



Energie in Abwasseranlagen

Handbuch NRW

2. vollständig überarbeitete Fassung

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis Bilder	8
Verzeichnis Tabellen	11
Abkürzungsverzeichnis	13
Einleitung	20
1 Über das Handbuch	23
1.1 Benutzerhinweise	23
1.2 Ziele des Handbuchs	23
1.3 Adressaten des Handbuchs	24
1.4 Abgrenzung des Handbuchs	24
1.5 Aufbau des Handbuchs	25
1.6 Orientierung im Handbuch	27
2 Vorgehensweise bei Energieoptimierungen	31
2.1 Allgemeine Hinweise	31
2.1.1 Begriffsdefinitionen	31
2.1.2 Strategie und Planung	33
2.1.3 Von der „Bedarfsplanung Konzept“ zum Projekt	33
2.1.4 Wechselwirkungen	35
2.2 Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen – Arbeitsblatt DWA-A 216: Energiecheck und Energieanalyse	36
2.3 Weitere Orientierungshilfen	42
2.3.1 Ermittlung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses und der Umweltauswirkungen von Maßnahmen	42
2.3.1.1 Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen	42
2.3.1.2 Ermittlung der Umweltauswirkungen von Maßnahmen	43
2.3.1.2.1 Auswirkungen auf die Ablaufqualität von Kläranlagen	43
2.3.1.2.2 CO ₂ -Bilanzierung in der Abwasserwirtschaft	43
2.3.2 Priorisierung von Maßnahmen	45
2.3.3 Durchführung der Erfolgskontrolle	45
2.3.4 Energiebilanzierung von Abwasseranlagen	47
2.3.4.1 Energetische Bewertung auf Verbraucherebene	49
2.3.4.2 Energetische Betrachtung auf Bereitstellerebene	50
2.3.4.3 Darstellung der Bereitsteller und Verbraucher im Energiefließbild	51
2.3.4.3.1 Messkonzept für elektrische Energie	53
2.3.4.3.2 Messkonzept für thermische Energie	62
2.3.4.3.3 Messkonzept für Faulgas	65
2.3.4.4 Weitere Anforderungen an Energiekenndaten	67

1

2

3

3	Verfahrenstechnische und betriebliche Effizienzsteigerung von Prozessen der Abwasserentsorgung	71
3.1	Abwasserableitung	71
3.1.1	Allgemeine Hinweise	71
3.1.2	Energierrelevante Planungsansätze für Neuplanungen und Anlagenoptimierungen	73
3.1.3	Pumpwerke	77
3.1.4	Regenbecken	80
3.2	Mechanische Vorreinigung	83
3.2.1	Rechenanlage	83
3.2.2	Sand- und Fettfang	85
3.2.3	Vorklärung	89
3.3	Biologische Reinigung	90
3.3.1	Allgemeine Hinweise	90
3.3.2	Belebtschlammverfahren	91
3.3.2.1	Allgemeine Hinweise	91
3.3.2.2	Effizienzmaßnahmen Belebtschlammverfahren	92
3.3.2.2.1	Effizienzmaßnahme – Auswahl der Verfahren	92
3.3.2.2.2	Effizienzmaßnahme – Auslastung	93
3.3.2.2.3	Effizienzmaßnahme – TS-Gehalt und Schlammalter	94
3.3.2.2.4	Effizienzmaßnahme – Rezirkulation bei vorgeschalteter Denitrifikation	94
3.3.2.2.5	Effizienzmaßnahme – Rücklaufschlamm	95
3.3.2.2.6	Effizienzmaßnahme – Durchmischung	95
3.3.2.2.7	Effizienzmaßnahme – Belüftung	96
3.3.3	Sonderverfahren des Belebtschlammverfahrens	105
3.3.3.1	Adsorptions-Belebungs-Verfahren (AB)	105
3.3.3.2	Sequencing Batch Reactor-Verfahren (SBR)	105
3.3.3.3	Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren)	106
3.3.4	Biofilmverfahren	108
3.3.4.1	Tropfkörper	108
3.3.4.2	Scheibentauchkörper	109
3.3.4.3	Tauchtropfkörper	109
3.3.4.4	Wirbelbettverfahren	110
3.3.4.5	Biofiltration mit Festbettreaktoren	110
3.3.5	Verfahren zur Phosphorelimination	111
3.3.6	Nachklärung	112
3.4	Weitergehende Reinigung	114
3.4.1	Nachgeschaltete Filteranlagen	114
3.4.2	Spurenstoffelimination	118
3.4.2.1	Ozonung	118
3.4.2.2	PAK-Filtration	119
3.4.2.3	GAK-Filtration	120
3.4.2.4	Ausblick	120
3.4.3	Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser	120
3.4.3.1	UV-Bestrahlung	121
3.4.3.2	Ozonung	122
3.4.3.3	Membrandesinfektion	122

3.5	Schlammbehandlung und Schlammentsorgung	123
3.5.1	Allgemeine Hinweise	123
3.5.2	Schlammförderung	125
3.5.3	Schlammeindickung, -entwässerung und -konditionierung	125
3.5.3.1	Allgemeine Hinweise	126
3.5.3.2	Statische Voreindickung	126
3.5.3.3	Entspannungsflotation	127
3.5.3.4	Schlammkonditionierung	127
3.5.3.5	Maschinelle Überschussschlammeindickung	128
3.5.3.6	Statische Nacheindickung des ausgefaulten Schlammes	128
3.5.3.7	Maschinelle Entwässerung des ausgefaulten Schlammes	129
3.5.4	Schlammstabilisierung	130
3.5.4.1	Allgemeine Hinweise	130
3.5.4.2	Anaerob-mesophile Stabilisierung	130
3.5.4.3	Aerobe Stabilisierung	135
3.5.4.4	Getrennte anaerobe Schlammstabilisierung und Faulgasverwertung auf kleinen und mittleren Anlagen	135
3.5.5	Schlamm Trocknung	137
3.5.5.1	Hochtemperatur- und Mitteltemperaturtrocknung	141
3.5.5.2	Niedertemperaturtrocknung	141
3.5.6	Schlammverwertung	142
3.5.6.1	Klärschlamm-Mitverbrennung	142
3.5.6.2	Klärschlamm-Monoverbrennung	143
3.5.7	Phosphorrückgewinnung bei der Schlammbehandlung	144
3.6	Prozesswasserbehandlung und -bewirtschaftung	145
3.6.1	Behandlung von stickstoffbelasteten Teilströmen	145
3.6.2	Phosphorrückgewinnung aus Prozesswasser	149
3.7	Kläranlageninterne Infrastruktur	149
3.7.1	Trink- und Brauchwasser	149
3.7.2	Druckluft (Kompressoren)	150
3.7.3	Beleuchtung	151
3.7.4	Heizen von Gebäuden	152
3.7.5	Kühlen von Gebäuden	153
3.7.6	Abluftbehandlung und Lüftungstechnik	154
3.7.7	Informations- und Kommunikationstechnik	157
4	Effizienzsteigerung bei der Anlagen- und EMSR-Technik	159
4.1	Elektrisch angetriebene Aggregate	159
4.1.1	Allgemeine Hinweise	159
4.1.2	Grundlagen der Energie- und Elektrotechnik	161
4.1.3	Der Elektromotor	165
4.1.4	Das mechanische Getriebe	168
4.1.4.1	Abgestimmte Auslegung eines Antriebsstrangs	169
4.2	Pumpen und Förderaggregate	170
4.2.1	Allgemeine Hinweise	170
4.2.2	Einteilung von Pumpen nach Arbeitsprinzip und Bauart	171



4.2.3	Hinweise zur Auslegung, Planung und Projektierung von Pumpen	175
4.2.4	Auswahl von Pumpen für einen energieeffizienten und sicheren Betrieb	177
4.2.5	Energieeffizienzmaßnahmen und Praxisbeispiel	180
4.3	Druckluftherzeuger	182
4.3.1	Allgemeine Hinweise	182
4.3.2	Energieeffizienzmaßnahmen und Praxisbeispiel	186
4.4	Aggregate zur Durchmischung	189
4.4.1	Durchmischung im Belebungsbecken	189
4.4.2	Durchmischung in Faulbehältern	191
4.5	Aggregate für die Eindickung und Entwässerung von Klärschlamm	193
4.5.1	Allgemeine Hinweise	193
4.5.2	Aggregate für die maschinelle Voreindickung	194
4.5.3	Aggregate für die maschinelle Entwässerung des ausgefaulten Schlammes	195
4.6	Prozessleittechnik und EMSR-Technik	197
4.6.1	Allgemeine Hinweise	197
4.6.2	Automatisierung abwassertechnischer Anlagen	198
4.6.3	Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik	199
4.6.4	Effizienzsteigerung durch Steuerung und Regelung	202
4.6.5	Webbasierte Technologieentwicklung, Industrie 4.0	206
4.6.6	Datenschutz und Cybersicherheit	206

5

5	Erneuerbare Energien und Energiebereitstellungssysteme in Abwasseranlagen	209
5.1	Allgemeine Hinweise	209
5.2	Faulgas	209
5.2.1	Faulgasproduktion	209
5.2.2	Co-Vergärung zur Erhöhung der Faulgasproduktion	215
5.2.3	Klärschlammintegration zur Erhöhung der Faulgasproduktion	216
5.2.4	Faulgasreinigung und -aufbereitung	218
5.3	Strom	221
5.3.1	Strom aus solarer Energie (Photovoltaik)	221
5.3.2	Strom aus Windenergie	223
5.3.3	Strom aus Wasserkraft	225
5.3.4	Lastmanagement und Interaktion mit dem Stromnetz	228
5.3.5	Regelenergie	231
5.4	Wärme und Kälte	234
5.4.1	Allgemeine Hinweise	234
5.4.2	Integrale Wärmekonzepte	236
5.4.2.1	Allgemeine Hinweise	236
5.4.2.2	Variante 1: Kläranlage mit Schlammfäulung, 500.000 E	239
5.4.2.3	Variante 2: Kläranlage mit Schlammfäulung und Schlamm-trocknung	242
5.4.2.4	Variante 3: Kläranlage mit Schlammfäulung, Schlamm-trocknung und Klärschlamm-Monoverbrennung	242
5.4.2.5	Wärmeverbund	243
5.4.3	Wärme und Kälte aus Abwasser	243
5.4.4	Wärme und Kälte aus Strom	246
5.4.5	Wärme und Kälte aus Gas, Heizöl oder Holzpellets	247

5.4.6	Wärme und Kälte aus solarer Energie (Solarthermie)	247
5.4.7	Wärme und Kälte aus der Erde (Geothermie)	248
5.4.8	Wärme aus Druckluft	248
5.4.9	Wärme aus Hochtemperaturprozessen	249
5.4.10	Wärme aus Raumluft	249
5.4.11	Wärme aus Faulschlamm	250
5.5	Energiespeicher	251
5.5.1	Schlamm-speicher	251
5.5.2	Faulgasspeicher	252
5.5.3	Stromspeicher	253
5.5.4	Wärmespeicher	255
5.6	Energiewandler	256
5.6.1	Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	256
5.6.2	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)	260
5.6.3	Organic Rankine Cycle (ORC)	262
5.6.4	Wandlung in Energieträger/Power to X	263
5.6.4.1	Power to Gas	264
5.6.4.2	Power to Liquid	265
5.6.4.3	Power to Heat	266
	Literatur	267
	Impressum	282

Verzeichnis der Bilder

Bild 1-1	Schematische Darstellung der in diesem Handbuch betrachteten Teilbereiche mit Angabe der zugehörigen Kapitel	28
Bild 2-1	Übertragung der Vorgehensweise bei Energieoptimierungen in das Schema eines Planungsprozesses nach dem Merkblatt DWA-M 820 [DWA, 2016f]	34
Bild 2-2	Schematisches Zahnradmodell der Wechselwirkungen auf einer Kläranlage	35
Bild 2-3	Ablauf bei der Energieoptimierung von Abwasseranlagen nach [DWA, 2015a]	37
Bild 2-4	Exemplarische Bewertung des spezifischen Stromverbrauchs einer Kläranlage mittels Summenhäufigkeit nach [DWA, 2015a]	39
Bild 2-5	Auswertung der durch das Land NRW geförderten Energieanalysen auf Kläranlagen nach [LANUV, 2016]	41
Bild 2-6	Beispiel für die Energieverbrauchsentwicklung einer Belebungsbeckenbelüftung	46
Bild 2-7	Konventionelle Aggregatzuordnung einer nach dem Belebtschlammverfahren betriebenen Kläranlage mit getrennter anaerober Stabilisierung	48
Bild 2-8	Aggregatzuordnung mit separierter Erfassung der Pumpen einer nach dem Belebtschlammverfahren betriebenen Kläranlage mit getrennter anaerober Stabilisierung	49
Bild 2-9	Energiefluss in einem Blockheizkraftwerk	51
Bild 2-10	Beispielhafte Darstellung von Erzeuger- und Verbraucherebene in einem Energiefließbild	52
Bild 2-11	Beispielhafte Darstellung der Energieströme in einem Sankey-Diagramm	53
Bild 2-12	Messkonzept mit Messungen in Verteilungen für ausgewählte Verbraucher	56
Bild 2-13	Messkonzept mit Direktmessungen für ausgewählte Verbraucher	57
Bild 2-14	Messkonzept thermische Energie für einen Faulbehälter mit Wärmerückgewinnung (Rekuperator)	64
Bild 2-15	Messkonzept Faulgasproduktion	66
Bild 2-16	Beispielhaftes Messkonzept eines Netzbetreibers mit Überschusseinspeisung und KWK-Untermessung nach [Westnetz, 2016]	69
Bild 3-1	Energieverbrauch von Pumpwerken in der Kanalisation in Abhängigkeit von der Fördermenge nach [Müller et al., 2013b]	78
Bild 3-2	Histogramm der Förderleistung eines Pumpwerks	80
Bild 3-3	Rechteckbecken als unbelüfteter und belüfteter Sandfang mit Saugräumer nach [DIN, 2002]	86
Bild 3-4	Verfahren der Stickstoffelimination nach [DWA, 2016b]	92
Bild 3-5	Beispiel einer CFD-Simulation für ein Belebungsbecken	96
Bild 3-6	Übersicht Belüftungssystem und Einflussparameter	97
Bild 3-7	Sauerstofftransport in Funktion der Wassertiefe bei Einzelblasen mit verschiedenen Durchmessern	99
Bild 3-8	Konstantdruck-/Gleitdruckregelung nach [DWA, 2016d]	103
Bild 3-9	Schema Luftverteilerregelung nach [DWA, 2016d]	103
Bild 3-10	Grundstruktur einer Belüftungsregelung	104
Bild 3-11	Beispiel für die Aufeinanderfolge von Prozessphasen während eines Zyklus einer SBR-Anlage nach [DWA, 2009b]	106
Bild 3-12	Schema Dead-End- (links) und Cross-Flow-Verfahren (rechts) nach [Melin und Rautenbach, 2007]	107
Bild 3-13	Übersicht über Energieverbraucher einer Biofilteranlage nach [Rother und Cornel, 2003]	111
Bild 3-14	Membrantypen und ihr Rückhaltevermögen gegenüber humanpathogenen Keimen und weiteren Stoffen nach [Lange et al., 2003]	123

Bild 3-15	Schematische Darstellung einer Kläranlage mit simultaner aerober Schlammstabilisierung	124
Bild 3-16	Schematische Darstellung einer Kläranlage mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung	124
Bild 3-17	Wärmebedarfsanteile (Nutzenergie) im Jahresverlauf für Schlamm- aufheizung, Faulbehälterheizung und die Raumwärme (einzeln) und die Summe der drei Verbraucher am Beispiel einer Kläranlage mit anaerob-mesophiler Stabilisierung	134
Bild 3-18	Empfohlene Einsatzbereiche der simultanen aeroben und getrennten anaeroben Schlammstabilisierung nach [Schröder, 2011]	136
Bild 3-19	Heizwert von Klärschlamm je Tonne (t) Originalsubstanz (OS) in Abhängigkeit vom Wassergehalt und vom Stabilisierungsgrad	137
Bild 3-20	Möglichkeiten der Prozesswasserbehandlung modifiziert nach [Jardin et al., 2005]	146
Bild 3-21	Spezifischer Heizenergiebedarf in Kilowattstunden pro m ² Nutzfläche im Jahr nach [ASUE, 2006]	152
Bild 3-22	Verfahren zur Abluftbehandlung nach [Eitner, 1992]	155
Bild 4-1	Wesentliche Bestandteile eines Kompaktaggregats	159
Bild 4-2	Stromverbrauch einzelner Verfahrensstufen (blau: vor Umsetzung der Maßnahme, grün: nach Umsetzung der Maßnahme)	161
Bild 4-3	Technische, energetische und fachliche Schnittstellen am Beispiel eines typischen Antriebsstrangs (hier: Verdichter für die Belüftung)	162
Bild 4-4	Entwicklungsstufen bei hocheffizienten Aggregaten	164
Bild 4-5	Energiebilanz eines Elektromotors, Verluste, Wirkungsgrad, Mustertypenschild nach [Volz, 2010]	165
Bild 4-6	Leistungsbereiche und Wirkungsgrade unterschiedlicher Elektromotoren nach [energie.ch, 2015]	166
Bild 4-7	Wirkungsgradklassen nach IE-Code für Elektromotoren (hier 4-polig, 50 Hz) nach [Nowak, 2014]	167
Bild 4-8	Bauarten von mechanischen Getrieben nach [ZVEI]	169
Bild 4-9	Einteilung der Pumpen nach dem hydraulischen Arbeitsprinzip	171
Bild 4-10	Verfahren für spezielle Förderaufgaben	171
Bild 4-11	Schematische Darstellung der Einsatzfelder verschiedener Pumpenbauarten (logarithmische Skalierung)	171
Bild 4-12	Bauform von Kreiselpumpenlaufrädern nach [Surek, 2014]	172
Bild 4-13	Klassifizierung der Kreiselpumpen	172
Bild 4-14	Klassifizierung der Verdrängerpumpen	172
Bild 4-15	Teillastverhalten und Wirkungsgrad von Schnecken- und Kreiselpumpen	173
Bild 4-16	Hydraulische und betriebliche Eigenschaften von Pumpen und Fördereinrichtungen	175
Bild 4-17	Auswirkungen auf das Betriebsverhalten bei Entfernung vom Auslegungspunkt nach [Hodgson, 2004]	176
Bild 4-18	Starre Staffelung mit gleich großen Pumpen	181
Bild 4-19	Bedarfsgerechte Staffelung mit unterschiedlichen Pumpen	182
Bild 4-20	Einteilung der Druckluftherzeuger nach dem Funktionsprinzip	183
Bild 4-21	Bauarten, Einsatzbereiche und energetische Kennwerte von Druckluft- erzeugern (x-Achse logarithmische Skalierung)	185
Bild 4-22	Häufigkeitsverteilung der erforderlichen Luftmengen im Fallbeispiel	187
Bild 4-23	Starre Staffelung bei vier gleich großen Gebläsen	187
Bild 4-24	Aufgenommene Kennlinie eines Gebläses	187

Bild 4-25	Staffelung gemäß dem Modernisierungskonzept	188
Bild 4-26	Durchmischung von Faulbehältern	192
Bild 4-27	Automatisierungspyramide nach [DWA, 2011b]	197
Bild 4-28	Automatisierungspyramide nach [VDMA, 2015]	198
Bild 4-29	Leittechnische Grundstruktur nach DWA-M 253 [DWA, 2011b]	199
Bild 4-30	Steuerung als offene Wirkungskette	200
Bild 4-31	Geschlossener Regelkreis	200
Bild 4-32	Regelkreis Drucklufferzeugung	200
Bild 4-33	Zeichnungen und Pläne der Steuerungs- und Regelungstechnik	201
Bild 4-34	Regelungsarten, -strukturen und -methoden	202
Bild 4-35	Struktur PID-Tuner	202
Bild 5-1	Schlammströme und Faktoren für die Faulgasproduktion bei der anaeroben Schlammbehandlung	210
Bild 5-2	Energieverbrauch und Energiegewinn verschiedener Desintegrationsverfahren je m ³ behandeltem Überschussschlamm (ÜS). Energiebilanz für die Modellkläranlage nach [DWA, 2015c]	218
Bild 5-3:	Elektrische Wirkungsgrade verschiedener PV-Zelltypen nach [Solarstromerzeugung.de, 2016]	222
Bild 5-4	Beispiel für Aufstellungsabstände in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, Aufstellort 50° nördliche Breite	223
Bild 5-5	Beispielhafte Weibullverteilung für mittlere Windgeschwindigkeit bei 6 m/s und die Leistung einer Windkraftanlage	224
Bild 5-6	Einsatzgebiete Kleinwasserkraft nach [Frehmann et al., 2013]	225
Bild 5-7	Einsatzgebiete Wasserturbinen nach [Quaschnig, 2013]	226
Bild 5-8	Leistungsdaten der Wasserkraftnutzung bei unterschiedlichen Kläranlagenanschlussgrößen und Fallhöhen	227
Bild 5-9	Darstellung eines idealisierten und eines realen Leistungsbezugs	228
Bild 5-10	Phasen und Schritte bei der Einführung eines Lastmanagements nach [DENA, 2012]	230
Bild 5-11	Schema der Netzfrequenzregelung im UCTE-Verbundnetz nach [FfE, 2013]	232
Bild 5-12	Technische Anforderungen zum Bereitstellen von Regelleistung nach [VDN, 2007]	233
Bild 5-13	Temperaturniveaus typischer Wärmeverbraucher auf Abwasseranlagen	235
Bild 5-14	Temperaturniveaus typischer Wärmebereitsteller auf Abwasseranlagen	236
Bild 5-15	Wärmebedarfsanteile bei einer konventionellen Kläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung und einer Anschlussgröße von 500.000 E _{Abwasser&Schlamm}	240
Bild 5-16	Monatlicher Wärmebedarf und Wärmebedarfsdeckung durch ein BHKW bei einer konventionellen Kläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung und einer Anschlussgröße von 500.000 E _{Abwasser&Schlamm}	241
Bild 5-17	Schema Rekuperator	250
Bild 5-18	Schematische Darstellung der Arten von Wärmespeichern nach [Sternner und Stadler, 2014]	255
Bild 5-19	KWK-Prinzip, verfügbare Brennstoffe und Umwandlungsarten abgewandelt nach [Seibert-Erling, 2008]	257
Bild 5-20	Arten von Verbrennungsmotoren nach [Seibert-Erling, 2008]	257
Bild 5-21	Funktionsprinzip einer Mikrogasturbine nach [Suttor, 2006]	260
Bild 5-22	Funktionsprinzip der Absorptionskältemaschine	261
Bild 5-23	Funktionsprinzip der Adsorptionskältemaschine	261
Bild 5-24	Funktionsschema einer ORC-Anlage	262
Bild 5-25	Prinzipien von Power to Gas-Konzepten nach [Schiebahn et al., 2013]	264

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1-1	Übersicht über die Adressaten des Energiehandbuchs und deren spezifische Möglichkeiten zur Nutzung der Handlungsempfehlungen für eine Energieoptimierung	24
Tabelle 1-2	Aufbau des Handbuchs	25
Tabelle 1-3	Erläuterung der Symbole für eine erleichterte Orientierung im Handbuch	27
Tabelle 2-1	Kennwerte des Energiechecks nach [DWA, 2015a]	38
Tabelle 2-2	Klimawirksamkeit der in der Wasserwirtschaft relevanten Treibhausgase nach [IPCC, 2013]	44
Tabelle 2-3	Orientierungshilfe zur Erfassung des Stromverbrauchs einzelner Aggregate getrennt nach Verfahrensstufen	58
Tabelle 3-1	Empfehlungen zur energieoptimierten Anlagendimensionierung von Abwasserableitungssystemen nach [DWA, 2012a], [DWA, 2010a], [DWA, 2005], [DWA, 2007b], [DWA, 2016a], [ATV-DVWK, 2000a], [ATV-DVWK, 2000b]	74
Tabelle 3-2	Öffnungsweiten von Rechenanlagen nach [DIN, 2016b]	83
Tabelle 3-3	Einteilung von Sandfängen nach verfahrens- und bautechnischen Gesichtspunkten nach [Stein et al., 1998]	86
Tabelle 3-4	Hinweise für den α -Wert bei unterschiedlichen Lastfällen und Verfahren angepasst nach [Günkel-Lange, 2013]	97
Tabelle 3-5	Richtwerte für Druckbelüftungssysteme nach [DWA, 2013d]	101
Tabelle 3-6	Energiebedarf beim Einsatz eines Tropfkörpers (20.000 E) als aerobe biologische Stufe	109
Tabelle 3-7	Auswahlkriterien für den Einsatz von Filtrationsverfahren, modifiziert nach [Meyer, 1979a]	116
Tabelle 3-8	Energieverbrauch der anaerob-mesophilen Stabilisierung je m^3 Rohschlamm nach [Müller et al., 2010]	131
Tabelle 3-9	Wärmedurchlasswiderstand innen und außen aus EN ISO 6946 nach [DIN, 2008b]	132
Tabelle 3-10:	Leistungs- und mittlere Verbrauchsdaten verschiedener Hochtemperatur-trocknungsverfahren nach [Müller et al., 2010]	140
Tabelle 3-11	Leistungs- und mittlere Verbrauchsdaten verschiedener Mittel- und Niedertemperaturtrocknungsverfahren nach [Müller et al., 2010]	140
Tabelle 3-12	Einsatzstellen der Phosphorrückgewinnung nach [Montag, 2013, Montag et al., 2014]	144
Tabelle 3-13	Gegenüberstellung der verschiedenen Verfahren zur Stickstoffumsetzung anhand prozessrelevanter Größen nach [Beier et al., 2008] [Haberkern et al., 2008]	146
Tabelle 3-14	Vergleich der durchschnittlichen Leistungsaufnahme verschiedener Leuchtmittel	151
Tabelle 4-1	Bauarten von Elektromotoren mit Auswahlkriterien für den Einsatz (relative Bewertung)	168
Tabelle 4-2	Energetische und betriebliche Eignung verfügbarer Pumpentypen für unterschiedliche Aufgaben	178
Tabelle 4-3	Auslegung mit drei gleich großen Schneckenpumpen	181
Tabelle 4-4	Auslegung mit Pumpen unterschiedlicher Bauart und Größe	182
Tabelle 4-5	Austrags-Feststoffgehalt [% TR], spez. Polymer-Flockungsmittelverbrauch und spez. Energieverbrauch von Aggregaten der maschinellen Voreindickung nach [DWA, 2007d]	194
Tabelle 4-6	Leistungsdaten maschineller Entwässerungsaggregate [DWA, 2013e]	195
Tabelle 5-1	Schlammfall ($\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$) und Glühverlust (%) bei biologischen Kläranlagen 50-Perzentilen nach [Pinnekamp et al., 2011b, DWA, 2014d]	211

Tabelle 5-2	Basisschlammanfall und -zusammensetzung der Schlämme im Jahresmittel (gewichtete Mittelwerte) nach [DWA, 2014d]	211
Tabelle 5-3	Faulgasertrag bezogen auf die zugeführte organische Substanz in Abhängigkeit von der Vorklärzeit	212
Tabelle 5-4	Übliche Gasbestandteile im Faulgas, angelehnt an [DWA, 2011c]	212
Tabelle 5-5	Abbauspezifische Faulgas- und Methanproduktion nach [DWA, 2010b]	216
Tabelle 5-6	Energiebedarf, Methanverluste und erzielbare Methangehalte im Produktgas für verschiedene Verfahren der Methananreicherung aus Faulgas nach [Scholz et al., 2012] [Urban et al., 2009]	221
Tabelle 5-7	Strom- und Wärmebedarf sowie -bereitstellung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus für eine Beispielkläranlage mit 500.000 E	239
Tabelle 5-8	Einfluss der Betriebsweise von Anlagen zur Faulgasverwertung auf die Bemessung von Gasspeichern nach [DWA, 2010b]	253
Tabelle 5-9	Vergleich verschiedener Kältemaschinen [BHKW-Infozentrum, 2016]	262
Tabelle 5-10	Übersicht Power to Gas- und Power to Liquid-Technologien und ihre Verbreitung	264
Tabelle 5-11	Charakterisierung der synthetischen Herstellung von Methanol und Dimethylether nach [Bolle et al., 2012]	266

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Erläuterung	Einheit
A		
A	Faulbehälteroberfläche	m ²
A	Oberfläche	m ²
A _U	Undurchlässige Gesamtfläche	ha
AB	Adsorptions-Belebensverfahren	
AFS	Abfiltrierbare Stoffe	mg/l
AG	Abgas	
AOP	Advanced Oxidation Process	
APC	Advanced Process Control	
A _{WÜ}	Wirksame Wärmeübertragungs-Oberfläche	m ²
B		
BHKW	Blockheizkraftwerk	
Bio-P	Biologische Phosphorelimination	
$b_{mTR,E,d}$	Einwohnerspezifischer mineralischer Trockenrückstand	g/(E · d)
$b_{oTR,E,d}$	Einwohnerspezifischer organischer Trockenrückstand	g/(E · d)
$b_{oTR,abb,E,d}$	Einwohnerspezifischer abbaubarer organischer Trockenrückstand	g/(E · d)
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf	mg/l
BSI-Gesetz	Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik	
BSI-KritisV	Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz	
BTEX	Aromatische Kohlenwasserstoffe	mg/l
$b_{TR,E,d}$	Einwohnerspezifische Trockenrückstands-Fracht	g/(E · d)
bzw.	beziehungsweise	
C		
c	Absolute Luftfeuchte	g/m ³
C	Kohlenstoff	
C _{1,2,3}	Konstanten der Magnus-Formel	
ca.	circa	
CCS	Carbon Capture and Storage	
CFD-Simulation	Computational Fluid Dynamics (Strömungssimulation)	
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff	
CH ₄	Methan	Vol.-%
CNG	Compressed Natural Gas	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	Vol.-%
CO ₂ e	CO ₂ -äquivalentes Treibhausgaspotenzial	t
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl einer Wärmepumpe)	
cos(φ)	Leistungsfaktor	
c _p	Spezifische Wärmekapazität	kWh _{th} /(m ³ ·K)
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	mg/l
D		
D	Durchmesser	mm
d. h.	das heißt	
DB	Durchlaufbecken	
D _{DR}	Drosselnennweite	mm
D _{DRL}	Durchmesser Druckrohrleitung	mm
D./Deni.	Denitrifikation	
DES	Desinfektion	
DESI	Schlammintegration	
d _i	Schichtdicke	m

Kürzel	Erläuterung	Einheit
DIN	Deutsches Institut für Normung	
DKG	Drehkolbengebläse	
DL	Druckluft	
DME	Dimethylether	
DN	Nennweite	
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff	mg/l
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.	
DWW	Druckwasserwäsche	
E		
E	Energie	J
E	Strommix	
EA	Energieanalysen	
e_{Bel}	Einwohnerspezifischer Stromverbrauch Belüftung	kWh/(E · a)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung	
EER	Nennkälteleistungszahl	
EF	Emissionsfaktoren	
EF_i	Emissionsfaktor der Energiemenge i	t CO ₂ e/kWh
EF_j	Emissionsfaktor der Stoffmenge j	t CO ₂ e/t
e_{FG}	Einwohnerspezifische Faulgasproduktion bezogen auf den Einwohnerwert	l/(E · d)
EG	Erdgas, fossil	
e_{ges}	Spezifischer Stromverbrauch der Anlage	kWh/(E · a)
EMSR-Technik	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik	
Energie _i	Fossile Energiemenge i	kWh
EnEV	Energieeinsparverordnung	
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer	
EPEX	European Power Exchange	
EPS	Extrazelluläre polymere Substanzen	
e_{PW}	Spezifischer Stromverbrauch Pumpwerk	Wh/(m ³ · m)
ERP	Enterprise Resource Planning	
etc.	et cetera	
$e_{th,ext}$	Spezifischer externer Wärmebezug	kWh _{th} /(E · a)
EV_{el}	Eigenversorgungsgrad der Elektrizität	%
EW	Einwohnerwert	E
evtl.	eventuell	
F		
f	Fouling-Faktor	m ² · K/W
FB	Fangbecken	
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe	
FFS	Flockungsfiltration	
FG	Faulgas	
FIL	Filtration	
FOS	Flüchtige organische Säuren (Essigsäureequivalent)	mg/l
FR	Froude-Zahl	
G		
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
GAK	Granulierte Aktivkohle	
ggf.	gegebenenfalls	
GK	Größenklasse	
GLRD	Gleitringdichtungen	
GV	Glühverlust	
GWP	Global Warming Potential	
GWP_k	Treibhausgaspotenzial des Gases k	t CO ₂ e/t
H		
h	Höhe	m
H	Hydraulik	

Kürzel	Erläuterung	Einheit
Δh_N	Nettofallhöhe als Differenz aus Fallhöhe und Verlusthöhe	m
H ₂ O	Wasserdampf	
H ₂ S	Schwefelwasserstoff	ppm
HD	Hochdruck	
HHT	Höchsttemperatur	
HMI	Human-Machine Interface	
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure	
HT	Hochtemperatur	
h ₀	Überfallhöhe	m
Hz	Räumerlaufbahnheizung	
I		
i	Kalkulatorischer Zinssatz	
I	Gefälle	
I	Strom	A
i. V. m.	in Verbindung mit	
i. d. R.	in der Regel	
IDM	siehe MID	
I _{Invest}	Investitionskosten	EUR
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik	
inkl.	inklusive	
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	
ISV	Schlammvolumenindex	l/kg
IT	Informationstechnik	
J		
JARV	Jülicher Abwasserreinigungsverfahren	
JAZ	Jahresarbeitszahl	
K		
K	Konstruktion	
K	Jahreskosten	EUR
k	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² · K)
KA	Kläranlage	
K _b	betriebliche Rauheit	mm
KD	Kapitaldienst	EUR
KFP	Kammerfilterpresse	
KRITIS	Strategische Initiative Kritische Infrastrukturen	
KVR-Leitlinien	Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen	
KW	Kühlwasser	
KW	Kohlenwasserstoffe	
KWEA	Kleinwindenergieanlage	
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz	
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	
L		
l	Länge	m
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen	
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser	
LE	Leiteinrichtung	
LED	Light-Emitting Diode (Leuchtdiode)	
LWG	Landeswassergesetz	
M		
m	Masse	kg
MAP	Magnesiumammoniumphosphat	
max.	maximal	
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor	
MBR	Membranbioreaktor	

Kürzel	Erläuterung	Einheit
MCP	Mechanische Membranreinigung	
MES	Manufacturing Execution System	
MFP	Membranfilterpresse	
MI	Mischer	
MID	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser	
MIS	Management-Informationssystem	
MK	Mischkanalisation	
MULNV	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	
MSE	Maschinelle Schlammwässerung	
MSR	Messen – Steuern – Regeln	
MT	Mitteltemperatur	
MTBF	Mean Time Between Failures	
MÜSE	Maschinelle Überschussschlammwässerung	
MW	Direkter, ggf. geeichter Messwert	
MW	Mischwasser	
N		
N	Stickstoff	
n	Abschreibungszeitraum	a
N	Jahresnutzen	EUR
N/DN	Nitrifikation/Denitrifikation	
N_{FG}	Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität	%
N_2O	Distickstoffoxid	
NH_3	Ammoniak	
NH_4	Ammonium	
NI/Nitri.	Nitrifikation	
NK	Nachklärung	
NNT	Niedrigsttemperatur	
NO_3	Nitrat	
NO_2	Nitrit	
NR	Nachklärbeckenräumer	
NRW	Nordrhein-Westfalen	
n_s	Spezifische Drehzahl	1/min
NT	Niedertemperatur	
O		
o. Ä.	oder Ähnliches	
o. g.	oben genannt	
O_2	Sauerstoff	
O_3	Ozon	
ORC	Organic Rankine Cycle	
org.	organisch	
OS	Originalsubstanz	
oTR	Organischer Trockenrückstand	
P		
P	Phosphor	
P	Elektrische Leistung	kW
P	Leistung	W
p	Druck	Pa/bar
PAK	Pulveraktivkohle	
P_a	Motor-Anschlusswert	kW
p_b	Statischer Gasdruck unter Betriebsbedingungen	hPa
p_D	Sättigungsdampfdruck	P
PD-Regler	Proportional-Differenzialregler	
P_{eff}	Effektiv erforderliche Leistung	kW
P_{el}	Elektrische Leistung	kW
PID-Regler	Proportional-Integral-Differenzialregler	

Kürzel	Erläuterung	Einheit
PIN	Prozessnahe Infrastruktur	
PI-Regler	Proportional-Integralregler	
PLS	Prozessleitsystem	
P_m	Mittellast	kW
P_{max}	Maximallast	kW
P_{mech}	Mechanische Leistung	kW
P_{min}	Minimallast	kW
p_n	Statischer Gasdruck im Normzustand	hPa
P_{nA}	Kupplungsleistung der Arbeitsmaschine	kW
P_{nM}	Motornennleistung	kW
ppm	parts per million	
p_s	Sättigungsdampfdruck	Pa
P_s	Spitzenlast	kW
PS	Primärschlamm	
PSA	Druckwechseladsorption	
P_{spez}	Spezifische Leistung der Druckluftherzeugung	W/(Nm ³ /h·bar)
PU	Polyurethan	
PW	Hebe- und Pumpwerk	
PWB	Prozesswasserbehandlung	
PWK	Pumpwerke und Kanal	
Q		
Q_{ABW}	Übertragene Wärmeleistung vom Wärmeübertrager	kW
$Q_{DR,min}$	Minimaler Drosselabfluss	l/s
Q_G	Gasvolumenstrom	m ³ /s
Q_{RI}	Interne Rezirkulation	m ³ /h
Q_{RS}	Rücklaufschlamm	m ³ /h
Q_t	Durchfluss im teilgefülltem Querschnitt	m ³ /s
\dot{Q}_T	Transmissionsverluste	W
Q_{thS}	Wärmebedarf für die Schlammaufheizung	kWh/a
Q_{thSB}	Gesamter Wärmeverbrauch	kWh/a
Q_{thV}	Erzeugungs-, Speicher- und Verteilverluste	kWh/a
Q_{thWP}	Von der Wärmepumpe gelieferte Wärmemenge	kWh/a
Q_V	Durchfluss im vollgefülltem Querschnitt	m ³ /s
\dot{Q}_{WP}	Von der Wärmepumpe abgegebene Wärmeleistung	kW
\dot{Q}_{WP}	Von der Wärmepumpe gelieferte Wärmeleistung	kW/a
$Q_{thWÜ}$	Vom Wärmeübertrager gelieferte Wärmemenge	kWh/a
$\dot{Q}_{WÜ}$	Vom Wärmeübertrager abgegebene Wärmeleistung	kW
$\dot{Q}_{WÜ}$	Vom Wärmeübertrager gelieferte Wärmeleistung	kW/a
R		
RB	Regenbecken	
R_D	Gaskonstante für Wasserdampf	kJ/(kg·K)
rd.	rund	
RE	Rechen	
RFID	Radio-Frequency Identification (Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen)	
RI-Fließbild	Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild	
RKBmD	Regenklärbecken mit Dauerstau	
RKBoD	Regenklärbecken ohne Dauerstau	
RLM-Zähler	Registrierende Leistungsmessung	
R_s	Rücklaufschlamm	
R_{se}	Wärmedurchlasswiderstand außen	(m ² ·K)/W
R_{si}	Wärmedurchlasswiderstand innen	(m ² ·K)/W
RÜB	Regenüberlaufbecken	
RW	Rührwerk	

Kürzel	Erläuterung	Einheit
RW	Rechenwert	
RW	Regenwasser	
S		
S/K/A Maßnahmen	Sofortmaßnahmen/Kurzfristige Maßnahmen/Abhängige Maßnahmen	
SAE	Standard Aeration Efficiency	kg O ₂ /kWh
SBR	Sequencing Batch Reactor	
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	
SELI	Spurenstoffelimination	
SF	Sandfang	
SH	Hygienisierung	
SK	Stauraumkanal	
SKO	Stauraumkanal Überlauf oben	
SKU	Stauraumkanal Überlauf unten	
SL	Schlammagerung	
SLP	Standard-Last-Profil	
sog.	sogenannt	
SP	Schwimmschlammpumpe	
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
SSOTE	Specific Standard Oxygen Transfer Efficiency	%/m
SSOTR	Specific Standard Oxygen Transfer Rate	g/(m _N ³ ·m)
STAB	Stabilisierung	
Stoff _j	Stoffmenge j	t
SV	Niederdruck-Schraubenverdichter	
SW	Schmutzwasser	
T		
t	Zeit	s
T	Absolute Temperatur	K/°C
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft	
TAB	Technische Anschlussbestimmungen	
TAC	Totales Anorganisches Carbonat (alkalische Pufferkapazität)	
T _b	Luft- bzw. Faulgastemperatur unter Betriebsbedingungen	K
T _{FR}	Faulraumtemperatur	K
THG	Treibhausgase	
THG _k	Treibhausgasmenge k	t
TK	Trennkanalisation	
T _n	Temperatur im Normzustand	K
TR	Trockenrückstand	
Trafo	Transformator	
TRO	Trocknung	
T _{RS}	Temperatur des Rohschlammes	K
TS	Trockensubstanz	
TS _{BB}	Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken	kg/m ³
T _{UT}	Umgebungstemperatur	K
TV	Turboverdichter	
U		
U	Spannung	V
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² ·K)
u. a.	unter anderem	
ÜIN	Übergeordnete Infrastruktur	
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber	
UP	Umwälzpumpe	
ÜS	Überschussschlamm	

Kürzel	Erläuterung	Einheit
V		
v	Geschwindigkeit	m/s
V	Volumen	m ³
v. a.	vor allem	
V _b	Volumen unter Betriebsbedingungen	m ³
VD	Verdichter	
VED	Statische Voreindickung	
Verb.	Verbindung	
vgl.	vergleiche	
VK	Vorreinigung	
V _{max}	Maximalgeschwindigkeit	m/s
V _{min}	Mindestgeschwindigkeit	m/s
V _n	Volumen im Normzustand	m ³
W		
W	Arbeit	Ws
WEA	Windenergieanlage	
WG	Wassergehalt	%
WHG	Wasserhaushaltsgesetz	
WW	Warmwasser	
Y		
Y	Stellgröße	
Y _{FG}	Spezifische Faulgasproduktion bezogen auf den organischen Trockenrückstand	l/kg
Z		
z	Eintauchtiefe	m
z. T.	zum Teil	
ZP	Zählpunkt	
α-Wert	Grenzflächenfaktor	
η _{AM}	Wirkungsgrad der Arbeitsmaschine	
η _{el,Uf}	Elektrischer Wirkungsgrad des Umformers	
η _G	Wirkungsgrad des Getriebes	
η _{ges}	Gesamtwirkungsgrad	
η _M	Wirkungsgrad des Motors	
η _{th}	Thermischer Wirkungsgrad	
η _w	Wirkungsgrad der Windkraftanlage	
θ	Temperatur	°C
λ _i	Wärmeleitfähigkeit der Schicht	W/(m · K)
ρ	Dichte	kg/m ³
φ	Breitengrad	°

Einleitung

Der weltweit steigende Energiebedarf, die Endlichkeit fossiler Ressourcen, steigende Energiekosten und die Sorge um die Auswirkungen auf das Klima erfordern einen deutlichen Wandel im Umgang mit Energie. NRW hat diese Herausforderungen angenommen und verfolgt das Ziel einer energieintelligenten Abwasserentsorgung. Diese Zielsetzung wird durch das Wasserhaushaltsgesetz unterstützt, das als ein Kriterium für den Stand der Technik die Ressourcen- und Energieeffizienz festschreibt.

Gemäß Anhang 1 der Abwasserverordnung sollen Kläranlagen so errichtet und betrieben werden, dass eine energieeffiziente Betriebsweise ermöglicht wird. Die bei der Abwasserbeseitigung entstehenden Energiepotenziale sind, soweit technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar, zu nutzen. Hierbei dürfen die Bestrebungen zur Verbesserung der Energieeffizienz nicht dem eigentlichen Zweck der Abwasserbeseitigung mit der Zielsetzung des Gewässerschutzes zuwiderlaufen.

Nordrhein-Westfalen hatte bereits Ende der 1990er-Jahre mit dem Handbuch **„Energie in Kläranlagen“** die Weichen hin zu einer energieoptimierten Kläranlage gestellt. Es beschrieb eine Methodik zur Erfassung und Bewertung der energetischen Situation von Kläranlagen durch eine Grobanalyse mit anschließender Feinanalyse sowie mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Das Handbuch fand bundesweite Beachtung und war Wegweiser für viele nachfolgende Leitfäden.

Aus Energieanalysen der letzten Jahre und aus umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten – jeweils maßgeblich finanziell gefördert auch durch das Land Nordrhein-Westfalen – ergaben sich neue Erkenntnisse über Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auf Abwasseranlagen sowie für das Vorgehen bei Energieanalysen. Bundesweit wird nun mit dem Arbeitsblatt DWA-A 216 **„Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen“** ein einheitlicher Standard für die Vorgehensweise bei der energetischen Optimierung von Pumpwerken und kommunalen Kläranlagen gesetzt. Diese neue Methodik ist auch auf industrielle Abwasseranlagen übertragbar.

Diese neuen Erkenntnisse machten eine umfangreiche Überarbeitung und Neuauflage des bisherigen Handbuchs erforderlich, die hier unter dem Titel **„Energie in Abwasseranlagen“** vorliegt. Diese Neuauflage spricht gezielt Betreiber, Klärwerkspersonal und planende Ingenieure sowie Behördenvertreter an und kann auch bei der Vermittlung von Basiswissen eingesetzt werden. Insofern darf, wie beim alten Handbuch, von einer bundesweiten Bedeutung dieser Neuauflage ausgegangen werden.

Abwasseranlagen sind – geprägt durch die spezifische Topografie und Struktur des Einzugsgebietes – Unikate, die immer eine individuelle Anpassung von Maßnahmen zur Energieoptimierung erfordern. Durch die zunehmend komplexere Verfahrens- und Anlagentechnik und aufgrund des vielschichtigen Gefüges von Energiequellen und -senken bei Abwasseranlagen ist bei der Anwendung des Handbuchs eine hohe Fachkenntnis Voraussetzung. Der Erfolg einer Energieanalyse und der daraus abgeleiteten Maßnahmen hängt wesentlich von der Qualifikation und Zusammensetzung des mit der Analyse betrauten Fachpersonals und der Kommunikation mit dem Betriebspersonal ab.

In Fortschreibung des bisherigen Handbuchs wird in der vorliegenden Neuauflage konsequent eine gesamtheitliche Betrachtung von Energieeffizienzmaßnahmen von der Abwasserableitung über die Abwasserbehandlung bis hin zur Schlammbehandlung und -entsorgung verfolgt. Dabei stehen nicht mehr nur das Sparen von Strom oder seine regenerative Erzeugung im Vordergrund, vielmehr soll der Fokus auf der effizienten Nutzung vorhandener Energie liegen. Weiter wird auch die Optimierung des Wärme- und Kältehaushalts einer Abwasseranlage stärker verfolgt.

Nach wie vor obliegt es dem Betreiber, seine energetischen Ziele zu definieren und in die Tat umzusetzen. Das Energiehandbuch dient als ein Werkzeug, das Begrifflichkeiten für die Zieldefinition eines Abwasserentsorgungspflichtigen klärt.

Im Handbuch wird klargestellt, dass eine energetische Effizienzsteigerung immer mit einer verfahrenstechnischen Optimierung einhergehen muss. Damit kann im Einzelfall sogar eine Optimierung der Reinigungsleistung im Sinne einer Verbesserung des Gewässerschutzes erreicht werden.

Energieoptimierung ist eine Daueraufgabe aller am Abwasserentsorgungsprozess Beteiligten, für die das vorliegende Handbuch umfangreiche Unterstützung bietet.



1 Über das Handbuch

1.1 Benutzerhinweise

Das vorliegende Handbuch ist eine Komplettüberarbeitung des NRW-Handbuchs „Energie in Kläranlagen“ aus dem Jahr 1999 [Müller et al., 1999]. Im Rahmen des Erstellungsprozesses wurde die Fachwelt durch eine projektbegleitende Beratergruppe, durch Workshops und durch direkte Ansprache von Fachleuten eingebunden. Das Handbuch bildet damit den momentanen Wissensstand ab.

Es dient als eine wichtige, jedoch nicht als einzige Erkenntnisquelle für fachgerechte Lösungen. Durch die Anwendung des Handbuchs entzieht sich niemand der Verantwortung für eigenes Handeln oder für die richtige Anwendung im konkreten Fall. Dies gilt insbesondere für den sachgerechten Umgang mit den im Handbuch aufgezeigten Spielräumen.

1.2 Ziele des Handbuchs

Das vorliegende Handbuch soll den Prozess der energetischen Optimierung des integralen Systems aus Abwasserableitung und zentraler Abwasserreinigung auf einer Kläranlage unterstützen. Es macht neue Arbeitsinstrumente und praxiserprobte Entwicklungen und Maßnahmen zur systematischen Energieoptimierung für die Fachleute von Betreibern, Planern, Behörden sowie für Nachwuchskräfte zugänglich. Für die praktische Anwendung und Beurteilung der im Handbuch beschriebenen Methoden und Lösungsansätze sind weiterhin detaillierte Vorkenntnisse sowohl in den Bereichen Elektro-, Maschinen-, Bau- als auch in der Abwasserverfahrenstechnik erforderlich.

Ziel ist nicht mehr allein eine Energieeinsparung, sondern vielmehr die Energieeffizienzsteigerung durch eine gesamtheitliche Betrachtung von Energiebereitstellung, -umwandlung, -speicherung und -verbrauch sowie deren intelligenter Vernetzung.

Die methodische Grundlage von Energiecheck und Energieanalyse als Werkzeuge zur Verfolgung der Energieeffizienzsteigerung bildet das Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA, 2015a] ab. Es knüpft an die erfolgreiche Methodik der Feinanalyse sowie der Erfolgskontrolle nach dem „**Handbuch Energie in Kläranlagen**“ [Müller et al., 1999] an. Dieses Gerüst wird durch das in diesem Nachschlagewerk enthaltene Wissen gefüllt und um innovative Ansätze erweitert.

Das vorliegende Handbuch gibt eine praktische Anleitung zur systematischen Vorgehensweise bei der Energieeffizienzoptimierung in der Abwasserentsorgung. Es ist als ein umfangreiches Nachschlagewerk und Handwerkszeug zu technischen, betrieblichen sowie strategischen Aspekten der Energieeffizienzoptimierung zu nutzen. Für den Betreiber ergibt sich ein klarer Leitfaden, mit dem seine energiepolitischen Ziele gelenkt und nachhaltig erreicht werden können. Die Beschreibung der nach heutigem Stand möglichen Maßnahmen und Technologien garantiert eine größtmögliche Vollständigkeit der Bearbeitung, setzt jedoch eine konsequente Prüfung der eigenen, anlagenspezifischen Anwendbarkeit voraus.

Oberste Prämisse bleibt dabei der prozessstabile Betrieb der Abwasseranlage, der zur Sicherstellung einer gesetzeskonformen Abwasserreinigung und -ableitung erforderlich ist und damit dem Gewässerschutz dient.

1.3 Adressaten des Handbuchs

Die Energieoptimierung eines prozess- und verfahrenstechnisch komplexen Vorgangs mit einem vielschichtigen Gefüge aus möglichen Energiequellen und -senken, wie ihn die Abwasserentsorgung darstellt, erfordert die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Fachleuten aus den Gebieten Elektro-, Maschinen-, Bau- und Abwasserverfahrenstechnik. Für Fachleute ist es deshalb wichtig, sich einen Überblick über die angrenzenden Fachgebiete zu verschaffen. Das Handbuch richtet sich vornehmlich an Betreiber von Abwasseranlagen, planende Ingenieure und Abwasserfachleute, die sich systematisch mit der Energieeffizienzsteigerung bestehender Abwasseranlagen oder der Planung neuer Anlagen bzw. Anlagenteile beschäftigen (Tabelle 1-1). Es gibt zudem für die Vermittlung von Basiswissen einen umfangreichen Themenüberblick.

Tabelle 1-1 Übersicht über die Adressaten des Energiehandbuchs und deren spezifische Möglichkeiten zur Nutzung der Handlungsempfehlungen für eine Energieoptimierung

Bauherr/Betreiber	<ul style="list-style-type: none"> ■ Grundsatzentscheidung zur Energieoptimierung ■ Festlegung der Dringlichkeit von Energieanalysen ■ Initiierung der Erstellung eines energetischen Gesamtkonzepts ■ Auslösen von Schritten zur Realisierung von Maßnahmen
Betriebspersonal	<ul style="list-style-type: none"> ■ Unterstützung bei einer Energieanalyse/der Maßnahmenentwicklung ■ Umsetzung möglicher energetischer Verbesserungen ■ Kontrolle des Erfolgs von Energieoptimierungsmaßnahmen ■ Einbringen von anlagenbezogenem Wissen/betrieblicher Erfahrung
Planer	<ul style="list-style-type: none"> ■ Durchführung von energetischen Effizienzanalysen bei Planungen ■ Entwicklung von Konzepten zur Energiedatenerfassung ■ Begleitung bei der Auswahl von geeigneten Aggregaten ■ Erstellung von energetischen Gesamtkonzepten und Einzelmaßnahmen
Behörden	<ul style="list-style-type: none"> ■ Überprüfung von Angaben des Antragstellers ■ Vorgabe von genehmigungsrechtlichen Anforderungen
Nachwuchskräfte Fachfremde Experten	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gewinnung eines Einblicks in die Thematik der Energieoptimierung in der Abwasserentsorgung

1.4 Abgrenzung des Handbuchs

Im vorliegenden Handbuch wird bewusst das Thema Energieeffizienz in den Mittelpunkt gestellt. Entsprechende Optimierungen sind grundsätzlich anhand verfahrenstechnischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte anlagenbezogen zu hinterfragen und mit Fachwissen individuell anzupassen. Im Fokus stehen dabei sowohl die elektrische als auch die thermische Energie.

Als Handwerkszeug will dieses Handbuch grundlegendes Wissen und die übergreifenden Zusammenhänge darstellen. Auch werden Orientierungshilfen zum Vorgehen bei Energieoptimierungen von Abwasseranlagen gegeben; diese sind als Vorschläge zu verstehen und besitzen keinen regelgebenden Charakter. Vertiefende Informationen können der im Handbuch angegebenen Fachliteratur entnommen werden.

Die behandelten Themen orientieren sich an den üblicherweise in der bestehenden Abwasserentsorgung in NRW eingesetzten Verfahren, geben aber auch Informationen über einige in Zukunft voraussichtlich an Bedeutung gewinnende Prozesse. Auf Sonderfälle und Industriekläranlagen wird hier nicht speziell eingegangen. Kleinkläranlagen können einen spezifisch sehr hohen Energieverbrauch haben; wegen ihrer geringen Bedeutung beim Gesamtenergieverbrauch – insbesondere auch im Vergleich zu kommunalen Kläranlagen – werden sie in diesem Handbuch nicht behandelt. Es liefert dennoch auch für diese Bereiche wichtige Hinweise.

Das Handbuch erörtert nicht den aktuellen Stand des Energierechts, da dieses kurzfristigen Änderungen unterliegen kann. Das Gleiche gilt für finanzielle Fördermöglichkeiten auf Landes- und Bundesebene. Einen guten aktuellen Überblick gibt beispielsweise das Web-Tool „Förder.Navi“ der EnergieAgentur.NRW. Aktuelle Förderungen des Landes werden auf den Internetseiten des Umweltministeriums veröffentlicht (www.umwelt.nrw.de).

1.5 Aufbau des Handbuchs

Das Handbuch folgt einem systematischen Aufbau (Tabelle 1-2), der eine selektive Bearbeitung einzelner Prozesse, aber auch unterschiedlicher Fragestellungen erlaubt. So bietet es die Möglichkeit, das jeweils benötigte Fachwissen für eine energetische Optimierung zielorientiert zu erweitern.

Tabelle 1-2 Aufbau des Handbuchs

Überblick und Herangehensweise	
Kapitel 1	Über das Handbuch
Kapitel 2	Vorgehensweise bei Energieoptimierungen
Fachwissen zur Effizienzsteigerung	
Kapitel 3	Verfahrenstechnische und betriebliche Effizienzsteigerung von Prozessen der Abwasserentsorgung
Kapitel 4	Effizienzsteigerung bei der Anlagen- und EMSR-Technik
Kapitel 5	Erneuerbare Energien und Energiebereitstellungssysteme in Abwasseranlagen

Anhand der nachfolgenden Fragen wird die Gliederung des Handbuchs näher erläutert:

Welche Vorgehensweise ist bei Energieoptimierungen zu verfolgen?

In Kapitel 2 werden zunächst relevante Begrifflichkeiten erläutert, die für eine Definition von energetischen Zielen hilfreich sein können. Daran schließt sich das Vorgehen bei einer Bedarfsplanung und die Sensibilisierung für das Thema der Wechselwirkungen von Effizienzmaßnahmen an.

Es folgen eine Zusammenfassung der methodischen Grundlage von Energiecheck und Energieanalyse nach DWA-A 216 [DWA, 2015a] und weitergehende Orientierungshilfen zur Herangehensweise bei der

- Ermittlung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses und der Umweltauswirkungen von Maßnahmen,
- Priorisierung von Maßnahmen,
- Erfolgskontrolle von durchgeführten Maßnahmen und
- Energiedatenerfassung bzw. Energiebilanzierung von Abwasseranlagen.

Welche effizienzsteigernden Maßnahmen werden bei den Prozessen der Abwasserentsorgung empfohlen?

In Kapitel 3 werden neben der zentralen Abwasserreinigung auf einer Kläranlage im Vorfeld die Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung in der Abwasserableitung erläutert.

Bei der Abwasserreinigung auf einer Kläranlage kommen je nach Ausbaugröße, Standort und Anforderungen an die Ablaufqualität unterschiedliche Reinigungsverfahren zum Einsatz. Diese lassen sich den drei nachfolgenden Reinigungsstufen zuordnen und werden entsprechend dieser Aufteilung dem Wasserweg folgend im Handbuch näher ausgeführt:

- Vorreinigung (Rechenanlage, Sand- und Fettfang, Vorklärung),
- biologische Reinigung (Belebtschlammverfahren, Sonderverfahren, Biofilmverfahren, Phosphorelimination, Nachklärung),
- weitergehende Reinigung (nachgeschaltete Filteranlagen, Spurenstoffelimination, Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser).

Neben einer Darstellung der Einflüsse und Handlungsmöglichkeiten bei diesen Abwasserbehandlungsverfahren werden ebenfalls die Behandlung, Verwertung und Entsorgung der bei der Abwasserreinigung anfallenden Schlämme erörtert. Dabei wird die Schlammbehandlung wie folgt weiter aufgeschlüsselt: Schlammförderung, -eindickung, -entwässerung, -konditionierung, -stabilisierung, -trocknung, -verwertung sowie Phosphorrückgewinnung.

Der Schlammbehandlung folgend werden die energetischen Optimierungsmöglichkeiten der Prozesswasserbehandlung und -bewirtschaftung vorgestellt.

Abschließend werden die Energieverbraucher der Kläranlageninternen Infrastruktur auf deren energetische Optimierungspotenziale hin beleuchtet.

Welche Aspekte müssen für eine Effizienzsteigerung bei der Anlagen- und EMSR-Technik beachtet werden?

Eine weitere Neuerung zum Handbuch „Energie in Kläranlagen“ aus dem Jahr 1999 ist die gesonderte Betrachtung der Anlagen- und EMSR-Technik innerhalb von Kapitel 4. Dadurch werden die übergeordneten Aggregate, die in verschiedenen Verfahrensstufen der Abwasserentsorgung (aus Kapitel 3) genutzt werden, zusammenfassend behandelt.

Es wird zunächst allgemein auf elektrisch angetriebene Aggregate eingegangen. Anschließend werden Hinweise zu Pumpen- und Förderaggregaten, Druckluftherzeugern, Aggregaten zur Durchmischung, Aggregaten zur Entwässerung und Eindickung sowie Möglichkeiten der Optimierung mittels Prozessleit- und EMSR-Technik gegeben.

Welche Erneuerbaren Energien und Energiebereitstellungssysteme sind in Abwasseranlagen möglich?

In Kapitel 5 werden die Energiebereitstellungssysteme und die Möglichkeiten zu deren Optimierung erörtert. Betrachtet werden hier analog zu den Energieverbrauchern sowohl die elektrische als auch die thermische Energie.

Als wesentliches Element werden Fragestellungen zum Thema Faulgas gesondert behandelt. Zudem werden mögliche Erneuerbare Energien, Energiespeicher und -wandler innerhalb der Abwasserentsorgung und deren Nutzung über deren Bilanzgrenzen hinaus beschrieben.

Das Thema „Wärme und Kälte“ wird ausführlich beschrieben. Es liefert neben einer einheitlichen Nomenklatur zu den Temperaturniveaus eine Darstellung der möglichen Anfallorte und Nutzungspotenziale.

Einen Überblick über die in diesem Handbuch betrachteten Teilbereiche der Abwasserentsorgung sowie deren zugehörige Kapitel gibt das Bild 1-1.

1.6 Orientierung im Handbuch

Im Handbuch sollen Symbole am Randstreifen dem Leser die Orientierung im Gesamtwerk erleichtern. Diese weisen auf Querverweise, Maßnahmen und Kennzahlen hin (Tabelle 1-3).

Tabelle 1-3 Erläuterung der Symbole für eine erleichterte Orientierung im Handbuch

Bezeichnung	Symbol	Erläuterung
Querverweis mit Seitenzahl		Querverweis innerhalb des Energiehandbuchs
Kennzeichnung Maßnahmen		Hinweis auf Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz oder sonstige Vorschläge für energetische und verfahrenstechnische Verbesserungen
Kennzahl		Hinweis auf eine Kennzahl oder auf Erfahrungswerte für spezifische Prozesse

3

3 Verfahrenstechnische sowie betriebliche Effizienzsteigerung von Prozessen

3.1 Abwasserableitung

3.1.2
Planungsansätze für
Neuplanung & Anlagenoptimierung

3.1.3
Pumpwerke

3.1.4
Regenbecken

3.2 Mechanische Vorreinigung

3.2.1
Rechen-
anlage

3.2.2
Sand- &
Fettfang

3.2.3
Vorklärung

3.3 Biologische Reinigung

3.3.2
Belebtschlamm-
verfahren

3.3.3
Sonder-
verfahren

3.6 Prozesswasserbehandlung

3.6.1
Behandlung von
stickstoffbelasteten
Teilströmen

3.5 Schlammbehandlung und Schlamm Entsorgung

3.5.2
Förderung

3.5.3
Eindickung, Entwässerung &
Konditionierung

3.5.4
Stabilisierung

3.5.5
Trocknung

4

4 Effizienzsteigerung bei der Anlagen- und EMSR-Technik

4.1 Elektrisch angetriebene
Aggregate

4.2 Pumpen &
Förderaggregate

4.3 Druckluftherzeuger

5

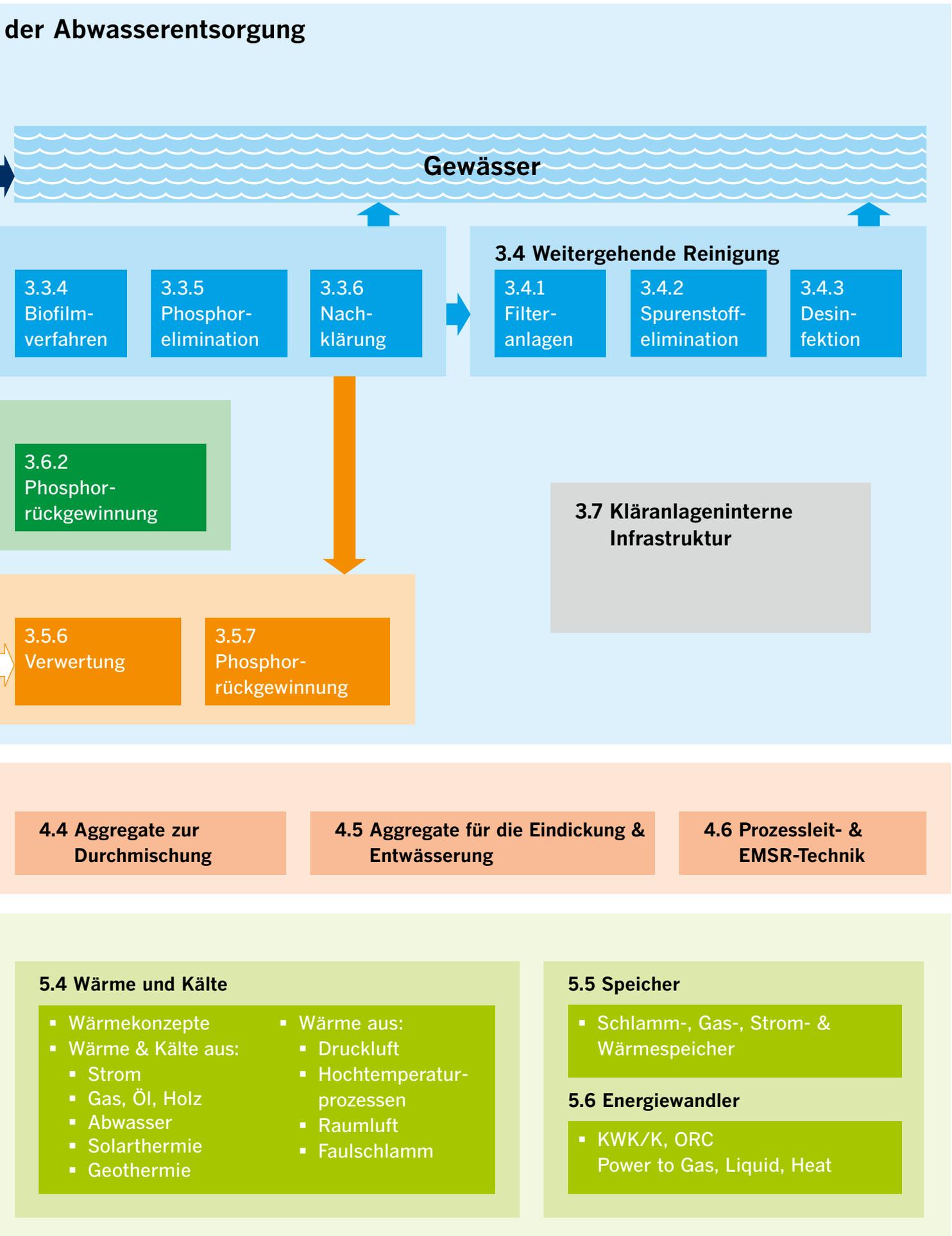
5 Energiebereitstellungssysteme in Abwasseranlagen

5.2 Faulgas

- Faulgasproduktion
- Co-Vergärung
- Klärschlammintegration
- Faulgasreinigung und -aufbereitung

5.3 Strom

- Strom aus:
 - Solarer Energie
 - Windkraft
 - Wasserkraft
- Lastmanagement und Interaktion mit dem Stromnetz
- Regelenergie





2 Vorgehensweise bei Energieoptimierungen

2.1 Allgemeine Hinweise

Kläranlagen sind nach dem geltenden Wasserhaushaltsgesetz nach dem Stand der Technik zu errichten und zu betreiben. Ein Kriterium zur Bestimmung des Standes der Technik ist die Energieeffizienz (Anlage 1 zu § 3 Nummer 11 WHG). Gemäß der Änderung der Abwasserverordnung Anhang 1 im Jahr 2014 sollen Kläranlagen so errichtet und betrieben werden, dass eine energieeffiziente Betriebsweise ermöglicht wird [Bundestag, 2016]. Die bei der Abwasserbeseitigung entstehenden Energiepotenziale sind, soweit technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar, zu nutzen. Dabei dürfen die Bestrebungen zur Energieeffizienzsteigerung nicht dem Ziel des Gewässerschutzes zuwiderlaufen.

Mit dem Ende 2015 veröffentlichten Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA, 2015a] „Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen“ wurde ein erstes systematisches und bundesweit einheitliches Instrument für die energetische Optimierung von Pumpwerken sowie kommunalen und unter Anpassung auch industriellen Kläranlagen geschaffen. Es unterscheidet hinsichtlich der Vorgehensweise in Energiecheck und detaillierte Energieanalyse. Der jährliche Energiecheck erlaubt als Mittel zur energetischen Selbsteinschätzung im Sinne der Selbstüberwachung eine erste Positionsbestimmung hinsichtlich Energieverbrauch und Energieerzeugung. Die detaillierte Betrachtung im Hinblick auf die Ableitung von Maßnahmen erfolgt im Rahmen der Energieanalyse.

Das Handbuch übernimmt die in Kapitel 2.2 näher vorgestellte Systematik des Arbeitsblattes DWA-A 216 und gibt darüber hinaus weitergehende Hilfestellungen. So werden in Kapitel 2.3 zum Teil vertiefende Orientierungshilfen v. a. zur Energiebilanzierung gegeben. Diese sind als Vorschläge zu verstehen und besitzen, anders als das DWA-A 216, keinen regelgebenden Charakter. Dieses Handbuch gibt als Nachschlagewerk für die Ausführung energetischer Optimierungen entsprechende Arbeitsmittel an die Hand.

In diesem Handbuch werden unterschiedliche abwassertechnische Kenngrößen verwandt. Dabei ist anzumerken, dass sich bemessungstechnisch relevante Größen entsprechend dem DWA-A 198 [ATV-DVWK, 2003a] auf die 85 %-Perzentilwerte beziehen. Demgegenüber ist bei der energetischen Betrachtung einer Kläranlage der Mittelwert (50 %-Perzentilwert) der betrachteten Kenngröße als Bezug zu wählen. Dies gilt auch für die nach dem DWA-A 216 zugrunde zu legende mittlere tägliche CSB-Schmutzfracht. Anzumerken ist, dass zur Ermittlung der einwohnerspezifischen Bezugsgröße bewusst die einwohnerspezifische CSB-Fracht von $120 \text{ g}/(\text{E} \cdot \text{d})$ als 85 %-Perzentilwert beibehalten wurde, um die Vergleichbarkeit mit bestehenden Datenerhebungen zu gewährleisten.

2.1.1 Begriffsdefinitionen

In der Fachwelt werden seit Jahren Begriffe wie „Energieautarkie“, „Energieautonomie“, „Energieplus-Kläranlage“ sowie „energieintelligente Kläranlage“ verwendet, ohne dass eine einheitliche Abgrenzung bzw. Begriffsbestimmung vorgenommen wird. Zusätzlich wird im Zusammenhang mit dem in der Vergangenheit erstellten Klimaschutzplan NRW der Ausdruck „Null-Energie-Kläranlage“ eingeführt.



Um zukünftig eine eindeutige Bezeichnung und damit Vergleichbarkeit zu erreichen, werden der Fachwelt nachstehende Begriffsdefinitionen, die sich sowohl auf Strom als auch auf Wärme beziehen, zur zukünftigen Verwendung vorgeschlagen:

Vollständige Energieautarkie

Vollständige Energieautarkie bedeutet, dass eine Abwasseranlage in der Lage ist, den Energieverbrauch jederzeit durch die lokal auf dem Kläranlagengelände verfügbaren Eigenenergiequellen zu decken.

Vollständige abwasserinduzierte Energieautarkie

Vollständige abwasserinduzierte Energieautarkie liegt vor, wenn der Energieverbrauch **jederzeit** nur durch die abwasserinduzierten Eigenenergiequellen abgedeckt wird. Auf die Nutzung von lokaler Wind- und Solarenergie und Energie aus zugelieferten Primärenergieträgern kann verzichtet werden.

Bilanzielle Energieautarkie

Im Unterschied zur vollständigen Energieautarkie wird hier der Energiebedarf nicht jederzeit durch die Eigenenergiebereitstellung gedeckt, sondern bilanziell nur im Jahresmittel.

Bilanzielle abwasserinduzierte Energieautarkie

Im Unterschied zur vollständigen abwasserinduzierten Energieautarkie wird hier der Energiebedarf nicht jederzeit durch die Eigenenergiebereitstellung gedeckt, sondern bilanziell nur im Jahresmittel.

Inselbetrieb

Inselbetrieb bezeichnet eine netzunabhängige Energieversorgung, also eine Energiebereitstellung ohne Anbindung an ein übergeordnetes Netz. Ein Inselbetrieb kann auch nur auf das Stromnetz bezogen werden.

Energieautonomie

Energieautonomie bezeichnet den Zustand, dass eine Abwasseranlage als unabhängig agierendes System in der Lage ist, den Energieverbrauch jederzeit **ohne Anbindung an die Energienetze** und ohne sonstige externe Energiequellen zu decken. Ein **Inselbetrieb** wäre dabei **möglich**, wenn die technischen Voraussetzungen geschaffen würden.

Null-Energie-Kläranlage

Die Null-Energie-Kläranlage, ein erklärtes Ziel des Klimaschutzplans NRW von 2015 (Maßnahme LR-KS1-M21), ist gleichbedeutend mit der bilanziellen Energieautarkie.

Energieneutrale Kläranlage

Die energieneutrale Kläranlage ist gleichbedeutend mit der bilanziellen Energieautarkie bzw. der Null-Energie-Kläranlage.

Energieintelligente Kläranlage

Als energieintelligente Kläranlage werden Anlagen bezeichnet, die die Interaktion mit den umgebenden Energienetzen (Strom, Gas, Wärme) als wesentliche Zielgröße definiert haben. Dies sind zum Beispiel Anlagen, die Regelenergie bereitstellen oder sich an einem virtuellen Kraftwerk beteiligen. Es ist eine Verknüpfung mit den „smarten“ Netzen der Zukunft auf Prozesselebene notwendig.

Energieplus-Kläranlage

Unter der Voraussetzung einer (bilanziellen) Energieautarkie oder Energieautonomie ergibt sich ein bilanzieller Eigenenergieüberschuss der Kläranlage im Jahresmittel.

Zugelieferte Primärenergieträger

Hierunter werden zum Beispiel Co-Fermente und zugelieferte Klärschlämme anderer Kläranlagen verstanden, die vor Ort in Strom und Wärme umgewandelt werden.

Rationelle Energieanwendung

Definition der „Rationellen Energieanwendung“ laut Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart [IER, o. J.]:

„Alle Maßnahmen, die im Sinne des ökonomischen Prinzips auf einen Energieeinsatz führen, der einem optimalen Faktoreinsatz der genutzten volkswirtschaftlichen Ressourcen entspricht. Synonym verwendete Begriffe:

- *rationelle Energienutzung*
- *rationelle Energieverwendung*
- *rationeller Energieeinsatz“*

Es wird empfohlen, diesen Begriff wegen des zum Teil unscharfen Gebrauchs und der Fokussierung auf die reine Wirtschaftlichkeit nicht für Abwasseranlagen zu verwenden.

Energiemanagementsysteme nach DIN-EN-ISO 50.001

Definition aus der DIN-EN-ISO 50001: *„Gesamtheit miteinander zusammenhängender oder interagierender Elemente zur Einführung einer Energiepolitik und strategischer Energieziele sowie Prozesse und Verfahren zur Erreichung dieser strategischen Ziele“* [DIN, 2011c].

Ein Energiemanagementsystem nach DIN-EN-ISO 50001 soll insbesondere dabei helfen, die für die Verbesserung der energetischen Effizienz nötigen Organisations-, Kommunikations- und Dokumentationsstrukturen zu schaffen.

2.1.2 Strategie und Planung

Die aus der Energieanalyse einer Abwasseranlage resultierenden Maßnahmen bedürfen je nach Kategorie (Sofortmaßnahmen – kurzfristige Maßnahmen – abhängige Maßnahmen) einer mehr oder weniger umfangreichen Vorbereitung und Planung. Insbesondere die abhängigen Maßnahmen werden ihrer Natur nach allerdings oft zu einem sehr viel späteren Zeitpunkt (bis zu 10 Jahre nach Aufstellung der Energieanalyse) geplant und umgesetzt. Oftmals wurden daher in der Vergangenheit bei Neuplanungen die Vorschläge der Energieanalyse schlicht vergessen. Daher muss ein Betreiber durch ein gezieltes Wiedervorlage- oder Nachverfolgungssystem gewährleisten, dass bei einer späteren Planung die Hinweise der Energieanalyse beachtet werden. Im Rahmen von Genehmigungsverfahren sollte ein Abgleich der Planung mit der Energieanalyse erfolgen.

Unabhängig davon, ob bereits ein Energiecheck oder eine Energieanalyse vorliegt, muss der Betreiber seine strategischen Anforderungen (z. B. im Rahmen eines Energiemanagements nach DIN EN ISO 50001 [DIN, 2011c]) bei Planungen von Abwasseranlagen sehr frühzeitig formulieren und in den Planungsprozess einbringen. Dafür ist ein einheitliches Verständnis des Planungsprozesses von wesentlicher Bedeutung. Nachstehend wird daher der Planungsablauf nach dem zurzeit in Bearbeitung befindlichen Merkblatt DWA-M 820 beschrieben [DWA, 2016f].

2.1.3 Von der „Bedarfsplanung Konzept“ zum Projekt

Bevor Projekte (Kanalisation, Regenbecken und Kläranlage) begonnen werden, muss ein umfassendes Konzept erstellt werden, das die abwassertechnische Gesamtsituation erfasst. Aus dem Konzept ergeben sich dann in der Regel viele Maßnahmen, die in einem Umsetzungskatalog festgelegt werden. Sowohl der Konzeptplanung als auch den Projektplanungen ist jeweils eine Bedarfsplanung nach „DIN 18205: 2016-11 – Bedarfsplanung im Bauwesen“ [DIN, 2016a] voranzustellen (Bedarfsplanung Konzept und Bedarfsplanung Projekt). In Bild 2-1 ist schematisch der Ablauf eines qualitätsgesicherten Planungsprozesses zu sehen. Energiecheck und Energieanalyse sind dabei in der Regel in der Konzeptphase zu erstellen bzw. zu berücksichtigen.

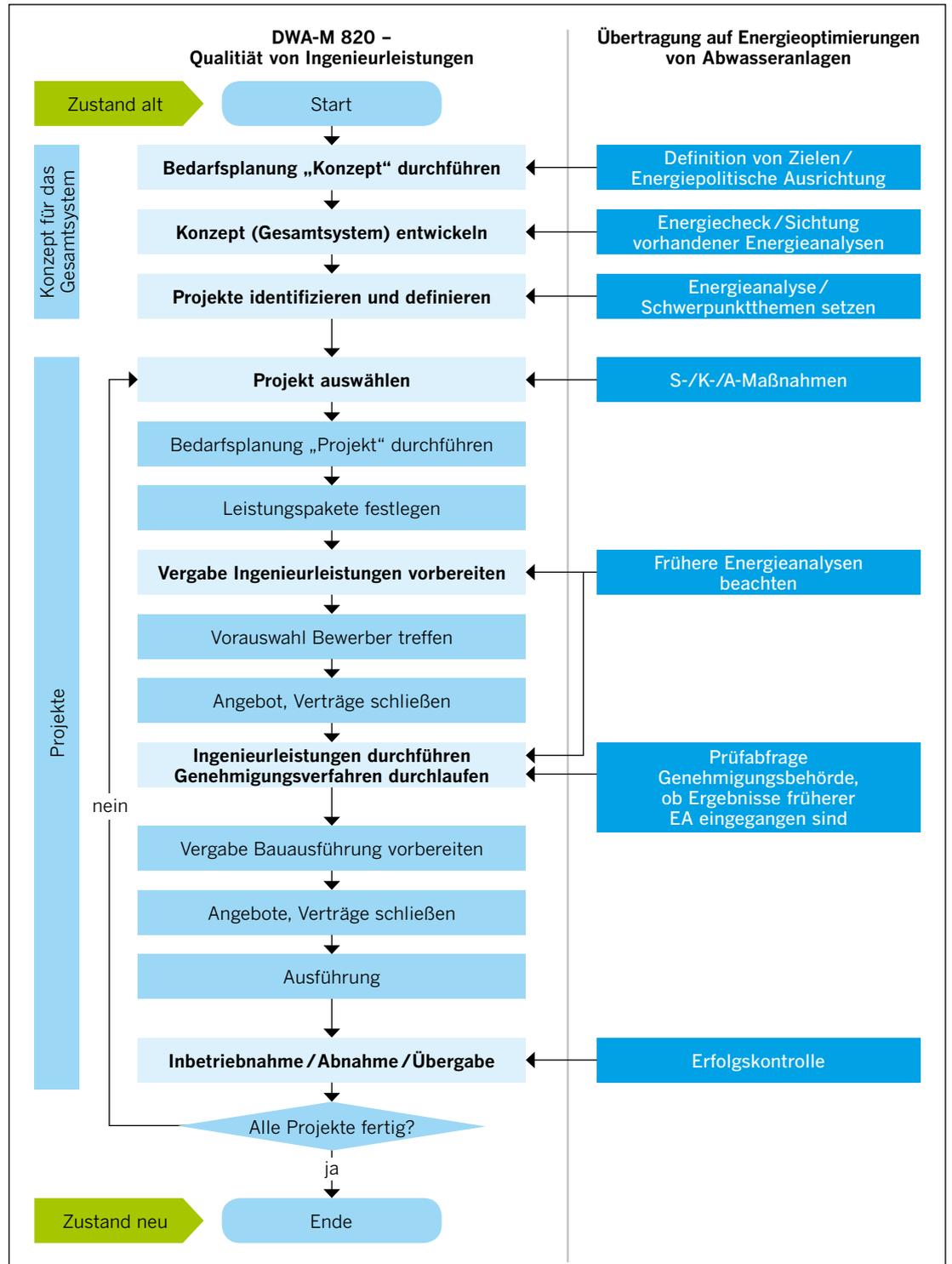


Bild 2-1 Übertragung der Vorgehensweise bei Energieoptimierungen in das Schema eines Planungsprozesses nach dem Merkblatt DWA-M 820 [DWA, 2016f]

Eine Vorgehensweise nach dem DWA-M 820 führt zu klaren Zielsetzungen und Leistungsanforderungen und ist Voraussetzung für die gute Qualität von Ingenieurleistungen.

Bereits im Rahmen der Bedarfsplanung des Konzepts, spätestens aber bei der Bedarfsplanung eines Projekts, muss der Betreiber einer Abwasseranlage seine Erwartungen und Forderungen an Energieverbrauch und Energiebereitstellung der Abwasseranlage formulieren. Dabei ist zum Beispiel festzulegen, ob nur Energieeffizienzmaßnahmen zu planen sind, die ein positives betriebswirtschaftliches Ergebnis erwarten lassen, oder ob zusätzliche Mittel auch für Maßnahmen mit schwer prognostizierbarer oder nicht gegebener Wirtschaftlichkeit, zum Beispiel aus Gründen des Klimaschutzes, bereitgestellt werden. Hier sollte eine klare Zielsetzung und Budgetierung erfolgen.

2.1.4 Wechselwirkungen

Eine moderne Kläranlage stellt ein komplexes verfahrenstechnisches System dar, das sich mit einem Zahnradmodell (Bild 2-2) mit vielen kleinen und größeren Zahnrädern und unterschiedlichen Drehrichtungen vergleichen lässt.

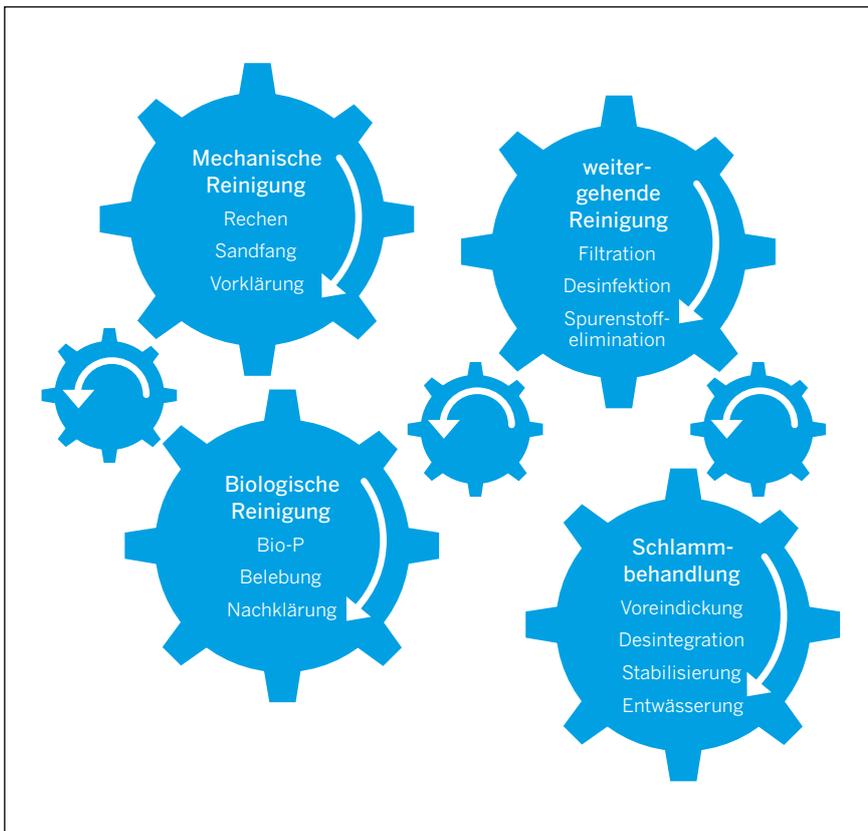


Bild 2-2 Schematisches Zahnradmodell der Wechselwirkungen auf einer Kläranlage

Wird an einem der „Zahnräder“ der Kläranlage gedreht, bedarf es eines hohen verfahrenstechnischen und betrieblichen Wissens, um die Auswirkungen an anderer Stelle der Kläranlage erkennen und bewerten zu können. Wechselwirkungen können dazu führen, dass bestimmte Energieeffizienzmaßnahmen, auch wenn sie lokal Vorteile bringen können, in der umfassenden Betrachtung der gesamten Kläranlage nicht zu empfehlen sind. Dazu werden nachfolgend beispielhaft einige Wechselwirkungen ohne Anspruch auf Vollständigkeit aufgeführt.

Eine Reduzierung der Abwassermengen bzw. Fremdwassermengen im Kanal führt gemeinhin zu einem reduzierten Betriebs- und Energieaufwand. Es ist allerdings darauf zu achten, dass nicht bei zu starker Reduzierung eine zu geringe Schwemmwirkung vorliegt. Diese kann dazu führen, dass es zu Ablagerungen im Kanal kommt oder die Pumpwerke nicht mehr im optimalen Betriebspunkt arbeiten.

Im Bereich der mechanischen Reinigung ist eine häufige Maßnahme die Anpassung der Luftmenge des Sandfanggebläses mit dem Ziel einer Energieeinsparung für diese Verfahrensstufe. Als Wechselwirkung ist festzuhalten, dass bei einer zu geringen Walzenströmung Sand und Fett in die nächsten Verfahrensstufen eindringen, was auf lange Sicht zu einem starken Verschleiß von Pumpen, Rührwerken etc. führt. Besonders gefährlich ist dies, da die Auswirkungen erst lange nach der Änderung am Sandfang (vgl. Kapitel 3.2.2) sichtbar werden.

Im Bereich der biologischen Stufe führt eine Änderung der Überschussschlammmenge (vgl. Kapitel 3.3.2.2.3) zu Wechselwirkungen mit der Schlammeindickung, Faulung, Gasausbeute und Schlammwässerung. Intermittierende Durchmischung oder gar Abschalten von Durchmischungsaggregaten können zu Ablagerungen in den Becken führen.



Weitere Wechselwirkungen können sich innerhalb der anaeroben Schlammbehandlung (vgl. Kapitel 3.5.4.2) ergeben. So kann beispielhaft die Änderung der Faulraumtemperatur oder die Änderung der Durchmischung maßgeblichen Einfluss auf die Mikroorganismen und damit auf den Gasertrag im Faulbehälter haben. Auch ist eine erhöhte Rücklösung von Stickstoff in die Prozesswässer und damit eine erhöhte Belastung der biologischen Stufe möglich. Dies muss bei einer Änderung der Faulbehältertemperatur beachtet werden.



Als ein weiteres Beispiel sei die Desintegration genannt, deren Ziel in der Steigerung der Gasausbeute aus dem Klärschlamm und der Verringerung der zu entsorgenden Klärschlammmenge liegt. Durch die Desintegration kann allerdings auch die maschinelle Schlammmentwässerung erschwert werden, wenn die Zudosierung von Fällmittel nicht den neuen Bedingungen angepasst wird (vgl. Kapitel 5.2.3).

Co-Fermente im Faulbehälter können neben dem erwünschten Effekt einer gesteigerten Faulgasproduktion zu einer zusätzlichen Belastung bei der Schlammmentwässerung und in den Prozesswässern führen.

Um derartige Wechselwirkungen bei der Identifikation und Planung von Energieeffizienzmaßnahmen erkennen und beachten zu können, bedarf es eines hohen Wissenstandes und eines guten Wissensaustausches bei den Planungsbeteiligten bzw. den Erstellern der Energieanalyse. Auch eine dynamische Simulation kann helfen, die betrieblichen Auswirkungen besser zu erkennen, da sich gegenseitig beeinflussende Maßnahmen damit identifiziert und berücksichtigt werden. Dies geschieht, indem maßgebliche Aggregate im Anlagenmodell in ihrem wahren Regelverhalten abgebildet werden. Bei Verfahrens- oder Regelungsänderungen zeigen sich im Simulationsmodell resultierende Änderungen von Betriebszuständen und ggf. auch des Energieverbrauchs für den aktuellen und den idealen Zustand.

2.2 Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen – Arbeitsblatt DWA-A 216: Energiecheck und Energieanalyse

Das Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA, 2015a] gibt neben einer Anleitung zum systematischen Vorgehen konkrete Mindestanforderungen an das zugrunde zu legende Datenmaterial sowie an Inhalt, Qualität und Ergebnisse einer energetischen Optimierung vor. Es unterteilt sich in die Schritte „Energiecheck“ und „Energieanalyse“, die in Detailtiefe und Umfang unterschiedlich sind (Bild 2-3). Detaillierte Informationen zur Durchführung einer Energieoptimierung nach DWA-A 216 sind dem Arbeitsblatt selbst zu entnehmen.

Energiecheck nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216

Der Energiecheck ermöglicht eine erste grobe Bestandsaufnahme und Bewertung des energetischen Zustands einer Abwasseranlage und dient unter anderem einer fortlaufenden Erfolgskontrolle. Er erfolgt anhand der wenigen in Tabelle 2-1 zusammengestellten und durch den Betreiber selbst ermittelbaren Kennwerte hinsichtlich Energieverbrauch und Energieeigenversorgung. Die Kennwerte des jährlichen Energiechecks dienen der Selbsteinschätzung des Betreibers im Sinne der Selbstüberwachung.

Die für jede Kläranlage im Rahmen des Energiechecks individuell zu bestimmenden Kennwerte sind zur groben Positionsbestimmung in vorliegende Summenhäufigkeiten aus dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA, 2015a] einzuordnen. Die Summenhäufigkeiten basieren auf statistischen Auswertungen realer Betriebsdaten von kommunalen Kläranlagen in Deutschland. Sie ermöglichen die Ermittlung der sogenannten „Unterschreitungshäufigkeit“ für die betrachteten Kennwerte als Maßeinheit für die energetische Bewertung. Nachfolgend ist in Bild 2-4 exemplarisch die Bestimmung der Unterschreitungshäufigkeit für den Kennwert des spezifischen Stromverbrauchs einer Kläranlage dargestellt. Aus dem jährlichen Stromverbrauch der gesamten Anlage und der mittleren Belastung der Anlage im Betrachtungszeitraum in Einwohnerwerten [bezogen auf

120 g CSB/(E · d)] wird der spezifische Gesamtstromverbrauch ermittelt. Durch Zuordnung dieses Kennwerts von 31 kWh/(E · a) in die Summenhäufigkeit dieses Kennwerts ergibt sich eine Unterschreitungshäufigkeit von 40%. Der gemessene Stromverbrauch der betrachteten Anlage wird folglich von 40% der Kläranlagen unterschritten.

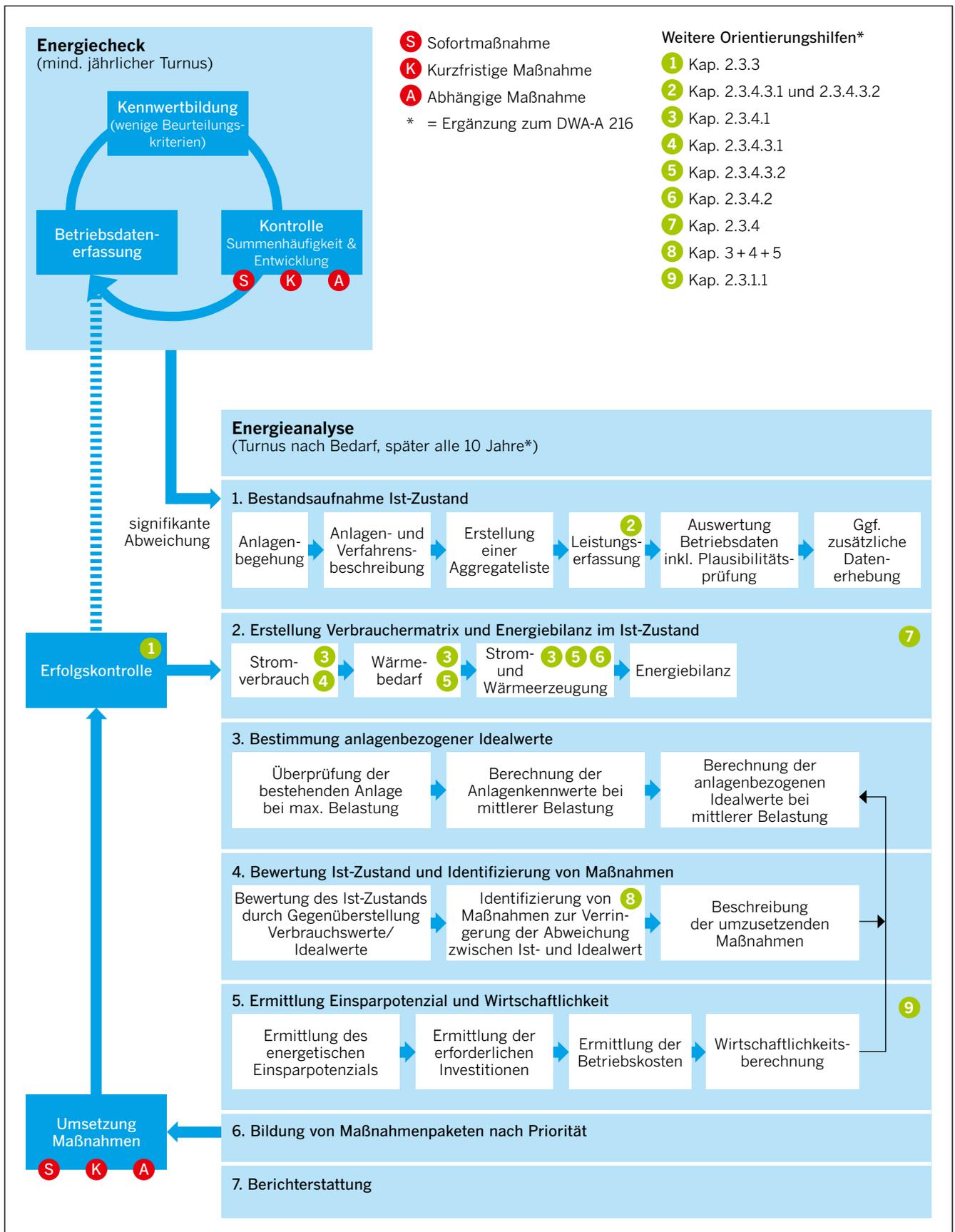


Bild 2-3 Ablauf bei der Energieoptimierung von Abwasseranlagen nach [DWA, 2015a]

Tabelle 2-1 Kennwerte des Energiechecks nach [DWA, 2015a]

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung Kennwert	Formel	Definition verwendeter Größen
Kläranlage				
e_{ges}	[kWh/(E · a)]	Spezifischer Stromverbrauch der Anlage	$e_{ges} = E_{ges}/EW_{CSB,120}$	E_{ges} Stromverbrauch gesamte Anlage [kWh/a] EW_{CSB} Einwohner bezogen auf 120 [g/(E · d) CSB]
e_{Bel}	[kWh/(E · a)]	Spezifischer Stromverbrauch Belüftung ¹⁾	$e_{Bel} = E_{Bel}/EW_{CSB,120}$	E_{Bel} Stromverbrauch Belüftung Belebungsbecken [kWh/a] EW_{CSB} Einwohner bezogen auf 120 [g/(E · d) CSB]
Kläranlage mit Faulung				
e_{FG}	[l(E · d)]	Spezifische Faulgasproduktion bezogen auf den Einwohnerwert	$e_{FG} = Q_{FG,d,aM}/EW_{CSB}$	$Q_{FG,d,aM}$ Jahresmittelwert des Faulgasanfalls bei Normbedingungen [l/d] EW_{CSB} Einwohner bezogen auf 120 [g/(E · d) CSB]
Y_{FG}	[l/kg]	Spezifische Faulgasproduktion bezogen auf organische Trockenmasse	$Y_{FG} = E_{FG,d,aM}/B_{d,oTM,aM}$	$B_{d,oTM,aM}$ Jahresmittelwert der dem Faulbehälter zugeführten organischen Trockenmasse [kg/d]
N_{FG}	[%]	Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität	$N_{FG} = (E_{KWKel} \cdot 100) / (Q_{FG,a} \cdot g_{CH4} \cdot 10)$	E_{KWKel} Jahresproduktion Strom aus Faulgasumwandlung in KWK-Anlagen bzw. Direktantrieb von Aggregaten [kWh/a] $Q_{FG,a}$ Jahressumme des Faulgasanfalls bei Normbedingungen [m ³ /a] g_{CH4} Volumenanteil des Methans am Biogasvolumen (z. B. 0,64)
EV_{el}	[%]	Eigenversorgungsgrad Elektrizität	$EV_{el} = (E_{KWKel}/E_{ges}) \cdot 100$	E_{KWKel} Jahresproduktion Strom aus Faulgasumwandlung in KWK-Anlagen bzw. Direktantrieb von Aggregaten [kWh/a] E_{ges} Stromverbrauch gesamt [kWh/a]
$e_{th,ext}$	[kWh _{th} /(E · a)]	Spezifischer externer Wärmebezug	$e_{ext} = E_{th}/EW_{CSB,120}$	$E_{th,ext}$ extern zugeführte Energie zur Wärmeversorgung [kWh/a] (fossile Brennstoffe) EW_{CSB} Einwohner bezogen auf 120 [g/(E · d) CSB]
Pumpwerk				
e_{PW}	[Wh/(m ³ · m)]	Spezifischer Stromverbrauch Pumpwerk	$e_{PW} = (E_{PW} \cdot 1000) / (Q_{PW} \cdot h_{man})$	E_{PW} Stromverbrauch des Pumpwerks [kWh/a] Q_{PW} Fördermenge [m ³ /a] h_{man} manometrische Förderhöhe [m]

1) falls notwendige Messwerte vorhanden sind

Damit wird allerdings keine Aussage darüber getroffen, ob die untersuchte Kläranlage bezüglich des Energieverbrauchs als „gut“ oder „schlecht“ einzustufen ist. Besondere Anforderungen, Topografie, Verfahren usw. können einen erhöhten Energiebedarf rechtfertigen.

Durch den Energiecheck lassen sich erste energetische Potenziale aufzeigen, wobei weder eine Ursachenbestimmung vorgenommen noch verlässliche quantitative Aussagen getroffen werden können. Daher dient der Energiecheck bei seiner erstmaligen Umsetzung als erster Schritt zur Energieanalyse und ist im weiteren Verlauf – anders als die frühere Grobanalyse [Müller et al., 1999] – im Sinne einer regelmäßigen Kontrolle mindestens jährlich durchzuführen. Durch diese Kontrolle kann der energetische Anlagenzustand überwacht und eine Selbsteinschätzung im Sinne

der Selbstüberwachung getroffen werden. Weiterhin können Hinweise auf die Umsetzung und den Erfolg von Maßnahmen, z. B. im Bereich der Belüftung, gegeben werden und es kann der Bedarf nach einer aktualisierten Energieanalyse bestimmt werden.

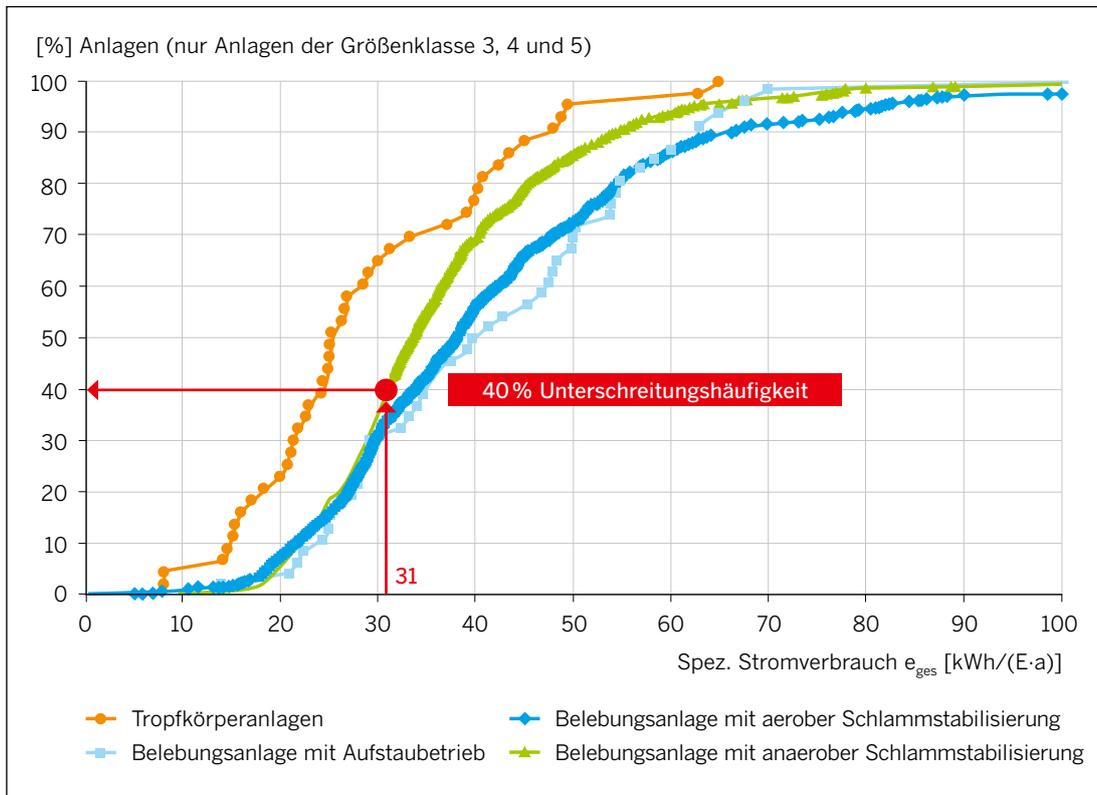


Bild 2-4 Exemplarische Bewertung des spezifischen Stromverbrauchs einer Kläranlage mittels Summenhäufigkeit nach [DWA, 2015a]

Energieanalyse nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216

Die Energieanalyse umfasst eine tiefer gehende Begutachtung der betrachteten Abwasseranlage unter Berücksichtigung der Maschinen-, Prozess-, Verfahrens- und Bautechnik. Zudem erweitert sie die Elemente des Energiechecks und beinhaltet eine (Energiedaten-) Erhebung des Ist-Zustandes einzelner Anlagenteile, Aggregate und Aggregategruppen im Rahmen einer Energiebilanz (siehe Ablaufschema in Bild 2-3). Die Bewertung dieser Bilanz erfolgt durch einen Vergleich der Ist-Werte mit eigenen anlagenbezogenen Idealwerten. Sie bildet die Grundlage für die Erarbeitung und Darstellung von Maßnahmen zur Verbesserung des energetischen wie oftmals auch des verfahrenstechnischen Anlagenzustands.

Für die Erstellung der Energiebilanz im Ist-Zustand sind die Verbraucher anhand einer Verbrauchermatrix aufzulisten und deren Leistungsaufnahme über den Bilanzzeitraum eines Referenzjahres zu summieren.

Neben den Verbrauchern sind auch die Energiebereitsteller respektive -wandler zu erfassen, wobei im Rahmen der Energieanalyse zwischen der Energieerzeugung aus abwasserinduzierten und nicht abwasserinduzierten Quellen unterschieden wird.

Eine Prüfung der Energiebilanz erfolgt durch Summation aller aus- und eingehenden thermischen wie elektrischen Energieströme unter Berücksichtigung von Verlusten und Messtoleranzen. Aus den in der Energiebilanz aufgenommenen Daten wird der tatsächliche Strom- und Wärmeverbrauch bzw. die tatsächliche Strom- und Wärmebereitstellung in absoluter [kWh/a] sowie normierter Form [kWh/(E·a)] gebildet.

Die Bewertung der energetischen Effizienz der betrachteten Anlage erfolgt anschließend anhand einer Gegenüberstellung der normierten Werte im Ist-Zustand mit anlagenbezogenen Idealwerten

(vgl. Anhang A des DWA-A 216), die auf Grundlage von vorhandenen Betriebsgrößen kläranlagen-spezifisch errechnet werden. Eine signifikante Differenz zwischen den ermittelten Ist-Werten und den anlagenbezogenen Idealwerten kann ein Indiz für mögliche Optimierungspotenziale sein, die durch entsprechende vorzuschlagende Maßnahmen gehoben werden können.

Bei nicht direkt am Aggregat gemessenen Kennwerten können evtl. zusätzliche Aggregate mit erfasst werden (z. B. Hilfspumpen, Hydraulikaggregate, Ventilatoren etc.), sodass der Vergleich zwischen den gemessenen Kennwerten und den Idealwerten nicht zutreffend ist. Der Verbrauch der Zusatzaggregate kann über die Nennleistung und die Betriebsstunden abgeschätzt und vom gemessenen Kennwert subtrahiert werden. Ansonsten würde das Einsparpotenzial zu hoch angesetzt werden. Bei einer Direktmessung am Aggregat wird dieser Konflikt vermieden.

Für diese Maßnahmen ist anschließend sowohl eine Ermittlung der Wirtschaftlichkeit (Kosten-Nutzen-Verhältnis) als auch eine Kategorisierung und Zusammenstellung zu Paketen vorzunehmen. Insgesamt sind drei Maßnahmenarten entsprechend ihrer Realisierungsphase zu unterscheiden, die sich nach dem DWA-A 216 wie folgt gliedern:

Sofortmaßnahmen (S):

Dies sind Maßnahmen, die sich innerhalb kurzer Zeit mit begrenztem Aufwand umsetzen lassen. Kriterien einer Sofortmaßnahme sind:

- günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis,
- geringer bis kein Planungsaufwand,
- Unabhängigkeit ihrer Durchführung und
- einfache Realisierbarkeit.

Beispiele: Änderungen der Schaltpunkte von Aggregaten oder Anpassungen von Sollwertvorgaben

Kurzfristige Maßnahmen (K):

Dies sind Maßnahmen, die innerhalb kurzer Zeit realisiert werden können, jedoch im Vergleich zu den Sofortmaßnahmen detailliertere Untersuchungen im Zuge einer Planung sowie ergänzende Messungen erfordern können.

Beispiele: Signifikante Änderungen in der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) oder das Auswechseln einzelner Aggregate oder deren Bauteile

Abhängige Maßnahmen (A):

Diese Maßnahmen sind aufgrund eines häufig ungünstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisses zumeist erst im Rahmen ohnehin durchzuführender Reparaturen oder Um- und Ersatzneubauten wirtschaftlich umsetzbar.

Beispiele: Wesentliche Umstellungen angewandter Verfahren, der Ersatz schadhafter Aggregate, die Ergänzung um weitere Anlagenkomponenten (BHKW-Bau/Tausch bei Errichtung/Umbau einer Faulung)

Einen Überblick über die Verteilung der möglichen Maßnahmen und deren Energieeinsparungspotenzial bzw. Energiegewinn zeigt die Auswertung der durch das Land NRW geförderten Energieanalysen auf Kläranlagen in Bild 2-5. Nach der Maßnahmenkategorie dominieren die Sofortmaßnahmen und die kurzfristigen Maßnahmen, insbesondere in der biologischen Abwasserreinigung. Zum anderen sind die Maßnahmen im Bereich der Schlammbehandlung bzw. Faulgasnutzung unter rein energetischer Betrachtung häufig nicht wirtschaftlich und fallen damit in die Kategorie der abhängigen Maßnahmen.

Vor dem Hintergrund der komplexen Gesamtthematik aus Energietechnik und Abwassertechnik, der richtigen Beurteilung der erhobenen Daten und dem vernetzten Zusammenspiel der einzelnen Komponenten einer Kläranlage bei den zu empfehlenden Maßnahmen hängt der Erfolg einer Energieanalyse von der Qualifikation der mit dieser Analyse betrauten Fachperson ab.

Zudem sind das Anlagenwissen und die Erfahrung des Betriebspersonals in die Erarbeitung bestmöglicher Optimierungslösungen einzubinden, was häufig auch mit einer stärkeren Identifikation und erhöhten Akzeptanz etwaiger Veränderungen verbunden ist.

Grundlage für eine gelungene Energieanalyse sind weiter die Qualität der Datengrundlage, eine exakte Dokumentation des Ist-Zustands und eine anlagenübergreifende Kenntnis und Sichtweise [DWA, 2015a].

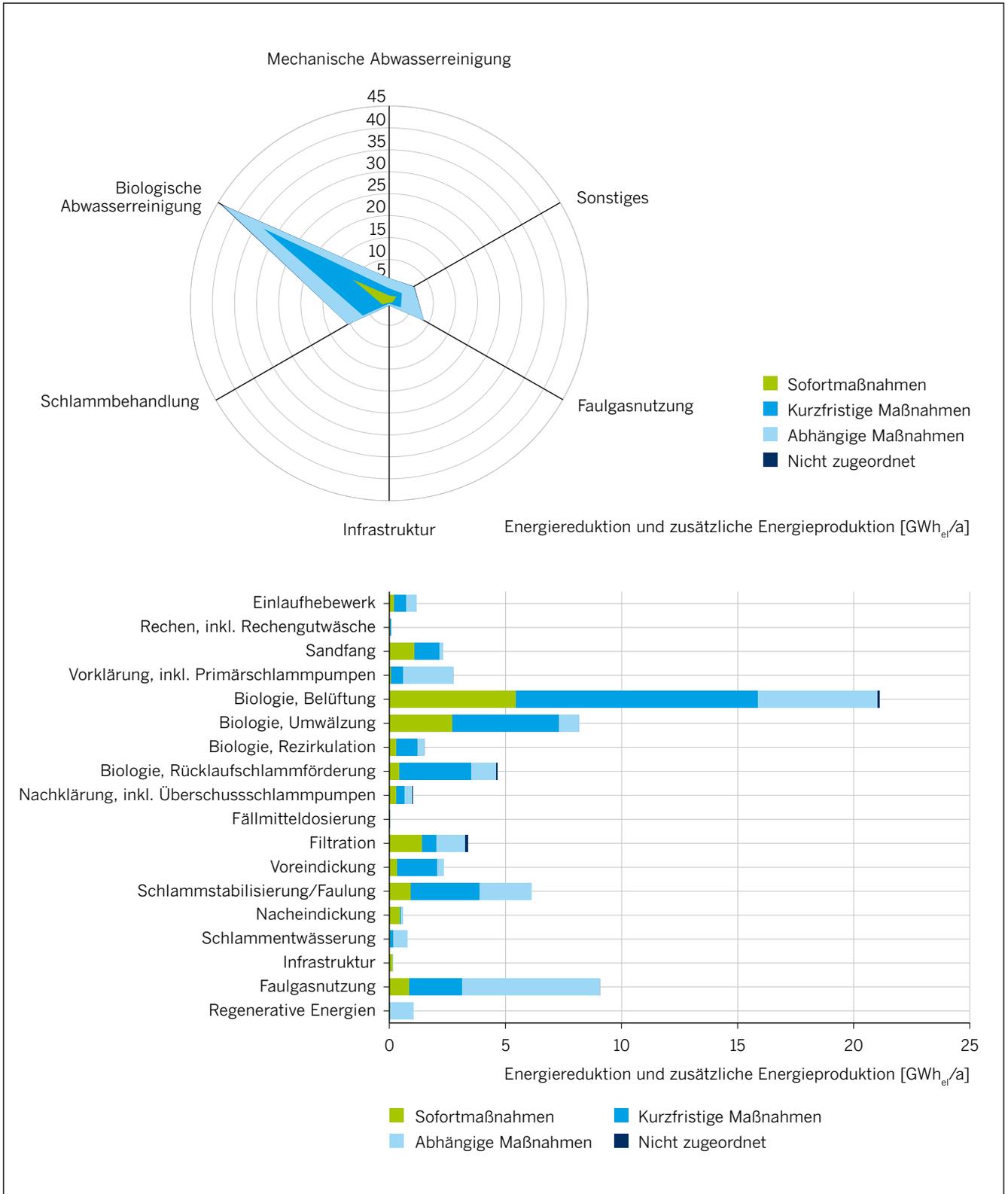


Bild 2-5 Auswertung der durch das Land NRW geförderten Energieanalysen auf Kläranlagen nach [LANUV, 2016]



Ein wesentlicher Bestandteil der energetischen Optimierung nach DWA-A 216 ist die Erfolgskontrolle (siehe Kapitel 2.3.3), durch die eine Verifizierung der für die vorgeschlagenen Maßnahmen prognostizierten Optimierungspotenziale stattfindet.

2.3 Weitere Orientierungshilfen

2.3.1 Ermittlung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses und der Umweltauswirkungen von Maßnahmen

2.3.1.1 Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme, die durch eine Energieanalyse festgelegt wurde, sind deren **Kosten** (Kapitaldienst der Investition, Betriebskosten, Wartung, Instandhaltung, Versicherung etc.) den zugehörigen **Nutzen** (Reduzierung Energiekosten und/oder Betriebsmittel, Abwasserabgabe etc.) gegenüberzustellen.

Für diese monetäre Bewertung werden verschiedene Berechnungsmethoden angewandt: Kapitalwertmethode, Interne-Zinsfuß-Methode, Amortisations-Methode oder Jahreskostenbetrachtung. Da die Berechnungsmethoden unterschiedliche Ausgangsdaten verwenden, können Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für einen vorliegenden Fall stark voneinander abweichen. Die o. g. Bewertungsmethoden werden überwiegend nur bei weitergehenden Planungen verwendet. In der Regel wird bei Energieanalysen das vereinfachte Verfahren über die Jahreskostenbetrachtung nach KVR-Leitlinie eingesetzt [DWA, 2012c]. Dies sieht auch das Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA, 2015a] so vor.

Bei der Jahreskostenbetrachtung werden die entstehenden Kosten auf die Jahresinvestitions- und Betriebskosten aufgeteilt und in einen Faktor umgerechnet. Es wird dabei eine lineare Abschreibung unter Berücksichtigung eines kalkulatorischen Zinssatzes angesetzt, die abhängig von der Nutzungsdauer ist. Die unterschiedlichen Nutzungs- bzw. Abschreibungszeiträume sind individuell von Anlagenbetreibern vorzugeben und können das Ergebnis stark beeinflussen. Wird eine kurze Nutzungsdauer angenommen, so steigen die Kosten pro Jahr, während bei einer sehr langen Nutzungsdauer die Kosten gering gehalten werden können. Um Preissteigerungen sowie unterschiedliche Randbedingungen (Vergütungen, Gesetzgebung etc.) zu berücksichtigen, kann es sinnvoll sein, eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Bei dieser werden die Eingangsparameter unterschiedlich geändert, um die Auswirkungen auf die Kennzahlen festzustellen. Die für eine vorgeschlagene Maßnahme erforderlichen Investitionen beinhalten eine Schätzung sämtlicher Aufwendungen für Planung, Bau, Inbetriebnahme, Anlagenkosten etc. Sie entsprechen zunächst nicht der detaillierten Kostenberechnung nach den HOAI-Planungsleistungen. Vielmehr sind sie als Bau-, Maschinen- sowie Elektrotechnikkosten separat anzusetzen. Hilfreich für einen evtl. späteren Planungsprozess ist die weitere Aufgliederung der Kosten nach den Kostengruppen der DIN 276 [DIN, 2008a]. Der Kapitaldienst errechnet sich nach der Formel 2-1.

Formel 2-1 Berechnung des Kapitaldienstes

$$K = I_{\text{Invest}} \cdot i \cdot \frac{(1 + i)^n}{[(1 + i)^n - 1]}$$

- I_{Invest} = Investitionskosten [Euro]
 i = Kalkulatorischer Zinssatz [-]
 n = Abschreibungszeitraum [a]

Die Betrachtung der gesamten Lebenszykluskosten einer Maßnahme ist sinnvoll, falls es sich um umfangreiche Investitionen handelt.

Neben den Investitionskosten fallen laufende Kosten (Betriebskosten) an, welche sich aus Personal-, Sach- und Energiekosten zusammensetzen. Ebenfalls sind die Reinvestitionskosten, Versicherungskosten, Kosten für die Behebung von Bauschäden oder die Erbringung gesetzlicher Leistungen zu berücksichtigen. Auch die für eine Erfolgskontrolle (vgl. Kapitel 2.3.3) erforderlichen Messinstrumente sind in die Investitionskosten der Maßnahme einzuplanen. Mit steigender



Betriebsdauer steigt bei Aggregaten auch oftmals der Energiebedarf, was zu einer verminderten Energieeinsparung führt. Dieser Umstand ist bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu berücksichtigen.

Der Jahresnutzen ergibt sich durch die jährlichen Einsparungen im Energiebereich sowie bei Betriebs-, Reparatur- und Wartungskosten, Einsparungen bei der Abwasserabgabe etc.

Ebenfalls in der Berechnung zu berücksichtigen sind etwaige Fördermittel oder Zuwendungen und Vergütungen. Die Investitions- und Betriebskosten sind mit der entsprechenden Mehrwertsteuer auszuweisen. Preissteigerungen, besonders bei Energie- und Personalkosten, sind bei einer Prognoseberechnung zu berücksichtigen.

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ergibt sich wie folgt:

[K] Jahreskosten = Kapitaldienst + Betriebskosten

[N] Jahresnutzen = Einsparungen

$$\frac{K}{N} = \frac{\text{Jahreskosten}}{\text{Jahresnutzen}}$$

Der berechnete Faktor aus dem Verhältnis von Jahreskosten zu Jahresnutzen gibt die Wirtschaftlichkeit der Investition bzw. der Umbaumaßnahme an. Ist der Faktor

- kleiner 1, ist die Investition wirtschaftlich,
- gleich 1, erzielt die Investition die geforderte Mindestrendite oder
- größer 1, ist die Investition nicht wirtschaftlich.

2.3.1.2 Ermittlung der Umweltauswirkungen von Maßnahmen

2.3.1.2.1 Auswirkungen auf die Ablaufqualität von Kläranlagen

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich die Ablaufqualität einer Kläranlage und damit auch die Belastung des Gewässers durch Maßnahmen zur Energieoptimierung nicht verschlechtern darf. Die mit einer Energieoptimierung zumeist einhergehende verfahrenstechnische Optimierung der gesamten Anlage kann im Gegenteil eine Verbesserung der Reinigungsleistung ermöglichen, wie sich in der Praxis oftmals zeigt. Diese Verbesserung der Reinigungsleistung und damit auch eine Reduzierung negativer Umweltauswirkungen kann neben dem rein monetären Vorteil geringerer Abwasserabgaben als weiterer Nutzen von Maßnahmen bewertet werden.

Durch die zunehmende Betrachtung der mit der Abwasserreinigung verbundenen Treibhausgasemissionen entwickelte sich das Bestreben hin zu einer möglichst energieeffizienten und klimaverträglichen Abwasserreinigung. Die Methodik der Ökobilanz und des CO₂-Fußabdrucks etablierte sich zur ganzheitlichen Erfassung des Energieverbrauchs in der Abwasserreinigung und als Instrument, um die Klimaverträglichkeit der Abwasserreinigung transparenter zu machen. Diese transparente Darstellung kann ebenfalls als Grundlage für eine Bewertung von Maßnahmen herangezogen werden.

2.3.1.2.2 CO₂-Bilanzierung in der Abwasserwirtschaft

Die CO₂-Bilanz bezeichnet die Bilanz der Treibhausgas-Emissionen eines Prozesses über eine festgelegte Zeitspanne. Zu den Treibhausgasen (THG) gehören alle Gase, die in der Atmosphäre einen direkten Einfluss auf den Treibhauseffekt haben. Für diese Gase wurde vom Weltklimarat (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) ein Koeffizient für das Treibhausgaspotenzial definiert. Besonders relevant aufgrund des hohen Treibhausgaspotenzials sind Methan und Distickstoffoxid (Lachgas), beides Gase, die auch in der Abwasserreinigung aufgrund des Stickstoffkreislaufs sowie methanogener Abbauprozesse auftreten.

Die Bilanzierung erfolgt entsprechend der ISO-Normen 14040 ff. zur Ökobilanzierung in vier Phasen [DIN, 2009]:

- Festlegung des Bilanzraums, Definition der Systemgrenzen,
- Erfassung aller relevanten Prozesse im Bilanzraum,
- Datenerhebung für alle In- und Outputströme,
- Berechnung der THG-Emissionen, Abschätzung der Klimawirkung.



Tabelle 2-2 Klimawirksamkeit der in der Wasserwirtschaft relevanten Treibhausgase [IPCC, 2013]

Treibhausgas	Treibhausgaspotenzial (CO ₂ e) bezogen auf 20 Jahre	Treibhausgaspotenzial (CO ₂ e) bezogen auf 100 Jahre
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	1	1
Methan (CH ₄)	28	28
Distickstoffoxid (Lachgas, N ₂ O)	265	265

Allgemein wird bei der CO₂-Bilanz zwischen zwei Emissionsarten unterschieden. Als **indirekt** werden **Emissionen** bezeichnet, die bei den Herstellungsprozessen der verwendeten Rohstoffe bzw. Materialien und bei der Erzeugung der benötigten Energie entstehen. Hierzu zählen auch die Emissionen bei der Verbrennung von Kraftstoffen in Fahrzeugen. Auf der Kläranlage entstehen diese indirekten Emissionen z. B. beim Verbrauch von Hilfsstoffen und Materialien, welche für den Prozess benötigt werden. Der Einsatz dieser Stoffe auf der Kläranlage verursacht in vielen Fällen unmittelbar vor Ort keine Treibhausgase. Herstellungsprozess und Transport hingegen bewirken relevante Treibhausgasemissionen und werden in der CO₂-Bilanz berücksichtigt. Zu diesen Betriebsmitteln zählen insbesondere Chemikalien zur Fällung von Abwasserinhaltsstoffen, zur Entwässerung sowie zur Regulierung des pH-Wertes oder auch Aktivkohle zur Biogas- bzw. Abwasserreinigung. Die Bilanzierung dieser indirekten Emissionen ist sehr konkret möglich, da die bezogenen Stoff- und Energieströme aus betriebswirtschaftlichen Gründen genau erfasst werden und somit eindeutig bewertet werden können.

Direkte Emissionen bezeichnen Treibhausgasemissionen, welche unmittelbar im Bilanzierungsraum an die Atmosphäre abgegeben werden. In der Wasserwirtschaft handelt es sich hier insbesondere um die Gase CH₄ und N₂O, welche aufgrund ihres hohen Global Warming Potential (GWP) berücksichtigt werden. Bei der Abwasserreinigung bzw. konkret bei der CSB-Elimination wird jedoch auch CO₂ freigesetzt. Da dieses CO₂ nicht fossilen Ursprungs ist, wird es in der CO₂-Bilanz des Wasserkreislaufs nicht berücksichtigt. Direkte Emissionen sind immer sehr stark prozess- und milieuhängig und daher ohne konkrete Messungen nicht quantifizierbar.

Wurden die zu betrachtenden Prozesse innerhalb des Bilanzraums festgelegt, sind für diese Verbrauchsmengen zu erheben, anhand derer sämtliche Emissionsquellen und ggf. auch -senken identifiziert werden können. Dazu gehören neben den Hauptprozessen (z. B. Abwasserreinigungsstufen) auch vor- und nachgelagerte Prozesse (Herstellung bzw. Erzeugung von Materialien und Energie, Transporte, Entsorgung) sowie die Kläranlageninfrastruktur.

Die indirekten Emissionen sowie CH₄ und N₂O werden einheitlich auf CO₂e-Emissionen umgerechnet. Mit sogenannten Emissionsfaktoren (EF) werden die genannten Aktivitätsdaten (Mengen) in resultierende THG-Emissionen (Formel 2-2) überführt.

Formel 2-2 Berechnung der CO₂e-Emissionen

$$\text{CO}_2\text{e} = \sum_{i=0}^n \text{Energie}_i \cdot \text{EF}_i + \sum_{j=0}^n \text{Stoff}_j \cdot \text{EF}_j + \sum_{k=0}^n \text{THG}_k \cdot \text{GWP}_k$$

CO₂e = CO₂-äquivalentes Treibhausgaspotential [t]

Energie_i = Fossile Energiemenge i [kWh]

EF_i = Emissionsfaktor der Energiemenge i [t CO₂e/kWh]

Stoff_j = Stoffmenge j [t]

EF_j = Emissionsfaktor der Stoffmenge j [t CO₂e/t]

THG_k = Treibhausgasmenge k [t]

GWP_k = Treibhausgaspotenzial des Gases k [t CO₂e/t]

Der EF gibt an, welche Menge an CO₂e pro eingesetzter Menge eines Stoffes, eines Produkts oder einer Energieeinheit emittiert wird. Die Summe der THG-Emissionen bzw. der CO₂-Bilanz werden als CO₂e relativ zu einer Aktivitätseinheit (z. B. CO₂ pro m³ Abwasser) ausgedrückt. Die EF sind mittlerweile für viele Produkte und Prozesse in öffentlich zugänglichen Datenbanken (z. B. [GEMIS, 2016]; [BMVBS, 2016]), teilweise in Herstellerinformationen (z. B. [Eyerer und Reinhardt, 2000]) oder in anderen Publikationen (z. B. [Janse und Wiers, 2006]; [Pinnekamp et al., 2011a]) zu finden. Insbesondere für vor- und nachgelagerte Prozesse (Vorketten, Transporte, Entsorgung) reicht es aus, solche Werte zu verwenden. Für alle direkten Emissionen sind nach Möglichkeit eigene Werte zu ermitteln [DIN, 2012]. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass diese Emissionsfaktoren nur sehr allgemeine Abschätzungswerte sind, welche insbesondere für spezifische Produkte, welche in der Wasserwirtschaft eingesetzt werden (z. B. Fäll- und Flockungsmittel) nicht vorliegen. Direkte Emissionen lassen sich wiederum nur durch Messungen für die Anlage verifizieren und können nicht über Rechengrößen abgebildet werden. Scharfe qualitative Aussagen sind daher über solche Bilanzen in der Regel nicht zu erzielen.

Äußerst wichtig für die CO₂-Bilanzierung ist eine klare Festlegung des Bilanzraums mit den relevanten Prozessen. Dies ist häufig sehr schwierig, aber für eine aussagekräftige CO₂-Bilanz, die mit zukünftigen Werten sowie mit anderen Anlagen verglichen werden kann, unerlässlich. Dieser Arbeitsschritt sollte deshalb sehr sorgfältig durchgeführt werden.

2.3.2 Priorisierung von Maßnahmen

Die Priorisierung von Energieeffizienzmaßnahmen wird im Regelfall durch die Erstellung einer Wirtschaftlichkeitsberechnung über das Verhältnis des Aufwands einer Maßnahme (Kosten) zu den Einsparungen (Nutzen) abgebildet. Sie ist als Kosten-Nutzen-Rechnung (vgl. Kapitel 2.3.1.1) definiert. Für eine abschließende Betrachtung der Priorisierung ist eine weitere Bewertung durch betriebliche und strategische Kriterien empfehlenswert. Die zusätzlichen Bewertungskriterien stellen sich wie folgt dar:



1. Energieeinsparpotenzial (absolut)

Stellt das Einsparpotenzial der Maßnahme in kWh/a dar.

2. Planungsaufwand

Stellt den zeitlichen Planungsaufwand der Maßnahme dar.

3. Genehmigung

Erfordert eine Maßnahme eine Änderung der wasserrechtlichen oder baurechtlichen Genehmigung, wirkt sich das auf den Umsetzungszeitraum bzw. auf die Umsetzungsgeschwindigkeit aus.

4. Randbedingungen

Hier können weitere Randbedingungen eingetragen werden, die Einfluss auf die Festlegung der Priorität haben, z. B. bereits vorliegende Planungen/Planungsüberlegungen zu zukünftigen Änderungen oder besonders positive Auswirkungen auf die CO₂-Bilanz.

Durch die zusätzlichen Bewertungskriterien kann sich die Priorisierung der Maßnahme gegenüber einer reinen Kosten-Nutzen-Betrachtung verschieben.

Eine Priorisierung von Energieeffizienzmaßnahmen basiert also nicht rein auf einem Abgleich von Zahlen, sondern verlangt die ausgewogene Berücksichtigung weiterer Kriterien. Besonders bei abhängigen Maßnahmen sind solche Kriterien oftmals ein Hindernis, weswegen diese oft nicht oder nur schleppend umgesetzt werden.

2.3.3 Durchführung der Erfolgskontrolle

Ein Konzept zur Erfolgskontrolle auf einer Kläranlage dient nach einer durchgeführten Energieanalyse zur regelmäßigen Gegenüberstellung der aufgenommenen Energiedaten mit den anlagenspezifischen Idealwerten. Weiterhin ist damit der Erfolg der bereits durchgeführten Maßnahmen aus der Energieanalyse zu überprüfen, um Abweichungen zu erkennen.

Als Ergebnis einer Energieanalyse werden in der Regel summarisch alle Energieeffizienzpotenziale zusammengerechnet. Daraus wird ein Ziel für den zukünftigen Energiebedarf bzw. für die Energieeffizienzsteigerung formuliert. Ein solches Vorgehen führt in der Regel zu schwer erfüllbaren Anforderungen. Dies ist darin begründet, dass manche Optimierungsmaßnahmen keine dauerhafte Energieeinsparung nach sich ziehen, sondern sich insofern dynamisch verändern, als mit dem Lebensalter der Energieverbrauch kontinuierlich bis zum nächsten Reinvestitionszeitpunkt steigen kann. Ein gutes Beispiel hierfür ist der in der Regel größte Energieverbraucher einer klassischen Kläranlage nach dem Belebtschlammverfahren, die Belüftung des biologischen Reaktors.

Bei der energetischen Optimierung des Belüftungssystems gibt es Maßnahmen, die eine bleibende Energieeinsparung erwarten lassen. Hierzu gehören beispielhaft die Anordnung von Belüftern und Umwälzaggregate und die Beckengeometrie. Bei der Erneuerung der Belüfter ergibt sich aber auch ein dynamischer Anteil des Energiebedarfs, da mit der Alterung der Belüfter ein Anwachsen des Drucks und damit ein erhöhter Energiebedarf einhergehen.

In Bild 2-6 wird beispielhaft ein derartiger Verlauf des Belüftungsenergiebedarfs gezeigt. Trotz zweimaliger Säuberung/Reaktivierung stieg der Energiebedarf der Belüftung von 2000 bis 2006 kontinuierlich an. Entsprechend den Empfehlungen einer im Jahr 2006 erstellten Energieanalyse wurden daher in einem gestuften Vorgehen in den Jahren 2007 und 2008 die Belüfter erneuert, sodass sich eine deutliche Energieeinsparung gegenüber dem Betrachtungsjahr der Energieanalyse 2006 ergab. Allerdings ist nur der kleinere Teil dieser Einsparung dauerhaft, verursacht durch eine Optimierung der Belüfteranordnung. Der größere Teil wird in den nächsten 10 Jahren durch den mit der Alterung verbundenen Druckanstieg nach und nach wieder aufgezehrt werden. Ein ähnliches Verhalten – wenn auch nicht in so starkem Maße – zeigen beispielsweise auch Pumpen und hier insbesondere Schneckenpumpen in Betontrögen, bei denen über die Jahre durch Abrieb der Schlupf größer und damit der spezifische Energieverbrauch höher wird.

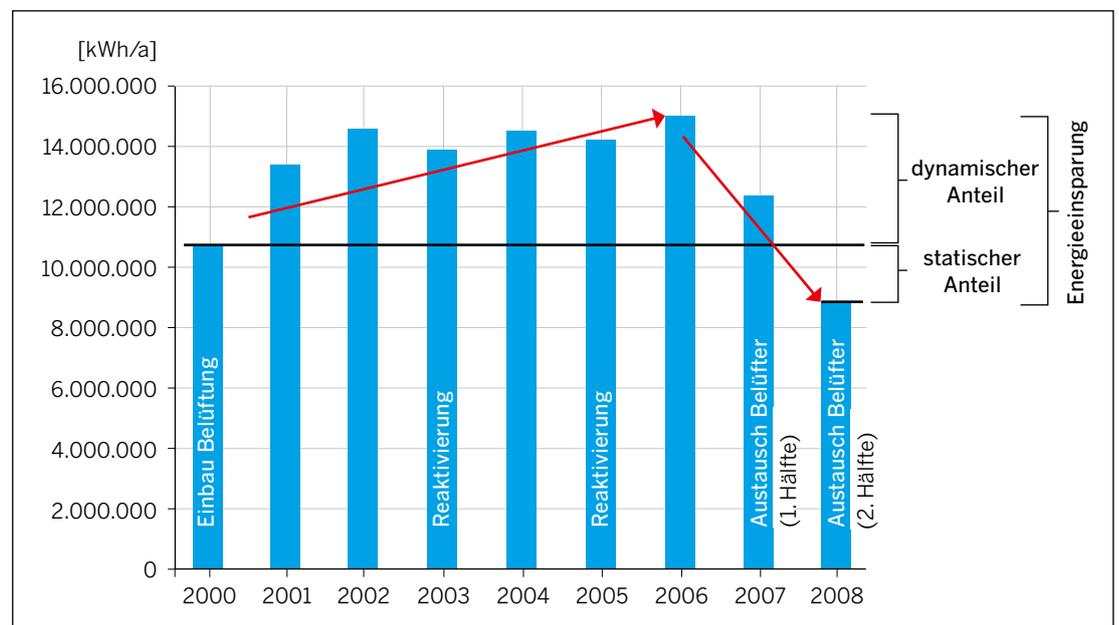


Bild 2-6 Beispiel für die Energieverbrauchsentwicklung einer Belebungsbeckenbelüftung

Für eine Erfolgskontrolle sind solche rein numerischen Betrachtungen nicht hilfreich. Stattdessen sollte aus der Priorisierung der Maßnahmen ein Umsetzungszeitplan entwickelt werden, in dem beschrieben wird, in welchem Jahr welche Maßnahme von Jahresbeginn an in Betrieb genommen bzw. umgesetzt wurde. Anhand dieser eindeutigen Zuweisung von Effizienzmaßnahmen zu Kalenderjahren kann dann sowohl eine Verbrauchsprognose für das nächste Jahr als auch rückblickend eine sinnvolle Vergleichsbasis für die Erfolgskontrolle erstellt werden. Besondere Zeiträume, die nicht der Maßnahme geschuldet waren oder in denen z. B. bestimmte Anlagenteile außer Betrieb waren, sind dabei gesondert zu berücksichtigen.

Insbesondere Maßnahmen, die eine verfahrenstechnische Umstellung bzw. Optimierung beinhalten, müssen in enger Abstimmung mit dem Betrieb evtl. auch in kleineren Schritten erfolgen und sind nachvollziehbar zu dokumentieren. Als Empfehlungen für diese Dokumentation sind unter anderem festzuhalten:

- eindeutige Maßnahmenbeschreibung,
- Nennung der Verantwortlichkeiten,
- Beginn der Maßnahme,
- geplante Dauer und tatsächliche Dauer der Maßnahme,
- geplante Dauer der Erfolgskontrolle,
- durchgeführte Maßnahmen zur Erfolgskontrolle, z. B. Laboranalysen, Ablesungen von Messungen etc.,
- bei Abbruch der Maßnahme Dokumentation der Begründung,
- weitere maßnahmenspezifische Besonderheiten.

Die Ziele einer Erfolgskontrolle mit der Überprüfung der Maßnahmenumsetzung sind:

1. Verifizierung von Prognosen

Vergleich der in einer Energieanalyse prognostizierten Effizienzsteigerung mit den Ist-Werten sowie Überprüfung der prognostizierten Wirtschaftlichkeit.

2. Erkennung von betrieblichen Abweichungen

Frühzeitige Entdeckung von negativen Veränderungen, Leckagen oder Störungen im Betrieb.

Generell ist darauf hinzuweisen, dass die im Rahmen einer Erfolgskontrolle zu vergleichenden Daten immer in Relation zu den aktuellen Rahmenbedingungen (Änderung der Zulaufsituation, Belastung etc.) zu setzen sind.

Wie bei der Ermittlung des Referenzjahres für die Energieanalyse sind auch bei der Erfolgskontrolle Sonderbetriebszustände mit Auswirkungen auf den Energiehaushalt zu erfassen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen zu bewerten.

2.3.4 Energiebilanzierung von Abwasseranlagen

Die energetische Situation von Abwasseranlagen wird im Wesentlichen durch den Verbrauch und die Bereitstellung von elektrischer und thermischer Energie bestimmt. Auf der Grundlage einer für diese Energieformen zu erstellenden Bilanz in Bezug auf festgelegte Systemgrenzen lässt sich eine anlagenspezifische energetische Bewertung für den Ist-Zustand erstellen. Auf dieser Basis können Maßnahmen zur Verbesserung anhand der dadurch eintretenden Veränderungen bewertet werden.

Bei den zu bilanzierenden Anlagen ist zwischen der Abwasserableitung mit den zugehörigen technischen Anlagen sowie Bauwerken und der Abwasserreinigung auf einer Kläranlage zu unterscheiden.

Die für die Abwasserableitung (vgl. Kapitel 3.1) aufzuwendende Energie beschränkt sich vornehmlich auf den Energiebedarf der Pumpwerke und den Kraftstoffbedarf von Reinigungsfahrzeugen. Dabei lässt sich der Energiebedarf der Pumpwerke und fest installierten Reinigungsaggregate sowie der Kraftstoffbedarf der Fahrzeugflotte bilanziell erfassen. Da dies zumeist analog zur Energiebilanzierung auf Kläranlagen durchgeführt werden kann, wird nachfolgend der Fokus auf die bilanzielle Erfassung von Energieverbrauch und -bereitstellung einer Kläranlage gelegt.

Die hohe verfahrens- und energietechnische Komplexität einer Kläranlage erfordert eine Strukturierung mit dem Ziel, den elektrischen und thermischen Gesamtverbrauch auf die verfahrenstechnischen Teilanlagen, Aggregategruppen oder auf Einzelaggregate aufzuteilen.



Mit der in Bild 2-7 dargestellten verfahrenstechnischen Grundstruktur lassen sich nach dem Belebtschlammverfahren mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung betriebene Kläranlagen abbilden.

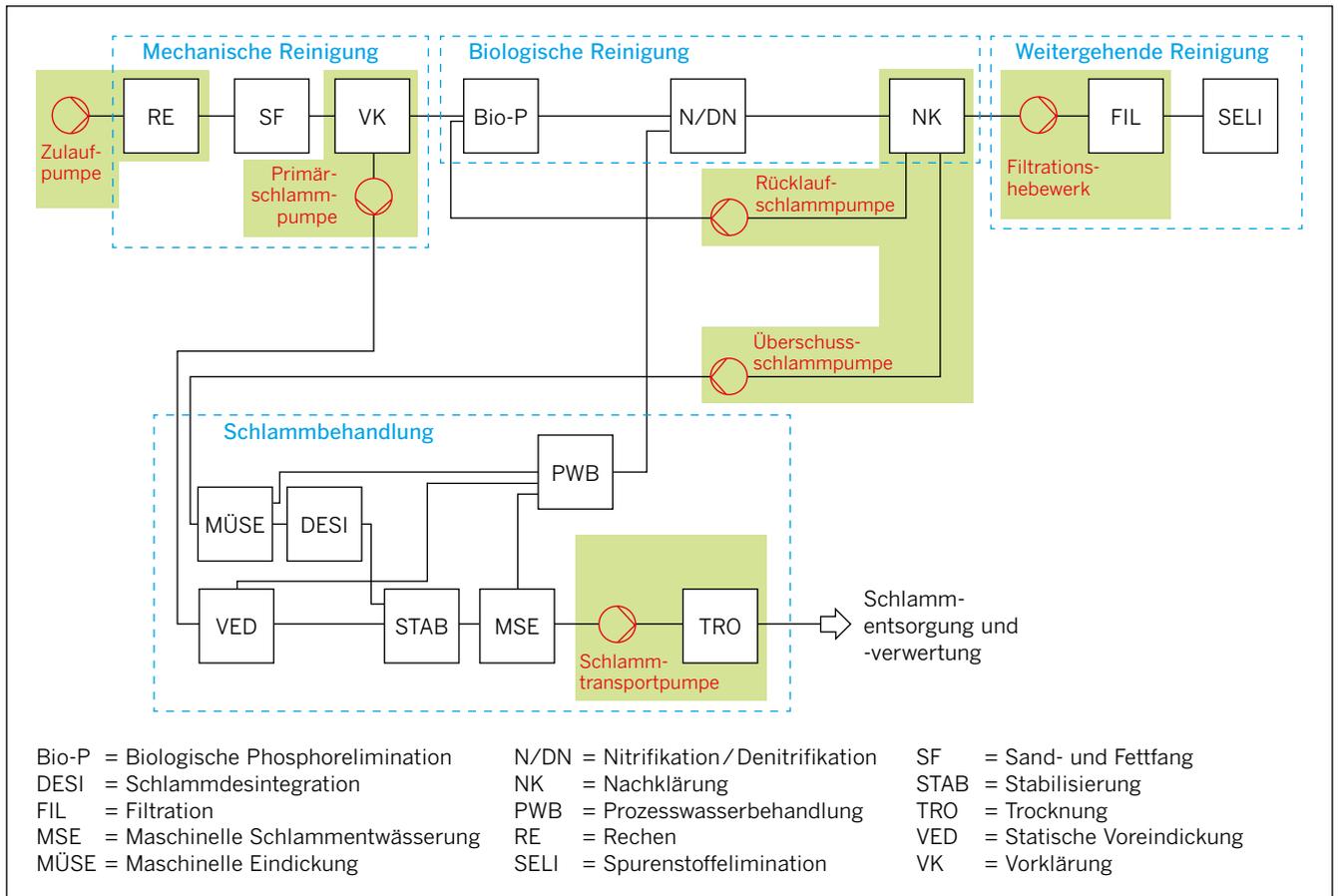


Bild 2-7 Konventionelle Aggregatzuordnung einer nach dem Belebtschlammverfahren betriebenen Kläranlage mit getrennter anaerober Stabilisierung

In der Praxis kommt es trotz der klaren Abgrenzung der Verfahrensstufen teilweise zu erheblichen Streuungen der bilanzierten Verbrauchswerte. Eine Ursache dafür kann die Berücksichtigung der den Verfahrensstufen fest zugeordneten Pumpen (grün eingrahmt) sein, vor allem, wenn deren Verbrauch gegenüber der jeweiligen Verfahrensstufe ins Gewicht fällt. Durch eine separate Betrachtung dieser Pumpen als herausgelöste Bindeglieder zwischen den Verfahrensstufen (Bild 2-8) werden nicht nur die beschriebenen Nachteile vermieden. Es ist darüber hinaus möglich, jede Pumpe aufgrund der topografischen und anlagentechnischen Verhältnisse nach den individuellen Einsatzbedingungen zu beurteilen.

Andere Ursachen für die Streuungen der Verbrauchswerte sind:

- Unterschiedliche energetische Effizienz der elektrischen Aggregate,
- Unterschiedliche Effizienz der Verfahrenstechnik,
- Verschleiß oder Alterung, z. B. bei Pumpenlaufrädern, Membranbelüftern und Getrieben,
- Unterschiedliche Effizienz der Steuer- und Regelkonzepte,
- Belastungsschwankungen, Abwasserzusammensetzung (Abbaubarkeit, Fremdwasser),
- Umbauten, betriebliche Änderungen,
- Falsche Zuordnung von Aggregaten in leittechnischen Prozessbildern oder bei der Generierung von Protokollen und Berichten.

Die Vergleichbarkeit von Verbrauchswerten kann bei Kläranlagen durch Belastungsschwankungen, Umstellungen der verfahrenstechnischen Betriebsweise oder Umbauten stark beeinträchtigt werden. Es ist deshalb wichtig, zur Vorbereitung von Bilanzierungsaufgaben repräsentative Zeiträume möglichst ohne störende betriebliche Einflüsse auszuwählen. Nach Möglichkeit sollte

dies ein Kalenderjahr sein. Es empfiehlt sich darüber hinaus, für ausgewählte Zeiträume aufgetretene Ereignisse oder besondere betriebliche Verhältnisse anhand der Betriebstagebücher zu recherchieren. Falls in keinem der letzten Kalenderjahre ein repräsentativer Betrieb für die Energiedatenerfassung erfolgte, muss durch eine sinnvolle Verknüpfung von Daten mehrerer Kalenderjahre ein fiktives Referenzjahr erzeugt werden.

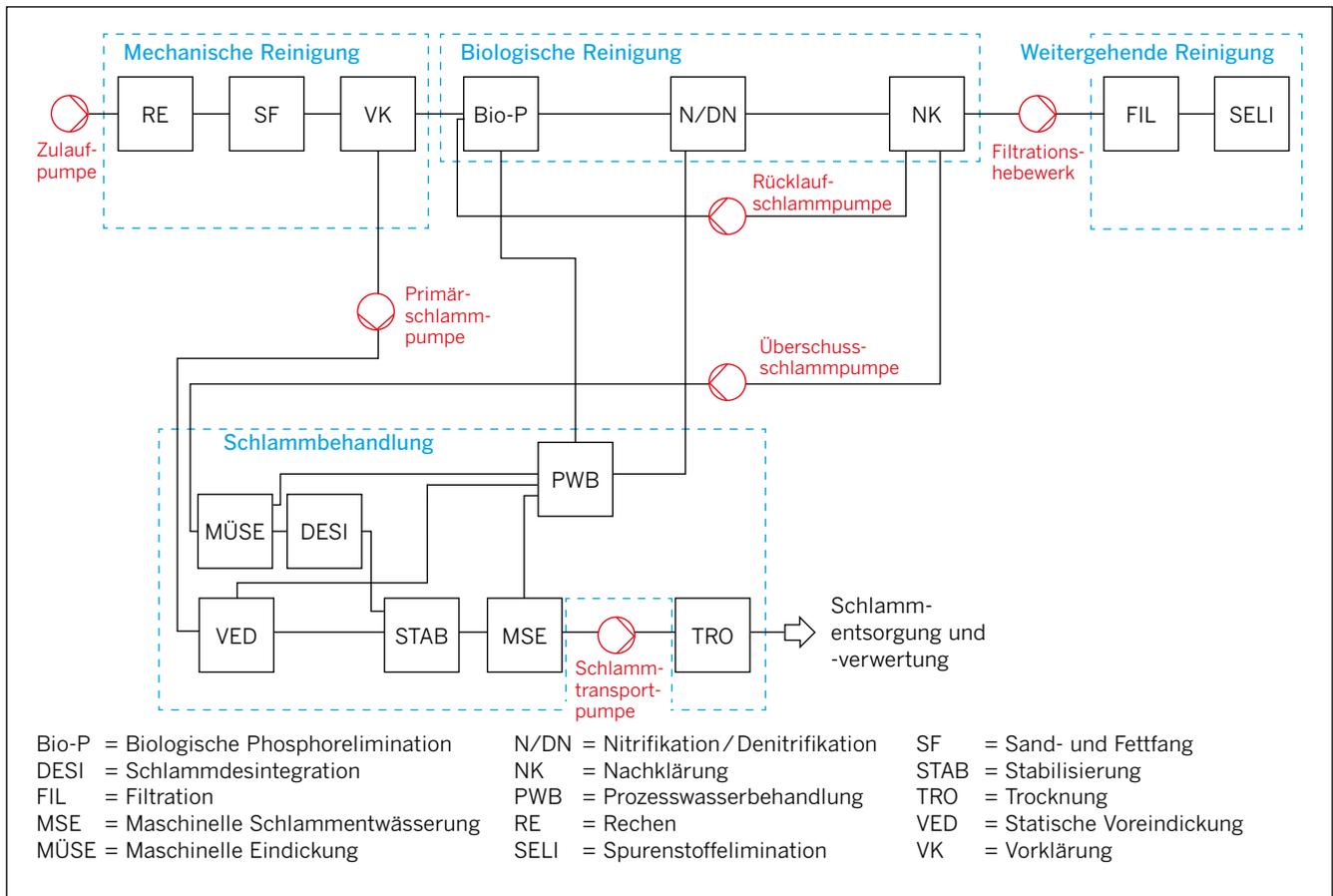


Bild 2-8 Aggregatzuordnung mit separierter Erfassung der Pumpen einer nach dem Belebtschlammverfahren betriebenen Kläranlage mit getrennter anaerober Stabilisierung

2.3.4.1 Energetische Bewertung auf Verbraucherebene

Für die energetische Bewertung einer Kläranlage gibt es aufgrund des verfügbaren Wissens über die verfahrenstechnischen Prozesse und die eingesetzten Aggregate im Wesentlichen folgende Möglichkeiten:

- Vergleich des Energieverbrauchs der Verfahrensstufen mit statistischen Kennwerten oder Vergleich mit berechneten optimalen Verbrauchswerten (DWA-A 216),
- Betrachtung der Kennwerte von Aggregaten nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip, beispielsweise bei einem Verdichter durch Vergleich der aufgenommenen elektrischen Leistung (Ursache) mit der erzeugten Druckluft (Wirkung).



Kennwerte sind dabei ein Oberbegriff für Vergleichswerte, die der Quantifizierung und Bewertung der Energieeffizienz dienen, z. B. kWh/(E·a) oder kWh/(m³·m).

Für beide Möglichkeiten ist die Entwicklung der Kennwerte im zeitlichen Verlauf sinnvoll, weil sich daraus Hinweise auf eine sich verschlechternde Effizienz, den Verschleiß von Maschinen oder ungünstige verfahrens- und anlagentechnische Randbedingungen ableiten lassen.

Bisher war die Betrachtung des Verbrauchs einzelner Verfahrensstufen und ein Vergleich mit einwohnerspezifischen jährlichen Kennwerten üblich. Für Anlagen mit einem auffällig hohen Gesamt-

verbrauch bleibt das auch die bevorzugte Methode, um sich einen Überblick zu verschaffen und Bereiche mit überhöhtem Verbrauch zu identifizieren. Wenn es aber in einem nächsten Optimierungsschritt um die Effizienzsteigerung durch den Einsatz neuer Aggregate oder verfahrenstechnische Umstellungen geht, stößt eine solche Betrachtung wegen der unzureichenden Differenzierung der Verbrauchswerte an ihre Grenzen. Hier hilft oft eine Fokussierung auf die energetisch relevanten Aggregate weiter. Die Energiedaten der Aggregate werden dabei hinsichtlich ihres Verhaltens bei wechselnden Belastungen, bei unterschiedlichen Betriebszuständen, Sommer-/ Winterbetrieb und im langfristigen zeitlichen Verlauf betrachtet.

Durch den vermehrten Einsatz fest installierter Leistungsmessungen kann der Stromverbrauch kontinuierlich aufgezeichnet werden. Die erfassten Leistungswerte können dann mit zugeordneten Prozesswerten zu energetischen Kennwerten im Sinne einer Ursache-Wirkungs-Beziehung verknüpft werden. Durch eine formelmäßige Verknüpfung der Ursache (elektrischer Leistungsbedarf) mit der physikalischen Wirkung (eine bestimmte Menge Wasser auf eine bestimmte Höhe fördern) über möglichst kurze Zeitabschnitte ist die Aussagekraft in Bezug auf den energetischen Zustand eines Aggregates größer als bei der bisher üblichen statistischen Betrachtung über lange Zeiträume. Die ständige Aufzeichnung mit fest installierten Leistungsmessgeräten ist darüber hinaus ein wesentliches Element zur Beurteilung umgesetzter Optimierungsmaßnahmen (Erfolgskontrolle s. Kapitel 2.3.3).



Eine Bilanzierung der Wärme wurde bisher als nachrangig angesehen, weil sie häufig im Überschuss vorhanden war. Durch den vermehrten Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung ergeben sich aber auch hier höhere Anforderungen an die Bilanzierung und die dazu erforderliche messtechnische Ausstattung (siehe Kapitel 2.3.4.3.2).



Zudem sollte der Kältebedarf einer Kläranlage, z. B. zur Klimatisierung der Schaltschrankräume, ermittelt werden. Dieser lässt sich über die Richtlinie VDI 2078 [VDI, 2015] zur Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen berechnen. Die Richtlinie dient der Berechnung für Räume aller Art, mit und ohne Klimatisierung, und berücksichtigt die relevanten Parameter, die das thermische Raumverhalten beeinflussen. Anlagenteile, wie maschinelle oder natürliche Lüftung sowie Flächenheizung oder -kühlung sind integraler Bestandteil des Berechnungsverfahrens. Alternativ kann bei strombetriebenen Klimageräten auch der Stromverbrauch als Anhaltspunkt für den Kältebedarf herangezogen werden. Bei Adsorptions- oder Absorptionskältemaschinen sind die zugeführte Wärmemenge und der Stromverbrauch zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 5.6.2).



2.3.4.2 Energetische Betrachtung auf Bereitstellerebene

Die Energiebereitstellung auf Kläranlagen war ursprünglich geprägt durch die elektrische Vollversorgung (100 % Fremdstrombezug) und bei Anlagen mit anaerober Schlammbehandlung durch eine fast vollständige Wärmeversorgung, wobei im Winter teilweise Fremdenergie (Heizöl, Erdgas, Propangas) zugeführt werden musste und im Sommer überschüssiges Gas abgefackelt wurde. Durch den verbreiteten Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW-Anlagen) haben sich die Verhältnisse zu einer anteiligen Eigenversorgung mit Strom und zugleich zu einer Reduzierung des Wärmeüberschusses im Sommer verschoben. Für die Betrachtung der Erzeugerebene ist es wichtig, dass bei einer Darstellung stets alle Energiearten berücksichtigt sind und dass maschinen- oder verfahrensspezifische Abhängigkeiten beachtet werden (Bild 2-9). Beim Einsatz von BHKW-Anlagen bleibt das Verhältnis der aus dem Gas produzierten Energiearten Strom (ca. **30 – 40 %**), Abgaswärme (**20 %** auf einem Temperaturniveau von ca. 500 °C) und Kühlwasserwärme (**20 %** auf Niedertemperatur von 80 – 90 °C) auch bei wechselnder Last nahezu unverändert. Etwa 20 % der eingesetzten Energie gehen als nicht nutzbare Abwärme verloren.



Wegen der begrenzten Speichermöglichkeiten kommt es in der Regel für die einzelnen Energiearten zu einer zeitweiligen Über- oder Unterdeckung. Beim Strom erfolgt der Ausgleich durch Fremdbezug aus dem Netz der allgemeinen Versorgung oder durch Rückspeisung in das Netz der allgemeinen Versorgung.

Nicht benötigte Wärme wird üblicherweise über Kühler an die Atmosphäre abgegeben. Fehlende Wärme muss durch Erzeugung beispielsweise aus Gas oder Öl in einem Heizkessel ausgeglichen werden.

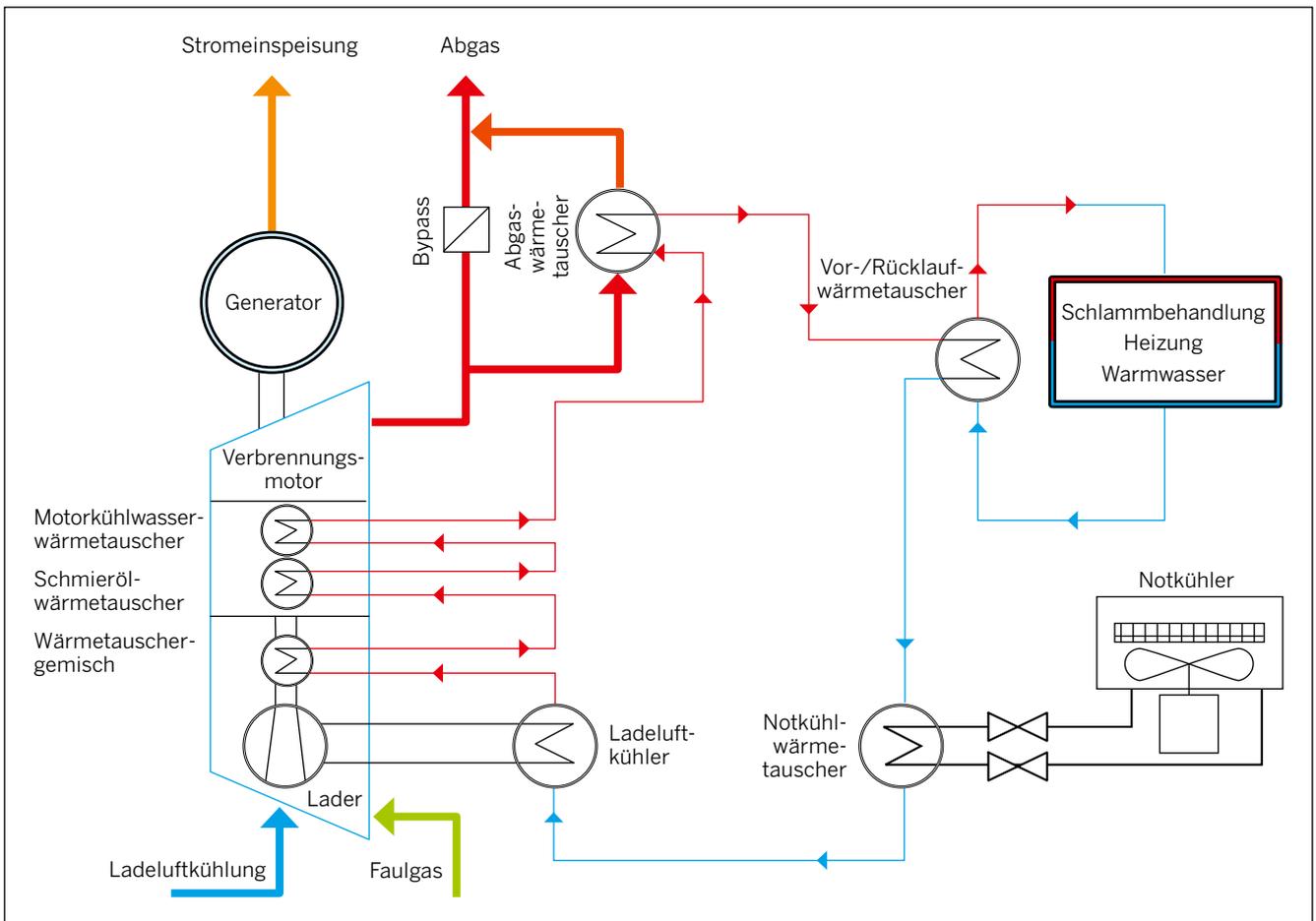


Bild 2-9 Energiefluss in einem Blockheizkraftwerk

2.3.4.3 Darstellung der Bereitsteller und Verbraucher im Energiefließbild

Die ursprüngliche Vollversorgung durch Fremdstrombezug auf der elektrischen Seite und die Nutzung des produzierten Faulgases nur zur Wärmeerzeugung sind weitgehend durch den Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung abgelöst worden. Neue Energiekonzepte beschäftigen sich u. a. mit der Aufbereitung und Einspeisung des Faulgases in das öffentliche Gasnetz, der Nutzung des aufbereiteten Faulgases in Kraftfahrzeugen, der Nutzung überschüssiger Wärme zur Kälteerzeugung sowie der Rückgewinnung von Wärme aus Abwasser oder Schlamm. Hinzu kommt der Einsatz von Windkraft-, Photovoltaik- und Wasserkraftanlagen zur Stromerzeugung oder der Einsatz solar- oder geothermischer Anlagen zur Wärmeerzeugung am Standort. Ein wichtiger Aspekt bei der Bilanzierung von Wärme und Kälte ist die Differenzierung nach den unterschiedlichen Temperaturniveaus (vgl. Kapitel 5.4.1).



Für die systematische zeichnerische Darstellung von Energiesystemen mit gemischten Energiearten (Gas, Wärme, Strom) mit der Möglichkeit einer einfachen Bilanzierung gibt es keine verbindlichen Richtlinien. Der in Bild 2-10 dargestellte Vorschlag eines Energiefließbildes basiert auf wenigen energetischen Grundelementen (Bereitsteller, Verbraucher, Speicher, Wandler etc.). Diese werden ergänzt durch komplexe Blöcke für bekannte Aggregate oder Teilanlagen (BHKW, Schlammverbrennung etc.) mit definierten internen Umwandlungsprozessen. Die Darstellung im Energiefließbild beschränkt sich jedoch wie bei einer Black Box auf die von außen erreichbaren Anschlüsse für die Ein- und Ausgänge der unterschiedlichen Energiearten. Energieknoten bündeln gleichartige Energien auf einem unmittelbar austauschbaren Niveau. Für die elektrische Energie sind das gewissermaßen die Sammelschienen auf den unterschiedlichen Spannungsebenen (10 kV, 400 V). Bei der Wärme entsprechen die Knoten beispielsweise den Vor- und Rücklaufverteilern des Heizungssystems. Die verbindenden Linien beschreiben den Energietransport. Die Darstellung entspricht weitgehend der eines Netzes; die Bilanzierung eines Systems ergibt sich insofern durch eine Summierung an den Energieknoten. Das Energiefließbild ist als eigenständige Darstellung verwendbar. Es sollte allerdings bei komplexen Anlagen in Verbindung mit einem RI-Fließbild zur

Darstellung der verfahrenstechnischen Verhältnisse, des Stofftransports und der Umwandlungsprozesse eingesetzt werden.

Alternativ lassen sich Gesamtbilanzen mit Sankey-Diagrammen (Beispiel siehe Bild 2-11) darstellen, oder man behilft sich mit Kommentierungen (Temperaturangaben, Wärmemengen) in den verfahrenstechnischen Fließbildern.

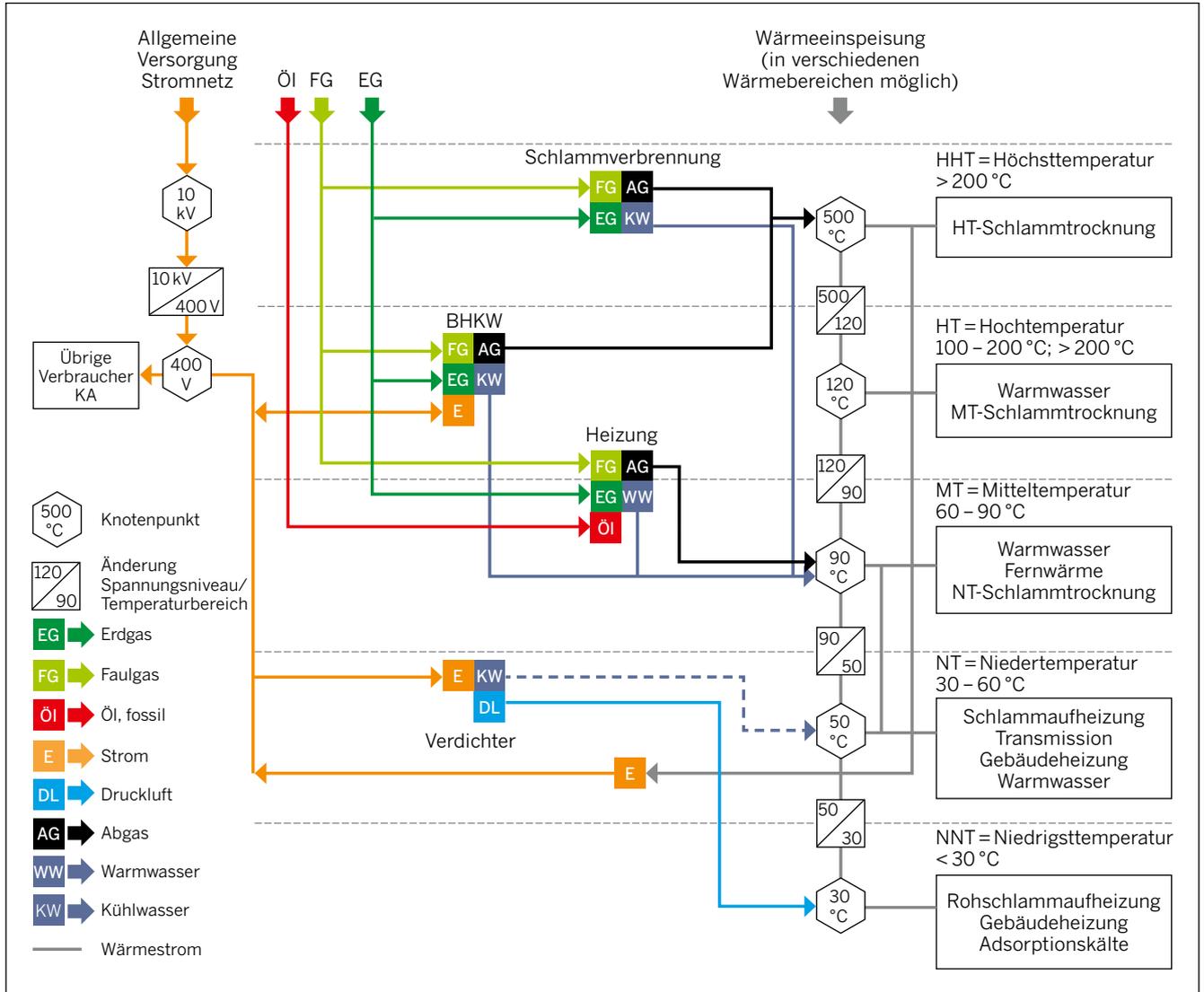


Bild 2-10 Beispielhafte Darstellung von Erzeuger- und Verbraucherebene in einem Energiefließbild

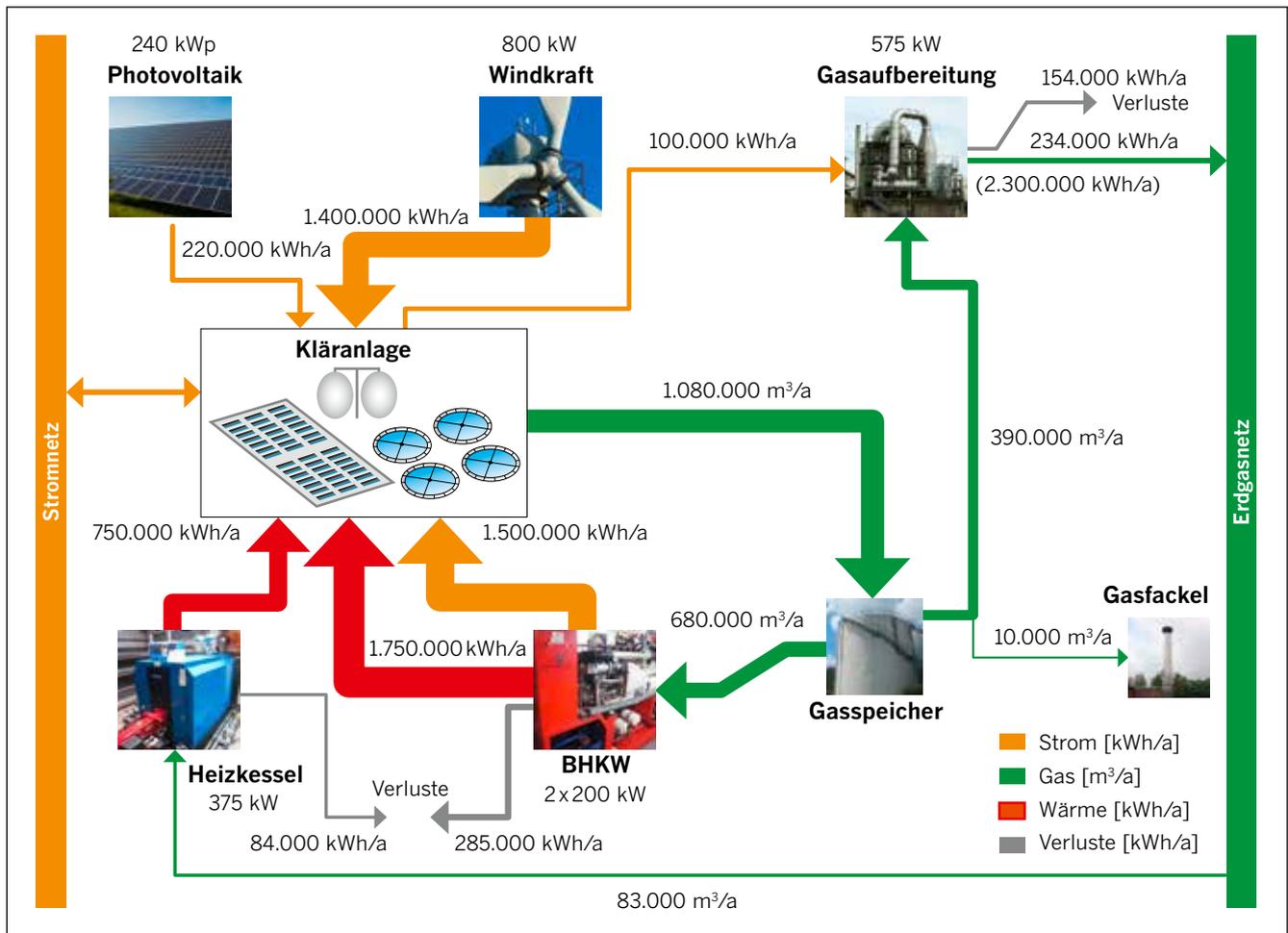


Bild 2-11 Beispielhafte Darstellung der Energieströme in einem Sankey-Diagramm

2.3.4.3.1 Messkonzept für elektrische Energie

Für die Energiebilanzierung der elektrischen Energie müssen angepasste Messkonzepte entwickelt werden, mit denen der Energieverbrauch an der richtigen Stelle und in der jeweils erforderlichen zeitlichen Auflösung und Qualität bzw. Genauigkeit erfasst wird.

Bei der konventionellen Vorgehensweise werden die relevanten Verbraucher einzeln in einer Verbrauchermatrix erfasst, in der aufgrund von stichprobenartigen Leistungsmessungen und entsprechenden Laufzeiten (Betriebsstunden) die jährlichen Verbrauchswerte berechnet werden (vgl. Kapitel 2.2). Diese Vorgehensweise ist bei dauernd mit gleicher Leistung laufenden Aggregaten immer noch sinnvoll. Bei Antrieben mit belastungsabhängig schwankender Leistungsaufnahme muss eine Datenaufnahme über einen repräsentativen Zeitraum erfolgen. Der ermittelte Verbrauch wird dann für die Verfahrensstufen zusammengefasst und mit Referenzwerten oder den Werten aus dem Vorjahr verglichen. Durch eine energetische Bewertung lässt sich das Potenzial für einzelne Verfahrensstufen oder Aggregate ableiten.

Der Trend geht deshalb zum Einsatz kontinuierlicher Leistungsmessungen, einerseits, weil die technische und preisliche Entwicklung für derartige Messgeräte günstig verläuft und weil andererseits in vielen Aggregaten eine Leistungsmessung bereits integriert ist. Bei der Bewertung von Aufwand und Nutzen sind auch die automatisierungstechnische Einbindung und die Projektierung der Archivsysteme zu berücksichtigen. Die regelmäßige Überprüfung der Funktion und Genauigkeit kann durch eine Plausibilisierung unterstützt werden. Das kann durch den Vergleich mit ähnlichen Werten, durch Teilbilanzierungen oder durch die Bildung von Kennzahlen mit Bezug auf die verfahrenstechnischen Prozesswerte erreicht werden.

Ohnehin ist bei vielen Anlagen schon heute der Datenumfang so groß, dass eine Einzelkontrolle sämtlicher Werte kaum noch zu bewältigen ist. Eine konventionelle zeitliche Verdichtung bringt an dieser Stelle keinen Gewinn; es werden dadurch möglicherweise sogar auffällige Werte geglättet und Unregelmäßigkeiten dadurch nicht rechtzeitig erkannt. Eine sinnvolle Reduzierung ergibt sich durch eine strukturierte Konzentration ursächlich zusammenhängender Werte, u. a. in Form von Kennzahlen oder durch die mathematische Beschreibung von Abhängigkeiten. Eine bisher noch wenig genutzte Möglichkeit ist die grafische Darstellung in Kennfeldern und eine entsprechende Mustererkennung. Für eine einfache Pumpe würde man hierzu auf das konventionelle Pumpenkennfeld (Q-H-Diagramm mit Pumpenkennlinie) zurückgreifen und die tatsächlichen Betriebswerte online in diesem Diagramm darstellen.

Bei der Auswahl von Messgeräten ist generell zu beachten, dass der ursprünglich sinusförmige Verlauf des Wechselstroms heute durch den Einsatz dezentraler Erzeugungsanlagen, geregelter Antriebe, Vorschaltgeräte von Leuchtstofflampen, Schaltnetzteile von Computern und ähnliche Verbraucher gestört wird. Bei Leistungsmessgeräten, die einen sinusförmigen Verlauf als Grundlage für die interne Berechnung der Leistung voraussetzen, können erhebliche Fehler im Bereich bis etwa 10 % auftreten. Es sollten daher für die mobile und stationäre Erfassung und bei höheren Ansprüchen an die Genauigkeit nur Messgeräte eingesetzt werden, die verzerrte Kurvenformen auswerten können (Effektivwertmessgeräte).

Um bei geregelten Antrieben die Leistungsaufnahme auch mit Messgeräten zu erfassen, die einen sinusförmigen Verlauf voraussetzen, wird in der Praxis die Leistung immer „vor“ dem Frequenzumformer gemessen. Dies hat zur Folge, dass realistische Vergleiche nur noch für den gesamten Antriebsstrang und nicht mehr für die Einzelkomponenten möglich sind.

2.3.4.3.1.1 Datenerfassung mit mobilen Geräten

Für die in der Verbrauchermatrix aufzuführenden Aggregate werden mit einem mobilen Energieanalysator oder einem Leistungsmessgerät stichprobenartige Messungen unter Betriebsbedingungen durchgeführt. Weiterhin wird aus Betriebsprotokollen oder durch Erfassung von Betriebsstundenzählern die jährliche Laufzeit ermittelt. Der Stromverbrauch eines Aggregates ergibt sich dann als Produkt aus gemessener Leistung und der Laufzeit. Aggregate mit veränderlicher Leistung (geregelter Pumpen und Verdichter) lassen sich nach dieser Methode nur ungenau erfassen. Hier wird der Verbrauch oft über Mittelwerte aus mehreren Einzelmessungen hochgerechnet.

Dieses Messkonzept hat den Nachteil, dass Aggregate mit wechselnder Belastung, die heute einen wesentlichen Anteil am Gesamtverbrauch ausmachen, nur mit unzulänglicher Genauigkeit erfasst werden. Bei einer Addition aller Einzelverbraucher und Verteilverluste müsste der Gesamtverbrauch dem Wert der bereitgestellten elektrischen Energie (Fremdbezug + Eigenerzeugung) exakt entsprechen. Erfahrungsgemäß trifft das nicht zu, die Abweichungen liegen in der Regel bei 10 – 15%. Dieser Fehler pflanzt sich in den berechneten Kennwerten fort, ohne dass erkennbar wäre, welche Teilanlage speziell davon betroffen ist.

2.3.4.3.1.2 Online-Erfassung über Zähler in den Verteilungen

Durch eine Erfassung der Verbrauchswerte in den elektrischen Haupt- bzw. Unterverteilungen mit kontinuierlicher Leistungsmessung lassen sich die Nachteile mobiler Einzelmessungen vermeiden. Allerdings muss aus wirtschaftlichen und technischen Gründen (Platzverhältnisse) die Anzahl der Zähler begrenzt bleiben. Dieses Ziel lässt sich durch die elektrotechnische Zusammenfassung der Aggregate auf getrennten Sammelschienen im Sinne der verfahrenstechnischen Einteilung (mechanische und biologische Stufe, Schlammbehandlung etc.) erreichen.

Dadurch wird aber die Verfügbarkeit der Leistungsversorgung bei Störungen oder bei Instandhaltungsarbeiten und damit die verfahrenstechnische Ausfallsicherheit der Anlage deutlich eingeschränkt. Diese Nachteile können durch eine zweiseitige Einspeisung einer Unterverteilung vermieden werden. In diesem Fall muss allerdings bei der Projektierung beachtet werden, dass in beiden Strängen der Stromfluss stets zum Verbraucher gerichtet ist und unerwünschte Rückflüsse über eine der beiden Versorgungsleitungen vermieden werden.

Weiterhin findet man bei einer durch hohe Verfügbarkeitsanforderungen geprägten Bauweise oft verfahrenstechnisch falsch zugeordnete Aggregate (Kellerentwässerungspumpen, Hilfsaggregate, Elektroheizungen etc.). Diese schalten unkontrolliert und müssen mühsam aus der Bilanz herausgerechnet werden.

Zu berücksichtigen sind zudem branchentypische Versorgungskonzepte wie bei einem Nachklärbeckenräumer. Wegen der Drehbewegung mit zentralem Anschluss aller Versorgungs- und Rohrleitungen im Mittelbauwerk wird die elektrische Leistung über Schleifringe übertragen. Diese wird dann vor Ort in einem Schaltkasten auf die Einzelantriebe verteilt. In der Regel kann dann nur der Abgang zum Räumer noch einzeln erfasst werden. Für die in kalten Regionen ins Gewicht fallende Räumerlaufbahnheizung ist zu unterscheiden zwischen einer stationären Beheizung der Betonoberfläche mittels Heizbändern, die über ein fest installiertes Kabel aus einer Unterverteilung versorgt wird, und einer „mitfahrenden“ Beheizung, beispielsweise mit einem Heizstrahler, die an den Schaltkasten auf dem Räumer angeschlossen ist.

Der Aufbau der Verteilungsnetze auf Kläranlagen ist im Wesentlichen standardisiert. Üblicherweise wird die Energie strahlenförmig von der Einspeisung ausgehend verteilt. Das hat gegenüber anderen Netzformen (Maschennetz) große Vorteile in Bezug auf die Ausfallsicherheit und die Fehlererkennung. Erhöhte Anforderungen an die Verfügbarkeit können durch Aufteilung von Sammelschienen in mehrere Abschnitte erfüllt werden. Eine typische Verteilungsstruktur zeigt Bild 2-12. Dort sind drei typische Aufbautechniken für Unterverteilungen dargestellt:

- Typ A (grün) ist eine hoch verfügbare Verteilung mit getrennten Sammelschienenabschnitten, wie sie bei Belebungsstufen mit mehreren Gebläsen eingesetzt wird. Hier müssen stets zwei Leistungsmessungen installiert werden.
- Typ B (orange) ist für die Versorgung von Kompaktanlagen (Räumer, Nachklärung) geeignet.
- Typ C (blau) ist eine einfache Verteilung, wie sie bei der Schlammbehandlung angewendet wird.
- Typ D (schwarz) ist ein direkter Abgang von der Niederspannungshauptverteilung, beispielsweise für hoch verfügbare Einzelverbraucher (Hochwasserpumpen).

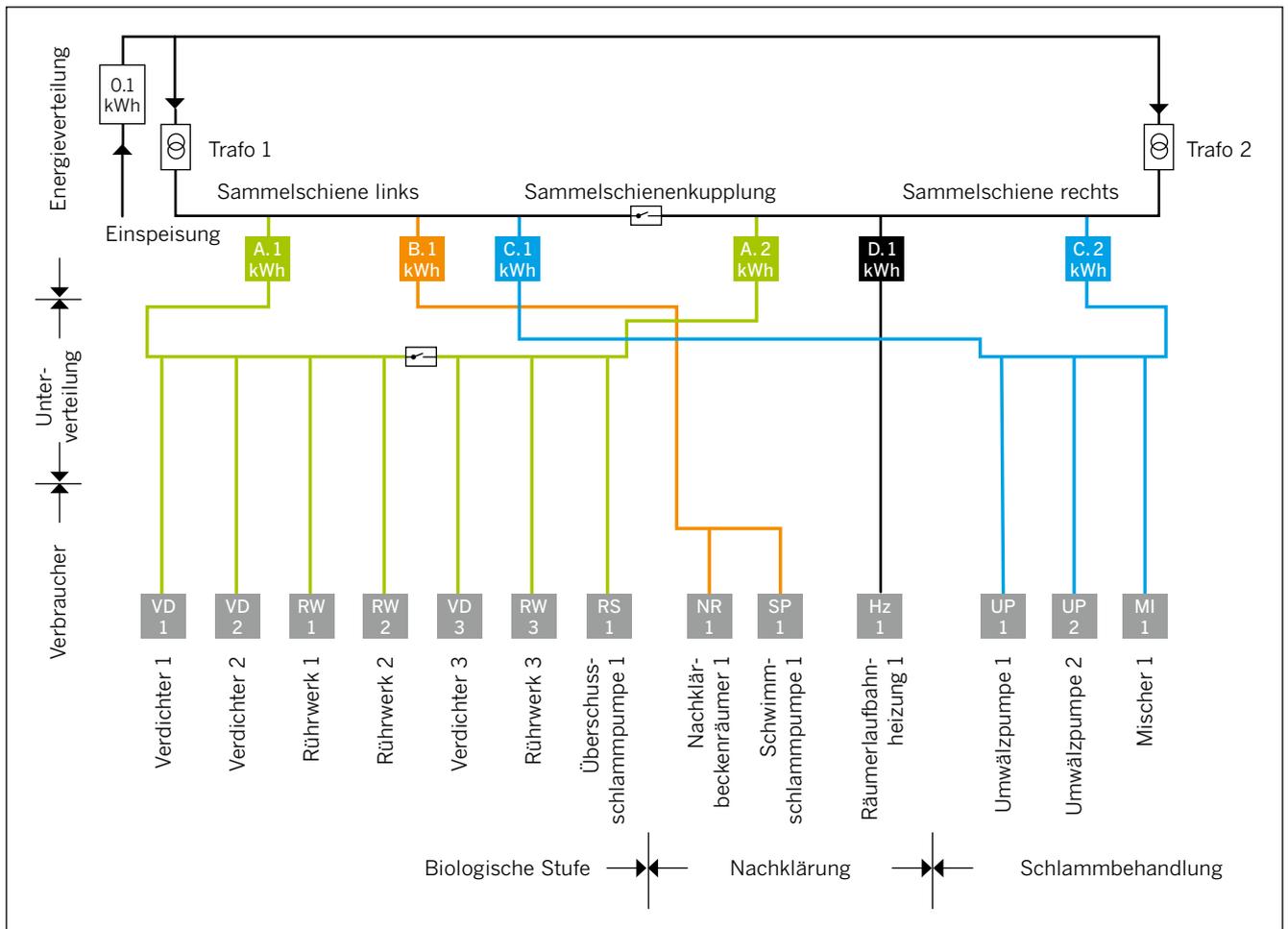


Bild 2-12 Messkonzept mit Messungen in Verteilungen für ausgewählte Verbraucher

In dem dargestellten Beispiel sind neben den verfahrenstechnischen Aggregaten auch Abgänge für die sog. Licht- und Kraftverteilung (Beleuchtung, Kellerentwässerungspumpen, Kompressoren etc.) an die jeweiligen Sammelschienenabschnitte angeschlossen. Dieser anteilige Verbrauch kann bei einer Messung/Zählung auf Unterverteilebene nicht separiert werden und führt zu Ungenauigkeiten bei der Erstellung der Verbrauchermatrix. Im Beispiel ist die Überschussschlamm-pumpe an die Verteilung der biologischen Stufe angeschlossen. Insgesamt führt ein Messkonzept mit Leistungsmessungen an den Unterverteilebenen dazu, dass die Aufteilung des Gesamtverbrauchs auf die Teilanlagen nur unvollständig gelingt und die verbleibende Differenz nicht eindeutig zugeordnet werden kann.

2.3.4.3.1.3 Direktmessungen an Aggregaten nach dem 80:20-Prinzip

Durch eine Direktmessung an den Aggregaten können Fehler, die sich durch fehlerhafte Bilanzierung oder falsche Zuordnung von Aggregaten zu den Unterverteilebenen ergeben, vermieden werden. Im Beispiel nach der neuen verfahrenstechnischen Aufteilung (Bild 2-13) werden im Vergleich zu Bild 2-12 die Überschussschlamm-pumpen diesmal getrennt von den verfahrenstechnischen Stufen bewertet. Eine solche Einzelmessung für alle Verbraucher ist allerdings nicht erforderlich. Aufgrund von Erfahrungswerten kann man davon ausgehen, dass hier das bekannte Pareto-Prinzip gilt, nach dem 80 % des Ergebnisses nur 20 % des Aufwands gegenüberstehen.

Umgesetzt auf die bisher dargelegten Beschreibungen der Versorgungsstruktur und der Aufteilung der Aggregate nach Leistungsgrößen bedeutet dies Folgendes: Die Direktmessung ist für eine überschaubare Anzahl wesentlicher Verbraucher oder Hauptaggregate ausreichend (vgl. Tabelle 2-3), um den überwiegenden Anteil des Stromverbrauchs direkt, ursachenbezogen und frei von fehlerhaften Zuordnungen nachzuweisen. Der gemessene Wert entspricht der Leistung des Aggregats. Durch Summierung können Verbrauchswerte für Gruppen (Druckluftherzeugung) gebildet werden.

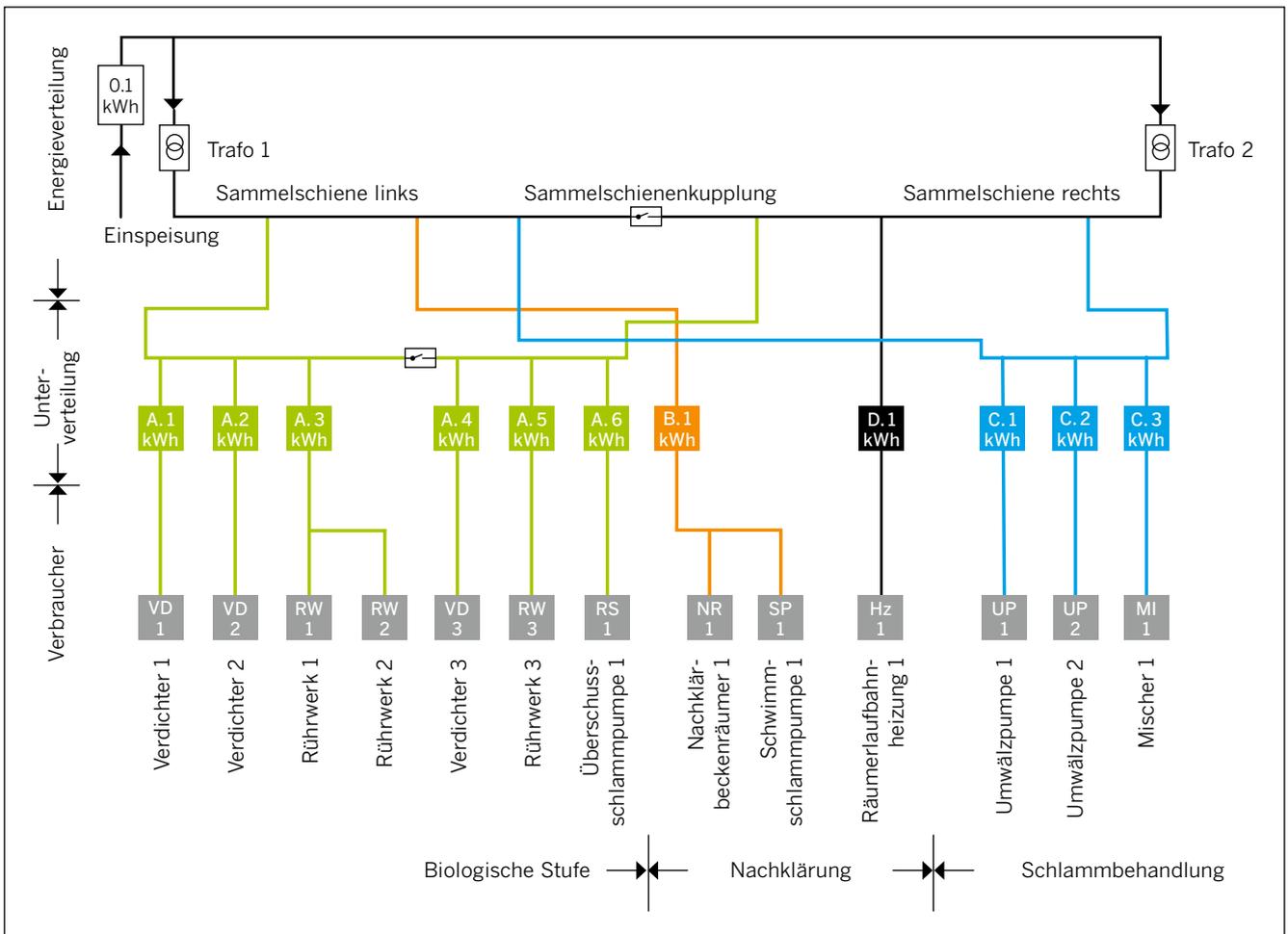


Bild 2-13 Messkonzept mit Direktmessungen für ausgewählte Verbraucher

2.3.4.3.1.4 Zuordnung der Aggregate zu den Verfahrensstufen

Nach der vorgestellten Abgrenzung der einzelnen Verfahrensstufen (Bild 2-8) und einer Bewertung nach der Relevanz für die energetische Bilanzierung sowie unter Berücksichtigung weiterer Anforderungen (u. a. Arbeitsblatt DWA-A 216) [DWA, 2015a] (vgl. Kapitel 2.2) sind in der Tabelle 2-3 die üblicherweise eingesetzten Aggregate getrennt nach Verfahrensstufen aufgelistet.



Im Rahmen einer Energiebilanzierung bzw. eines angepassten Messkonzepts ist es notwendig, die relevanten Messungen strukturiert und anhand ihrer Priorität festzulegen. Es soll vermieden werden, zu viele oder zu wenige Messungen auf der Abwasseranlage durchzuführen. Grundsätzlich wird dabei unterschieden zwischen Messungen, die jeder Anlagenbetreiber im Rahmen des Energiechecks im Sinne einer Selbstüberwachung durchführen sollte und solchen, die für eine energetische Bilanzierung der betrachteten Abwasseranlage empfehlenswert sind. Die hierfür notwendigen Messgeräte sollten im Rahmen eines Ausrüstungsplans nachgerüstet werden. Hilfsweise kann es z. B. im Rahmen einer Energieanalyse sinnvoll sein, die entsprechenden Aggregate mit mobilen Messgeräten zu erfassen. Bei mobilen Messungen sollten aber die Vorgaben der Tabelle 2-3 bereits berücksichtigt werden. Neue Aggregate können heute bereits mit Messsystemen ausgestattet werden. Darauf sollte bei einer Neuausrüstung immer geachtet werden. Jeder Anlagenbetreiber sollte ein Messkonzept sowie einen zeitabhängigen Ausrüstungsplan erstellen. Eine Hilfestellung hierzu gibt Tabelle 2-3. Unterschieden wird in dieser Tabelle zwischen den Stufen 1 bis 3.

Mit den in Stufe 1 vorgeschlagenen Messungen lassen sich die für den Energiecheck nach dem Arbeitsblatt DWA-A 216 erforderlichen Kennwerte für den Energiebedarf der Belüftung und der Pumpen bestimmen.

Diese Messungen werden in der Stufe 2 um die Erfassung einiger zusätzlicher Hauptverbraucher erweitert, deren Erfassung immer zu empfehlen ist.

Durch kläranlagenspezifische Randbedingungen ist es möglich, dass die in Stufe 2 empfohlenen Messungen nicht ausreichend sind, um rd. 80 % des Gesamtstromverbrauchs der betrachteten abwassertechnischen Anlage zu messen. Daher lassen sich mit den in Stufe 3 enthaltenen Messungen üblicherweise rund 80 % des Gesamtstromverbrauchs erfassen und die Datengrundlage für eine Energieanalyse schaffen. Werden mit den aufgeführten Messungen deutlich weniger als 80 % des Gesamtstromverbrauchs erfasst, sind unter Beachtung kläranlagenspezifischer Randbedingungen weitere Verbraucher zu messen. Die Auswahl dieser weiteren Verbraucher sollte sich an dem Produkt der installierten Leistung und den Betriebsstunden der noch nicht erfassten Aggregate, beginnend mit dem höchsten Wert, orientieren.

Zu unterscheiden ist bei den empfohlenen Messungen zwischen der Messung jedes einzelnen Aggregats (grün) und einer Summenmessung aller Aggregate der Verfahrensstufe (orange).

Eine Aufschaltung der gemessenen Leistungswerte auf das zentrale Prozessleitsystem ist nicht zwingend für alle Messungen erforderlich; durch regelmäßiges Ablesen der Werte ist auch ein Offline-Betrieb möglich. Das Aufschalten auf das PLS-System ermöglicht jedoch eine kontinuierliche Beurteilung der energetischen Situation ohne größeren Ableseaufwand und wird daher empfohlen.

Bei Feldern ohne Eintragung ist zunächst ohne Betrachtung der kläranlagenspezifischen Randbedingungen keine Messung erforderlich.

Tabelle 2-3 Orientierungshilfe zur Erfassung des Stromverbrauchs einzelner Aggregate getrennt nach Verfahrensstufen

Aggregatliste					
Prozess	Kürzel	Verfahrenstechnische Aggregate	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Abwasserableitung					
Pumpwerke und Kanal	PWK	Gesamt			
		Pumpen	Einzel	Einzel	Einzel
		Elektroheizung	-	-	Summe
		Be- und Entlüftung	-	-	-
		Reinigungseinrichtungen	-	-	Summe
		Elektro-Schieber	-	-	-
Regenbecken	RB	Gesamt	-	-	Summe
		Rührwerke	-	-	Summe
		Strahlreiniger	-	-	Summe
		Pumpen	-	-	Summe
Mechanische Reinigung					
Rechen	RE	Gesamt			
		Rechen	-	-	Summe
		Rechenguttransport	-	-	-
		Rechengutentwässerung	-	Einzel	Einzel
		Rechengutwäsche	-	-	-
Sandfang	SF	Gesamt			
		Sandfanggebläse	-	-	Einzel
		Sandfangräumer	-	-	Summe
		Sandentnahmepumpe	-	-	-
		Sandfanggutwäscher Klassierer	-	-	-

Aggregatliste					
Prozess	Kürzel	Verfahrenstechnische Aggregate	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Vorreinigung	VK	Gesamt			
		Vorklärbeckenräumer	-	-	Summe
		Schwimmschlammpumpe	-	-	Summe
		Fettpumpen	-	-	-

Biologische Reinigung					
Biologische Phosphorelimination	BioP	Gesamt			
		Rührwerke zur Durchmischung	-	-	Summe
Denitrifikation	DN	Gesamt			
		Rührwerke zur Durchmischung	-	-	Summe
		Rezirkulationspumpe	-	Einzel	Einzel
Denitrifikation Nitrifikation	DN/N	Gesamt			
		Druckluftherzeugung	Summe	Einzel	Einzel
		Fällmitteldosierung	-	-	-
		Rührwerke zur Belüftungsunterstützung	-	-	Summe
		Rührwerke zur Durchmischung	-	-	Summe
Nitrifikation	NI	Gesamt			
		Druckluftherzeugung	Summe	Einzel	Einzel
Nachklärung	NK	Gesamt			
		Nachklärbeckenräumer	-	-	Summe
		Schwimmschlammumpen	-	-	Summe
		Schwimmschlammzerstörung	-	-	-
		Bewegliche Zu- und Abläufe	-	-	-

Weitergehende Reinigung					
Filtration	FIL	Gesamt			
		Druckluftherzeugung	-	Einzel	Einzel
		Spülluftgebläse	-	-	Summe
		Spülwasserpumpe	-	-	Summe
		Schlammwasserpumpe	-	-	Summe
Spurenstoffelimination	SELI	Gesamt			
		Ozongenerator	-	Einzel	Einzel
		Sauerstofferzeugung/-Lieferung	-	Einzel	Einzel
		Restozonvernichter	-	Summe	Summe
		Ozoneintrag	-	-	Summe
		Mischer Aktivkohle	-	-	-
		Aktivkohledosierpumpen	-	-	Summe
		UV-Bestrahlung	-	Summe	Einzel
Rührwerk zur Durchmischung	-	-	Summe		
Desinfektion	DES	Gesamt			
		UV-Bestrahlung	-	Summe	Summe

Aggregatliste					
Prozess	Kürzel	Verfahrenstechnische Aggregate	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Schlammbehandlung					
Maschinelle Eindickung	MÜSE	Gesamt			
		ÜS-Siebtrommel	-	Einzel	Einzel
		ÜS-Flotation	-	Einzel	Einzel
		ÜS-Dekanter	-	Einzel	Einzel
		ÜS-Scheibeneindicker	-	Einzel	Einzel
		ÜS-Bandfilter	-	Einzel	Einzel
		ÜS-Eindickschnecke	-	Einzel	Einzel
Statische Voreindickung	VED	Gesamt			
		PS-Siebtrommel	-	-	Summe
		PS-Pressen	-	-	Summe
		Krählwerk	-	-	-
Schlammintegration	DESI	Gesamt			
		Zentrifuge	-	Einzel	Einzel
		Ultraschallverfahren	-	Einzel	Einzel
		Hochdruckverfahren	-	Einzel	Einzel
		Kugelmühlen	-	Einzel	Einzel
		Strahlverfahren	-	Einzel	Einzel
Stabilisierung	STAB	Gesamt			
		Umwälzpumpe	-	Einzel	Einzel
		Heizschlammumwälzpumpe	-	Einzel	Einzel
		Mischer	-	-	Summe
Hygienisierung	SH	Gesamt			
		Hygienisierung	-	-	Summe
Schlamm Lagerung	SL	Gesamt			
		Rührwerke zur Durchmischung	-	-	Summe
Schlamm entwässerung	MSE	Gesamt			
		Dekanter	-	Einzel	Einzel
		Hochleistungszentrifuge	-	Einzel	Einzel
		Kammerfilterpresse/KFP Befüllpumpe	-	Einzel	Einzel
		Membranfilterpresse/MFP Befüllpumpe	-	Einzel	Einzel
		Bandpresse	-	Einzel	Einzel
		Rührwerk/Mixer	-	-	Summe
Trocknung	TRO	Gesamt			
		Kreislaufventilator	-	-	Summe
		Trommeltrockner	-	-	Summe
		Bandtrockner	-	-	Summe
		Rohrtrockner	-	-	Summe
		Solartrocknung	-	-	Summe
		Kühlschnecke	-	-	Summe
		Kondensatpumpe	-	-	Summe

Aggregatliste					
Prozess	Kürzel	Verfahrenstechnische Aggregate	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Gasverwertung					
Faulgas	FG	Gesamt			
		Druckerhöhung (Gasspeicher) nur HD	-	-	Summe
		Druckerhöhung (Verwertung) nur Mikrogasturbine	-	-	Summe
		Gasreinigung	-	-	Summe
		BHKW-Eigenverbrauch	-	-	Summe
		Mikrogasturbine Eigenverbrauch	-	-	Summe
Hebe- & Pumpwerke					
Hebe- & Pumpwerke	PW	Gesamt			
		Zulaufpumpe/-hebwerk	Einzel	Einzel	Einzel
		Zwischenhebwerk/ Beschickung	Einzel	Einzel	Einzel
		Primärschlammpumpe	-	Einzel	Einzel
		Überschussschlammpumpe	-	Einzel	Einzel
		Rohschlammumpen	-	Einzel	Einzel
		Faulschlammumpen	-	Einzel	Einzel
		Rücklaufschlammpumpe	-	Einzel	Einzel
		Förderbänder	-	-	Summe
		Filtrat-/Trübwasserpumpen	-	Einzel	Einzel
		Kohlenstoffdosierpumpe	-	-	-
		Beschickungspumpe allgemein	-	-	Summe
		Brauchwasserpumpen	-	-	Summe
Sonstiges					
Prozessnahe Infrastruktur	PIN	Gesamt			
		Abluftbehandlung (bei abgedeckten Kläranlagen)	-	-	(Summe)
		Automatisierung	-	-	Einzel
		Containeranlagen	-	-	-
		Rohrbegleitheizung	-	-	-
		Räumerlaufbahnheizung	-	-	-
		Rinnenbelüftung	-	-	-
		Dezentrale Wasserbereitstellung	-	-	-
Zu und Abluft	-	-	-		
Übergeordnete Infrastruktur	ÜIN	Gesamt			
		Zentrale Pneumatik	-	-	-
		EDV (mit zentralen Serveranlagen)	-	-	(Summe)
		Klimatisierung	-	-	-
		Automatisierung, PLS	-	-	-

Aggregatliste					
Prozess	Kürzel	Verfahrenstechnische Aggregate	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Übergeordnete Infrastruktur (Fortsetzung)	ÜIN	Labor	-	-	-
		Heizungspumpen	-	-	-
		Elektroheizung	-	-	Einzel
		Wärmepumpen	-	-	Einzel
		Werkstattausrüstung	-	-	-
		Beleuchtung	-	-	-
		Druckerhöhungsanlagen	-	-	-

Stufe 1 Messungen für den Energiecheck nach DWA-A 216

Stufe 2 Erfassung zusätzlicher Hauptverbraucher, deren Erfassung immer zu empfehlen ist

Stufe 3 Durch kläranlagenspezifische Randbedingungen ist es möglich, dass die in Stufe 2 empfohlenen Messungen nicht ausreichend sind, um rd. 80 % des Gesamtstromverbrauchs der betrachteten abwassertechnischen Anlage zu messen. Daher lassen sich mit den in Stufe 3 enthaltenen Messungen üblicherweise rd. 80 % des Gesamtstromverbrauchs erfassen und die Datengrundlage für eine Energieanalyse schaffen. Werden mit den aufgeführten Messungen deutlich weniger als 80 % des Gesamtstromverbrauchs erfasst, sind unter Beachtung kläranlagenspezifischer Randbedingungen weitere Verbraucher zu messen. Die Auswahl dieser weiteren Verbraucher sollte sich an dem Produkt der installierten Leistung und den Betriebsstunden der noch nicht erfassten Aggregate, beginnend mit dem höchsten Wert, orientieren.

Einzel Jedes Einzelaggregat messen

Summe Summierte Messung aller Einzelaggregate

2.3.4.3.2 Messkonzept für thermische Energie

Die Erfassung des Wärme- und Kälteverbrauchs wird zukünftig für die energetische Optimierung aus folgenden Gründen immer wichtiger: Einerseits ist für den auf Kläranlagen verbreiteten Betrieb von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen die jahreszeitlich geprägte Dynamik des Wärmebedarfs interessant. Andererseits sollte bei einem Fehlbedarf schon aus Gründen des Klimaschutzes möglichst keine Primärenergie in reine Wärme umgesetzt werden. Darüber hinaus werden durch gesetzliche Regelungen (KWKG, EnEV) immer häufiger messtechnisch belegte Nachweise verlangt.

Im Vergleich zu Messgeräten für die elektrische Leistung sind Geräte zur Erfassung der Wärmemenge (Wärmezähler) bei ähnlichen Anforderungen an die Qualität (Genauigkeit, Eichung etc.) deutlich teurer. Darüber hinaus ist die Installation mit höherem Aufwand verbunden. Ein Messkonzept wie das für die elektrischen Verbraucher vorgeschlagene mit Einzelmessungen für alle relevanten Verbraucher ist daher weniger geeignet. Hinzu kommt, dass wärmerrelevante Größen wegen der anlagentechnischen Randbedingungen nicht getrennt erfasst werden können. Das trifft beispielsweise für den als wichtig einzustufenden Wärmebedarf eines Faulbehälters zu. Der Wärmebedarf setzt sich zusammen aus dem Anteil für die Schlammaufheizung und dem Anteil zum Ausgleich der Transmissionsverluste (vgl. Kapitel 3.5.4.2). Beide Größen sind jedoch wegen der anlagentechnischen Verschaltung des Schlammwärmeübertragers im laufenden Betrieb nur in der Summe erfassbar.

Weil im Vergleich zur elektrischen Seite eine kontinuierliche Erfassung aller Verbrauchsdaten keine wesentlichen betrieblichen Vorteile bringt, wird für den Wärmebereich ein Messkonzept auf der Basis festgelegter Messprozeduren vorgeschlagen. Diese können aus wirtschaftlichen Gründen mit einer vertretbar geringen Zahl von Wärmezählern durchgeführt werden. Häufig reicht es im Wärmebereich für die betriebliche Bilanzierung aus, über Einzelmessungen die für den Verbrauch relevanten Koeffizienten zu bestimmen. Dann kann mit hinreichender Genauigkeit der Wärmebedarf bei unterschiedlichen Randbedingungen (Außentemperaturen) rechnerisch ermittelt werden.

Unabhängig davon bleibt die Möglichkeit, für einzelne als wichtig angesehene Bereitsteller oder Verbraucher separate stationäre und zweckgebundene Wärmezähler einzusetzen, z. B. für die von einem BHKW abgegebene Wärme an einen Heizkreis oder für den Anteil, der über den Notkühler an die Umgebung abgegeben wird.

Eine Messprozedur ist im Wesentlichen dadurch charakterisiert, dass aus dem laufenden Betrieb heraus festgelegte Einstellungen an der Anlage vorgenommen werden, mit denen die gewünschten wärmetechnischen Größen für eine repräsentative Zeit erfasst werden. Die Vorgehensweise wird nachfolgend an einfachen Beispielen erläutert.

■ **Faulbehälter**

Für den Betrieb der Schlammbehandlung reicht grundsätzlich die Kenntnis des gesamten Wärmebedarfs eines Faulbehälters, der sich aus dem Wärmebedarf für die Schlammaufhebung und den Transmissionsverlusten zusammensetzt, aus. Um dennoch die beiden Größen einzeln zu ermitteln, kann die Schlammzufuhr zeitweise abgestellt werden; dann werden von dem installierten Wärmezähler nur die Transmissionsverluste erfasst. Aus diesen Daten lässt sich unter Berücksichtigung der Bauwerksdaten und der Temperaturdifferenz der Wärmedurchgangskoeffizient ermitteln. Mit Hilfe dieses Wertes kann der Wärmebedarf rechnerisch mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden.

Diese Betriebsmethode zeichnet sich durch ihre unkomplizierte Durchführbarkeit aus und dient zur ersten wärmetechnischen Einstufung eines Faulbehälters. Sie kann variabel auf die anlagentechnischen Verhältnisse und die vorhandene messtechnische Ausrüstung abgestimmt werden. Beispielsweise kann bei fehlendem Wärmezähler die Wärmemenge auch aus der Temperaturabsenkung des Faulbehälters über 1–2 Tage bestimmt werden. Die praktische Durchführung eines Versuchs ist im Arbeitsblatt DWA-A 216, Anhang A.2 [DWA, 2015a] beschrieben.

■ **BHKW – thermische Leistung und thermischer Wirkungsgrad**

BHKW-Anlagen sind in der Regel aufgrund gesetzlicher Forderungen mit einem Wärmezähler ausgestattet, mit dem die Nutzwärme ohne die über einen Notkühler an die Umgebung abgegebene Wärme erfasst wird. Für die Überprüfung der thermischen Leistung muss zeitweise dafür gesorgt werden, dass sämtliche produzierte Wärme in den Heizkreis abgegeben und mit dem Zähler erfasst wird. Dazu muss die Regelung der Wärmeverteilung ggf. im Handbetrieb so eingestellt werden, dass die gesamte produzierte Wärme abgenommen wird. Üblicherweise gelingt das durch eine manuelle oder automatische Vorgabe der maximalen Leistung für den Schlammwärmetauscher des Faulbehälters. So wird beispielsweise der Dreiwegemischer im Heizkreis des Schlammwärmetauschers vollständig geöffnet oder ein erhöhter Temperatursollwert für den Faulbehälter vorgegeben.

Gerade bei der Erneuerung von Heizungssystemen und Wärmeverteilern können durch die Verschaltung des Verteilsystems mit wenig Aufwand vielfältige Messmöglichkeiten geschaffen werden. In der Regel werden alle relevanten Temperaturen (Außenluft, Abwasser, Rohschlamm, Faulschlamm etc.) aufgrund der Verpflichtung zur Selbstüberwachung erfasst. Das gilt ebenso für den Wasser- und Schlammtransport. Durch eine regelmäßige Durchführung der immer gleichen Messprozeduren können Bilanzen aufgestellt und Veränderungen an der Gesamtanlage und an den gemessenen Teilanlagen in ihrer zeitlichen Entwicklung beobachtet werden. Möglicherweise lohnt es sich auch, die Durchführung solcher Prozeduren zu automatisieren.

Eine bisher nur selten genutzte Möglichkeit ist die Ermittlung der Wärmeleistung bzw. Wärmemenge aus vorhandenen betrieblichen Messeinrichtungen. Für die Bestimmung sind eine Durchflussmessung und zwei Temperaturmessungen erforderlich. Gerade in dem interessierenden Bereich der Schlammbehandlung werden heute fast sämtliche Einzelmengen mit Durchflussmessgeräten (IDM) erfasst. An den Ein- und Austrittspunkten der wichtigsten Stufen (Faulbehälter) und Apparaturen (Schlammwärmetauscher) befinden sich Temperatursensoren. Es ist also ohne großen Aufwand möglich, aus diesen Werten rechnerisch die Wärmeleistung online zu bestimmen.

Erweiterte Bilanzierung nach Temperaturniveau

Bei zukünftigen Energiekonzepten ist von einem vermehrten Einsatz regenerativer Wärmeerzeuger und vor allem einer Wärmerückgewinnung auszugehen. Im Vergleich zu einer konventionellen Wärmeversorgung fällt die Wärme dann nicht in dem bisher üblichen Bereich von 70–90 °C an, sondern in mehreren unterschiedlichen Temperaturniveaus (vgl. Kapitel 5.4.1).

Bei der Erfassung von Wärmemengen und der Erstellung von Wärmebilanzen ist eine einfache Summation zwar mathematisch und physikalisch richtig, führt aber zu falschen konzeptionellen

Schlussfolgerungen. Die Wärmemengen müssen deshalb für einzelnen Temperaturniveaus getrennt erfasst werden. Dies lässt sich anschaulich an dem in Bild 2-14 dargestellten Beispiel einer Kläranlage darstellen. Hier erfolgt die Strom- und Wärmeversorgung mittels Kraft-Wärme-Koppelung (BHKW, Abgas- und Kühlwasserwärme – Wärmehähler 1.01, Mitteltemperatur 60–95 °C). Die Schlamm aufheizung wird durch eine Wärmerückgewinnung aus dem ausgefaulten Schlamm mittels eines sogenannten Rekuperators (Wärmehähler 1.02, Temperaturniveau 25–35 °C) unterstützt.

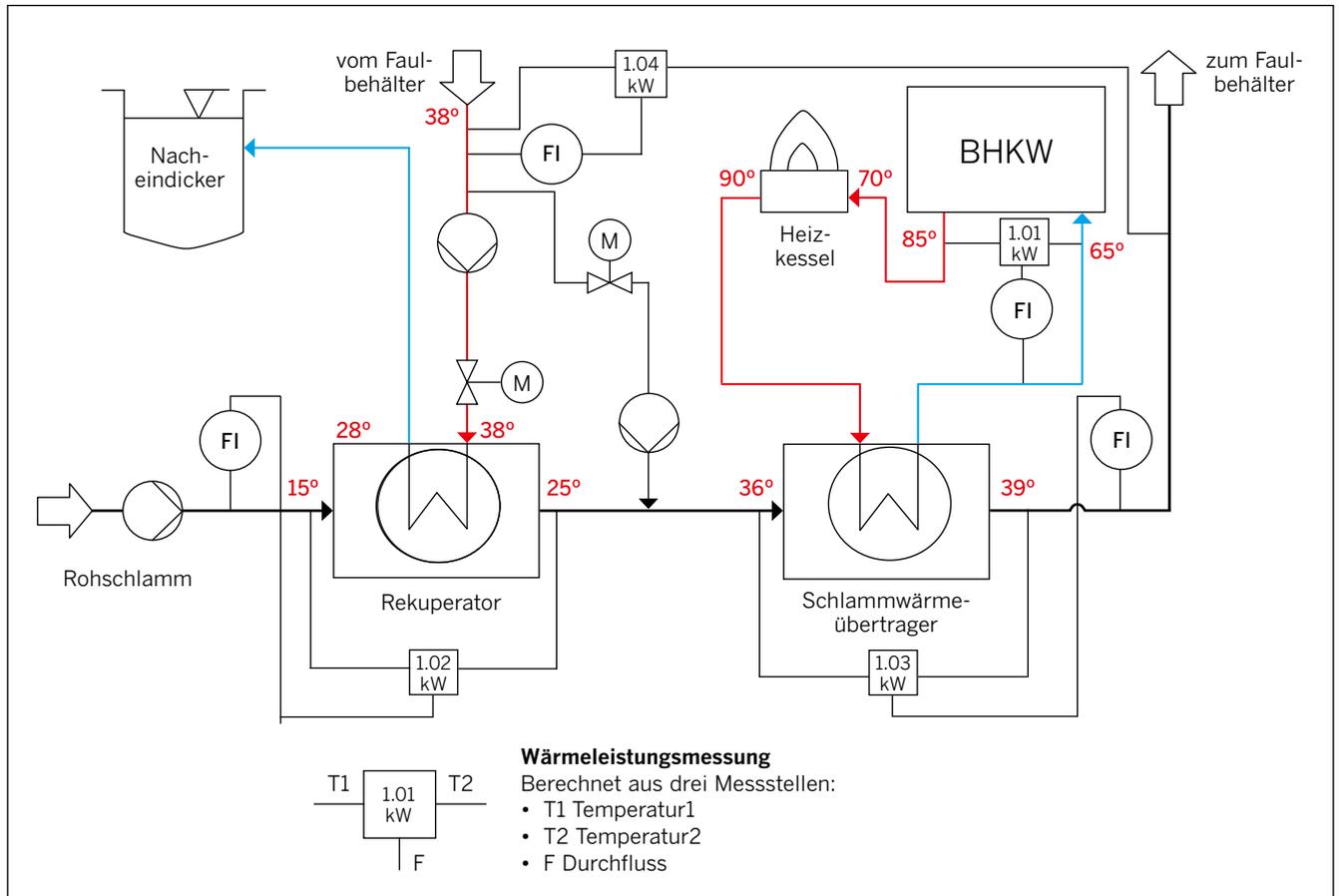


Bild 2-14 Messkonzept thermische Energie für einen Faulbehälter mit Wärmerückgewinnung (Rekuperator)

Das Messkonzept basiert auf einer einzigen geeichten Wärmemessung, mit der aufgrund gesetzlicher Anforderungen die vom BHKW erzeugte Nutzwärme erfasst wird (MW = direkter, ggf. geeichter Messwert). Alle weiteren Wärmemengen lassen sich in diesem Beispiel aus bereits vorhandenen Messstellen als Rechenwert (RW) kombinieren. Dazu wird der für das zu betrachtende Teilsystem (z. B. Rekuperator) relevante Durchfluss, hier die Rohschlammmenge, mit den Temperaturmesswerten am Ein- und Ausgang des Systems rechnerisch im Leitsystem zu einem Leistungswert verknüpft.

- Wärmehähler 1.01 abgegebene Nutzwärme BHKW (MW)
- Wärmehähler 1.02 Wärmezufuhr Rekuperator/Rohschlamm (RW)
- Wärmehähler 1.03 Wärmezufuhr Schlammwärmübertrager (RW)
- Wärmehähler 1.04 Wärmeaufnahme Faulbehälter (RW)

2.3.4.3.3 Messkonzept für Faulgas

Die messtechnische Erfassung von Faulgasmengen und deren Bilanzierung ist eine wesentliche Grundlage für die energetische Analyse, als Auslegungsgröße für die Anlagen zur Faulgasnutzung und für den energetisch optimierten Betrieb. Die messtechnischen Möglichkeiten werden ausführlich im Merkblatt DWA-M 264 [DWA, 2015b] behandelt. Dort wird auch die Auswahl geeigneter Messorte erläutert. Grundsätzlich ist die Erfassung der Faulgasmenge umso schwieriger, je näher man an den Faulbehälter als eigentliche Quelle heranrückt, weil das aus dem Faulbehälter austretende Gas sehr feucht ist, zur Tropfenbildung an den Sonden neigt und noch stark verunreinigt ist. Bei einer vorhandenen Gasreinigung (Kiesfilter, Entschwefelung, ggf. Aktivkohlefilter zur Siloxan-entfernung) (vgl. Kapitel 5.2.4) ist der Aufwand für eine hinreichend genaue Mengenummessung deutlich reduziert.



Konventionelle Messkonzepte basieren auf einer Gasanfallmessung in der vom Faulbehälter abgehenden Gasleitung und einer Gasverbrauchsmessung im Hauptstrang hinter der Gasreinigung. Grundsätzlich müssten die beiden Messergebnisse bis auf die ggf. auftretenden Fackelverluste übereinstimmen. In der Praxis treten allerdings teilweise sehr große Abweichungen auf, die auf die sog. Pendelung des Gases zwischen Faulbehälter und Gasspeicher zurückzuführen sind. Beim Beschicken des Faulbehälters, beim Ein- und Ausschalten von Mischeinrichtungen sowie aufgrund von schwankenden Außentemperaturen kann es zu einer ansonsten unschädlichen Rückströmung von Faulgas in den Faulbehälter kommen. Weil die eingesetzten Messgeräte nicht in der Lage sind, die Fließrichtung zu erkennen, wird diese Menge dann noch zwei Mal (Rückströmung + erneute Vorwärtsströmung) erfasst und summiert. Eine deutlich höher liegende Gasanfallmessung gegenüber der Gasverbrauchsmessung ist ein Anzeichen für das Auftreten der beschriebenen Effekte. Diese Nachteile lassen sich durch eine konsequente Erfassung der Gasmengen auf der Verbraucherebene vermeiden (siehe Messstellen 2.01 bis 2.03 in Bild 2-15).

Nicht wenige der auftretenden Probleme bei der Faulgasnutzung lassen sich auf die Anordnung des Gasbehälters und der Gasleitungen zurückführen. Bei der Anordnung im Nebenschluss liegt der Gasbehälter in einem Bypass und wird nur von der Gasmenge durchströmt, die im laufenden Betrieb nicht unmittelbar genutzt werden kann. Schwankungen der Gasqualität werden bei dieser Anordnung nicht ausgeglichen und führen zu Messfehlern und beispielsweise zum unruhigen Lauf von BHKW-Aggregaten (durchgestrichener Gasbehälter in Bild 2-15). Durch eine Anordnung im Hauptschluss wird das gesamte Speichervolumen auch für den Ausgleich der Gasqualität genutzt.

Die Faulgasproduktion kann durch Summierung aller Verbraucher zzgl. Fackelverlusten (ermittelt über Fackelbetriebsstunden) rechnerisch ermittelt werden. Das Wechselspiel zwischen Faulbehälter und Gasbehälter ist für eine Bilanzierung nicht relevant. Durch die Messung auf Verbraucherebene kann die jeweilige Gasmenge unmittelbar dem jeweiligen Verbraucher zugeordnet werden. Damit lassen sich Wirkungsgrade von Erzeugungsanlagen (BHKW, Heizung etc.) überprüfen.

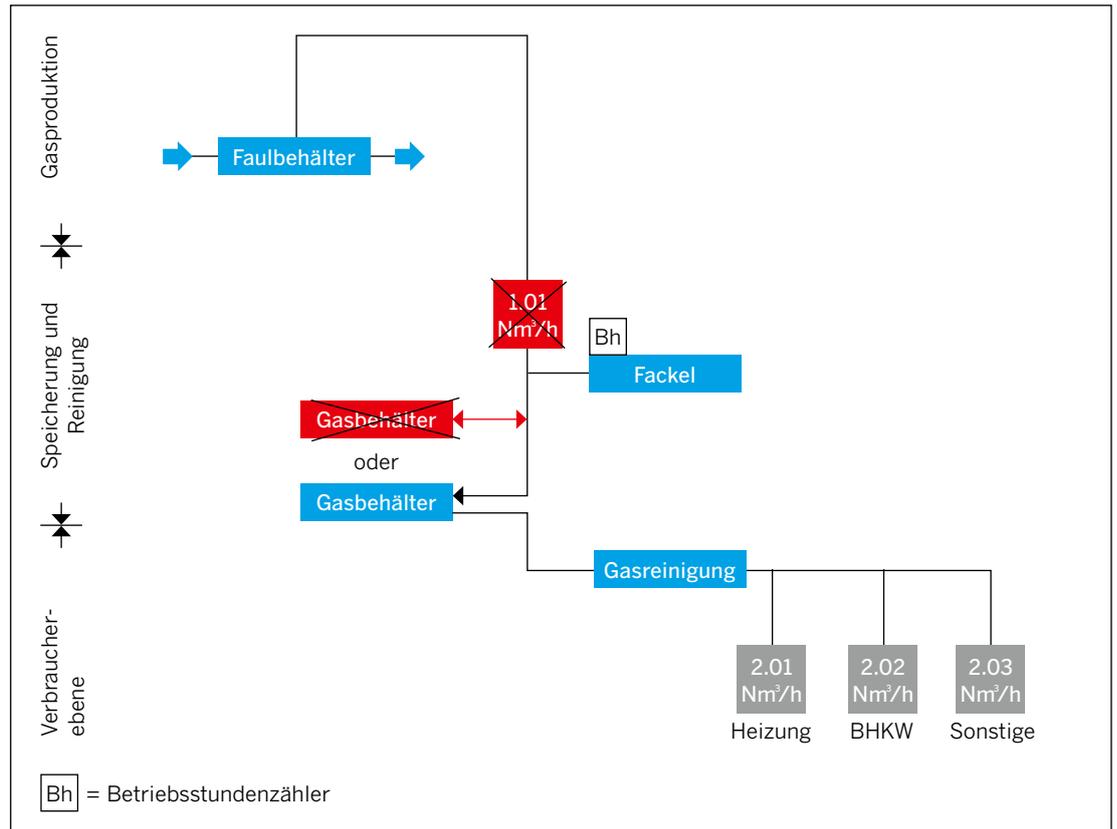


Bild 2-15 Messkonzept Faulgasproduktion



Die Angaben zu Faulgaserträgen beziehen sich meist auf den „Normzustand“ des Faulgases, d. h. bei **0 °C** und einem Druck von **1,01325 bar**. Bei älteren Gasmengenmessungen (z. B. Messstelle 1.01 in Bild 2-15) wird in der Regel nicht automatisch vom Betriebszustand auf den Normzustand umgerechnet.

Für den Zusammenhang zwischen dem Gaszustand unter Betriebsbedingungen (Index b) und dem Normzustand (Index n) gilt allgemein (Formel 2-3):

Formel 2-3 Zusammenhang zwischen Betriebsbedingung und Normzustand bei Gasen

$$\frac{V_n \cdot p_n}{T_n} = \frac{V_b \cdot p_b}{T_b}$$

V_n = Volumen im Normzustand [m³]

T_n = Temperatur im Normzustand [K] (273,15 K)

p_n = statischer Gasdruck im Normzustand [hPa] (1.013,25 hPa)

V_b = Volumen unter Betriebsbedingungen [m³]

T_b = Luft- bzw. Faulgastemperatur unter Betriebsbedingungen [K]

p_b = statischer Gasdruck unter Betriebsbedingungen [hPa]

In dieser Form des idealen Gasgesetzes kann zur Umrechnung der Betriebszustände eines Gasvolumenstroms das Volumen V durch den Gasvolumenstrom Q_G ersetzt werden.

Die Umrechnungsformel zur Errechnung des Volumens im Normzustand aus dem Volumen unter Betriebsbedingungen lautet ausmultipliziert (Formel 2-4):

Formel 2-4 Umrechnungsformel zur Errechnung des Volumens im Normzustand [DWA, 2015b]

$$Q_{G,n} = Q_{G,b} \cdot \frac{p_b \cdot T_n [273 \text{ K}]}{p_n (1013 \text{ hPa}) \cdot T_b}$$

Ein Faulgasmesswert ohne Druck- und Temperaturkorrektur liegt bei etwa 35 °C (= 308 K) und 30 hPa (= P) Überdruck nach der Formel um etwa 10 % zu hoch und ist entsprechend zu korrigieren. Die Umrechnung zwischen Betriebs- und Normzustand über das ideale Gasgesetz ist für trockene Gase gültig.

Bei Austritt aus dem Faulbehälter ist das Faulgas feucht, daher sollte der Wasserdampfanteil bei einer unmittelbaren Messung nach dem Faulbehälter (siehe Messstelle 1.01 in Bild 2-15) berücksichtigt werden. Faulgas ist wegen der langen Blasenwege des Faulgases im Faulbehälter durch den Schlamm wasserdampfgesättigt. Der Wasserdampfanteil kann unter den meist vorliegenden Druck- und Temperaturverhältnissen mit der Formel von H. Magnus (1802-1870) berechnet werden (Formel 2-5):

Formel 2-5 Magnus-Formel zur Errechnung des Wasserdampfpartialdrucks

$$p_s = C_1 \cdot \exp\left(\frac{C_2 \cdot \theta}{C_3 + \theta}\right)$$

p_s = Sättigungsdampfdruck [P]

$C_{1,2,3}$ = Konstanten (für 0 °C sind $C_1 = 610,78$, $C_2 = 17,08$ und $C_3 = 234,18$)

θ = Temperatur [°C]

Die Wasserdampfmasse (absolute Feuchte) errechnet sich nach Formel 2-6:

Formel 2-6 Berechnung der absoluten Feuchte im Faulgas

$$c = \frac{p_D}{R_D \cdot T}$$

c = absolute Feuchte [g/m³]

p_D = Sättigungsdampfdruck [P] · relative Feuchte [=1 bei 100 %]

R_D = Gaskonstante für Wasserdampf [kJ/(kg·K)] = 0,462

T = absolute Temperatur [K] = 273,15 + Temp. [°C]

1 m³ Faulgas hat unter üblichen Bedingungen (**65 % Methan** mit **0,74 kg/m³** und **35 % CO²** mit **1,96 kg/m³**) eine Dichte von **1,17 kg/m³**. Darin sind bei Sättigung **39,5 g/m³** Wasser als Wasserdampf bei **35 °C** und **30 mbar** enthalten.

Kühlt man Faulgas in den nachfolgenden Rohrleitungen auf **15 °C** ab, fällt Wasser bis zum Sättigungspunkt als Kondensat aus (bei dieser Temperatur **12,8 g/m³**). Je m³ Faulgas ist also mit **26,7 g/m³** Kondensat zu rechnen.

2.3.4.4 Weitere Anforderungen an Energiekennndaten

An die Erfassung und Bereitstellung von Energiedaten werden heute von unterschiedlichen Nutzern vielfältige Anforderungen gestellt:

- Zunächst hat der Betreiber selbst ein großes Interesse daran, auf betrieblicher Ebene den Energieverbrauch und die bereitgestellte Energie transparent als Grundlage für den Betrieb und damit verbundene Optimierungsmaßnahmen darzustellen (auch im Sinne der Selbstüberwachung). Auf der Planungs- und Managementebene dienen Energiedaten als Grundlage für Verbrauchs- und Kostenprognosen sowie Beschaffungsvorgänge.
- Vom Energieversorger und speziell vom Betreiber des Stromnetzes werden Informationen über die verbrauchten und ggf. eingespeisten Mengen benötigt, in erster Linie als Grundlage für die Abrechnung.
- Aufgrund gesetzlicher oder behördlicher Anforderungen (u. a. Digitalisierung der Energiewende) werden zukünftig Informationen zur Verbrauchscharakteristik angefordert (Smart-Metering).

Daraus ergeben sich nachfolgende Anforderungen an den Leistungsumfang bei der Datenerfassung, die erforderlichen technischen Einrichtungen und die Informationsverarbeitung:

■ **Erfassung von Energiemengen (Strom, Wärme) und Leistungsdaten zum Zwecke der Abrechnung**

Hier werden ausschließlich geeichte Zähler eingesetzt, die ggf. den Vorgaben des Netzbetreibers (Fabrikat, Typ, Leistungsumfang) entsprechen. Diese Zähler werden in der Regel nach der Installation verplombt. Der Betreiber hat vor Ort allenfalls über eine Schnittstelle Zugriff auf die Daten. Sofern es vertraglich vereinbart ist, werden dem Betreiber die Daten über einen Webzugang zur Verfügung gestellt.

■ **Erfassung von Energiemengen zur Bildung von Kennwerten**

Die Ermittlung von anlagenspezifischen Kennwerten zur energetischen Beurteilung einer Anlage ist die Grundlage einer jeden Energieanalyse und eine wesentliche Voraussetzung zur Identifizierung von Einsparpotenzialen.

Mit dem Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA, 2015a] liegt eine wichtige Grundlage für eine bundesweit einheitliche Erfassung und Auswertung der Verbrauchsdaten von Kläranlagen vor. Damit sollen vor allem die Betreiber in die Lage versetzt werden, die Entwicklung des Energieverbrauchs in ihren Anlagen im zeitlichen Verlauf zu analysieren und auch im Sinne der Selbstüberwachung zu bewerten. Das wäre zudem ein wichtiger Fortschritt für die Durchführung von statistischen Erhebungen.

Bei der Wahl der Bezugsgrößen ist darauf zu achten, dass diese in einem eindeutigen Verhältnis zu der jeweils ermittelten Größe stehen. Bei jährlichen Verbrauchswerten von Kläranlagen ist zu unterscheiden zwischen der Anschlussgröße und der tatsächlichen Belastung. Der Energieverbrauch hängt beispielsweise auch von den Anforderungen an die Ablaufqualität und dem Höhenprofil ab. Beim Vergleich mit anderen Anlagen müssen diese besonderen Bedingungen berücksichtigt werden.

Für die Festlegung ursachenbezogener Kennwerte, bei denen die elektrische Leistung zeitlich unmittelbar im Verhältnis zu der jeweiligen physikalischen Leistung (Fördermenge, Druckluftmenge) steht, werden bei Betreibern, in Gremien und unter Fachleuten betriebliche Kennzahlen diskutiert. Davon haben sich jedoch bislang nur wenige etabliert. Für Verdichter wurden beispielsweise im Merkblatt DWA-M 229 [DWA, 2013d] Kenngrößen für die energetische Effizienz unter Betriebsbedingungen festgelegt. Für Pumpen schreibt das Arbeitsblatt DWA-A 216 bereits einen ursachenbezogenen Kennwert aus elektrischer Arbeit pro gepumpter Wassermenge und überwundener manometrischer Förderhöhe in $\text{Wh}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ vor. Es ist zu erwarten, dass mittelfristig auch für andere Aggregate, wie z. B. Schub für Rührwerke etc. (vgl. Kapitel 4.4), entsprechende Entwicklungen vorangetrieben werden.

■ **Erfassung von Energiemengen bei Eigenversorgung**

Bei der Eigenerzeugung von Strom werden umfangreiche Anforderungen an die Datenerfassung gestellt, die in Form eines Messkonzeptes mit dem Netzbetreiber abzustimmen sind. Die Netzbetreiber stellen üblicherweise einen Formularsatz mit konfektionierten Vorschlägen für die Verschaltung und Messung der Eigenerzeugungsanlagen zur Verfügung. Ein für Kläranlagen typisches Konzept ist die Überschusseinspeisung mehrerer Energiearten (Solarstrom, BHKW-Strom mit/ohne KWK-Förderung) mit KWK-Untermessung (Bild 2-16). Die in den Messkonzepten verwendeten Begriffe und Bezeichnungen richten sich streng nach den jeweils aktuellen energierechtlichen Regelungen. Sie können daher von der im technischen Bereich üblichen Nomenklatur abweichen. Ein „Zählpunkt ZP“ ist im technischen Sinne die Messstelle für die Erfassung der Leistung und der Strommenge. Weil Kläranlagen Bereitsteller und Verbraucher zugleich sind (sog. Prosumenten), kann der Strom in beiden Richtungen fließen. Deshalb werden Zweirichtungszähler benötigt. Wenn aus vertraglicher Sicht der 15-Minuten-Hochlastwert relevant ist, müssen die tatsächlich auftretenden Lastspitzen entweder mit einer registrierenden Leistungsmessung (RLM-Zähler) erfasst werden oder es wird ein Standard-Last-Profil (SLP) hinterlegt.

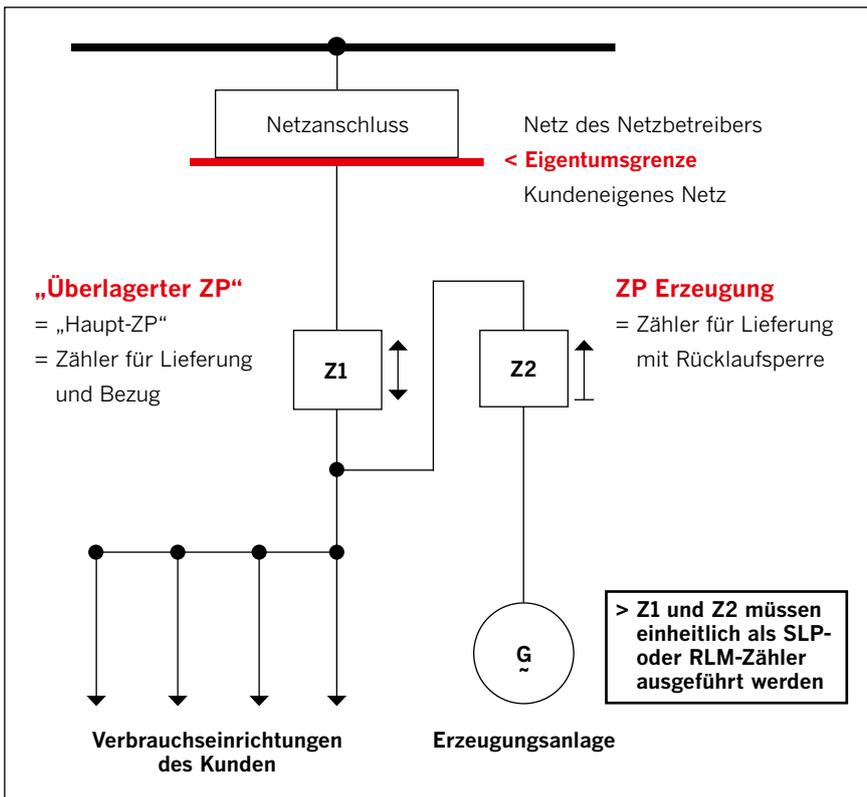


Bild 2-16 Beispielhaftes Messkonzept eines Netzbetreibers mit Überschusseinspeisung und KWK-Untermessung nach [Westnetz, 2016]

Der entsprechende Aufwand bei den Betreibern zur Erfüllung sämtlicher Pflichten ist teilweise beträchtlich. Der Einsatz unterschiedlicher Erfassungssysteme für gleiche oder ähnliche Aufgaben führt erfahrungsgemäß dazu, dass die Einheitlichkeit und Konsistenz der Daten am Ende nur noch schwer zu gewährleisten ist. Weil sich darüber hinaus die Anforderungen gerade im energierechtlichen Bereich fließend ändern, wird man in Kauf nehmen müssen, dass mehrere parallele Systeme zur Energiedatenerfassung auf einer Anlage existieren. Für betriebliche Zwecke ist es wichtig, festzulegen, welche Daten als Grundlage für Optimierungsmaßnahmen verwendet werden und wie ggf. ein Abgleich der Erfassungssysteme herzustellen ist.

Für eine Teilnahme am Regel-Energiemarkt oder einem virtuellen Kraftwerk sind bei der Erfassung der Energiedaten über den Bedarf für Energiecheck und Energieanalyse u. a. folgende Angaben wichtig:

- Elektrische Leistung (z. B. 30 kW)
- Mögliche Einschaltdauer (z. B. 30 Minuten)
- Mögliche Ein- und Abschaltzeiträume (z. B. 23:00 Uhr bis 5:00 Uhr)
- Anfahrzeiten bis zur Maximalleistung (z. B. 0,27 s/kW)
- Notwendige Pausenzeiten zwischen Ab- und Wiedereinschaltung (z. B. 5 Minuten)

Dem Anspruch an eine umfassende Datenbereitstellung stehen die Forderungen nach Sicherheit im IT-Bereich entgegen. Hier sind vor allem die Geräte für Smart-Metering im Fokus. Diese Thematik wird von staatlicher Seite unter der strategischen Initiative Kritische Infrastrukturen (KRITIS) betrachtet. Dabei geht es um die Frage, bei welchen Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen bei Ausfällen Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden. Hierzu wird auf die Ausführungen in Kapitel 4.6.6 verwiesen.



3 Verfahrenstechnische und betriebliche Effizienzsteigerung von Prozessen der Abwasserentsorgung

3 Verfahrenstechnische sowie betriebliche Effizienzsteigerung von Prozessen der Abwasserentsorgung

3.1
Abwasser-
ableitung

3.2
Mechanische
Vorreinigung

3.3
Biologische
Reinigung

3.4
Weiter-
führende
Reinigung

3.5
Schlamm-
behandlung
& Schlamm-
entsorgung

3.6
Prozesswasser-
behandlung &
-bewirtschaftung

3.7
Kläranlagen-
interne
Infrastruktur

3.1 Abwasserableitung

3.1 Abwasserableitung

3.1.1
Allgemeine
Hinweise

3.1.2
Energierrelevante Planungsansätze für
Neuplanungen & Anlagenoptimierungen

3.1.3
Pumpwerke

3.1.4
Regenbecken

3.1.1 Allgemeine Hinweise

Die Abwasserableitung ist grundsätzlich durch zwei Systeme möglich:

- Mischentwässerung
- Trennentwässerung

Bei beiden Systemen ist eine Modifikation wie folgt möglich:

- Qualifizierte oder modifizierte Mischentwässerung (2-Leitungs-System): Schmutzwasser und behandlungsbedürftiges Niederschlagswasser werden in einem Kanal/Rohr abgeleitet, nicht behandlungsbedürftiges Niederschlagswasser wird gesondert abgeleitet.
- Qualifiziertes oder modifiziertes Trennentwässerung (3-Leitungs-System): getrennte Ableitung von Schmutz-/Fremdwasser, behandlungsbedürftigem und nicht behandlungsbedürftigem Niederschlagswasser.

Die jeweiligen Systeme enthalten sowohl Pumpwerke als auch Regenbecken:

Pumpwerke

- Schmutzwasserpumpwerke
- Hochwasserpumpwerke
- Misch- und Regenwasserpumpwerke

Regenbecken

Unter dem Begriff „Regenbecken“ werden folgende Becken zur Rückhaltung und/oder Behandlung von Regen- und Mischwasser verstanden:

- Regenüberlaufbecken (Mischentwässerung)
- Stauraumkanal (Mischentwässerung)
- Regenklärbecken (Trennentwässerung)
- Retentionsbodenfilter (Trenn- und Mischentwässerung)
- Regenrückhaltebecken (Trenn- und Mischentwässerung)

In bestehenden Siedlungsgebieten sind die klassischen Entwässerungsverfahren wie die Mischentwässerung und die Trennentwässerung und deren o. g. Varianten vertreten. Während in Altgebieten das Mischverfahren die überwiegende Entwässerungsform ist, kommen in NRW bei Neuerschließung auf Grundlage des § 55 (2) WHG i. V. m. § 44 LWG sowie nach den Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren des MUNLV vom 26.5.05 („Trennerlass“) fast ausschließlich Formen der Trennentwässerung zum Einsatz, um Regenwasser zu versickern oder möglichst ortsnah einem Gewässer zuführen zu können.

In Trennentwässerungen gewinnen Anlagen der dezentralen Regenwasserbehandlung, wie z. B. Filtereinsätze in Straßeneinläufen, zunehmend an Bedeutung. Dies gilt vor allem auch für die flexible Nachrüstbarkeit dieser Systeme in bestehenden Netzen.

In dünner besiedelten Gebieten und Außenbereichen werden zur Schmutzwasserentsorgung Sonderformen der Entwässerung wie Druckentwässerungssysteme und Unterdruckentwässerungssysteme eingesetzt. Die Regenwasserentsorgung erfolgt in diesen Fällen in der Regel durch Maßnahmen auf den Grundstücken vor Ort. In Einzelfällen, wie zum Beispiel bei in sich abgeschlossenen Gewerbe- und Industriegebieten, werden Druck- und Unterdruckentwässerungssysteme mit einer klassischen Regenwasserkanalisation kombiniert. In bestehenden Druckluftentwässerungssystemen liegt ein energetisches Optimierungspotenzial häufig in der Betriebsweise von energieintensiven Druckluftspülstationen.

Grundsätzlich wird angestrebt, Systeme im Misch- und Trennverfahren vollständig im Freigefälle auszuführen. In diesen Fällen sind die Kanalisationsanlagen im Hinblick auf eine energetische Optimierung nicht relevant, lediglich der Aufwand für die Spülung bzw. Reinigung kann eine energetische Bedeutung besitzen. Lassen die topografischen Randbedingungen eine Entwässerung im Freigefälle nicht zu, werden Hebeanlagen und Pumpwerke in unterschiedlichen Ausprägungen eingesetzt. Hier sind energetische Aspekte je nach Pumpwerksart und Förderaufgabe von unterschiedlich großer Bedeutung (vgl. hierzu auch Kapitel 4.2.4).



Neben den verschiedenen Möglichkeiten der Pumpenauswahl, die in Kapitel 4.2.4 ausführlich beschrieben werden, sind an dieser Stelle die Sondersysteme wie Sperrstofftrennfördersysteme und pneumatisch unterstützte Abwasserförderung im Bereich der Abwasserableitung gesondert zu erwähnen. Bei den Sperrstofftrennfördersystemen werden die Störstoffe vor der Pumpe in einer separaten Kammer mechanisch oder physikalisch getrennt. Durch die Pumpe wird nur noch das vorgereinigte Abwasser geführt, welches beim Verlassen der Pumpe die Störstoffe wieder aufnimmt. Damit ist die Pumpe weitestgehend verstopfungsfrei, benötigt jedoch viel mehr Platz als herkömmliche Pumpsysteme. Einsatzgebiete ergeben sich besonders dann, wenn mit einer erhöhten Verstopfungsgefahr bzw. undefinierbaren Störstoffen gerechnet werden muss (z. B. Rastplätze etc.). Bei den pneumatisch unterstützten Systemen (Druckentwässerung oder Unterdruckentwässerung) wird das Abwasser mit Hilfe von Druckluft gefördert. Der Energieaufwand ist im Vergleich zu konventionellen Pumpsystemen deutlich höher. Für solche Systeme können Werte bis zu **23 kWh/(E · a)** [DWA, 2005] angesetzt werden. Das Abwasser gelangt im freien Zulauf in einen Behälter, der entweder durch Überdruck oder Unterdruck entleert wird. Neben der Förderaufgabe lässt sich das Abwasser auch gleichzeitig belüften, um Faulungsprozesse bei langen Leitungen zu vermeiden und die Abwasserleitung zu spülen (Druck oder Vakuum). In der Regel werden solche Systeme aufgrund der begrenzten Druckhöhen und der geringen Förderkapazitäten (bis 25 l/s) überwiegend im häuslichen Bereich bzw. bei Gebäudeentwässerung oder kleineren kommunalen Gebieten angewendet [Weismann und Gutzeit, 1998].



Bei der Auswahl von Pumpentypen und Laufradformen (Freistromrad, Einkanal- oder Mehrkanalräder etc.) scheinen sich die Forderungen nach Energieeffizienz und Betriebssicherheit zu widersprechen. Grundsätzlich ist aber jede Pumpe, die für die Förderaufgabe richtig ausgewählt wurde, betriebssicher, wenn sie im Bereich des optimalen Betriebspunktes gefahren wird. Die Betriebssicherheit wird eingeschränkt, wenn Pumpen mit höheren Wirkungsgraden für Förderaufgaben, für die sie nicht konstruiert sind, eingesetzt werden. Gleiches gilt, wenn bei der Abwasserförderung eigentlich verstopfungsunempfindliche Pumpen mit Freistromrädern außerhalb des optimalen Betriebsbereiches gefahren werden. Auch diese Pumpen verlieren ihre Betriebssicherheit.

3.1.2 Energierelevante Planungsansätze für Neuplanungen und Anlagenoptimierungen

Bei Neuplanungen bzw. Überplanung von vorhandenen Anlagen zur Abwasserableitung wurde das Thema Energieeffizienz oft nur sehr nachrangig behandelt. Zukünftig sollte die Thematik in jedem Planungsprozess ein fester Bestandteil sein. Im Bereich der Siedlungsentwässerung existieren Ansätze, den Energieverbrauch der Abwasserableitung zu senken, die sich auf die unterschiedlichen Planungsabschnitte beziehen (Wasseranfall, Dimensionierung und Betrieb). Dies betrifft sowohl die Neuplanung von Anlagen als auch die Optimierung bestehender Systeme. Bei bestehenden Anlagen sind die optimalen Lösungen aufgrund vorhandener Randbedingungen häufig nur mit größerem Investitionsaufwand zu realisieren. Hier sollte das Kosten-Nutzen-Verhältnis (vgl. Kapitel 2.3.1) der Maßnahme unter Einbeziehung von Betriebs- und Wartungskosten bewertet werden.



Abwasser-/Wasseranfall

Ein Baustein ist zunächst die Reduzierung des Abwasseranfalls. Neben einer effizienteren Wassernutzung in Haushalten sowie Gewerbe- und Industriebetrieben, auf die der Planer und der Netzbetreiber in der Regel keinen Einfluss haben, ist die Abkopplung von Regenwasser mit ortsnaher Einleitung in ein Gewässer oder Versickerung eine Planungsoption. Hier werden die Randbedingungen durch das Vorhandensein von Fließgewässern sowie die Hydrogeologie bestimmt. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Abwasseranfalls ist die Reduzierung von Fremdwasser in der Kanalisation. Neben den positiven Effekten für die Abwasserbehandlung auf den Kläranlagen ergeben sich auch energetische Vorteile bei der Abwasserförderung im Bereich der Ableitung. Bei der Kanalsanierung zur Fremdwasserreduzierung ist aber eine ganzheitliche Sicht erforderlich, die neben der Sanierung der Hauptkanäle die Grundleitungen und Hausanschlussysteme einbezieht. Aus energetischer Sicht ist der Erhalt einer ausreichenden Spülwirkung (genügend Zufluss oder kurzzeitige Spülungen) zur Vermeidung zusätzlicher Betriebsaufwände durch Ablagerungen von Bedeutung. Daher ist eine Reduzierung des Abwasseranfalls nicht nach dem Prinzip „so weit wie möglich“ ratsam, sondern nur unter Betrachtung des Systems Kanalisation und Kläranlage.



Bei Starkregenereignissen kommt es immer wieder zu umweltbelastenden Entlastungen des Mischwassers in die Gewässer. Die hierfür erforderliche Reduzierung der Entlastungshäufigkeit wird bislang überwiegend durch den Bau von Regenrückhaltebecken und Zwischenspeichern erreicht.

Die Bewirtschaftung des Kanalnetzes stellt auch eine Möglichkeit zur Reduzierung der Entlastungsrate durch eine effektive Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Kapazitäten der vorhandenen Anlagen im Hinblick auf den Gewässerschutz dar.

Bei großen Mischentwässerungen sind Stauraumkanäle und Regenüberlaufbecken oftmals in mehreren Stufen hintereinander angeordnet. Durch eine entsprechende Abflusssteuerung der Mischwasserströme bei einem Regenereignis kann das vorhandene Volumen des Kanalnetzes effizient genutzt werden. Dazu gehören gesteuerte Auf- und Einstauvorgänge in einer Verbundsteuerung von mehreren Teileinzugsgebieten und eine zeitlich begrenzte Rückhaltung von Abflüssen.

Durch den Einsatz von Online-Radarniederschlagsdaten mit Radarprognose können die Zuflüsse ins Kanalnetz generiert werden, um eine realistische, ungleichmäßige Überregnung über das Einzugsgebiet abzubilden.

Die Steuergröße zur Verringerung der Entlastungshäufigkeit und des Abflussverhaltens ist die Drosselwassermenge. Durch die Steuerung bzw. Erhöhung der Weiterleitungsmenge wird das Mischwasser weiter zu den verfügbaren Speicherräumen im Kanalnetz geleitet.

Die Kanalnetzbewirtschaftung wird nicht nur für einen stabilen Betrieb und für eine effiziente Nutzung von Ressourcen angewendet, sondern kann auch als ein Instrument für ein flexibel und damit anpassungsfähiges Kanalnetz an die Auswirkungen des Klimawandels betrachtet werden.

Dimensionierung

Bei schwierigen Randbedingungen für eine Freigefällekanalisation ist häufig die Konzeption eines Pumpwerks unvermeidbar. Hier müssen die späteren Betriebs- und Energiekosten in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen, um nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Neben den geodätischen Förderhöhen, die je nach Topografie nur in engen Grenzen beeinflusst werden können, haben die Rohrleitungsverluste, gerade bei langen Druckrohrleitungen, erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf. Daher ist der Leitungsdimensionierung, der Leitungsführung, der Be- und Entlüftung, der Ausbildung von Hoch- und Tiefpunkten sowie den Fließgeschwindigkeiten besondere Beachtung zu schenken und diese sind sorgfältig unter Berücksichtigung des Lastprofils zu konzeptionieren. Die Fließgeschwindigkeiten sollten in der Regel zwischen **0,8** und **1,5 m/s** liegen, wobei bei Steigleitungen eine Mindestgeschwindigkeit von **2,5 m/s** eingehalten werden sollte.



Bei der Dimensionierung der Leitungsquerschnitte und der Festlegung der Förderleistung der Pumpen muss weiterhin eine Abwägung zwischen möglichst geringen Geschwindigkeiten (geringer Energiebedarf) und kurzen Aufenthaltszeiten (Vermeidung/Remobilisierung von Ablagerungen und Geruchsentwicklung) erfolgen.

Neben hydraulischen Planungsansätzen, die einen direkten Einfluss auf den Energiebedarf der Abwasserförderung haben, gibt es zahlreiche Einflussfaktoren, die die Grundlage für einen optimalen Anlagenbetrieb bilden.

Ein optimaler Anlagenbetrieb hat eine Minimierung von Betriebs- und Wartungsaufwand zur Folge, was sich unter anderem in einer Reduzierung des Aufwands (z. B. energetisch aufwendige Spülung) durch das Wartungspersonal niederschlägt. Eine gute Wartungsfreundlichkeit oder eine gute Fernüberwachung einer abwassertechnischen Anlage sorgt für eine Energiebedarfsreduzierung im Wartungs- und Betriebsbereich. Dazu gehören z. B. die Festlegung der Ein- und Ausschaltpunkte, Redundanzen, ausreichende Gefälle etc.



Tabelle 3-1 Empfehlungen zur energieoptimierten Anlagendimensionierung von Abwasserableitungssystemen [DWA, 2012a], [DWA, 2010a], [DWA, 2005], [DWA, 2007b], [DWA, 2016a], [ATV-DVWK, 2000a], [ATV-DVWK, 2000b]

Systemteil	Bemerkung	Empfehlung	
Abwassertransport			
Freispiegelleitung	H	Ausschließen von transkritischen, hydraulisch instabilen Abflusszuständen ¹⁾	$0,75 < FR < 1,5$
		Bei strömendem Abfluss ¹⁾	$Q_r/Q_v \leq 50\%$ (Auslastung des Zulaufkanals)
		Ansetzen eines Rohres und Einhaltung der entsprechenden betrieblichen Rauigkeiten ¹⁾	$k_b = 1,5$ mm für nicht genormte Rohre
		Mindestschubspannung – RW und MW ¹⁾	$\tau \geq 4,1 \cdot Q^{1/3}$
		Mindestschubspannung – SW ¹⁾	$\tau \geq 3,4 \cdot Q^{1/3}$
		Mindestgefälle ¹⁾	abhängig von Wasserstand, Durchmesser und Rauigkeit
	Maximalgefälle ohne Bemessung als Steilstrecke ¹⁾	$I \leq 200\%$	

Systemteil		Bemerkung	Empfehlung
Freispiegelleitung	K	Bei strömendem Abfluss ¹⁾	Schachtgerinne mit hochgezogener Berme
		Bei Steilstrecken (Boussinesq-Zahl $Bou > 6$, $v > 10$ m/s) ¹⁾	Anordnung Bauwerke
		Abstand zwischen Schächten ⁷⁾	$L \leq 100$ m
Abwasser-Pumpanlagen	H	Mindestfließgeschwindigkeit – Laufrad ⁶⁾	$v_{min} \geq 2$ m/s
		Mindestfließgeschwindigkeit Druckleitung – große Gesamtförderzahl ⁶⁾	$v_{min} \geq 0,5$ m/s
		Mindestfließgeschwindigkeit Druckleitung – geringe Gesamtförderzahl ⁶⁾	$v_{min} \geq 1,0$ m/s
		Maximalgeschwindigkeit Druckleitung ⁶⁾	abhängig von DN, generell $v_{max} \leq 2,5$ m/s
		Maximalgeschwindigkeit Druckleitung – länger als 500 m ⁶⁾	geringer als o. g.
		Durchmesser Saugleitung ⁶⁾	$D \geq 100$ mm
		Leistungsreserve ⁶⁾	immer einplanen, abhängig von Pumpenleistung
	K	Be- und Entlüftungarmaturen ⁶⁾	immer an Hochpunkten anordnen
		Einbindung Pumpen-Druckleitung in Sammelleitung ⁶⁾	immer horizontal
		Freier Kugeldurchgang Kreiselpumpen (häusliches Abwasser) ⁵⁾	$D \geq 100$ mm
Sohlneigung Saugraum ⁶⁾		$\alpha \geq 60^\circ$	
Unterdruckleitung (außerhalb v. Gebäuden)	H	Mindestgefälle ³⁾	$I \geq 0,2$ ‰
	K	Minstdurchmesser ³⁾	$D_{DRL} \geq 65$ mm
Druckleitung (außerhalb v. Gebäuden)	H	Mindestfließgeschwindigkeit – Hausanschluss- und Sammeldruckleitungen bis DN 100 ⁴⁾	$v_{min} \geq 0,7$ m/s
		Mindestfließgeschwindigkeit – Sammeldruckleitung bis DN 150 ⁴⁾	$v_{min} \geq 0,8$ m/s
		Mindestfließgeschwindigkeit – Sammeldruckleitung bis DN 200 ⁴⁾	$v_{min} \geq 0,9$ m/s
		Maximale Durchflusszeit ⁴⁾	$t \leq 8$ h
	K	Freier Kugeldurchgang Pumpen ⁴⁾	$D \geq 40$ mm

Bauwerke			
Schachtbauwerke	H	Absturzbauwerk mit Untersturz – Minstdurchmesser ⁷⁾	$D \geq 200$ mm
		Absturzbauwerk – Mindestkapazität ⁷⁾	$Q \geq 2 \cdot QT$
	K	Richtungsänderung im Schacht ⁷⁾	nicht im 90°-Winkel
		Radius Sohlgerinne ⁷⁾	2- bis 3-faches des Durchmessers
		Radius Sohlgerinne – DN > 1200 ⁷⁾	$R \geq 15$ m
Regenüberläufe	H	Im Kanal verbleibender Abfluss ⁵⁾	$Q \geq 50$ l/s
		Maximale angeschlossene undurchlässige Fläche ⁵⁾	$A_U \geq 2$ ha
		Minimale Fließgeschwindigkeit bei Trockenwetter im Zu- und Ablaufbereich ⁵⁾	$v_{min} \geq 0,5$ m/s
Regenüberlaufbecken	H	Minimale Fließgeschwindigkeit bei Trockenwetter im Zu- und Ablaufbereich ⁵⁾	$v_{min} \geq 0,8$ m/s
		Minimales Längsgefälle ohne Spülvorrichtung ⁵⁾	$I \geq 1\%$
		Quergefälle ohne Spülvorrichtung ⁵⁾	$3\% \leq I \leq 5\%$

Systemteil		Bemerkung	Empfehlung
Stauraumkanäle	H	Minimale Fließgeschwindigkeit bei Trockenwetter ⁵⁾	$v_{\min} \geq 0,8 \text{ m/s}$
		Minimale Wassertiefe bei Trockenwetter ⁵⁾	$h \geq 0,05 \text{ m}$
		Schleppspannung ⁵⁾	$1,3 \text{ N/m}^2 \leq \tau \leq 3 \text{ N/m}^2$
Abläufe	K	Lage Grundablass Notentleerung ⁵⁾	$h \geq 0,50 \text{ m}$ über Ablaufleitung
Dückerleitung	H	Maximaler Neigungswinkel abfallender Ast ⁷⁾	$\alpha \leq 45^\circ$

Wasserstandsbegrenzung			
Drosselorgane	H	Minimaler Drosselabfluss – Steuerung ²⁾	$Q_{\text{DR,min}} \geq 25 \text{ l/s}$
		Minimaler Drosselabfluss – Regelung ²⁾	$Q_{\text{DR,min}} \geq 10 \text{ l/s}$
		Mindesteinstauhöhe mechanischer Drosselorgane ²⁾	$h \geq 2 \cdot D_{\text{DR}}$
		konfektionierte Drossel – abzuführende Abflüsse ²⁾	$Q \geq 1,2 \cdot QT$
		Minimale Nennweite SW und MW ²⁾	$D_{\text{DR}} \geq 200 \text{ mm}$
Drosselstrecken	H	Minstdurchmesser ²⁾	$D_{\text{DR}} \geq 200 \text{ mm}$
		Maximaldurchmesser ²⁾	$D_{\text{DR}} \leq 500 \text{ mm}$
		Mindestlänge ²⁾	$L_{\text{DR}} \geq 20 \cdot D$
		Höchstlänge ²⁾	$L_{\text{DR}} \leq 100 \text{ m}$
		Maximalgefälle ²⁾	$I \leq 3 \text{ ‰}$
Wehr	K	Tauchwand vor Wehr – Abstand ²⁾	$a \geq 30 \text{ cm}$ und $\geq 2 \text{ hü}$
		Tauchwand vor Wehr – Eintauchtiefe ²⁾	$h_{\text{ü}} \geq z \geq 2 \text{ hü}$

Erläuterungen:

H = Hydraulik
 K = Konstruktion
 RW = Regenwasser
 SW = Schmutzwasser
 MW = Mischwasser
 L_{DR} = Länge einer Drosselstrecke
 D_{DR} = Drosselnennweite
 D_{DRL} = Durchmesser der Druckrohrleitung

Literatur:

1) DWA-A 110
 2) DWA-A 111
 3) DWA-A 116-1
 4) DWA-A 116-2
 5) ATV-DVWK-A 128 (Entwurf DWA-A 102)
 6) ATV-DVWK-A 134
 7) ATV-DVWK-A 157

Betrieb

Die wesentlichen Aufgaben des Kanalbetriebs sind – neben der Sicherstellung der Funktion – die Reinigung und die Inspektion der Kanalisationsanlagen. Beide Aufgaben werden im Hinblick auf die Betriebskosten durch den erforderlichen Geräte- und Personalaufwand bestimmt.

Energierrelevante Aspekte sind von untergeordneter Bedeutung. So liegen auch keine Auswertungen über eingesetzte Energieformen und Energieverbräuche für diese Betriebsaufgaben vor. Die wesentliche Energieform ist in diesem Bereich der eingesetzte Kraftstoff für den Betrieb von Fahrzeugen und Generatoren für die Reinigung und Inspektion der Kanalisationsanlagen.



Überlegungen zur Reduzierung von Betriebskosten, die zum Beispiel eine Reduzierung des Reinigungsaufwands durch bedarfsorientierte Spülkonzepte einbeziehen, beinhalten neben der Reduzierung des Personalaufwands automatisch positive Effekte im Bereich Energiebedarf. Diese können aber nicht belastbar qualifiziert werden. Der Einsatz von beweglichen Wehren oder Spülklappen als Spüleinrichtungen im Kanal kann in Einzelfällen sinnvoll sein, zum Beispiel vor Entlastungsbauwerken, um das Austragen von Schmutzstoffen zu vermindern. Diese Maßnahmen tragen i. d. R. nicht zur Reduzierung des Energieverbrauchs der Kanalreinigung bei, da es entweder nur zu einer Verlagerung der Schmutzstoffe kommt oder der Energieverbrauch einer Spülgutentnahme hinzukommt.

3.1.3 Pumpwerke

In diesem Kapitel werden Hinweise zu Besonderheiten der Planung und des Betriebs von Pumpenanlagen im Bereich der Abwasserableitung gegeben. Weitergehende Informationen zu Pumpen und Laufradformen sowie Motoren sind dem Kapitel 4.2 zu entnehmen.



Pumpwerke im Bereich der Abwasserableitung lassen sich im Wesentlichen in folgende Typen einteilen:

- Schmutzwasserpumpwerke
- Hochwasserpumpwerke
- Misch-/Regenwasserpumpwerke

Sie sind grundsätzlich dadurch gekennzeichnet, dass sie deutlichen Schwankungen des Abwasseranfalls ausgesetzt sind bzw. nur temporär betrieben werden. Dies stellt eine große Herausforderung für eine optimale Pumpenauslegung dar. Darüber hinaus haben Pumpwerke in der Kanalisation ein hohes Schadenspotenzial, da im Versagensfall in der Regel große Schäden im Einzugsgebiet durch Rückstau verursacht werden. Daher muss bei der Planung und Optimierung von Pumpwerken in der Abwasserableitung die Betriebssicherheit Priorität haben. Bei der Auswahl der Pumpenkonstellationen spielt die Förderaufgabe mit den wesentlichen Elementen „Abwassermenge“ und „Abwasserzusammensetzung“ die maßgebliche Rolle. Vor allem die Belastung durch Feuchttücher stellt die Betriebe vor zunehmende Herausforderungen. Gegen diese Abwasserinhaltsstoffe unempfindlichere Pumpentypen sind häufig weniger energieeffizient. Hier muss der höhere Wartungsaufwand von energieeffizienten, aber verstopfungsanfälligeren Pumpen bzw. der Energieaufwand für zusätzliche Zerkleinerungseinrichtungen in den Entscheidungsprozess einbezogen werden.

Schmutzwasserpumpwerke haben aus energetischer Sicht nur ein geringes Optimierungspotenzial. Der Abwasseranfall ist in der Regel relativ gleichmäßig und die Fördermenge liegt in einer Größenordnung, die häufig von einer Pumpe als Grundlast bewältigt und gut an die Förderaufgabe angepasst werden kann. Häufig sind diese Pumpwerke mit zwei Pumpen ausgestattet, wobei die Pumpen 100 % redundant zueinander ausgelegt sind. Bei der Überprüfung ist darauf zu achten, dass die Pumpen in ihrem optimalen Betriebspunkt betrieben werden. Die Aussagen zum energetischen Optimierungspotenzial gelten auch für Schmutzwasserpumpstationen im Außenbereich.

Hochwasserpumpwerke dienen der Vorflutsicherung von Entwässerungssystemen, wenn die Entwässerung in das Gewässer bei Hochwasser nicht mehr im Freigefälleabfluss erfolgen kann. Sie werden vor oder hinter Kläranlagen oder Regenbecken sowohl im Trenn- als auch im Mischverfahren eingesetzt. Auch wenn Hochwasserpumpwerke hinter Regenbecken häufig erhebliche Förderleistungen aufweisen, spielen sie aufgrund der sehr geringen Betriebszeiten aus Energieverbrauchssicht eine untergeordnete Rolle in Bezug auf den gesamten Strombedarf einer Kläranlage. Bei Betrieb führen Hochwasserpumpwerke jedoch zu einem kurzzeitigen Spitzenstrombedarf während Phasen erhöhten Strombedarfs (Regenwetter). Weiterhin sind Vorhaltekosten durch Trafoverluste im Stand-by-Betrieb zu beachten. Bei dieser Situation steht allein die sichere Gewährleistung der Förderaufgabe im Vordergrund. Hochwasserpumpen dürfen in keinem Fall zur Erzielung energetischer Einsparungen abgeschaltet werden.

Misch- und Regenwasserpumpwerke weisen oft eine sehr große Schwankungsbreite des Abwasseranfalls auf. Daher wird häufig eine Kombination mehrerer Pumpen, teilweise mit mehreren Druckrohrleitungen, für die unterschiedlichen Betriebszustände eingesetzt. Vor allem bei der Parallelschaltung von Pumpen auf eine Leitung kommt es zur gegenseitigen Beeinflussung der Pumpen, teilweise mit erheblichen energetischen Auswirkungen. Untersuchungen im Auftrag des Umweltministeriums des Landes Nordrhein-Westfalen haben gezeigt, dass bei diesen Pumpwerken ein erhebliches Optimierungspotenzial im Hinblick auf den Energieverbrauch existiert [Müller et al., 2013b].



Der theoretische Energiebedarf, der benötigt wird, um einen m^3 Wasser um einen Meter anzuheben, liegt bei **2,714 Wh/(m³·m)** ($\rho \cdot g \cdot Q \cdot h \approx 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1/3.600 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1 \text{ m}$). Dieser Wert ist jedoch unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade in der Praxis nicht erreichbar. Die aufgenommenen Kennwerte sollten demnach in Bezug auf die absoluten kWh/a sowie die Betriebsstunden betrachtet werden, um eine repräsentative Aussage über ein sinnvolles Einsparpotenzial treffen zu können. Ein Wert über **6 bis 10 kWh/(E·a)** gibt erfahrungsgemäß allerdings bereits erste Hinweise darauf, dass das Pumpwerk näher betrachtet werden sollte.



Nach [Müller et al., 2013b] wurden rd. 60 Pumpwerke ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Bild 3-1 dargestellt. Es liegen nur für wenige Pumpwerke ausreichende Betriebsdaten vor, um vergleichende Kennwerte bezogen auf die geförderte Wassermenge und Druckhöhe zu ermitteln. Dies ist der erste Schritt bei der Datenerfassung für eine energetische Optimierung von Pumpwerken. Zu gleichen Ergebnissen kommt auch das Arbeitsblatt DWA-A 216 [DWA, 2015a].

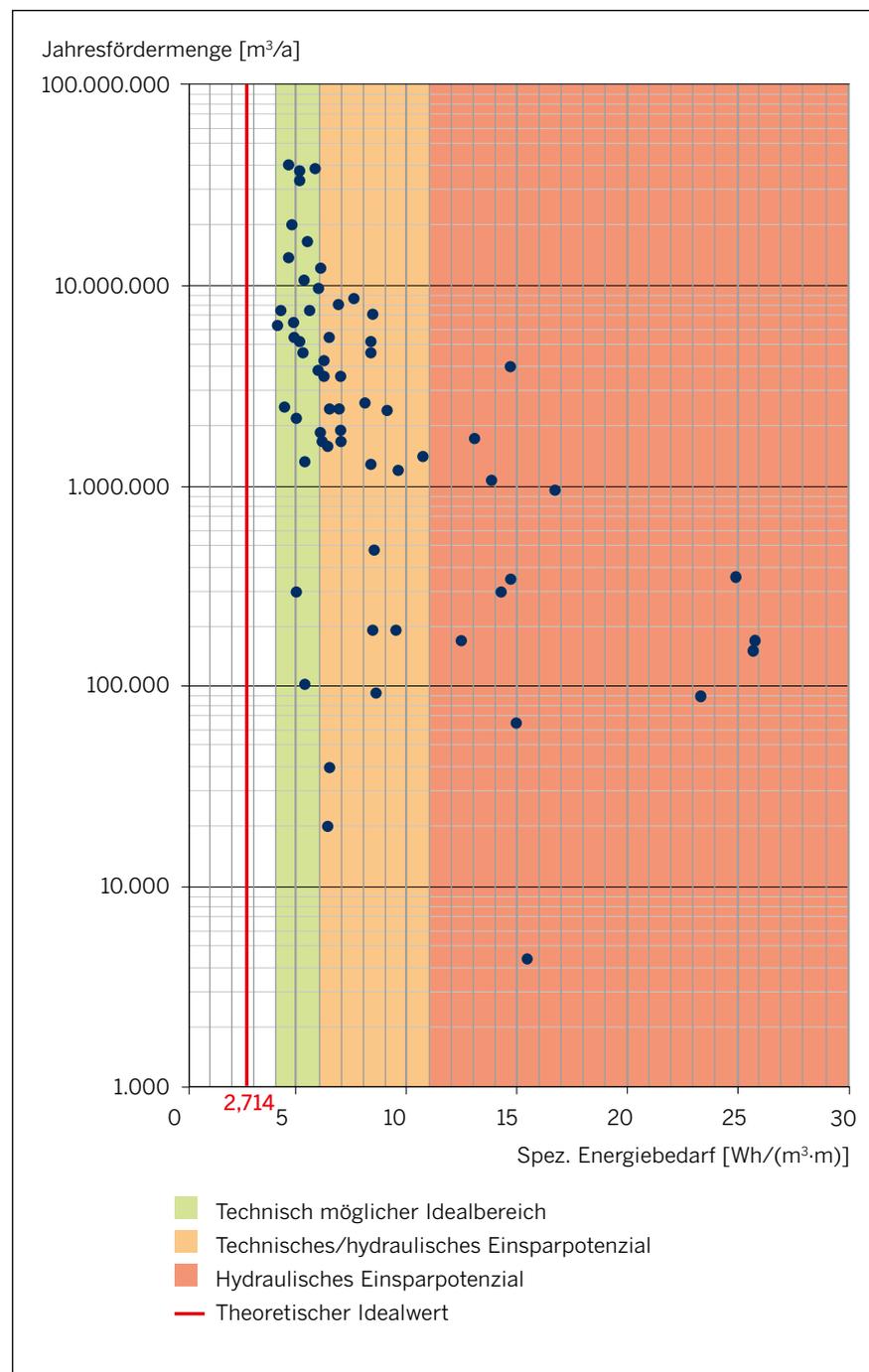


Bild 3-1 Energieverbrauch von Pumpwerken in der Kanalisation in Abhängigkeit von der Fördermenge nach [Müller et al., 2013b]

Pumpwerke mit energetischem Optimierungspotenzial (bei Pumpstationen im Außenbereich oder kleinen Schmutzwasser-Pumpwerken ist das Energieeinsparpotenzial von untergeordneter Bedeutung) sollten mindestens mit einer Datenerfassung ausgerüstet werden. Dies bietet die Grundlage für eine fundierte Bewertung des Anlagenbetriebs, nicht nur in der zeitlichen Entwicklung, sondern auch im Vergleich zu ähnlichen Anlagen. Um eine verifizierbare Energieanalyse in Verbindung mit einer Betriebsoptimierung durchführen zu können, ist es erforderlich, dass mindestens folgende wesentliche Betriebsdaten gemessen werden:

- Energieverbrauch der Abwasserpumpe/n (kWh/a)
- Durchflussmenge der Abwasserpumpe/n (m³/a)
- Füllstand im Pumpensumpf (m)

Die Pumpwerksausstattung, insbesondere Elektroheizungen oder Be- und Entlüftungsanlagen, Entfeuchtungsanlagen, Vorwärmung von Notstromaggregaten etc., können bei Pumpwerken den größten Anteil am Strombedarf ausmachen und sollten einer kritischen Betrachtung (Stichwort Frostschutzbetrieb) unterzogen werden. Werden die Nebenaggregate wirklich benötigt? Ist die Steuerung so ausgelegt, dass die Anlagen wirklich nur bei realem Bedarf betrieben werden? Eine separate Messung dieser Aggregate ist jedoch nicht sinnvoll. Vielmehr kann der Strombedarf über die Subtraktion mit den Kennwerten der Abwasserpumpen berechnet werden. Folgende Maßnahmen im Pumpwerksbetrieb können nennenswerte Einsparpotenziale von bis zu 30 % erschließen, ohne die Betriebssicherheit negativ zu beeinflussen [Müller et al., 2013b]:

- Einrichtung einer Drehzahlregelung, mindestens für die häufig betriebenen Maschinen,
- bedarfsorientierte, lastabhängige Kombination von Pumpen(-stufen),
- Validierung und Optimierung des Pumpen-Steuerungskonzepts durch Pumpwerkssimulation unter Einbeziehung von Betriebserfahrungen,
- Verminderung der Fließgeschwindigkeit durch Optimierung von Leitungsquerschnitten, Leitungsführung und Armaturen (Reduzierung von Reibungsverlusten),
- Vergleichmäßigung der Fördermengen durch Ausnutzung vorhandener Speicherräume (Pumpensumpf),
- Anpassung des Pumpensumpfs und Optimierung der Schaltzahl der Pumpen. Dazu ist eine genaue Erfassung des realen Bedarfs zur Auslegung und Optimierung von Pumpen und Steuerungskonzepten sowie eine betriebliche und technische Überwachung notwendig. Liegen keine kontinuierlichen Messdatenerfassungen vor, können durch Kurzzeitmesskampagnen Tagesganglinien ermittelt werden, die in Kombination mit vorhandenen Messdaten (z. B. Wasserspiegel Pumpensumpf) zu Jahreganglinien weiterentwickelt werden können.

Ziel einer optimalen Pumpwerksauslegung sollte es sein, den Grundlastbetrieb möglichst effizient abzudecken. Dies setzt eine ausreichend umfassende und validierte Datengrundlage voraus. Bewährt hat sich hier die Auswertung und Darstellung von Pumpenlaufzeiten im Histogramm (Bild 3-2). Das Histogramm zeigt am Beispiel eines vorhandenen Pumpwerks die relative Häufigkeit des Auftretens der Fördermenge sowie die realisierte Pumpensteuerung. Diese Auswertung ermöglicht auf Basis realer Daten eine klare Definition der Förderaufgabe als Grundlage der Pumpenauslegung (vgl. Kapitel 4.2.3) und zeigt deutlich die Bereiche, in denen ein energieeffizienter Pumpenbetrieb wichtig ist. In diesem Beispiel sind die Trockenwetterpumpen mit 45 l/s an die Zulaufsituation angepasst dimensioniert. Ab einer Menge von 90 l/s bis 180 l/s tritt der Regenwetterfall auf, der zusammen mit einer Trockenwetterpumpe und einer Regenwetterpumpe abgefahren werden kann. Andererseits zeigt das Bild aber auch, dass bei Ausfall der Regenwetterpumpe nur noch 90 l/s von 180 l/s förderbar sind. Ein solches Histogramm kann daher neben der Pumpendimensionierung auch bereits Hinweise auf die Betriebssicherheit geben.



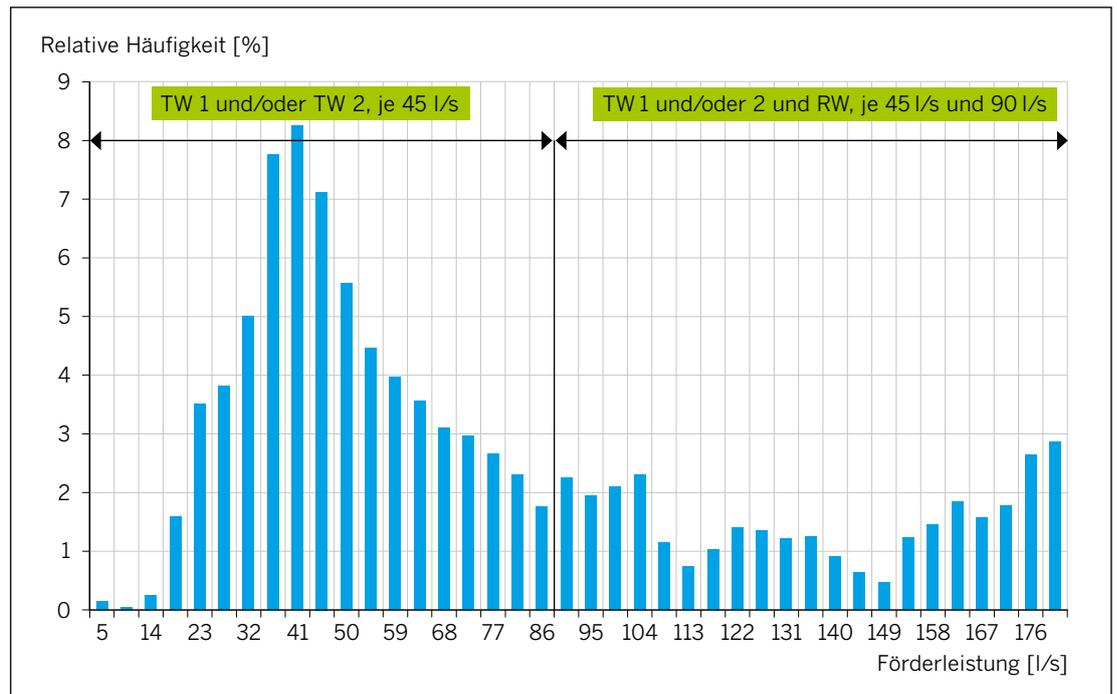


Bild 3-2 Histogramm der Förderleistung eines Pumpwerks

Hinweise zur Planung und zum Bau von Abwasserpumpenanlagen können dem ATV-DVWK-A 134 [ATV-DVWK, 2000a] entnommen werden.

3.1.4 Regenbecken

Regenüberlaufbecken

Regenüberlaufbecken (RÜB) dienen der Zwischenspeicherung und Teilreinigung von Mischwasser vor Entlastung in das Gewässer und werden dementsprechend nur in der Mischentwässerung eingesetzt. Nach Regenende wird der Inhalt des Regenüberlaufbeckens zur Kläranlage abgeleitet.

Je nach Größe und Struktur des Einzugsgebiets werden Regenüberlaufbecken als Fangbecken oder Durchlaufbecken ausgeführt. Entlastungen in das Gewässer können über einen vorgeschalteten Beckenüberlauf und/oder über einen Klärüberlauf im Becken erfolgen.

Stauraumkanäle

Ein Sonderfall von Regenüberlaufbecken sind Stauraumkanäle. Stauraumkanäle besitzen in der Regel nur einen Überlauf in das Gewässer. Je nach Anordnung dieses Überlaufs werden sie in Stauraumkanäle mit oben und unten liegender Entlastung unterschieden. Ist der Überlauf oben (SKO), also am Beginn des Kanals angeordnet, ist der Staukanal im Hinblick auf die Wirkungsweise einem Fangbecken gleichzusetzen. Ist der Überlauf unten (SKU) angeordnet, ähnelt der Kanal einem Durchlaufbecken, weist aber schlechtere Absetzwirkungen auf.

Regenklärbecken

Im Trennverfahren werden zur Regenwasserbehandlung Regenklärbecken eingesetzt. Diese wirken analog zu Regenüberlaufbecken im Mischverfahren. Regenklärbecken können unterschieden werden in:

- Regenklärbecken mit Dauerstau (RKBmD): Das Becken ist (zumindest teilweise) ständig mit Wasser gefüllt, Sedimente werden nur in großen Zeitintervallen (mehrere Jahre) abgezogen, daher sind diese Becken nicht mehr zeitgemäß,
- Regenklärbecken ohne Dauerstau (RKBoD): Das Becken wird nach jedem Einstau vollständig, meist zur Kläranlage, entleert.

Retentionsbodenfilteranlagen

Zur weitergehenden Regenwasserbehandlung werden sowohl in der Misch- als auch in der Trennentwässerung Retentionsbodenfilteranlagen eingesetzt. Diese sind bei Mischentwässerungen grundsätzlich zweistufig aufgebaut. Die erste Stufe besteht aus einem klassischen, vorstehend beschriebenen Regenbecken (RÜB, SK, RKB), das Grobstoffe durch Absetzwirkungen von der zweiten Stufe, dem Retentionsbodenfilter, fernhält. Im Grundprinzip arbeitet der Retentionsbodenfilter wie ein Regenrückhaltebecken, dessen Drosselablauf über eine Filterschicht gereinigt wird. Für Retentionsbodenfilter wird auf das Handbuch für Planung, Bau und Betrieb verwiesen [Grotehusmann et al., 2015].

Regenrückhaltebecken

Neben den Anlagen zur Regenwasserbehandlung gibt es Regenbecken, die eine reine Rückhaltefunktion haben. Dabei ist zwischen Regenrückhaltebecken im Netz und Regenrückhaltebecken vor Einleitung in ein Gewässer zu unterscheiden.

Regenrückhaltebecken im Netz dienen der hydraulischen Entlastung des nachfolgenden Netzes und haben keinen Überlauf mit Systemauslass. Diese Anlagen haben keine Reinigungsfunktion, sodass bei der Beckengestaltung betriebliche Aspekte wie Vermeidung von Ablagerungen im Vordergrund stehen.

Regenrückhaltebecken vor Einleitung in ein Gewässer dienen dem Schutz des Gewässers vor hydraulischer Belastung, wobei ökologische Aspekte und weniger der Hochwasserschutz im Vordergrund stehen. Häufig sind diese Anlagen als offene Erdbecken ausgeführt, die mit starren, ungeregelten Drosseln oder einfachen mechanischen Drosselorganen ausgerüstet sind.

Energieverbrauch von Regenbecken

Regenbecken sind als Anlagen des Kanalnetzes an verschiedenen Standorten im Einzugsgebiet angeordnet und unterliegen i. d. R. keiner ständigen Kontrolle durch das Betriebspersonal. Daher werden bei der Planung betriebsichere und wartungsarme Lösungen, häufig ohne den Einsatz von Fremdenergie, angestrebt. Dementsprechend ist das Energieeinsparpotenzial i. d. R. gering. Der energierelevanteste Bereich ist die Ausführung der Beckenreinigung.

Energierelevante Aggregate bei Regenbecken und der weitergehenden Regenwasserbehandlung sind:

- Rührwerke
- Strahlreiniger
- Pumpen

Regenbecken sind neben den für die Funktion des Beckens erforderlichen Aggregaten mit weiteren Einrichtungen, die einen ordnungsgemäßen Beckenbetrieb unterstützen, ausgestattet. Dazu zählen Messtechnik, Beleuchtung, Belüftung, Heizung von Betriebsgebäuden und Schaltschränken. Während die Messtechnik und die Beleuchtung (kurze Betriebszeiten) im Hinblick auf den Energiebedarf von untergeordneter Bedeutung sind, können künstliche Be- und Entlüftungsanlagen über Ventilatoren und die Beheizung von Betriebsgebäuden, Drosselschächten (MID) und Schaltschränken einen erheblichen Anteil am Gesamtstrombedarf eines Regenbeckens ausmachen.

Untersuchungen und Auswertungen zum Energiebedarf von Regenbecken liegen so gut wie nicht vor. Der Jahresenergieverbrauch hängt stark vom Regenanfall im Betrachtungsjahr ab, sodass die zeitliche Entwicklung des Energieverbrauchs keine direkte Aussage zum technischen Zustand der Regenbeckenanlage zulässt. Hinweise zu Regenbecken und Regenwasserbehandlung sind im Arbeitsblatt DWA-A 117 [DWA, 2014a], DWA-A 166 [DWA, 2013a] und im Merkblatt DWA-M 176 [DWA, 2013b] festgehalten.

Um einen Aufbau von Ablagerungen in Regenbecken zu vermeiden und damit einen unnötigen Schmutzfrachtaustrag bei einem nachfolgenden Entlastungsereignis oder Betriebsprobleme (Geruchsbildung) zu verhindern, werden Regenbecken zum Teil mit automatischen Reinigungseinrichtungen ausgestattet.

Dabei ist im Wesentlichen zwischen Systemen, die eine Beckenreinigung nach Entleerung des Beckens durchführen, und Systemen, die ein Absetzen von Schmutzstoffen bzw. eine Remobilisierung von abgesetzten Schmutzstoffen bewirken, zu unterscheiden.

Zur ersten Gruppe gehören Systeme, die die Reinigung der Beckensohle mit Hilfe eines Wasserschwall durchföhren. Hierzu gehören Spülkippen und Schwallspülungen (Vakuumpülungen, Klappenspülungen). Bei diesen Systemen werden nur klein dimensionierte Pumpen für die Beschickung von Spülkippen und -kammern bzw. zur Erzeugung eines Unterdrucks eingesetzt, die nur sehr geringe Laufzeiten aufweisen. Aus energetischer Sicht spielen diese Systeme daher eine untergeordnete Rolle.

Anders verhält es sich bei Systemen, die die Schmutzstoffe während des Entleerungsvorganges in Schwebelage halten bzw. remobilisieren. Hierzu gehören Strahlreiniger und Rührwerke. Je nach Beckengröße werden teilweise mehrere Aggregate mit relativ großem Leistungsbedarf benötigt, um eine ausreichende Reinigungsleistung zu erzielen. Hinzu kommen relativ lange Laufzeiten über den gesamten Entleerungsvorgang. Dies kann bei Netzen mit einem hohen Fremdwasseranfall und den damit verbundenen Nachlaufzeiten problematisch sein. Daher ist der Energiebedarf dieser Systeme deutlich höher als bei den mit Wasserschwallreinigung arbeitenden Systemen.

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht ist der Einsatz von Strahlreinigern und Rührwerken in Durchlaufbecken und Staukanälen mit unten liegender Entlastung kritisch zu sehen. Die remobilisierten Schmutzstoffe können bei einem innerhalb der Entleerungszeit nachfolgenden Regenereignis in das Gewässer ausgeschwemmt werden. Vorteile haben diese Systeme bei schwierigen Beckengeometrien und bei der Nachrüstung von Anlagen, da sie flexibel ohne große bauliche Anforderungen installiert werden können.

Grundsätzlich wird angestrebt, die Beckenentleerung nach Regenereignis weitgehend im Freigefälle zu realisieren. Bei weniger geneigtem Gelände oder nicht ausreichender Tiefenlage der weiterführenden Kanalisation wird häufig eine Restentleerung über Pumpen erforderlich. Aufgrund der kleineren Fördermengen und der geringen Förderhöhen können klein dimensionierte Pumpen zum Einsatz kommen. In Verbindung mit der i. d. R. überschaubaren Anzahl von Einstau-/Entleerungsereignissen führt dieser Umstand zu einem relativ geringen Energiebedarf. Daher sollte bei der Auswahl des Pumpentyps und der Laufradform die Betriebssicherheit im Vordergrund stehen (vgl. Kapitel 4.2.4).



Häufig ist es wirtschaftlicher, tiefe Becken in kompakter Bauweise mit einer Restentleerung über Pumpen anstelle flacher, großflächiger Becken, die im Freigefälle entwässert werden können, zu realisieren. Natürlich wird dieser Aspekt durch optimale Gestaltung der Teilentleerung des oberen Beckenbereiches im Freigefälle (z. B. durch möglichst tief liegende Rückschlagklappen in den Zulaufschwelen) unterstützt. Die Förderleistung der Entleerungspumpe ist optimal auf das zur Verfügung stehende Entleerungskontingent (Drosselabfluss – Trockenwetterabfluss) abzustimmen, um eine Kreislaufförderung zu vermeiden. Eine Überdimensionierung der Pumpen bringt hier keine Vorteile.

Dezentrale Regenwasserbehandlungsanlagen

Dezentrale Regenwasserbehandlungsanlagen wie Filtereinsätze in Straßeneinläufen oder Kompaktfilteranlagen für kleinere Anschlussflächen kommen häufig ohne den Einsatz von Fremdenergie aus. Allerdings erfordern sie einen Aufwand an Kontrolle, Wartung und Reinigung, der mit einem entsprechenden mobilen Energieeinsatz durch das Betriebspersonal verbunden ist. Wie bereits in Kapitel 3.1.2 erläutert, führt eine wartungsfreundliche und betriebsereichernde Ausführung solcher Anlagen zu einer Reduzierung dieser mobilen Energiekomponente.



3.2 Mechanische Vorreinigung

3.2 Mechanische Vorreinigung

3.2.1
Rechenanlage

3.2.2
Sand- & Fettfang

3.2.3
Vorklärung

3.2.1 Rechenanlage

Ein Rechen dient der Entfernung der im Abwasser enthaltenen Grob- und Sperrstoffe und damit dem Schutz der nachfolgenden Einrichtungen der Kläranlage vor mechanischen Beschädigungen und Verzopfungen. Unmittelbar betroffen sind meist die Pumpen, Belüftungseinrichtungen, Rührwerke und Mischer in Faulbehältern [Hansen et al., 2014].

Rechenanlagen lassen sich einteilen nach der Art und Form der Trennelemente, nach der Art ihrer Reinigungselemente und der Durchlassweite (Tabelle 3-2).

Art und Form der Trennelemente

- Stabrechen
- Bogenrechen
- Trommelrechen
- Stufenrechen
- Bandrechen

Art der Reinigungselemente

- Harken mit Eingriff im Mitstrom
- Harken mit Eingriff im Gegenstrom
- Bürsten
- Spritzdüsen
- Schaber

Neben den aufgeführten verbreiteten Bauarten gibt es Sonderbauformen, um den unterschiedlichen abwasserspezifischen, hydraulischen und baulichen Anforderungen gerecht zu werden. Siebe als Sonderbauform kommen bevorzugt bei kleinen Durchlassweiten oder speziellen Verfahren wie dem Membranbelebungsverfahren zum Einsatz. Die Normung [DIN, 2016b] zur Einteilung der Rechen und Siebe wurde der technischen Entwicklung angepasst.

Tabelle 3-2 Öffnungsweiten von Rechenanlagen [DIN, 2016b]

Rechenanlagen	Öffnungsweiten
Grobrechen	20 mm oder größer
Mittelrechen	8 mm bis unter 20 mm
Feinrechen	über 1 mm bis unter 8 mm
Feinstrechen	0,05 mm bis 1 mm
Mikrosieb	unter 0,05 mm

Rechenanlagen werden üblicherweise im Zulauf eingebaut. Sofern in weiteren Teilanlagen verfahrens- oder strömungsbedingte Verzopfungen auftreten, können dort zusätzliche und auf den jeweiligen Bedarf abgestimmte Rechenanlagen vorgesehen werden.

Folgende Kombinationen haben sich in der betrieblichen Praxis bewährt:

- Die Kombination eines Grob- oder Mittelrechens mit einem Feinrechen im Zulauf ist vor allem dann zu empfehlen, wenn das Abwasser im Freigefälle zufließt und Grobstoffe enthält, die ein Feinrechen nicht verarbeiten kann oder die diesen sogar schädigen können. Dann übernimmt der Grobrechen neben seiner eigentlichen Aufgabe eine Schutzfunktion.
- Wenn ungünstige hydraulische Verhältnisse im Zulauf den Einbau einer leistungsfähigen Rechenanlage nicht zulassen, bietet sich die Anordnung eines Feinrechens im Rücklaufschlamm an. Hier sind zudem oft ausreichende hydraulische Reserven vorhanden. Weitere Vorteile eines Rücklaufschlammrechens sind die Entfernung von Verzapfungen, die erst im Belebungsbecken entstehen, und die geringere Abrasionswirkung gegenüber der Anordnung vor dem Sandfang. Wegen der geringen Durchflussschwankungen kann die Dimensionierung besser auf den Einsatzfall abgestimmt werden.



Das Rechengut wird behandelt und entsorgt. Mit einer Rechengutwäsche wird der organische Anteil reduziert; das ist eine wesentliche Voraussetzung für eine kostengünstige Entsorgung. Durch eine Rückführung der organisch belasteten Waschwässer wird das C/N-Verhältnis verbessert; dies wirkt sich günstig auf eine vorgeschaltete Denitrifikation aus. Durch den Einsatz einer Rechengutpresse kann das Volumen des Rechenguts um bis zu **50–70 %** reduziert werden; dadurch werden Transportkosten und -energie eingespart.

Neben den konventionellen Einzelaggregaten zur Rechengutbehandlung (Kolben-, Walzen-, Schneckenpressen) haben sich in den letzten Jahren vor allem kombinierte (Rechengutwaschpresse) und an die örtlichen Verhältnisse angepasste Bauformen etabliert.

Die Behandlung des Rechenguts durch Zerkleinerung und Rückführung in das Abwasser oder in den Schlammkreislauf wurde bisher nur im Einzelfall eingesetzt. Den Vorteilen einer Minimierung des zu entsorgenden Rechenguts und eines leicht erhöhten Gasanfalls stehen negative Begleiterscheinungen wie Verstopfungen und Abrasion von Pumpen sowie Probleme mit Schwimmstoffen gegenüber [LfUG, 2006].



Die Antriebstechnik für die überwiegend langsamen Bewegungen bei teilweise sehr hohen Kräften (Pressen) kann entweder mit Elektromotoren und Getrieben mit hoher Übersetzung oder direkt mit hydraulischen Antriebselementen (Zylinder) realisiert werden. Grundsätzlich sind bei der Auslegung dieser Antriebe hohe Leistungsreserven vorzusehen, damit auch in ungünstigen betrieblichen Situationen eine zuverlässige Betriebsweise gewährleistet ist. Zu schwach ausgelegte Antriebe führen in der betrieblichen Praxis dazu, dass die Taktzeiten präventiv erhöht werden. Weil der Stromverbrauch nur unwesentlich von der tatsächlichen Belegung des Rechens abhängt, führt die höhere Anzahl der Räumzyklen am Ende zu einem höheren Stromverbrauch. Bei der vergleichsweise geringen Einschaltdauer der Hauptaggregate fallen permanent betriebene Nebenaggregate wie Wasserpumpen, Ölpumpen und Automatisierungskomponenten (SPS, Schaltschrankheizungen etc.) beim Stromverbrauch umso mehr ins Gewicht. Deshalb sollte bei diesen Aggregaten auf eine möglichst niedrige Leistungsaufnahme geachtet werden.



Beim Stromverbrauch liegen die Erfahrungswerte aus durchgeführten Energieanalysen bei **2.000–5.000 kWh/a**. Nach dem DWA-A 216 wird ein Bereich von **5.000–10.000 kWh/a** angegeben. Der Verbrauch ist abhängig vom Rechengutanfall und den Anforderungen an die Rechengutbehandlung (Wäsche, Presse). Hohe Leistungsreserven der Aggregate führen in der Regel nicht zu höheren Verbrauchswerten, weil sich der Verbrauch in erster Linie aus der Einschaltdauer



der Aggregate ergibt und sich der Leistungsbedarf an die tatsächliche Belastung anpasst. Wenn der gemessene Verbrauch deutlich höher liegt, empfiehlt sich eine messtechnische Überprüfung durch eine kontinuierliche Aufzeichnung des Gesamtverbrauchs der Rechenanlage. Anhand des zeitlichen Verlaufs beim Stillstand und während eines Räumzyklus lässt sich erkennen, ob die Leistungsaufnahme einzelner Aggregate erhöht ist oder ob gar der Verbrauch im Stillstand den Gesamtverbrauch dominiert.

Rechenanlagen werden in der Regel eingehaust, vor allem aus Gründen des Frostschutzes. Der Energieverbrauch (Strom und Wärme) für die Zu- und Abluft sowie zur Beheizung wird in



Kapitel 3.7 Kläranlageninterne Infrastruktur betrachtet. Einige bewährte Maßnahmen zur Energieeinsparung sind vor allem dem Bereich der Abluftreinigung zuzuordnen:

- Verwendung von Endlossäcken zur Reduzierung der Geruchsemissionen beim Abwurf in einen Container,
- Gezielte, räumlich abgegrenzte Absaugung direkt an den Emissionsquellen,
- Vermeidung unnötig hoher Anforderungen an die Be- und Entlüftung des Rechenhauses. Beispielsweise kann durch eine Kapselung der wasserberührten Teile und eine Teilabdeckung der Gerinne die Bildung von Kondenswasser verringert werden. Bei der Festlegung der Ex-Schutz-Zonen reicht es in der Regel aus, diese auf die Gerinneoberkante zu beschränken. Beide Maßnahmen führen zu einem geringeren Be- und Entlüftungsbedarf,
- Zu- und Abschaltung der Belüftung über Gaskonzentrationsmessung.

3.2.2 Sand- und Fettfang

Sand führt einerseits zu einem abrasiven Verschleiß an allen Komponenten mit direktem Kontakt zum Medium (Abwasser, Schlamm), dies sind insbesondere Pumpen, Schlammzentrifugen und Rohrleitungen. Andererseits lagert sich Sand in Bauwerken ab. Besonders anfällig für Sandablagerungen sind Belebungsbecken und Faulbehälter. Über Jahre hinweg kann der Sand sich so verfestigen, dass sich die Sedimente meist nicht mehr mit Spülwagen, sondern nur noch mit schwerem Gerät (Bagger) entfernen lassen.

Flotierbare Anteile im Abwasser, meist bestehend aus lipophilen Stoffen und deren Emulsionen, werden als Fette bezeichnet. Diese verklumpen mit Feststoffen, lagern sich an Beckenwänden oder in Rohrleitungen an und sind dann nur mit großem Aufwand zu entfernen. Andererseits sind Fette sehr energiereich, sodass durch Sammlung und konzentrierte Zugabe in den Faulbehälter die Gasproduktion gesteigert werden kann.

Der Transport der Fette mittels einer separaten Rohrleitung über längere Strecken ist allerdings wegen möglicher Verfestigungseffekte problematisch. Einer Verstopfung kann durch die Verflüssigung der Fette mittels einer elektrischen Rohrbegleitheizung entgegengewirkt werden; der Stromverbrauch kann dabei erheblich sein.

Die zur Elimination der im Abwasser enthaltenen Sand- und Fettanteile sowie zur Aufbereitung und zur Entsorgung eingesetzte Anlagentechnik lässt sich in folgende Verfahrensschritte einteilen:

- Sand- und Fettfang (Bauwerk, Gerinne, Luftbereitstellung),
- Sandfangräumung (Entnahme und Transport des Abwasser-Sand-Gemisches),
- Sandfanggutbehandlung (Entwässerung und Abtrennung organischer Anteile) durch Wäsche.

Nachfolgend werden zunächst die Verfahrensschritte und Teilanlagen einzeln beschrieben. Anschließend wird die Gesamtfunktionalität an einer typischen Anlage erläutert. Daraus lassen sich dann Maßnahmen zur betrieblichen und energetischen Optimierung ableiten. Das primäre Ziel ist die möglichst vollständige Sandelimination, weil sich dadurch in allen Bereichen Verbesserungen ergeben. Bei einer Kosten-Nutzen-Berechnung fallen die Entsorgungskosten und die Energiekosten ins Gewicht, wobei die Entsorgungskosten in der Regel deutlich höher als die Energiekosten sind.

Bauwerk und Gerinne

Sandfänge werden nach dem Abscheideprinzip, der Beckenform und dem Räumprinzip unterschieden (Tabelle 3-3).

Die geläufigste Form ist ein belüfteter Sandfang (Bild 3-3) mit Saug- oder Schildräumer. Ein Fettfang kann unter strömungs- und bautechnischen Gesichtspunkten günstig mit einem belüfteten Sandfang kombiniert werden. Die heute oftmals eingesetzte Bauform eines Sand-/Fettfangs ist ein belüfteter Sandfang mit Saugräumer (kurz: „Belüfteter Sand-/Fettfang“).

Der Fettfang wird in Längsrichtung parallel zum Sandfanggerinne durch eine mittels Tauchwand oder geschlitzter Trennwand separierte Zone geschaffen. Durch die erzeugte Walzenströmung werden die Fette unter diese Tauch- bzw. Trennwand gezogen, schwimmen in der Zone des Fettfangs auf und werden mit einem Räumern zu einem Sammelschacht geschoben. Von dort werden sie mit speziellen Pumpen weitertransportiert.

Tabelle 3-3 Einteilung von Sandfängen nach verfahrens- und bautechnischen Gesichtspunkten [Stein et al., 1998]

Unterscheidung nach	Varianten
Abscheideprinzip	<ul style="list-style-type: none"> ■ unbelüfteter Sandfang ■ belüfteter Sandfang ■ belüfteter Sand- und Fettfang
Beckenform	<ul style="list-style-type: none"> ■ Rundsandfang ■ Langsandfang ■ Flachsandfang
Räumprinzip	<ul style="list-style-type: none"> ■ Saugräumer ■ Schildräumer ■ Förderschnecke

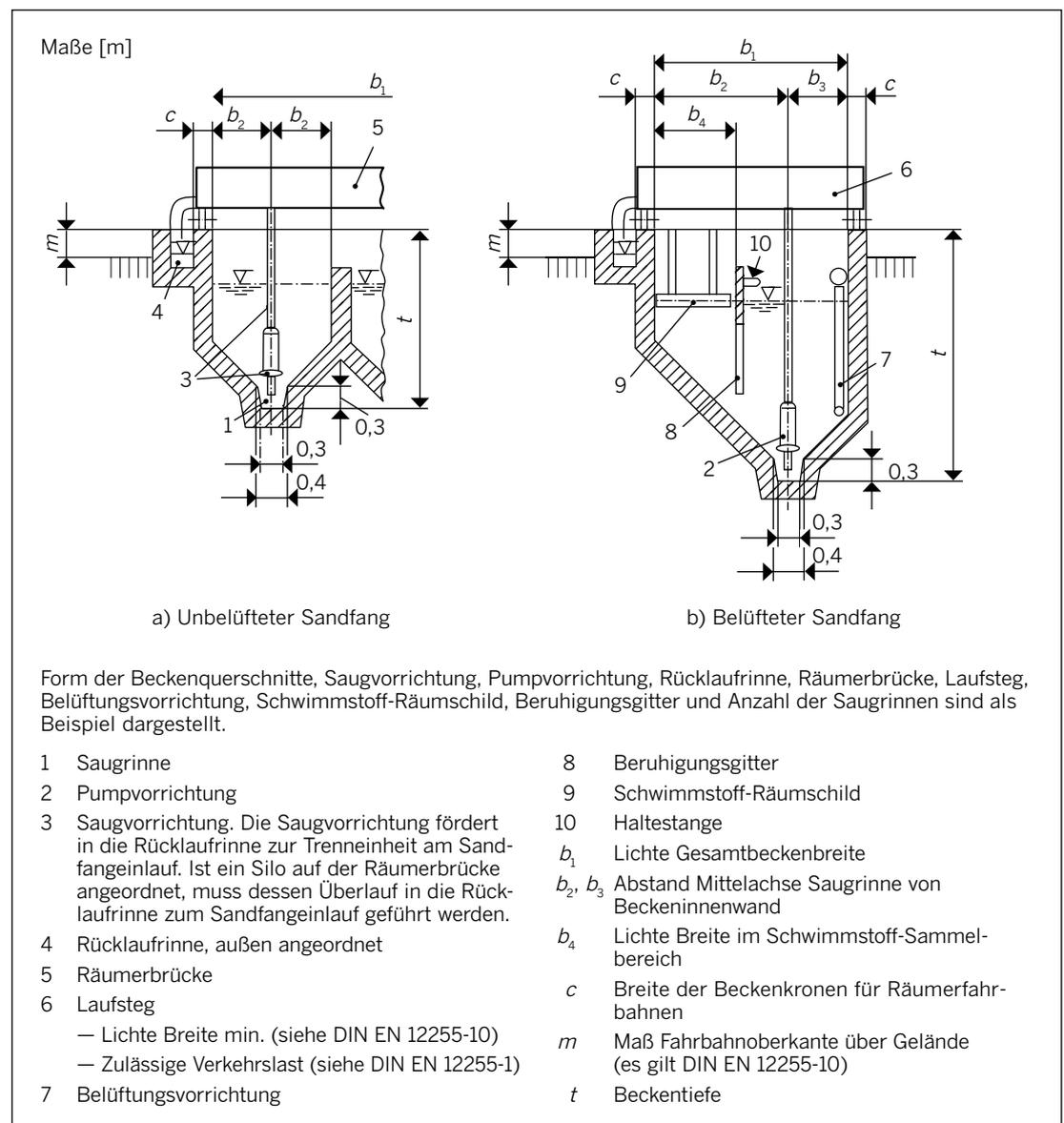


Bild 3-3 Rechteckbecken als unbelüfteter und belüfteter Sandfang mit Saugräumer nach [DIN, 2002]

In der Sandfangkammer bildet sich aufgrund der länglichen Beckenform zunächst eine Horizontalströmung aus. Diese wird mittels einer seitlich angeordneten bodennahen Linienbelüftung durch eine Querströmung überlagert, sodass schließlich eine Spiralströmung (Strömungswalze) entsteht. Die Zufuhr von Druckluft dient ausschließlich dazu, die Querströmung zu initiieren und die Horizontalströmung abzulenken. Die Linienbelüftung muss grobblasig sein (Lochdurchmesser ca. 2–5 mm), um eine hohe Düsenwirkung zu erzielen; ein Sauerstoffeintrag ist nicht angestrebt.

Infolge der durch die Spiralströmung entstehenden Fliehkräfte werden die (leichten) organischen Stoffe von den (schwereren) nach außen drängenden und dann herabsinkenden Sandpartikeln getrennt. Zudem ist dadurch die Funktionsfähigkeit des Fettfangs gegeben, da erfahrungsgemäß bei bestehenden und nach den gültigen technischen Regeln dimensionierten Sandfängen im Normalbetrieb (Trockenwetterzulauf) der größte Teil des Sandes bereits auf dem ersten Drittel der gesamten Länge des Sandfangs abgeschieden wird.

Der Energieverbrauch für den Betrieb eines Sand- und Fettfangs ergibt sich im Wesentlichen aus dem erforderlichen Druckluftbedarf. Der spezifische Luftbedarf liegt bei **0,5–1,3 m_N³/h** Druckluft pro m³ belüftetes Sandfangvolumen [Stein et al., 1998]. Es ist deshalb wichtig, bei einem von der Zulaufmenge abhängigen abschnittswisen Betrieb die Luftmenge auf das jeweils belüftete Volumen anzupassen. Die Luftmenge ist dann ausreichend, wenn sich im Sandfang die gewünschte Querströmung einstellt, was durch eine einfache Sichtkontrolle an der Wasseroberfläche überprüft werden kann. Ein über diese Mindestmenge hinausgehender Lufteintrag bringt keine Vorteile; durch entstehende Verwirbelungen kann sogar die Funktion des Fettfangs beeinträchtigt werden. Eine sprudelnde Belüftung ist ein sicheres Anzeichen für einen zu hohen Lufteintrag oder eine unzulängliche Luftverteilung.

Die Luftbereitstellung erfolgt wegen der geringen Einblastiefe von ca. 1,50–4 m vorzugsweise mit Drehkolbengebläsen mit einer spezifischen Leistung von **45–60 W/(m_N³/h bar)**. Für den tatsächlichen Luftbedarf und den sich aufgrund der Einblastiefe ergebenden Druck lässt sich überschlägig die Gebläseleistung berechnen und daraus der sich im Dauerbetrieb ergebende jährliche Energieverbrauch. Bei der Auswahl der für den Lufteintrag notwendigen Drehkolbengebläse ist darauf zu achten, dass die Maschinendrehzahl im energieeffizienten Bereich liegt und keinesfalls die vom Hersteller vorgegebene Mindestdrehzahl unterschritten wird. Bei schwierigen hydraulischen Verhältnissen kann es sinnvoll sein, die Gebläse mit Frequenzumrichtern auszurüsten, um durch die Drehzahlverstellung den Lufteintrag im späteren Betrieb zu optimieren. Alternativ kann im Rahmen der Inbetriebnahme eine Anpassung der Luftmenge durch einen Austausch der Keilriemenscheiben erfolgen und auf den Einsatz eines Frequenzumrichters verzichtet werden.

Ebenfalls kann die Strömungsumlenkung teilweise oder sogar vollständig durch eine Veränderung der hydraulischen Situation im Zulauf des Sandfangs erreicht werden [Botsch, 2010]. Vereinfacht gesagt, wird dabei das zufließende Abwasser mit Leitblechen umgelenkt, sodass es tangential in den Sandfang einströmt und zur Unterstützung der Strömungswalze beiträgt.

Sandentnahme

Zur Sandentnahme aus dem Trichter und dem Transport zur Sandbehandlungsanlage sind aufgrund der abrasiven Eigenschaften des Abwasser-Sandgemisches nur wenige Aggregate geeignet:

■ Druckluftheber (Mammutpumpen)

Erfahrungsgemäß werden Mammutpumpen zur Gewährleistung des verstopfungsfreien Betriebs mit einer Nennweite von mindestens 100 mm gebaut und mit viel zu großer Luftmenge betrieben. Die unnötig eingeblassene Luft ist in der Regel die wesentliche Ursache für eine negative energetische Bewertung. Weiterhin kann eine Entnahme mit festem Zeittakt ohne Orientierung am Bedarf zu einem erhöhten Energieverbrauch führen.

■ Kreiselpumpen

Kreiselpumpen zur Entnahme des Abwasser-Sandgemisches können nur mit Freistromrädern und entsprechender Beschichtung (Panzerung) des Laufrades eingesetzt werden. Die Standzeiten bis zur Überholung hängen von der Beanspruchung ab; sie liegen in der Regel bei etwa fünf Jahren.



Beim Einsatz von Kreiselpumpen ist die Antriebsleistung aufgrund der auf die nachfolgende Behandlungsstufe abzustimmenden niedrigeren Fördermenge deutlich geringer. Das kann allerdings dazu führen, dass die Pumpe beim Anlaufen oder bei größerem Sandanfall infolge von Mischwasserzuflusses versagt. Um dies zu vermeiden, werden Kreiselpumpen mit wesentlich höherer Einsatzdauer betrieben als verstopfungsunanfällige und robuste Mammutpumpen. Unterm Strich führen die niedrige Einschaltdauer und die hohe Leistungsaufnahme der Mammutpumpe im Vergleich mit der hohen Einschaltdauer und der niedrigen Leistungsaufnahme einer Kreiselpumpe zu ähnlich hohen Stromverbräuchen (vgl. Kapitel 4.2.4).



Sandfanggutaufbereitung

Bei der Aufbereitung des entnommenen Sandfangguts wird zwischen Sandklassierern und Sandwäschern unterschieden. Ein Klassierer dient in erster Linie zur Entwässerung; eine Trennung von mineralischen und organischen Bestandteilen gelingt erfahrungsgemäß nur unvollständig. Sandwaschanlagen erzielen bei dieser Aufgabe wesentlich höhere Wirkungsgrade. Dabei wird mit dem zugeführten Waschwasser in einem separaten Behälter eine Wirbelschichtzone aufgebaut und die Organik von der Sandfraktion „abgewaschen“. Es wird zwischen ein- und mehrstufigen Sandwaschanlagen unterschieden. Mehrstufige Sandwäscher können wegen der deutlich höheren Kosten nur auf großen Kläranlagen wirtschaftlich betrieben werden [Stein et al., 1998].

Das Optimierungspotenzial liegt im Wasserverbrauch und der für die Brauchwasserbereitstellung benötigten Energie sowie im Ergebnis der Aufbereitung, weil sich durch die Entfernung der Organik der Abfallschlüssel ändert und dadurch geringere Entsorgungskosten anfallen.



Effizienzmaßnahmen

Eine wesentliche Voraussetzung für die möglichst vollständige Sandelimination ist die aufeinander abgestimmte Bemessung und der Betrieb aller Teilanlagen und Aggregate. Konkurrierende Anforderungen ergeben sich vor allem für die zulässige Beschickung der Sandfanggutaufbereitung und die zur Vermeidung von Verstopfungen notwendige Mindestfördermenge bei Entnahme und Transport. Weil zur Sandfanggutaufbereitung meist eine Sedimentation eingesetzt wird, sind solche Anlagen sehr empfindlich gegen eine hydraulische Überlastung, auch wenn sie nur sehr kurzfristig (wenige Sekunden) auftritt. Deshalb empfiehlt sich zur Sicherheit gegen hydraulische Überlastung der Betrieb mit einer reduzierten Beschickungsmenge. Das hat den Vorteil, dass sich gerade die Abscheidung kleiner Korngrößen bzw. feiner Sande verbessert.

Die konkurrierenden Forderungen lassen sich auflösen, wenn zwischen der Sandentnahme und der Sandfanggutaufbereitung eine hydraulische Weiche als Mengenbegrenzer eingesetzt wird [Botsch, 2013a]. Dadurch wird zwar eine Teilmenge des Abwasser-Sand-Gemisches nur im Kreis gepumpt. Durch die begrenzte Menge wird aber eine hohe Eliminationsrate erreicht und die Sandentnahme läuft betriebssicher.

Für weitere Hinweise zur Optimierung wird insbesondere auf den Leitfaden „Sandfang für Betreiber und Planer“ verwiesen [Botsch, 2013b]. Dort wird u. a. auf die konstruktive Gestaltung der Bauwerke zur strömungstechnischen Optimierung, auf maschinentechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Betriebsverhaltens und Maßnahmen für den koordinierten Betrieb von Sandfang, Entnahme und Behandlung eingegangen. Als weiteres Hilfsmittel zur Optimierung hat sich die Strömungssimulation erwiesen [Hunze, 2005].

Bei einer energetischen Optimierung des Sand-/Fettfangs sollten die Auswirkungen auf die Leistung durch eine Bestimmung der Sieblinie des Sandfangguts vor und nach Umsetzung der Maßnahme kontrolliert werden.

Zur Verbesserung der Fettabscheidung können Tauchmotorrührwerke eingesetzt werden, die die Strömung auf die Trennwand zwischen Sand- und Fettfang und durch eine zusätzliche Öffnung zum Fettfang umlenken [Botsch, 2013b].

Statt der Begleitheizung für die Fettleitungen kann auch eine Dosierung eines biologischen Rohrreinigers aus Mikroorganismen und fettlösenden Enzymen die Förderung des Fettes erleichtern [Stier, 2016].

3.2.3 Vorklärung

In der Vorklärung werden absetzbare Stoffe durch Sedimentation vom Rohabwasser getrennt. Die Durchflusszeit wird üblicherweise auf **0,5–2 h**, bezogen auf den Trockenwetterzulauf, bemessen. In der Praxis können aufgrund der tatsächlichen Bandbreite der Zulaufmengen deutlich größere Schwankungen der Aufenthaltszeiten auftreten. Dadurch kann es zu einer unerwünschten Speicherwirkung von Abwässern mit hohen Schmutzkonzentrationen bei kleinen Zuflüssen kommen. Bei dann einsetzendem Regen kommt es zu einer hydraulischen Verdrängung des Vorklärbeckeninhalts in das Belebungsbecken. Die auftretende Belastungsspitze ist verfahrenstechnisch nur sehr schwer zu beherrschen und verursacht außerdem eine energetische Lastspitze. Diesem Effekt lässt sich entgegenwirken, indem die unerwünschte Speicherwirkung der Vorklärung durch betriebliche Maßnahmen vermieden wird. Beispielsweise sollte Prozesswasser aus der Schlamm-entwässerung nicht in den Zulauf der Vorklärung gegeben werden, sondern in den Zulauf zum Belebungsbecken. Vorklärbecken können auch so umgebaut werden, dass man sie als Ausgleichsbecken mit variablem Füllvolumen betreiben kann. Dann lässt sich eine Speicherwirkung durch einen möglichst niedrigen Füllstand vermeiden.

Insgesamt müssen mit einem Vorklärbecken mehrere, teilweise konkurrierende Ziele in Einklang gebracht werden:

- die Elimination ungelöster Stoffe im Abwasser,
- die Vermeidung einer Speicherwirkung,
- die Entnahme des Rohschlammes mit einem möglichst hohen oTR-Gehalt, die sich wiederum auf die Gasausbeute und den Wärmebedarf für die Schlammaufheizung auswirkt.

Für eine Vorklärung sind folgende Bauweisen und Beckenformen üblich:

- Rundbecken mit zentraler Zuführung (Zulaufdüker) und Schild-/Saugräumer,
- Rechteckbecken mit Schild- oder Bandräumer.

Effizienzmaßnahmen

Der Energieverbrauch der Räumeinrichtungen ist gering und bietet bei konventionell aufgebauten Räubern kaum Optimierungspotenzial. Bei Verzicht auf die gewohnte Begehbarkeit der Räumerbrücke – insbesondere für Rechteckbecken möglich – wird die Konstruktion deutlich leichter, was zu kleineren Antriebsleistungen führt. Für Reparaturen wird der Räumer dann einfach auf das Gelände an einem Ende des Beckens rangiert. Die Leichtbauweise ermöglicht unter günstigen Voraussetzungen eine berührungslose Leistungsübertragung und den Verzicht auf die sonst üblichen Kabeltrommeln. Weiterhin interessant ist der Einsatz elektrohydraulischer Antriebe für die Räumschilde bei Rechteckbecken anstelle der sonst üblichen aufwendigen Hebeaggregate.

Besondere Aufmerksamkeit verdient die Betriebsweise des Primärschlammabzugs. Der früher übliche (sichtbare) Abzug allein durch hydrostatischen Druck neigt bei höheren TR-Konzentrationen zu Verstopfungen. Dies hat einen erheblichen betrieblichen Aufwand für Spülungen zur Folge. Zudem ist die Geruchsbelästigung kaum vermeidbar. Der Trend geht daher zu geschlossenen Systemen, bei denen der Schlamm quasi abgesaugt wird. Ein Nachteil dieser Systeme ist allerdings die fehlende Möglichkeit zur visuellen Kontrolle des Primärschlammabzugs. Daher sollten für den Schlammabzug Konstruktionen mit einer Sammelleitung eingesetzt werden, an deren Ende eine Trübungssonde eingebaut ist (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Pumpen werden dabei ohne Zwischenschacht in die Sammelleitung verschaltet. Der automatisierte Abzug erfolgt dann in der Weise, dass die Abzugsschieber der einzelnen Becken nacheinander geöffnet werden. Mit der Trübungssonde wird festgestellt, wann sich der TR-Gehalt verringert; dann wird der Abzugsschieber geschlossen. Für eine detaillierte Beschreibung mit speziellen Hinweisen zur MSR-Ausrüstung wird auf [Schweizer, o. J.] verwiesen. Aufgrund der für eine Feststoff- oder Trübungsmessung ungünstigen Eigenschaften von Rohschlamm muss entweder eine speziell dafür geeignete Sonde gewählt werden oder es kann alternativ die Höhe des Schlammspiegels im Trichter durch eine Ultraschallsonde erfasst werden.



Der Stromverbrauch für den Primärschlammabzug ist wegen der üblicherweise geringen Einschaltdauer von untergeordneter Bedeutung. Die entscheidenden Optimierungskriterien sind die Erzielung eines möglichst hohen TR-Gehalts und die Vergleichmäßigung des Schlammabzugs, um einen geringen Wärmebedarf und eine stetige Gasproduktion zu erreichen. Das setzt eine robuste Betriebsweise und entsprechend ausgelegte Pumpen voraus. Darüber hinaus lassen sich durch einen gleichmäßigen Primärschlammabzug unerwünschte Abbauprozesse mit Methanproduktion im Vorklärbecken vermeiden. Zur Auswahl und Auslegung der Pumpen ist anzumerken, dass diese in Bezug auf die Förderhöhe auf die nachfolgende Stufe (Voreindicker oder Faulbehälter) bzw. die gewählte Betriebsweise ausgelegt sein müssen. Sinnvollerweise kommen hier Verdrängerpumpen (Exzentrerschneckenpumpen oder Drehkolbenpumpen) zum Einsatz. Nicht selten finden sich hier Kreiselpumpen, die nur auf die geodätische Höhe des Voreindickers oder Faulbehälters ausgelegt sind. Weil beim Abzug von stark eingedicktem Schlamm die Rohrleitungsverluste ansteigen, sinkt dann die Förderleistung bzw. der Energieverbrauch steigt. Eine Zugabe von Brauchwasser zur Verdünnung des Schlamms ist im Sinne einer Minimierung des Wärmebedarfs und der Erhöhung des Faulgasertrags (Aufenthaltszeit) kontraproduktiv.

Zur Verbesserung der Fließeigenschaften des Rohschlammes kann ein Teil des Überschussschlammes (ca. **10–30 %**) in die Vorklärung eingeleitet werden.



3.3 Biologische Reinigung

3.3 Biologische Reinigung

3.3.1
Allgemeine
Hinweise

3.3.2
Belebtschlamm-
verfahren

3.3.3
Sonderverfahren des
Belebtschlammverfahrens

3.3.4
Biofilm-
verfahren

3.3.5
Phosphor-
elimination

3.3.6
Nachklärung

3.3.1 Allgemeine Hinweise

Im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung in NRW wird als biologische Hauptstufe meist das Belebtschlammverfahren eingesetzt mit den Hauptaufgaben:

- Kohlenstoffelimination
- Stickstoffelimination
- Phosphorelimination (biologisch und/oder chemisch)

Die **Kohlenstoffelimination** sowie die **Nitrifikation** finden unter aeroben Milieubedingungen statt. Die Versorgung der Biomasse mit Sauerstoff ist von besonderer Relevanz beim Energieverbrauch der Kläranlage und stellt in der Regel den größten Stromverbraucher dar.

Die **Denitrifikation** findet unter anoxischen Verhältnissen statt und die Becken werden dauerhaft durchmischt. Voraussetzung ist das Vorhandensein abbaubarer Kohlenstoffverbindungen. Je nach Verfahrenswahl oder spezifischen Randbedingungen müssen diese Kohlenstoffverbindungen zum Teil extern zugegeben werden.

Die verstärkte **biologische Phosphorelimination** kann durch gezielte Verfahrensführung, in welcher der Belebtschlamm anaerobe und aerobe Phasen durchläuft, erreicht werden. Dadurch ist es möglich, die Phosphorinkorporation von etwa **3 %** der organischen Biomasse auf **5 %** zu steigern. Für diesen Prozess wird in der Regel ein separates Becken mit Durchmischung bzw. eine entsprechend abgestufte intermittierende Sauerstoffzufuhr im Belebungsbecken benötigt.



Die **chemische Phosphorelimination** wird meist notwendig, wenn die biologische Phosphorelimination nicht ausreicht, um das Reinigungsziel einzuhalten. Hierzu werden Simultanfällung, Vorfällung oder Nachfällung mit Eisen- oder Aluminiumsalzen angewendet. Der Energiebedarf für die Dosierpumpen ist bei diesen Verfahren meist vernachlässigbar gering. Bei höheren Anforderungen an die Reinigungsleistung kann eine nachgeschaltete Filteranlage notwendig werden (siehe Kapitel 3.4.1).



Daneben sind das Biofilmverfahren und verschiedene Sonderverfahren im Einsatz. Naturnahe Verfahren werden aufgrund der geringen energetischen Relevanz in diesem Handbuch nicht beschrieben. Des Weiteren werden patentierte Sonderverfahren zur Stickstoffelimination, wie das Tri-Cycle-Verfahren und das Jülicher Abwasserreinigungsverfahren (JARV) wegen des äußerst geringen Verbreitungsgrades in NRW in diesem Handbuch nicht betrachtet.

3.3.2 Belebtschlammverfahren

3.3.2.1 Allgemeine Hinweise

Das Belebtschlammverfahren basiert auf natürlichen Selbstreinigungsprozessen eines Gewässers. Diese werden durch technische Mittel intensiviert, sodass die Reinigungsprozesse in einem geringen Reaktorvolumen und in kürzerer Zeit ablaufen. Die Intensivierung bzw. die Herstellung eines optimalen Lebensraums für die Bakterien wird durch folgende Maßnahmen erreicht:

- Erhöhung der Organismen-Dichte (TS-Gehalt),
- Deckung des erhöhten Sauerstoffbedarfs (Belüftung),
- Optimaler Kontakt zwischen belebtem Schlamm, Abwasser und Sauerstoff (Durchmischung).

Die Bemessung von einstufigen Belebtschlammmanlagen ist umfassend im Arbeitsblatt DWA-A 131 [DWA, 2016b] beschrieben. Hinweise zu den Systemen für Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen sind dem Merkblatt DWA-M 229 [DWA, 2013d] zu entnehmen. Hinweise zur verfahrenstechnischen Gestaltung der Stickstoffelimination sind zusätzlich im Merkblatt DWA-M 269 [DWA, 2006a], zur Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen im Merkblatt DWA-M 209 [DWA, 2007c] und zur Automatisierung im Arbeitsblatt DWA-A 268 [DWA, 2016d] erläutert.

Das Belebtschlammverfahren unterscheidet sich in der Ausführung durch unterschiedliche Prozessgestaltungen der Stickstoffelimination, durch verschiedene Beckenunterteilungen respektive verschiedene Strömungsführungen und durch die Beckenform. Gängige Bau- und Betriebsformen zur Stickstoffelimination sind nachfolgend aufgelistet und in Bild 3-4 dargestellt:

- Vorgeschaltete Denitrifikation
- Kaskadendenitrifikation
- Simultane Denitrifikation
- Alternierende Denitrifikation
(De- und Nitrifikation gleichzeitig in getrennten Becken mit anschließendem Prozesswechsel)
- Intermittierende Denitrifikation
(De- und Nitrifikation zeitlich nacheinander im gleichen Becken)
- Nachgeschaltete Denitrifikation

Darüber hinaus gibt es kombinierte und mehrstufige Anordnungen der vorgenannten Verfahrensvarianten oder Erweiterungen des Verfahrens, wie z. B. vorgeschaltete anaerobe Mischbecken oder aerobe Selektoren.

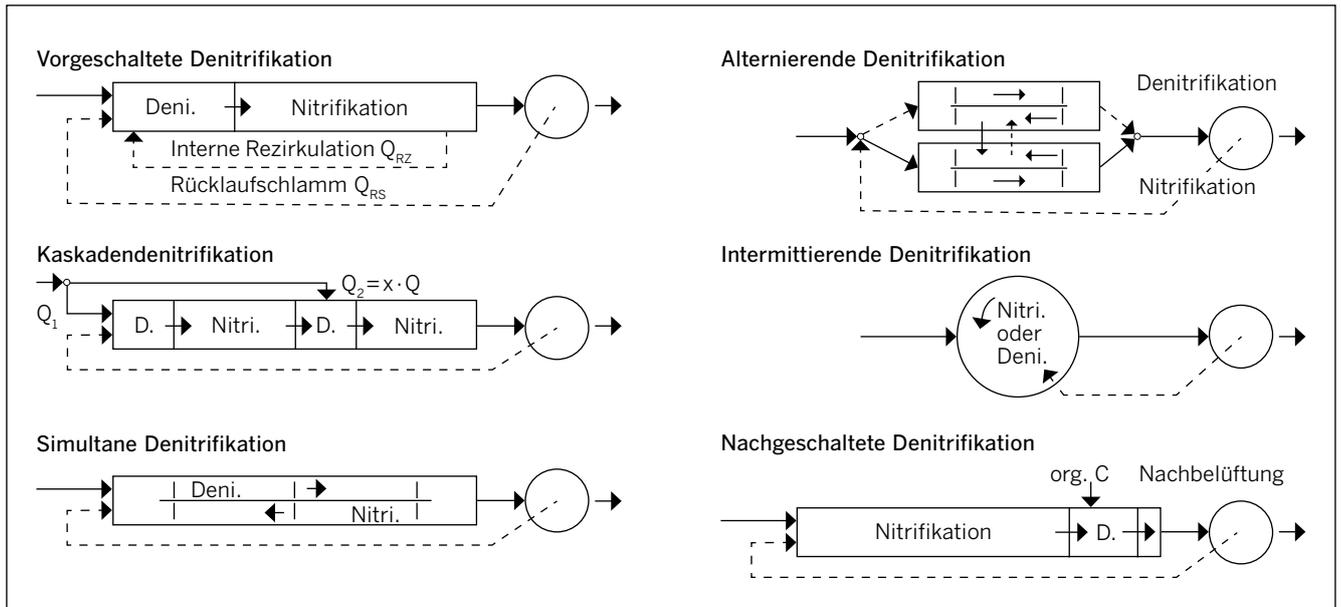


Bild 3-4 Verfahren der Stickstoffelimination nach [DWA, 2016b]



3.3.2.2 Effizienzmaßnahmen Belebtschlammverfahren

Für eine energetische Effizienzsteigerung muss immer die gesamte Verfahrensstufe ganzheitlich betrachtet werden. Änderungen in einzelnen Bereichen können einen wesentlichen Einfluss auf die anderen Bereiche besitzen. Die verschiedenen Effizienzmaßnahmen werden für folgende Eingriffsmöglichkeiten in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben:

- Auswahl der Verfahren
- Auslastung
- TS-Gehalt und Schlammalter
- Rezirkulation
- Rücklaufschlamm
- Durchmischung
- Belüftung



3.3.2.2.1 Effizienzmaßnahme – Auswahl der Verfahren

Grundsätzlich stellt sich als erste Frage die nach der Auswahl der Verfahren, die in Bild 3-4 dargestellt sind. Bei bestehenden Anlagen ist dies jedoch ein Faktor, der sich nur mit erheblichem baulichem Aufwand realisieren lässt. Bei Planung von neuen Anlagen sollte dies unter dem energetischen Aspekt zwingend betrachtet werden.

In den 1980er-/1990er-Jahren wurden in Deutschland größere Kläranlagen, die nach dem Belebtschlammverfahren geplant wurden, überwiegend mit einer vorgeschalteten Denitrifikation ausgerüstet. Bei der vorgeschalteten Denitrifikation ist die Verfahrensabfolge der biologischen Reinigung, bestehend aus Nitrifikation und anschließender Denitrifikation, umgekehrt. Aus diesem Grund wird eine Rezirkulation zwischen den Nitrifikations- und den Denitrifikationsbecken benötigt. Dies ist jedoch mit energetischem Aufwand für das Pumpen verbunden. Bei einer nachgeschalteten Denitrifikation hingegen ist die Zugabe von Kohlenstoff notwendig, da in der Nitrifikationsstufe dieser Kohlenstoff bereits größtenteils abgebaut ist.

Bei steigenden Strompreisen könnte sich die nachgeschaltete Denitrifikation als wirtschaftlich erweisen und zusätzlich die Betriebsstabilität der Kläranlagen verbessern. Dies ist jedoch mit einer Wirtschaftlichkeitsbewertung zu überprüfen.

Bei der Kaskadendenitrifikation durchläuft das Abwasser mehrere Becken. Im ersten Denitrifikationsbecken wird der aus der Nachklärung geförderte Rücklaufschlamm denitrifiziert und in den nachfolgenden Denitrifikationsbecken das im vorhergehenden Nitrifikationsbecken gebildete Nitrat. Eine interne Rezirkulation sowie die zusätzliche Kohlenstoffzugabe sind bei der Kaskaden

denitrifikation nicht erforderlich. Dafür ist der verfahrenstechnische Aufwand für die Abwasserverteilung aufwendiger.

Bei der simultanen Denitrifikation erfolgt die Umsetzung zeitgleich in einem Umlaufbecken mit Zonen für die Nitrifikation und die Denitrifikation bzw. bei intermittierender Denitrifikation in einem Becken mit zeitlicher Belüftung. Eine interne Rezirkulation sowie die zusätzliche Kohlenstoffzugabe sind auch hier nicht erforderlich. Dafür sind im Vergleich zu den anderen Verfahren größere Beckenvolumina erforderlich, da der Nitratabbau allein durch die Denitrifikationskapazität bestimmt wird.

Die alternierende Denitrifikation besteht aus zwei Belebungsbecken, die alternierend mit Abwasser beschickt und belüftet werden und miteinander verbunden sind. Der Vorteil besteht darin, kurzzeitig große Denitrifikationskapazitäten zur Verfügung zu stellen, jedoch sind dafür auch große Beckenvolumina und eine aufwendigere Steuerung notwendig.

Eine bereits vielfach diskutierte Verfahrensweise ist die gezielte Kohlenstoffausschleusung zur Verbesserung der Gasausbeute. Durch den Bau von separaten Becken oder durch Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung lässt sich der Anteil der organischen Substanz im Primärschlamm erhöhen. Dadurch wird auch mehr Kohlenstoff in der Vorklärung ausgeschleust. Dieser energiereichere Schlamm kann bei Kläranlagen mit Faulung zu einer Erhöhung des Gasertrags führen. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die Einsparungen bei der Belüftungsenergie in den nachfolgenden Belebungsbecken. Da jedoch viele Kläranlagen ein eher ungünstiges Verhältnis von C/N (< 4) aufweisen und bei der Abwasserreinigung mit einer vorgeschalteten Denitrifikation auch weiterhin ausreichend Kohlenstoff vorhanden sein muss, ist dieses Verfahren nicht in allen Fällen zielführend. Es ist nur dann wirtschaftlich umsetzbar, wenn das zulaufende Abwasser kohlenstoffhaltig ist (Lebensmittelindustrie) oder ein günstiges C/N-Verhältnis aufweist oder die Anlage mit nachgeschalteter Denitrifikation und externer Kohlenstoffzugabe betrieben wird. Bei der nachgeschalteten Denitrifikation muss jedoch in die Kosten-Nutzen-Rechnung die evtl. Kohlenstoffdosierung einkalkuliert werden.

3.3.2.2 Effizienzmaßnahme – Auslastung

Das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Frachtbelastung und der Bemessungsbelastung (Ausbaukapazität) einer Kläranlage wird als Auslastungsgrad bezeichnet. Dieser stellt eine maßgebliche Einflussgröße auf den Energieverbrauch dar und kann über die Auswertung der Betriebsdaten ermittelt werden. Zur Ermittlung der notwendigen Daten wird auf das Arbeitsblatt ATV-DVKW-A 198 [ATV-DVWK, 2003a] verwiesen. Dabei sind besonders die temporären Belastungen, z. B. im Regenwetterfall durch Stoßbelastung, saisonale Belastungen sowie die gesamte hydraulische Situation genau zu beachten. Im Falle einer dauerhaften bzw. saisonalen Unterlastung ist es möglich, einzelne Becken temporär oder komplett außer Betrieb zu nehmen. Falls die entsprechenden Aggregate (Belüftung, Durchmischung etc.) auf einen geringeren Belastungsgrad ausgelegt sind, z. B. durch das Vorhandensein eines Grundlastgebläses, kann durch diese Maßnahme Energie eingespart werden. Ein nicht effizienter Teillastbetrieb der Aggregate sollte, wenn möglich, vermieden werden. Eventuell müssen Aggregate ersetzt werden, die wegen ihrer Baugröße keine Anpassung an geringere Belastungen durch Regelung erlauben.

Einen weiteren limitierenden Faktor für die Anpassung der Außerbetriebnahme von Becken stellt der TS-Gehalt im Belebungsbecken dar. Er sollte i. d. R. **5 g/l** nicht überschreiten, da die Nachklärbecken sonst nicht mehr optimal beschickt werden können (zu hohe Schlammvolumenbeschickung und damit Gefahr von Schlammabtrieb). Die Maßnahmen zur Außerbetriebnahme von Teilen oder gesamten Becken sind immer in enger Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden umzusetzen.

Bei einer dauerhaften Überlastung (tatsächliche Fracht $>$ bemessungstechnische Maximalfracht) der Kläranlage ist zu prüfen, inwieweit die Zulaufbelastung durch einen Ausgleich der Zulaufmenge gepuffert und kontinuierlich der Anlage zugeführt werden kann, oder ob die Kläranlage allgemein erweitert werden muss. Weitere Möglichkeiten können sich aus einer Umstellung des Verfahrens ergeben (Kaskade, Nebenstrombehandlung etc.). Dies ist im Einzelfall zu prüfen. Insbesondere bei mittelgroßen Kläranlagen, die mit einer simultanen aeroben Schlammstabilisierung





betrieben werden, kann durch die Umstellung auf eine getrennte anaerobe Schlammstabilisierung (vgl. Kapitel 3.5.4.4) das Problem der Überlastung (Schlammalter weit unterhalb von 25 Tagen) unter Umständen ohne umfangreiche Baumaßnahmen gelöst werden. Damit geht ein Gewinn an Eigenenergie aus Faulgas einher.



Maßnahmen wie eine Reduzierung des TS-Gehalts, Anpassung des Schlammalters oder eine Reduzierung des Sauerstoffsollwerts lassen sich besonders bei unterbelasteten Anlagen leicht umsetzen. Sie werden nachfolgend im Detail erläutert. Für die biologische Stufe sind besonders auch die internen Rückbelastungen relevant. Maßnahmen für eine Prozesswasserbehandlung sind in Kapitel 3.6 dargestellt.



3.3.2.2.3 Effizienzmaßnahme – TS-Gehalt und Schlammalter

Auf den meisten Kläranlagen werden entweder die TS-Gehalte oder das Schlammalter überwiegend auf einen Soll-Wert eingeregelt und über das ganze Jahr konstant gehalten. Ein zu hohes Schlammalter kann einen zu hohen Sauerstoffbedarf bzw. eine Reduzierung der Faulgasproduktion zur Folge haben. Eine zu starke Reduzierung des TS-Gehalts und somit die Erhöhung der Schlammbelastung führt zu einer Verminderung der Reinigungsleistung und zu einer erhöhten spezifischen Überschussschlammproduktion.

Die Wachstumsrate sowie der Sauerstoffverbrauch für die Kohlenstoffelimination sind von der Temperatur abhängig. Daher ist es wichtig, neben der allgemeinen Bemessung des TS-Gehalts auch durch die Einstellung des TS-Gehalts in Abhängigkeit von Temperaturen und Belastungen (Jahresgang der Zulauffrachten) das Schlammalter anzupassen.

Im Sommer ist die Wachstums- und Umsatzgeschwindigkeit der Bakterien größer, sofern immer genügend Sauerstoff im System vorhanden ist. Dies führt dazu, dass aufgrund der höheren Sauerstoffzehrung mehr Sauerstoff eingetragen werden muss. Daneben muss zusätzlich durch den schlechteren Sauerstoffeintrag bezogen auf die höheren Temperaturen im Wasser auch mehr Luft in das System gefördert werden, um die erforderliche Sauerstoffkonzentration zu erreichen.

Mittels einer Angleichung des TS-Gehalts in den Belebungsbecken in Abhängigkeit von der Temperatur (Senkung des TS-Gehalts) kann der benötigte Lufteintrag vermindert werden. Das führt zu einem geringeren Energieverbrauch der Gebläse/Oberflächenbelüfter.

Die Einstellung des Schlammalters kann darüber hinaus durch eine Außerbetriebnahme oder auch Umnutzung von Belebungsbeckenbereichen zu Anaerobbecken für die biologische Phosphorelimination im Sommer erreicht werden. Dabei darf das für das Wachstum der Nitrifikanten erforderliche Mindestschlammalter in Abhängigkeit von der Temperatur nicht unterschritten werden.



3.3.2.2.4 Effizienzmaßnahme – Rezirkulation bei vorgeschalteter Denitrifikation

Bei einer vorgeschalteten Denitrifikation wird nitratreiches Abwasser vom Ablauf des belüfteten Beckens zum Zulauf der Denitrifikationszone über Pumpen oder Rührwerke und somit unter Einsatz von Energie zurückgeführt. In Abhängigkeit von dem angestrebten Nitratlaufwert muss in der Regel etwa das 2- bis 4-Fache des Abwasserzuflusses rezirkuliert werden. Das optimale Rezirkulationsverhältnis ist vorab für jede Kläranlage zu bestimmen. Die Rezirkulationspumpen sollten mit der Möglichkeit einer effizienten Regelung dimensioniert werden. Hinweise zur allgemeinen Auslegung von Pumpen finden sich im Kapitel 4.2.3.



Allgemein ist darauf zu achten, dass aus den Nitrifikationszonen so wenig Sauerstoff wie möglich in die Denitrifikationszonen verschleppt wird. Unter diesem Aspekt und unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz sollte die Regelung der Rezirkulation auf Basis einer kontinuierlichen Nitratmessung erfolgen. Hierzu ist eine kontinuierliche Nitratmessung im Ablauf der Denitrifikationsbecken bzw. -zonen notwendig.

Werden durch diese Messung Konzentrationen nahe null aufgenommen, so ist dies ein Indiz dafür, dass die Denitrifikationsleistung durch eine zu geringe Rezirkulation begrenzt wird und die Rezirkulation zu erhöhen ist. Eine ansteigende Nitratkonzentration im Ablauf der Denitrifikationszone

hingegen zeigt, dass mehr Nitrat rezirkuliert wird, als mit der vorhandenen Denitrifikationskapazität eliminiert werden kann. Bei Überschreitung einer Obergrenze des Nitratgehalts (z. B. 3 mg/l) kann das verwertbare Kohlenstoffangebot limitierend auf die Denitrifikation wirken [DWA, 2016d].

Eine einfache Möglichkeit ohne zusätzliche Messungen (z. B. für kleinere Kläranlagen) ist die Anpassung des Rezirkulationsstroms über eine Arbeitszeit-Pausen-Regelung.

In Kombinations- oder Umlaufbecken werden für die Rezirkulation rührwerksähnliche Axialpumpen eingesetzt, die i. d. R. einen geringeren Energieverbrauch aufweisen als Rücklaufschlammumpen. Für die Einsparmaßnahmen wird auf das Kapitel 4.4.1 verwiesen.

3.3.2.2.5 Effizienzmaßnahme – Rücklaufschlamm

Die Förderung des Rücklaufschlammes aus der Nachklärung dient der Sicherstellung der für die Reinigung notwendigen Biomasse (ausreichender TS-Gehalt) in den Belebungsbecken. Eine Variante ist die Förderung eines konstanten Rücklaufschlammstroms bezogen auf den Tagesmittelwert der Trockenwetter-Bemessungswassermenge. Dadurch können aber die TS-Gehalte in den Belebungsbecken sehr stark schwanken, da die Rückführung aus der Nachklärung bei hydraulischen Belastungen nicht zeitnah erfolgt.

Da die Menge der in die Nachklärung verlagerten Biomasse damit i. d. R. je nach Abwasserzulaufmenge schwankt, ist es aus energetischer Sicht sinnvoll, die Rücklaufschlammförderung durch eine Regelung an diese Schwankungsverhältnisse anzupassen. Dies kann über eine zuflussproportionale Regelung erfolgen. In einem festgelegten Verhältnis zum Zulauf wird der Rücklaufschlamm in die Belebungsbecken zurückgeführt. Bei dieser Regelung sollte auch bei niedrigen Zuflüssen ein konstanter Volumenstrom von etwa dem 0,75- bis 1-fachen Trockenwetterzufluss eingehalten werden. Zur Vermeidung eines hohen hydraulischen Impulses in der Nachklärung, der zu Turbulenzen führen kann und den TS-Gehalt in der Belebung kurzzeitig ansteigen lässt, sollte bei einsetzendem Mischwasserzufluss die erhöhte Rückführung zeitlich verzögert und sanft anlaufen, z. B. geregelt nach dem gleitenden 1-h- bis 2-h-Mittel des Zuflusses. Weiterhin kann mit einer Schlammspiegelmessung das Eindickverhalten in der Nachklärung erfasst und in das Regelungskonzept integriert werden, um z. B. bei Erreichung eines festgelegten Schlammspiegels die Belüftung in den letzten Belebungsbecken abzuschalten. Weitere Hinweise zur Rücklaufschlammregelung befinden sich im Kapitel 4.6.4.

Zu untersuchen ist auch, ob eine Kopplung mit Messungen im Einzugsgebiet (Regenbeckenfüllung, Regenradar) sinnvoll ist. Diese kann z. B. dazu dienen, vor einem einsetzenden Regenlauf das Rücklaufverhältnis anzupassen und so die Nachklärung für den Regenwetterstoß vorzubereiten.

3.3.2.2.6 Effizienzmaßnahme – Durchmischung

Für Belebungsbecken ist es wichtig, eine optimale Strömungserzeugung zu erreichen. Damit wird der Inhalt des Beckens in Bewegung gesetzt und durchmischt. Für das optimale Mischverhältnis sind der Schub, die Anordnung in Abhängigkeit von der Beckengeometrie und die Strömungsbedingungen die maßgebenden Faktoren. Weitere Hinweise finden sich im Merkblatt DWA-M 229 [DWA, 2013d]. Die installierten Rührwerksaggregate und Dimensionierungshinweise werden in Kapitel 4.4.1 beschrieben.

Bereits in der Planung sollten die Anforderungen an eine ausreichende Umwälzung berücksichtigt werden, da die Formverluste durch Umlenkungen (eckige, runde Umleitung, Trennwände, Leitwände etc.) einen maßgeblichen Einfluss auf die Umwälzleistung haben. Des Weiteren beeinflussen sich die Rührwerke gegenseitig, sodass ein gewisser Mindestabstand oder eine Trennwand notwendig sind. Auch die Betriebsweise in Abhängigkeit von der Belüftung ist von großer Bedeutung. In der Regel werden bei laufender Belüftung die Rührwerke nicht betrieben.

Ob bei einer intermittierenden Belüftung auf Umwälzaggregate zugunsten einer Stoßbelüftung verzichtet werden kann, ist im Einzelfall hinsichtlich der verfahrenstechnischen und energetischen Auswirkungen genau zu überprüfen.



Um Kurzschlussströmungen zu vermeiden sowie eine Volldurchmischung und eine ausreichende Aufenthaltszeit in Verbindung mit einer optimalen Sauerstoffaufnahme zu gewährleisten, ist es notwendig, die Strömungsverhältnisse in den Belebungsbecken zu optimieren. Ein typischer Fehler bei der Durchmischung ist z. B. der bei tangentialer und symmetrischer Anordnung von Rührwerken in Rundbecken auftretende „Teetasseneffekt“. Demnach bildet sich ein stationärer rotationssymmetrischer Zustand aus, bei dem der Schlamm allerdings nur noch „im Kreis geschoben“ wird, ohne dass eine Vermischung stattfindet. Wegen der sich verringernden Strömungsgeschwindigkeit zur Beckenmitte hin kommt es dort außerdem zu einer kegelförmigen Schlammablagerung. Hier kann der Einbau von Umlenklechen zur Unterbrechung der Kreiselströmung hilfreich sein. Eine Verbesserung ergibt sich oft durch eine von der tangentialen Ausrichtung um ca. 15 Grad geneigten Anstellung.

Ein allgemein hilfreiches und sinnvolles Mittel dafür ist die Strömungssimulation (CFD-Simulation), welche in der Regel die Beckengeometrie im Zusammenhang mit der Belüftung, der Durchmischung und der Ein- und Auslaufgestaltung betrachtet. Dies unterstützt auch die optimale Anordnung von Belüftern und Umwälzaggregate sowie Leitwänden und gibt Hinweise für die optimierte Regelung. Durch solche Simulationen und Optimierungen kann sowohl die Energie für die Durchmischung als auch der Sauerstoffeintrag reduziert werden. Ein grafisches Beispiel einer solchen Simulation ist in Bild 3-5 dargestellt und zeigt den Verlauf der Fließgeschwindigkeiten in einem Becken. Mit dieser Darstellung kann auf Ablagerungen oder Totzonen rückgeschlossen werden.

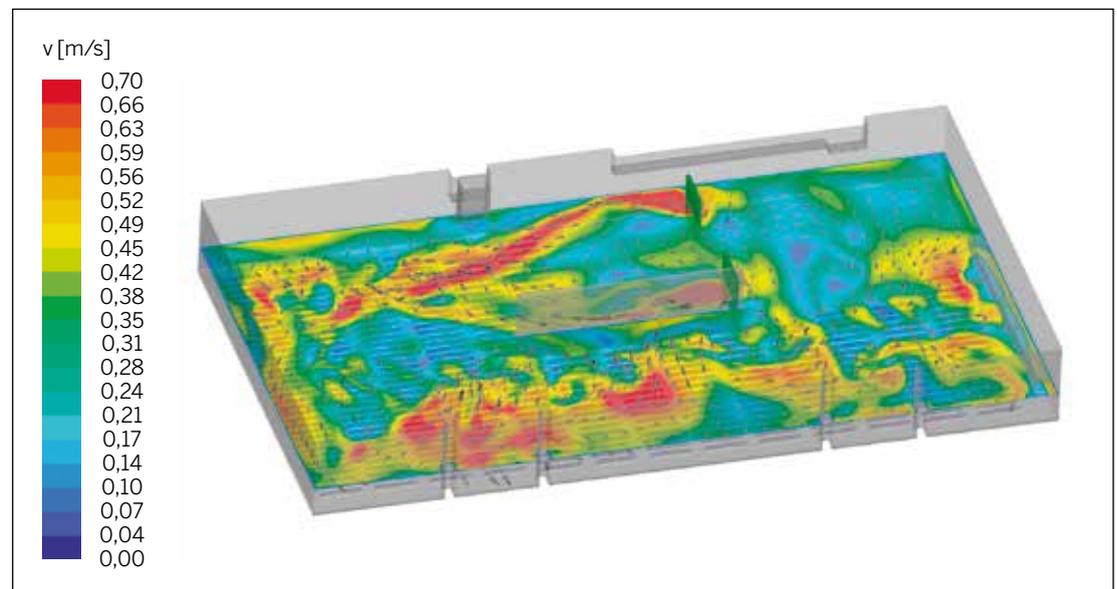


Bild 3-5 Beispiel einer CFD-Simulation für ein Belebungsbecken



3.3.2.2.7 Effizienzmaßnahme – Belüftung

Den größten Anteil des Strombedarfs in der biologischen Stufe macht die Belüftung aus, die sich in folgende Belüftungsarten unterteilen lässt:

- Oberflächenbelüftung
- Druckluftbelüftung

Eine Übersicht über Belüftersysteme und die Einflussparameter gibt Bild 3-6.

Maßnahmen zur Energieoptimierung von Sondersystemen der Belüftung wie z. B. In- und Ejektorbelüftern werden nachfolgend nicht beschrieben, da sie im kommunalen Bereich selten angewendet werden. Energieeinsparmaßnahmen finden sich jeweils in den einzelnen Teilbereichen des gesamten Belüftungssystems. Die Luftbereitstellung wird in Kapitel 4.3 beschrieben.

Druckbelüftung			Oberflächenbelüftung
Parameter <ul style="list-style-type: none"> ■ Einblas- und Eintauchtiefe ■ Belegungsdichte ■ Luftbeaufschlagung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Leerrohrgeschwindigkeit ■ Grenzflächenfaktor ■ Umwälzung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anordnung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Eintauchtiefe ■ Anordnung ■ Drehzahl
Luftbereitstellung <ul style="list-style-type: none"> ■ Drehkolbengebläse ■ Schraubenverdichter ■ Turboverdichter 	Luftverteilung <ul style="list-style-type: none"> ■ Transport- und Verteilleitung ■ Armaturen 	Lufteintrag <ul style="list-style-type: none"> ■ Rohrbelüfter ■ Schlauchbelüfter ■ Tellerbelüfter ■ Plattenbelüfter ■ Dombelüfter ■ In- und Ejektorenbelüfter 	Luftseintrag <ul style="list-style-type: none"> ■ Walzenbelüfter ■ Kreiselbelüfter

Bild 3-6 Übersicht Belüftungssystem und Einflussparameter

Grundsätzlich ergeben sich bei der Belüftung der Belebungsbecken die Energieeinsparungen durch eine optimal ausgewählte und betriebene Systemlösung sowie Präventivmaßnahmen (z. B. Reinigung der Belüfter). Diese werden daher nachfolgend beschrieben.

Hinweise zur Bemessung des Sauerstoffbedarfs

Der für die Abwasserbehandlung benötigte Sauerstoff setzt sich zusammen aus dem Verbrauch für Kohlenstoffelimination (einschließlich der endogenen Atmung), dem Bedarf für die Nitrifikation sowie der Einsparung an Sauerstoff aus der Denitrifikation. Die Ermittlung des Sauerstoffbedarfs richtet sich nach dem Arbeitsblatt DWA-A 131 [DWA, 2016b] und die Bemessung des Belüftungssystems nach dem Merkblatt M 229 Teil 1 [DWA, 2013d].

Der α -Wert, auch als Grenzflächenfaktor definiert, gibt das Verhältnis zwischen dem Belüffungskoeffizienten unter Betriebsbedingungen im Belebtschlamm und im Reinwasser jeweils unter Standardbedingungen an. Er ist von der Art des Abwassers (oberflächenaktive Stoffe) und den Eigenschaften des belebten Schlammes abhängig und hat sehr starken Einfluss auf die Auslegung des Belüftungssystems und damit auf den Energieverbrauch. Die Wahl des α -Wertes sollte demnach sorgfältig unter Berücksichtigung der Abwasserbeschaffenheit und der verschiedenen Lastfälle erfolgen. Hinweise für unterschiedliche Verfahren und Lastfälle sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

Tabelle 3-4 Hinweise für den α -Wert bei unterschiedlichen Lastfällen und Verfahren angepasst nach [Günkel-Lange, 2013]

	α_{\min} (für maximalen Lastfall)	α_{mittel} (für mittleren Lastfall)	α_{\max} (für minimalen Lastfall)
Diskontinuierlich betriebene Denitrifikation (sim., interm., altern.)	0,6	0,75	0,85
Kontinuierlich betriebene vorg. Denitrifikation (bspw. mit großem VKB und VD/VBB~0,5)	0,65	0,75	0,85
SBR-Verfahren zur Stickstoffelimination	0,5	0,65	0,8
MBR-Verfahren (TS ~ 12 g/l, tTS = 25 d)	0,5	0,6	0,7
Simultane aerobe Stabilisierung	0,7	0,8	0,9
Kohlenstoffelimination	0,35	0,5	0,60

Für kommunale Anlagen liegt der α -Wert i. d. R. zwischen **0,55** und **0,65** bei kontinuierlicher Denitrifikation. SBR-Anlagen und MBR-Anlagen weisen in der Regel aufgrund der höheren Schlammbelastung einen etwas schlechteren α -Wert im Vergleich zu konventionellen Beleb-

schlammanlagen auf (ca. 0,50). Besonders bei geringer Schlammbelastung, z. B. mit simultaner aerober Stabilisierung, sollte mit einem etwas günstigeren Wert (0,70 bis 0,90) [Günel-Lange, 2013] gerechnet werden.



Es ist auf einen prozessstabilen Sauerstoffeintrag in den aeroben Bereich des Belebungsbeckens zu achten. Üblicherweise liegt die Sauerstoffkonzentration im aeroben Bereich des Belebungsbeckens zwischen **1,0** und **2,5 mg/l**. Mit höheren Sauerstoffkonzentrationen kann nur eine geringfügige Verbesserung der Umsatzrate erreicht werden, sie führen aber zu deutlich erhöhten Luftmengen und entsprechend höherem Energieeinsatz. Die Absenkung der Sauerstoffkonzentration sollte schrittweise unter Beobachtung der Ablaufwerte und der Schlammigenschaften erfolgen. Sauerstoffgehalte kleiner **0,8 mg/l** sind i. d. R. zu vermeiden, da hierdurch die Gefahr der Bildung von Bläh- und Schwimmschlamm ansteigt [DWA, 2016d]. Zudem könnte bei solchen Sauerstoffstressbedingungen Distickstoffmonoxid („Lachgas“) als starkes Treibhausgas emittiert werden (siehe Kapitel 2.3.1.2.2) [Sümer et al., 1996].

Oberflächenbelüftung – Lufteintrag

Bei allen Oberflächenbelüftern erfolgt der Sauerstoffeintrag über eine mechanische Einwirkung auf die Wasseroberfläche. Dabei werden gleichzeitig Umwälzströmungen erzeugt, welche zu einer Durchmischung des Beckeninhalts führen und Schlammablagerungen verhindern. In bestimmten Fällen existieren auch kombinierte Verfahren aus Oberflächenbelüftung und separaten Rührwerken, da der Energiebedarf der Belüfter bei geringer Belastung zu hoch sein kann. Bei den Oberflächenbelüftern werden folgende Systeme verwendet:

- Kreiselbelüfter
- Walzenbelüfter

Die Sauerstoffzufuhr bei Oberflächenbelüftern wird beeinflusst durch:

- Anzahl der Maschinen
- Drehzahl des Belüfters
- Eintauchtiefe des Belüfters
- Beckengeometrie und Beckeneinbauten

Die Eintauchtiefe kann sowohl durch Wehre im Ablauf des Belebungsbeckens (variabler Wasserspiegel) als auch durch eine Höhenverstellereinrichtung des Belüfters geändert werden. Um den optimalen Sauerstoffeintrag zu gewährleisten, ist eine Anpassung der Drehzahl in Kombination mit der Eintauchtiefe notwendig. Für die Aggregate gibt es entsprechende Kennlinien, die den optimalen Arbeitsbereich in Abhängigkeit von diesen beiden Verstellmöglichkeiten angeben. Dabei ist Folgendes zu beachten:

- Beim Einsatz von Wehren ist die sich, infolge der schwankenden Wassermenge im Zulauf und im Rücklaufschlamm, ergebende Wasserspiegeländerung zusätzlich zur regelungstechnisch bedingten Höhenverstellung zu berücksichtigen.
- Die Regelung muss so langsam sein, dass durch schnelle Wehrabsenkung keine hydraulische Überlastung der Nachklärbecken auftritt.
- Der Sauerstoffeintrag muss auch bei geringen Eintauchtiefen ausreichend hoch sein.
- Mit abnehmender Eintauchtiefe nimmt die Umwälzleistung des Belüfters ab. Es sind bei Bedarf zusätzliche Rührwerke einzubauen bzw. eine Arbeitszeit-Pausen-Steuerung einzusetzen.

Grundsätzlich sind beim Einsatz von Oberflächenbelüftern auch der Einfluss der Aerosolbildung und die Geräuschentwicklung zu beachten. In der Regel werden Oberflächenbelüfter nur noch bei Becken mit geringer Tiefe (**2 – 4 m**) eingesetzt.



Druckbelüftung – Lufteintrag

Bei der Druckluftbelüftung wird Luft über Belüftungselemente in mehreren Metern Tiefe in das Belebungsbecken eingeblasen. Während der Verweilzeit der Luftblase im Abwasser geht ein Teil des Sauerstoffs in das Abwasser über. Der Sauerstoffübergang ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig: Blasengröße, Turbulenzen, Aufenthaltszeit (Einblastiefe), Sauerstoffkonzentration,

Temperatur, Salzgehalte und Abwasserinhaltsstoffe. Die nachfolgend beschriebenen Einflussfaktoren können im Merkblatt DWA-M 229-1 nachgelesen werden [DWA, 2013d]:

Blasengröße: Die ins Abwasser eingebrachte Sauerstoffmenge ist umso größer, je größer die Grenzfläche zwischen Luft und Abwasser ist. Je kleiner die einzelnen Luftblasen sind, umso größer ist somit die Gesamtoberfläche aller Luftblasen. Damit lässt sich auch in Abhängigkeit von der Einblastiefe ein höherer Sauerstoffübergang erreichen (Bild 3-7).

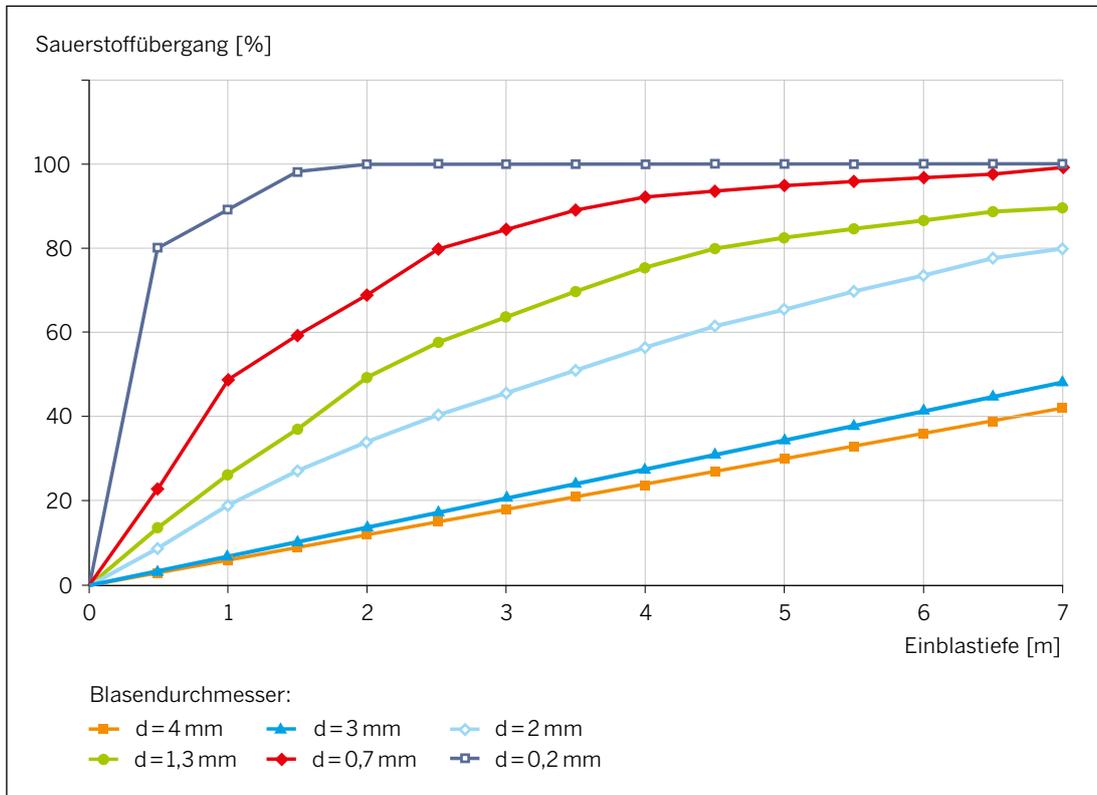


Bild 3-7 Sauerstofftransport in Funktion der Wassertiefe bei Einzelblasen mit verschiedenen Durchmessern

Aufenthaltszeit der Blasen im Wasser: Je länger die Aufenthaltszeit der Luftblasen im System ist, desto größer ist der Sauerstoffübergang. Die Aufenthaltszeit ist von drei wesentlichen Faktoren abhängig: der Wassertiefe (Bild 3-7), der vertikalen Wasserbewegung und der Steiggeschwindigkeit der Luftblasen.

Turbulenz in der Phasengrenzschicht: Der Transport von Sauerstoff über die Luftblase in das Wasser wird weiterhin von der Transportgeschwindigkeit durch die Phasengrenzschicht beeinflusst. Diese ist abhängig von der Bewegung der Wasserteilchen in der Phasengrenzschicht [Henkel, 2010].

Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken: Die Sauerstoffzufuhr ist direkt proportional zur Differenz zwischen der Sauerstoffsättigungskonzentration und der aktuellen Sauerstoffkonzentration. Somit reduziert sich die erforderliche Sauerstoffzufuhr bei einer Absenkung der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken von 2,0 mg/l auf 1,5 mg/l rechnerisch um ca. 6%. Durch großtechnische Versuche ist belegt, dass sich bei einer Änderung der Sauerstoffkonzentration von **2,2 mg/l** auf **1,8 mg/l** für die Belüftung eine Energieeinsparung von **8 %** ergibt [Bongards, 2000].

Temperatur: Die Sauerstoffsättigungskonzentration ist temperaturabhängig. In Reinwasser beträgt der Wert **10,9 mg/l** bei **10 °C** und **8,8 mg/l** bei **20 °C**. Daraus ergibt sich, dass die erforderliche Sauerstoffzufuhr bei **10 °C** um ca. **2 %** geringer ist als bei **20 °C**. Weitere Details können dem Merkblatt DWA-M 209 [DWA, 2007c] entnommen werden.



Abwasserinhaltsstoffe: Im Abwasser wird gegenüber Reinwasser der Sauerstoffeintrag verändert. Einen Einfluss darauf haben, neben den Feststoffen (belebter Schlamm), grenzflächenaktive Stoffe (z. B. Waschmitteltenside) und Salze. Besonders der Salzgehalt ist ein entscheidender Einflussfaktor für die energetische Effizienz und wird oftmals vernachlässigt.

Detaillierte Beschreibungen der unterschiedlichen Systeme und Materialien sind im Merkblatt DWA-M 229-1 [DWA, 2013d] nachzulesen. Die Auswahl und Anordnung von Belüfterelementen ist wie beschrieben von vielen Einflussgrößen abhängig. Eine allgemeine Aussage über das energetisch oder betrieblich optimale System ist daher nicht möglich. Es muss immer eine auf die jeweilige Kläranlage bezogene Untersuchung/Planung erfolgen.

Für die Herstellung von Belüfterelementen können Keramik, mineralisches Granulat, Hartkunststoffgranulat oder Elastomere eingesetzt werden. Sie besitzen folgende Vor- und Nachteile [DWA, 2013d]:

Keramik: Elemente aus Keramik werden überwiegend aus Aluminiumoxiden, Aluminiumsilikaten und Silikaten hergestellt und besitzen in der Regel eine lange Standzeit gegenüber den anderen Materialien. Sie sind jedoch verstopfungsanfällig und nur für einen Dauerbetrieb geeignet.

Mineralisches Granulat und Hartkunststoffgranulat: Belüftungselemente aus diesen Materialien besitzen in der Regel eine gröbere Körnung und damit größere Blasengrößen, sind weniger verstopfungsanfällig als Keramik und haben eine mittlere Standzeit. Sie sind jedoch nur für einen Dauerbetrieb geeignet.

Elastomere: Für Belüfterelemente aus Elastomeren (auch Membranbelüfter genannt) kommen folgende Materialien zum Einsatz:

- EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer)
- PU (Polyurethan)
- Silikon

Die Elastomere sind besonders für einen intermittierenden Betrieb bei geringer Blasengröße geeignet. Sie zeigen jedoch je nach Material Schwächen bezüglich Weichmachern (EPDM), Versprödung und höheren Druckverlusten. Auf der überwiegenden Anzahl der Kläranlagen in Deutschland werden heute Belüfterelemente aus Elastomeren eingesetzt.



Zur Anordnung von Belüftern im Becken lassen sich zusammenfassend folgende zu berücksichtigende Faktoren festhalten [DWA, 2013d]:

- Die Abstände zwischen den Belüfterelementen und Wänden dürfen nicht zu groß werden.
- Es ist darauf zu achten, dass die Belüfter an der Sohle gleichmäßig verteilt und auf identischer Höhe sind.
- Bei Mischbecken mit Sohlrührwerk muss der Bereich des Rührwerks ausgespart werden. Die Abstände der Belüfterfelder zu den Rührwerken sind herstellerspezifisch unterschiedlich und zu prüfen. Typische Werte liegen bei rund **4–7 m**.
- Es sollten möglichst gleichmäßige Abstände zwischen den Belüftern vorliegen und im Zweifelsfall ein oder zwei Verteilrohre mehr in das Becken hineingelegt werden.
- Anordnungen zu Umlaufbecken sind gesondert zu betrachten. Hinweise gibt das Merkblatt DWA-M 229-1 [DWA, 2013d].



Für die unterschiedlichen Bewertungen der Belüfterelemente ist besonders die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr SSOTR (Specific Standard Oxygen Transfer Rate) in $\text{g}/(\text{m}_N^3 \cdot \text{m})$ oder die spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung SSOTE (Specific Standard Oxygen Transfer Efficiency) in %/m heranzuziehen. Weiterhin lässt sich auch die Belüftereffizienz mit der SAE (Standard Aeration Efficiency) in $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ beschreiben. Diese Werte sind Bezugswerte, die zum Vergleich von Druckluft-Belüftungseinrichtungen benutzt werden und die einen wesentlichen Einfluss auf die Umrechnung auf die Luftmenge haben, die durch die Gebläse/Verdichter zur Verfügung gestellt werden muss. Die Werte werden von den meisten Herstellern angegeben, sollten jedoch unter Be-

triebsbedingungen nochmals geprüft bzw. vorab garantiert werden. In Tabelle 3-5 werden Anhaltswerte für die verschiedenen Belüftungssysteme gegeben.

Tabelle 3-5 Richtwerte für Druckbelüftungssysteme [DWA, 2013d]

Druckbelüftungssysteme in Reinwasser bis zu einer Einblastiefe von 6 m				
System	günstig		mittel	
	SSOTE % [%/m]	SAE [kg/kWh]	SSOTE % [%/m]	SAE [kg/kWh]
Flächendeckend	8,0–8,7	4,2–4,5	6,0–7,0	3,3–3,4
Umwälzung und Belüftung	6,7–8,0	3,7–4,2	5,0–7,0	3,2–3,3

Auf jeder Kläranlage schwanken diese Werte durch verschiedene Einflussgrößen, sodass eine Gegenüberstellung der Herstellerwerte für die unterschiedlichen Systeme nicht zielführend ist. Bei der Wahl der Belüftungselemente sind insbesondere folgende Aspekte zu bewerten:

- Blasenbild
- Schlitz- bzw. Lochgrößen und Anzahl Löcher pro m² Belüfter
- Sauerstoffbedarf
- Beckengeometrie
- Umwälzung
- Druckverluste
- Einbausituation
- Beaufschlagung
- Belegungsgrad
- Wartung und Reinigung

Bei Belüftungssystemen wird bezüglich des Druckverlustes unterschieden nach:

- systembedingtem Druckverlust (abhängig von Belüftungselement und Materialwahl),
- betriebsbedingtem Druckverlust (Rohrleitung, Einbauten, Regelarmaturen, Luftverteilung etc.),
- altersbedingtem Druckverlust (durch Versprödung und Ablagerungen).

Die betriebsbedingten Druckverluste sollten so gering wie möglich gehalten werden, was jedoch nur in gewissen Grenzen beeinflussbar ist (Rohrleitungsführung, Armaturen, Rohrquerschnitte, Materialwahl etc.). Mit dem Alter steigt der Druckverlust und damit proportional zur Gesamtdruckdifferenz auch der Energieverbrauch. Die Alterungsdruckverluste sind stark abhängig von der Betriebsweise und weiteren Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Abwasserbeschaffenheit, Belüfterbelastung, Porengröße und Regenerationszyklen. Um die Druckverluste messen zu können, sollten entsprechende Druckmessungen in den Rohrleitungen vorgesehen werden. Maßnahmen, um altersbedingte Druckverluste zu reduzieren, sind:

- Chemische Reinigung: regelmäßige Zugabe von geringfügigen Mengen Ameisen- oder Essigsäure je nach Material der Membran.
- Kurzzeitige Druckerhöhung und Entlastung: Eine täglich einmalige Belastung der Membranen mit der maximal zulässigen Luftmenge kann Verkalkungen in den Lochungen der Membranen absprengen und dadurch den Alterungsprozess der Membranen verzögern.
- Austausch der Belüfterelemente: Wenn der Druckverlust durch die beiden vorherigen Maßnahmen nicht mehr ausreichend gesenkt werden kann, ist der Austausch der Belüfterelemente ratsam. Dabei sollte das gesamte Druckbelüftungssystem erneut betrachtet werden.

Die durch einen Austausch der Belüfterelemente erzielbare Energieeinsparung ist nur zum Teil dauerhaft. Durch die Alterung steigt der Stromverbrauch kontinuierlich wieder an. Die Unterteilung der Einsparung in dauerhafte (statische) und variable (dynamische) Einsparung ist hinsichtlich der Erfolgskontrolle (Kapitel 2.3.3) von besonderer Bedeutung. Weiterhin sollte bei allen Systemen ein Überlastungsschutz vorgesehen werden, z. B. durch eine maximale Begrenzung der Druckluftzeuger, damit die Belüftungselemente und Luftleitungen nicht zu stark beaufschlagt werden.





Druckbelüftung – Luftverteilung

Der Transport der Luftmengen zu den Belüftungselementen erfolgt über Rohrleitungssysteme. Diese sollten so dimensioniert werden, dass der Druckverlust im gesamten Leitungssystem ca. **40 bis 50 mbar** bzw. in den Regelarmaturen **10 mbar** nicht überschreitet. Besonders die Regelarmaturen sollten einen möglichst geringen Druckverlust bei voller Öffnung und einen günstigen Kennlinienverlauf im Teillastbereich aufweisen.

Die Änderung des Luftvolumenstroms in komplexen Systemen erfolgt über verschiedene Schieberkonstruktionen, die durch Automatisierungsprozesse Sollwertbezogen gesteuert bzw. geregelt werden. Dazu haben sich im Gegensatz zu Plattenschiebern vor allem Regulierschieber bewährt, die für den Anwendungsfall eine optimale Regelcharakteristik besitzen.

Um Wasseransammlungen, z. B. durch Kondensat in den Rohrleitungen, zu vermeiden und somit nicht noch weitere Druckverluste zu erzeugen, müssen Entwässerungseinrichtungen in den Tiefpunkten der Rohrleitungen vorgesehen werden, die regelmäßig manuell oder automatisiert bedient werden können.

Druckbelüftung – Allgemeine Regelungskonzepte

Die Automatisierungen und Regelungskonzepte von einstufigen Belebtschlammanlagen zur Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorelimination in Abhängigkeit von allen Prozessparametern sind im Arbeitsblatt DWA-A 268 [DWA, 2016d] ausführlich beschrieben. Für die Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen gilt das Arbeitsblatt DWA-A 209 [DWA, 2007c]. Nachfolgend werden nur einige energetisch relevante Hinweise für die Regelungskonzepte gegeben. Das angepasste Regelungskonzept ist eines der wesentlichsten Einsparpotenziale im Bereich der Belebungsbeckenbelüftung.

Die Sauerstoffregelung basiert vorwiegend auf der Messung des Sauerstoffgehalts. Verbesserungen in der Betriebsstabilität sowie in der Wirtschaftlichkeit ergeben sich durch die zusätzliche Erfassung der NH_4 - und NO_3 -Konzentration zur O_2 -Konzentration als Messgröße im Ablauf der Belebungsstufe. Dadurch kann die Sauerstoffzufuhr bedarfsgerecht geregelt werden, besonders im Hinblick auf die tatsächlichen Nitrifikationsabläufe. Darüber hinaus lassen sich damit Sauerstoffüberschüsse im Ablauf vermeiden. Im Falle von Kaskaden sowie simultan denitrifizierenden und intermittierenden Anlagen kann auch die NO_3 -Konzentration mit einbezogen werden, um die Dauer der Belüftung und die Luftmengen exakt an die Abbaubedingungen anzupassen.

Die Regelung der Maschinen zur Sauerstoffzufuhr wird entweder durch Ein- und Ausschalten der Maschinen oder Änderung der Drehzahl realisiert. Als Regelgröße wird je nach System der Druck in der Sammelleitung oder der Sauerstoffgehalt herangezogen. Weitere Hinweise befinden sich in Kapitel 4.3.



Bei der Auswahl der Messeinrichtung spielen besonders die Positionierung der Sonden und deren Anzahl sowie der Einfluss von Totzeiten eine entscheidende Rolle. Beides ist im Vorfeld genauestens zu untersuchen. Ebenso bedeutsam ist die Anzahl der zu installierenden Sauerstoffelektroden.

Bei der Automatisierung der Sauerstoffzufuhr wird zwischen der Konstantdruckregelung, der Gleitdruckregelung und der Verteilregelung unterschieden. Deren Einsatz ist je nach umgesetzter Verfahrenstechnik zu prüfen. Aufgrund der energetischen Relevanz werden die Unterschiede im Folgenden dargestellt:

- **Konstantdruckregelung (Bild 3-8):**

Die Versorgung erfolgt über ein zentrales Netz, in welchem die Luft mit konstantem Druck zur Verfügung gestellt wird. Der Druck wird dabei auf die maximal zu erwartende Belastung ausgelegt. Der Vorteil besteht darin, dass dadurch die einzelnen Sauerstoffregelungen von der Maschinenregelung abgekoppelt und die Schalthäufigkeit der Maschinen vermindert wird.

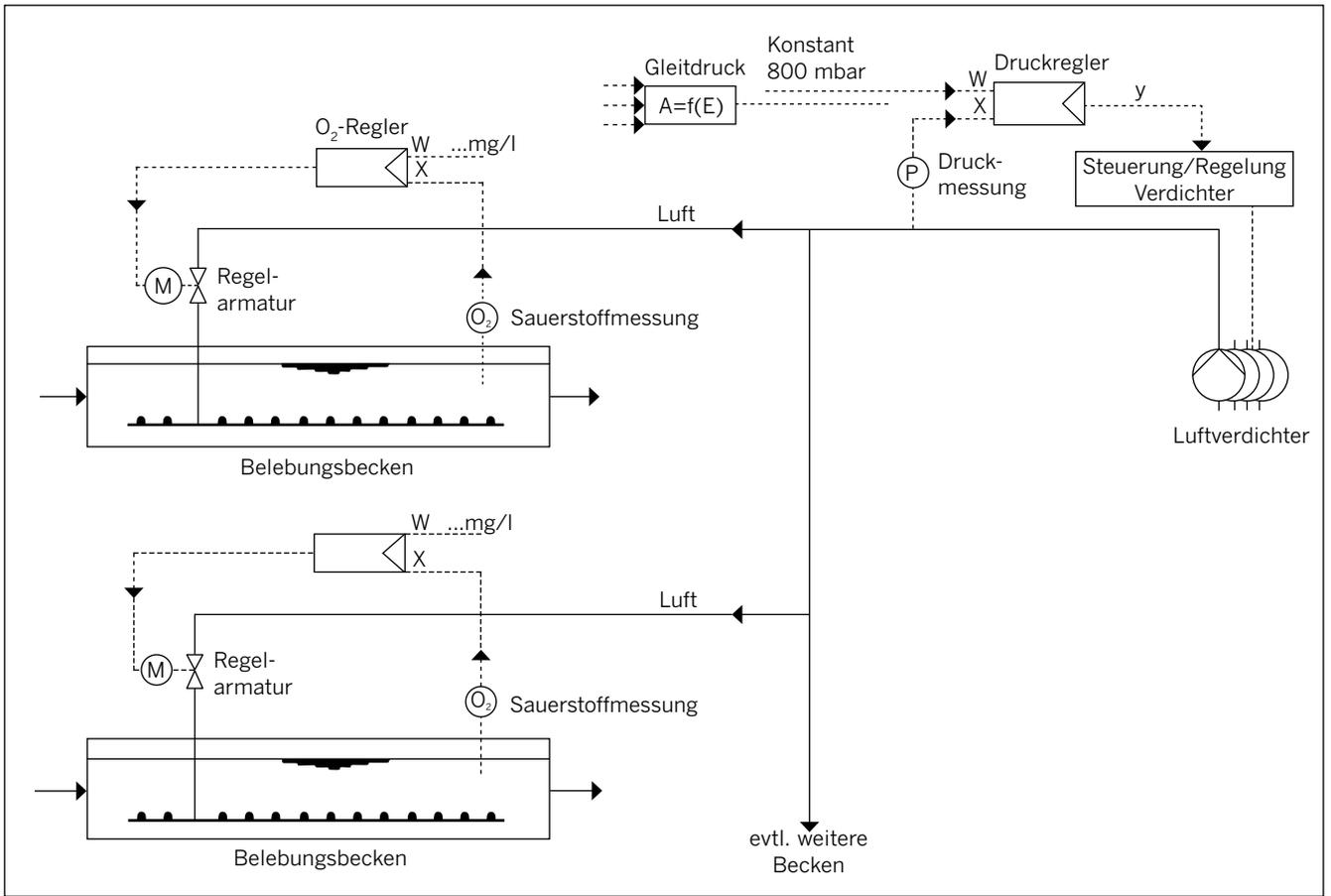


Bild 3-8 Konstantdruck/Gleitdruckregelung nach [DWA, 2016d]

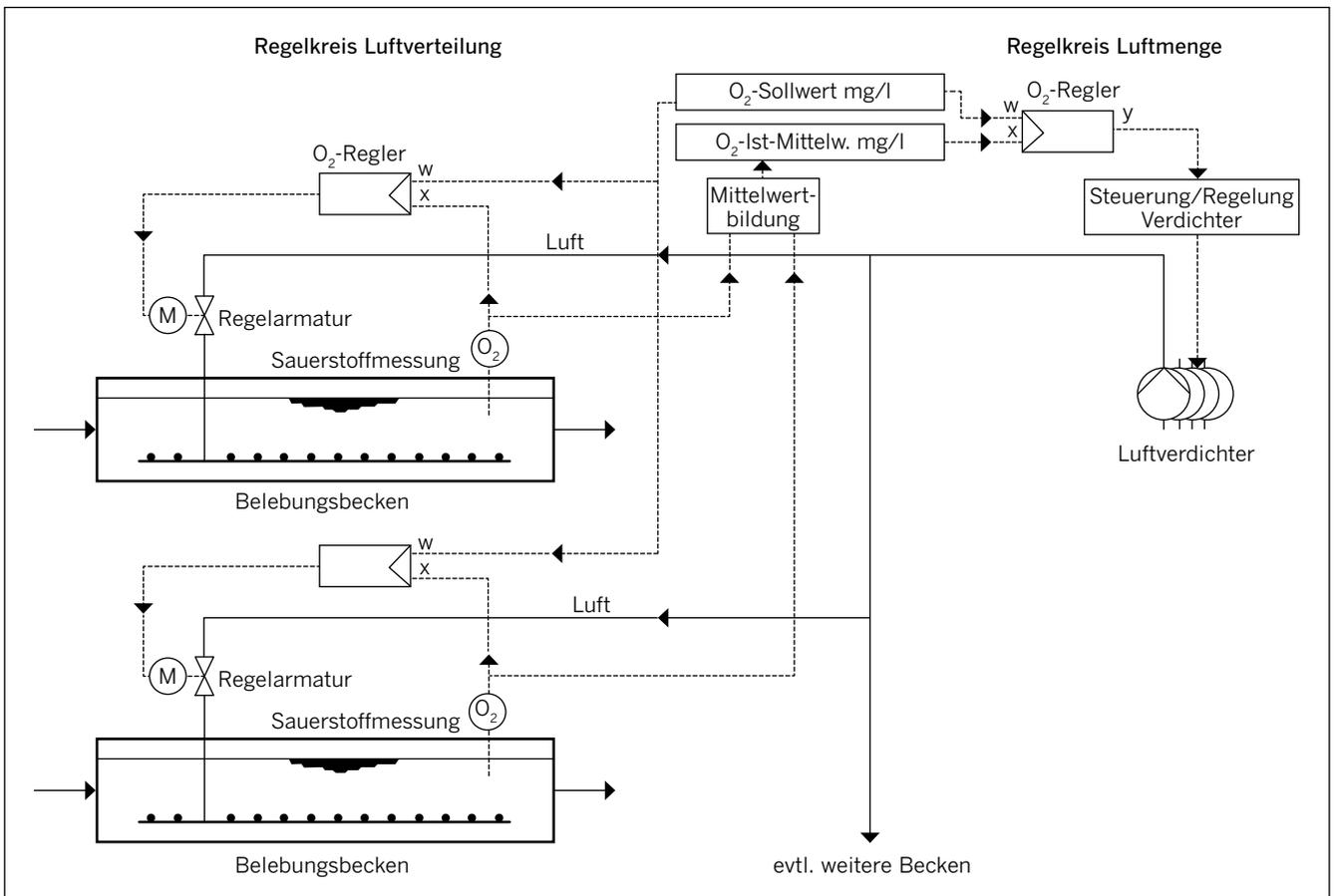


Bild 3-9 Schema Luftverteilerregelung nach [DWA, 2016d]

■ Gleitdruckregelung (Bild 3-8):

In Abhängigkeit vom tatsächlichen Sauerstoffbedarf wird der minimal erforderliche Druck in der Luftzufuhrleitung eingestellt. Diese Drosselung erfolgt durch Regulierventile. Die Kontrolle wird über die Beckeneinheit mit dem höchsten Luftbedarf geführt, in der bei voll geöffnetem Regulierventil zielgerichtet der vorgegebene Sauerstoffsollwert erreicht wird. Bei den Becken mit niedrigerem Sauerstoffbedarf wird über Regulierventile gedrosselt. Eine Gleitdruckregelung ermöglicht i. d. R. eine Energieeinsparung gegenüber einer Konstantdruckregelung.

■ Verteilregelung (Bild 3-9):

Die Regelung erfolgt über die Messung der Sauerstoffkonzentration (zusätzlich ggf. Stickstoffmessung) in den Belebungsbecken und Luftmengenmessungen in den Rohrleitungssystemen. Die Verteilregelung ist damit von der Druckhaltung in den Sammelleitungen entbunden. Basierend auf einem Sauerstoff-Mittelwert wird die Gesamtluftmenge der Gebläse eingeregelt und über Ventile entsprechend auf die Becken verteilt. Dadurch werden Totzeiten in der Regelung reduziert und bei optimaler Umsetzung Einsparungen der benötigten Luftmenge erzielt.

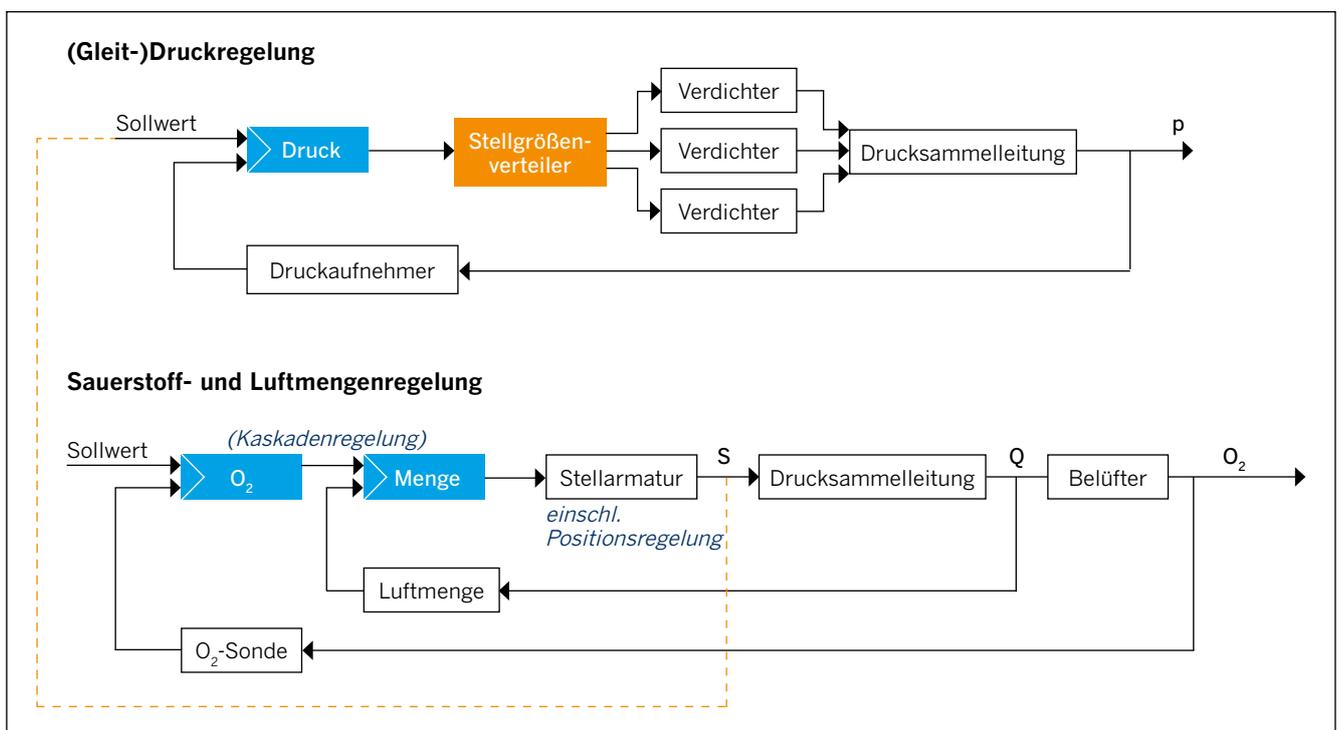


Bild 3-10 Grundstruktur einer Belüftungsregelung

Als Anwendungsbeispiel ist in Bild 3-10 eine typische Belüftungsregelung dargestellt. Sie besteht aus einer Druckregelung für die Druckluftherzeuger und einer Sauerstoff- und Luftmengenregelung zur Verteilung der Druckluft auf die einzelnen Becken/Abnahmestellen. Die Druckregelung kann als Festwertregelung mit konstantem Druck oder als Folgeregelung mit variablem Druck (Gleitdruckregelung) in Abhängigkeit von der Stellgliedposition der Luftmengenregelung aufgebaut werden. Die Sauerstoff- und Luftmengenregelung ist als Kaskadenregelung (im regelungstechnischen Sinne) aufgebaut. Der Sauerstoffregelung in der äußeren Schleife ist die Luftmengenregelung in der inneren Schleife unterlagert. Die Vorteile der Kaskadenstruktur liegen einerseits in der Möglichkeit einer Begrenzung der Luftmenge, um eine zu hohe oder zu niedrige Beaufschlagung der Belüfter zu vermeiden, und andererseits in der für eine Kaskadierung typischen höheren dynamischen Stabilität. Dadurch kann die Neigung zu schwingendem Verhalten deutlich vermindert werden. Eine Besonderheit speziell für die anlagentechnische und energetische Optimierung ist der sogenannte Stellgrößenverteiler, mit dem die Stellgröße des Reglers auf die vorhandenen Arbeitsmaschinen aufgeteilt wird.

Bei einer energetischen Optimierung werden nur noch selten gleich große Aggregate eingesetzt, weil dies zu einer ungünstigen Staffelung mit knappen Übergängen an den Umschaltpunkten oder

sogar zu Lücken bei der Überdeckung führt. Durch die Auswahl einer an die Belastung angepassten und sorgfältig gestaffelten Kombination von Aggregaten ergeben sich ungleich bessere Voraussetzungen hinsichtlich der Regelbarkeit.

Gleichwohl ist die regelungstechnische Umsetzung schon aufgrund der höheren Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten komplexer. Diese beträgt bei n Aggregaten 2^n und somit bei 3 Aggregaten 8 und bei 5 Aggregaten bereits 32. Um die Programmierung und Inbetriebnahme ebenso vieler Einzelfälle zu vermeiden, empfiehlt sich der Einsatz eines intelligenten Stellgrößenverteilers. In diesem Baustein können darüber hinaus die energetischen Kennlinien jedes einzelnen Aggregats hinterlegt werden, sodass für alle Betriebspunkte die jeweils energetisch günstigste Kombination abgerufen werden kann [Broll und Mannel, 2013].

3.3.3 Sonderverfahren des Belebtschlammverfahrens

3.3.3 Sonderverfahren des Belebtschlammverfahrens

3.3.3.1
Adsorptions-Belebungs-
Verfahren (AB)

3.3.3.2
Sequencing Batch Reactor –
Verfahren (SBR)

3.3.3.3
Membran-Bioreaktor-
Verfahren (MBR)

3.3.3.1 Adsorptions-Belebungs-Verfahren (AB)

Das AB-Verfahren ist eine zweistufige Variante des Belebtschlammverfahrens. In einer ersten hochbelasteten Stufe wird verstärkt Kohlenstoff ausgeschleust. Der Abbau organischer Verbindungen erfolgt vor allem über Adsorption, Akkumulation und Flokkulation, während der biologische Abbau nur einen geringen Anteil an der Abbauleistung dieser Stufe hat. Die schwach belastete zweite biologische Stufe arbeitet wie die Belebungsstufe beim einstufigen Belebtschlammverfahren mit einem hohen Schlammalter und ist insbesondere für die Stickstoffelimination verantwortlich. Das zweistufige AB-Verfahren ist vorteilhaft einsetzbar bei überproportional mit Kohlenstoff belastetem Abwasser.

Durch Vergleichsrechnung [Böhnke et al., 1998] konnte nachgewiesen werden, dass der Energieverbrauch für die Belüftung beim AB-Verfahren etwa **20 %** niedriger ist als bei einstufigen Belebtschlammanlagen. Dieser Vorteil ist allerdings nur dann gegeben, wenn keine externe Kohlenstoffquelle benötigt wird, um die geforderte Stickstoffelimination einzuhalten.

Effizienzmaßnahmen

Für das AB-Verfahren gelten weitestgehend die beim einstufigen Belebtschlammverfahren bereits dargestellten Energieeffizienzmaßnahmen (Kapitel 3.3.2.2.2 bis Kapitel 3.3.2.2.7).

3.3.3.2 Sequencing Batch Reactor-Verfahren (SBR)

Das Sequencing Batch Reactor (SBR)-Verfahren ist eine Variante des Belebtschlammverfahrens, in welchem ein Reaktionsraum sowohl die Funktion des biologischen Reaktors als auch des Nachklärbeckens übernimmt. Dadurch ist diese Variante besonders platzsparend, da mehrere Verfahrensstufen in einem Becken kombiniert sind (Bild 3-11). Der SBR wird diskontinuierlich befüllt und entleert. Das Zeitintervall vom Beginn des Füllvorgangs bis zum Ende des Klarwasserabzugs inklusive einer eventuellen Ruhephase wird als Zyklus bezeichnet.

Dauer, Häufigkeit und Anordnung der Phasen innerhalb eines Zyklus lassen sich variabel gestalten, da das SBR-Verfahren hydraulisch nicht mit dem Zulauf gekoppelt ist. Ein Zyklus beginnt mit der Füllphase, in der bereits erste anaerobe oder anoxische Abbauprozesse beginnen. Es folgen je nach Reinigungsziel belüftete und unbelüftete Phasen, in denen die eigentlichen Abbauprozesse stattfinden. In der anschließenden Sedimentationsphase setzt sich der Schlamm ab. Es bildet sich eine Klarwasserschicht. In der sogenannten Dekantierphase wird das überstehende Klarwasser abgezogen. Zum Abschluss des Zyklus kann eine Ruhephase erfolgen oder es beginnt ein neuer Zyklus. Eine separate Nachklärung ist beim SBR-Verfahren nicht notwendig.



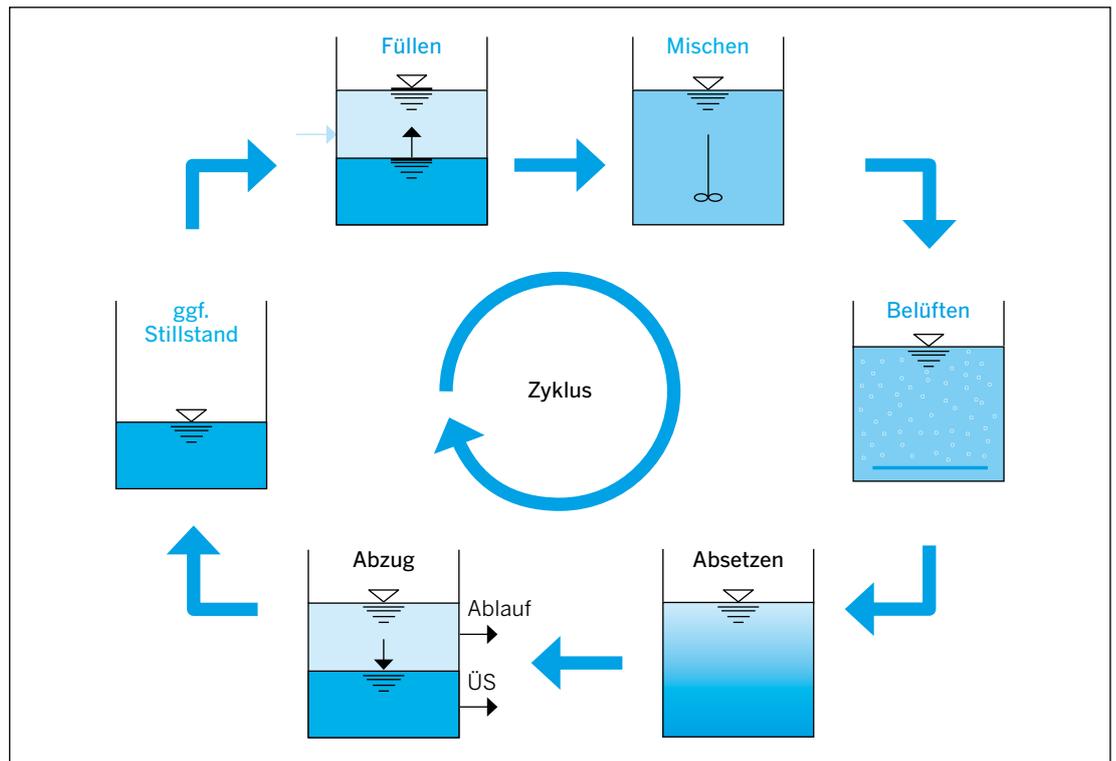


Bild 3-11 Beispiel für die Aueinanderfolge von Prozessphasen während eines Zyklus einer SBR-Anlage nach [DWA, 2009b]

Grundsätzlich liegt der Stromverbrauch beim SBR-Verfahren aufgrund von ähnlichen Verfahrensschritten etwa in der Größenordnung des Belebtschlammverfahrens mit getrennter Nachklärung. Die durch den Wegfall der Nachklärung theoretisch gewonnenen Energieeinsparungen heben sich durch höheren Energieaufwand durch größere Förderhöhen, begründet durch die Bauweise als Hochbehälter sowie durch höheren Energieaufwand für die Belüftung bei wechselnden Wasserständen wieder auf. Auch wenn in Summe nicht mehr Energie benötigt wird, kann die Spitzenleistung der Belüftung besonders bei kleinen Anlagen mit Pufferkapazitäten höher sein. Bemessungen zu SBR-Anlagen sind dem Merkblatt DWA-M 210 [DWA, 2009b] zu entnehmen.

Effizienzmaßnahmen

Für das SBR-Verfahren gelten weitestgehend die beim einstufigen Belebtschlammverfahren bereits dargestellten Energieeffizienzmaßnahmen (Kapitel 3.3.2.2 bis Kapitel 3.3.2.7).

3.3.3.3 Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren)

In Membranbioreaktoren (MBR) wird die Phasentrennung von Belebtschlamm und gereinigtem Abwasser nicht wie im klassischen Belebtschlammverfahren durch Sedimentation, sondern durch eine Membran übernommen.

Vorteile gegenüber dem Belebtschlammverfahren sind der geringere Raumbedarf durch kleinere Belebungsbecken und der Wegfall der Nachklärung. Membranverfahren erreichen hohe Reinigungsleistungen inklusive einer (Teil-)Hygienisierung (siehe Kapitel 3.4.3.3).

Die Bemessungsgrundlagen von MBR-Anlagen sind dem Merkblatt DWA-M 227 [DWA, 2014b] zu entnehmen.

Als Membran werden Module aus Hohl- oder Flachmembranen eingesetzt, die entweder direkt in das Belebungsbecken integriert oder in einer separaten Membrankammer eingesetzt werden. Die Beschickung kann, wie in Bild 3-12 dargestellt, entweder über das Dead-End- oder das Cross-Flow-Verfahren erfolgen, wobei in Deutschland fast ausschließlich die Cross-Flow-Filtration zur Anwendung kommt.



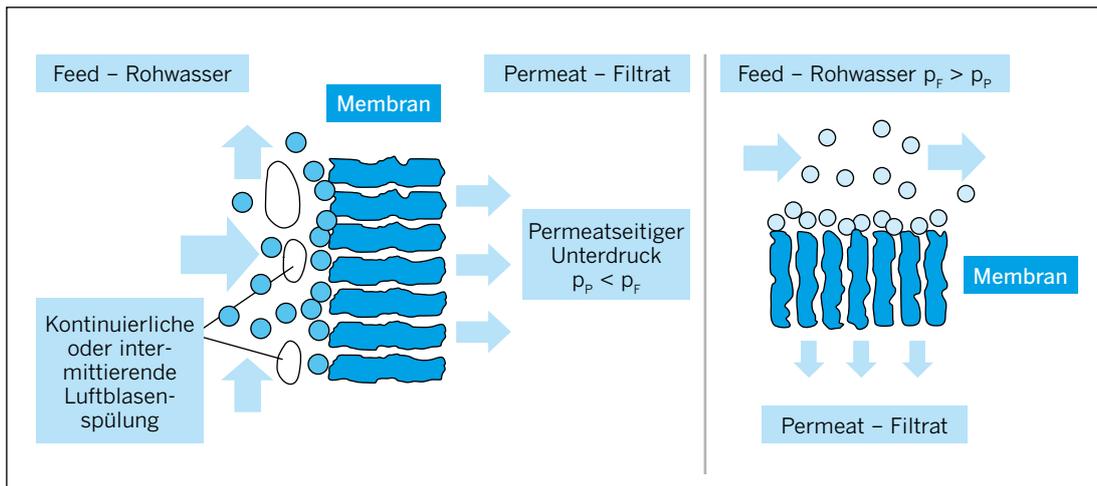


Bild 3-12 Schema Dead-End- (links) und Cross-Flow-Verfahrenen (rechts) nach [Melin und Rautenbach, 2007]

Das Cross-Flow-Verfahren ist aufgrund der notwendigen Rezirkulation mit einem deutlich höheren Energieaufwand verbunden, kann aber mit höheren Mengen und einem höheren Feststoffgehalt beschickt werden. Dies ist für Kläranlagen von größerer Bedeutung.

MBR-Verfahren weisen gegenüber klassischen Belebtschlammanlagen einen höheren Energieverbrauch auf. Der Stromverbrauch liegt zwischen **0,73 kWh/m³** und **1,83 kWh/m³** bzw. ca. **49 kWh/(E · a)** und **208 kWh/(E · a)**. Die betrachteten MBR-Anlagen liegen hierbei überwiegend auf Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 11.000 bis 80.000 E [Krebber, 2014]. Folgende Faktoren haben Einfluss auf den Energieverbrauch:

- der Membrantyp (Porengröße, Membranmaterial und Modulbauart),
- die Verfahrensart (Cross-Flow, Semi-Cross-Flow, Dead-End),
- die Anströmung der Membran (IN-OUT, OUT-IN),
- der für die Filtrationsleistung aktuell erforderliche Druck (Arbeitsdruck),
- die Zyklusstruktur (zum Beispiel Filtration, Luftspülung, Permeatspülung, kombinierte Luft- und Permeatspülung),
- der Entwässerungstyp des Einzugsgebiets: Abwässer aus Trennentwässerungen sind wegen der geringeren behandelten Wassermengen einwohnerspezifisch weniger energieaufwendig zu behandeln als Abwässer aus Mischentwässerungen.

Effizienzmaßnahmen

Neben den beim einstufigen Belebtschlammverfahren bereits dargestellten Effizienzmaßnahmen (Kapitel 3.3.2.2 bis Kapitel 3.3.2.7) sind nach [Krebber, 2014] folgende Maßnahmen zu nennen:

- Die Intensität der Membranbelüftung ist genau zu überprüfen, um eine Überbelüftung zu vermeiden. Eine Anpassung der Luftmenge an die gegebenen Erfordernisse ist zu empfehlen.
- Die grobblasige Membranbelüftung sollte nicht zum primären Zweck des Sauerstoffeintrags aktiviert werden, da sie nur einen geringen Sauerstoffeintragskoeffizienten aufweist. Vielmehr ist es ratsam, sie ausschließlich zur Begrenzung der Deckschicht während der Filtration einzusetzen. Der Sauerstoffeintrag sollte vorwiegend mit feinblasiger Belüftung erfolgen.
- Die Zwangsbelüftung bei inaktiver Membrankammer zur Vermeidung anaerober Zustände und Absetzen des Schlammes sollte auf das minimal erforderliche Maß begrenzt werden. Hierzu ist es zu empfehlen, die aktive Membrankammer oft, möglichst nach jedem Filtrationsintervall, zu wechseln.
- Die Filtrationszyklen sollten nicht vorzeitig abgebrochen werden. Damit kann einem ungünstigen Verhältnis zwischen belüfteten Filtrationspausen und gewonnenem Permeat entgegengewirkt werden, da während der Pausen weiter belüftet wird, um Deckschichten abzutragen.
- Aussagen zu einer Mindestbelüftungsintensität bei variablem Fluss sind immer individuell zu prüfen und können nicht verallgemeinert werden.



- MBR-Verfahren arbeiten energetisch effizienter, wenn sie mit möglichst hohen bzw. konstanten Zuflüssen beschickt werden. Somit ist eine Betriebsführung, die die Menge des Anlagenzulaufs berücksichtigt, energetisch sinnvoll. Zunächst sollte die Anzahl der in Betrieb befindlichen Module an den Zulauf angepasst werden. Weiterhin sollte eine Anpassung energieintensiver Aggregate an den Anlagenzufluss vorgenommen werden. Korrelieren die Laufzeiten der Aggregate mit der hydraulischen Auslastung, deutet dies auf eine energieorientierte Betriebsweise hin.
- Der externe Rezirkulationsstrom sollte an den Anlagenfluss und an die gewünschten Trockensubstanzgehalte in Membrankammern und Belebungsbecken angepasst werden.
- Rührwerke sollten an den tatsächlichen Durchmischungsbedarf angepasst werden.
- Die Anlage sollte so gestaltet sein, dass soweit wie möglich auf Pumpen (z. B. Permeatpumpen) verzichtet wird und ein freier Abfluss gegeben ist.
- Energetisch sinnvoll ist es, mit Rücksicht auf die Reinigungsleistung den TS-Gehalt eventuell an die Temperatur anzupassen. Bei geringerem Trockensubstanzgehalt wird die Effizienz des Sauerstoffeintrags verbessert und die Sauerstoffzehrung durch endogene Atmung vermindert.
- Im Zusammenhang mit der Stabilisierung des Schlammes ist das Schlammalter bzw. der Trockensubstanzgehalt zu hinterfragen. Dieser sollte außerdem an eine Jahresganglinie der Temperatur angepasst werden. Der Sauerstoffbedarf der Mikroorganismen steigt mit höherem Schlammalter an. Bei geringerem Trockensubstanzgehalt wird die Effizienz des Sauerstoffeintrags verbessert und die Sauerstoffzehrung durch endogene Atmung vermindert.
- Die Anordnung der Membranmodule in separaten Membrankammern hat gegenüber der integrierten Anordnung im Belebungsbecken energetische Nachteile, bietet jedoch betriebliche Vorteile. Eine eindeutige Empfehlung kann nicht gegeben werden. Die Anordnung ist individuell zu prüfen.
- Der Bau einer Vorklärung wird empfohlen, da sich dies auf den Stromverbrauch und die Betriebsstabilität positiv auswirkt. Bei Umsetzung einer Vorklärung ist ebenfalls der Bau einer Faulung zu empfehlen.
- Weiterhin müssen die Membranen nach gewissen Betriebszeiten ausgetauscht werden, da sich neben den reversiblen auch irreversible Ablagerungen ansetzen, die die nutzbare Filterfläche und damit die Leistungsfähigkeit der Membran einschränken.

3.3.4 Biofilmverfahren

3.3.4 Biofilmverfahren

3.3.4.1
Tropfkörper

3.3.4.2
Scheibentauchkörper

3.3.4.3
Tauchtropfkörper

3.3.4.4
Wirbelbettverfahren

3.3.4.5
Biofiltration mit Festbettreaktoren

3.3.4.1 Tropfkörper

Tropfkörperanlagen werden in der Regel als biologische Hauptstufe mit dem Ziel der Kohlenstoffelimination und ggf. Nitrifikation eingesetzt. Sie können aber auch als nachgeschaltete Nitrifikationsstufe eingesetzt werden. Bei Tropfkörpern haftet die Biomasse als Biofilm auf bspw. porösen Lavasteinen oder auf Kunststoff-Füllkörpern. Das vorgeklärte Abwasser durchrieselt das Trägermaterial, wobei i. d. R. die natürliche Belüftung für die Sauerstoffzufuhr ausreichend ist.

Tropfkörper zeichnen sich durch einen generell niedrigen Energiebedarf aus, weshalb sie für die energetische Optimierung von Kläranlagen interessant sind. Allerdings muss für deren Einsatz bei Anschlusswerten > 10.000 E das Problem der Denitrifikation verfahrenstechnisch günstig gelöst werden. Dafür gibt es verschiedene Ansätze, u. a. vorgeschaltete anoxische Belebungsstufen mit Zwischenklärung (ggf. vorhanden), anoxische Tropfkörper [Dorias, 1996] sowie vorgeschaltete anoxische MBBR-Reaktoren [Riße und Koch, 2011]. Tabelle 3-6 zeigt das Potenzial der Energieeinsparung beim Einsatz von Tropfkörpern in der aeroben biologischen Stufe.

Tabelle 3-6 Energiebedarf beim Einsatz eines Tropfkörpers (20.000 E) als aerobe biologische Stufe

Nitrifizierende Tropfkörperanlage mit Beschickungspumpwerk	20.000 E
Förderleistung inkl. Rezirkulation 760 m ³ /h	0,21 m ³ /s
Tropfkörperhöhe	4,2 m
Förderhöhe Beschickungspumpe	5 m
Pumpenwirkungsgrad	60 %
Leistung (P)	17,6 kW
Arbeit (W)	15.300 kWh/a
Energiebedarf Tropfkörper	7,7 kWh/(E · a)
Energiebedarf für konventionelle Belebung	13–17 kWh/(E · a)

Weitere energetische Vorteile im Vergleich zur konventionellen Belebung ergeben sich bei Tropfkörpern durch:

- Vereinfachung der Schlammbehandlung, da nur ein Schlammstrom (PS + ÜS TK) weiterbehandelt wird, solange alle Überschussschlämme in die Vorklärung gelangen,
- ggf. Vereinfachung der Schlammmentwässerung.

Effizienzmaßnahmen

Ansätze zur energetischen Optimierung von Tropfkörpern sind:

- Begrenzung des Rückführverhältnisses auf das verfahrenstechnisch notwendige Maß,
- Optimierung der Pumpenauslegung und Minimierung der Druckverluste im Beschickungssystem,
- Optimierung der Tropfkörperhöhe durch Wahl eines geeigneten Aufwuchsträgermaterials.

3.3.4.2 Scheibentauchkörper

Dieses System benötigt nur kinetische Energie zur Bewegung der Tauchkörper und wird auf kleineren Anlagen (Größenklasse 1 und 2) eingesetzt. Beim Scheibentauchkörper werden die rotierenden, ggf. profilierten Scheiben, auf denen die Biomasse aufwächst, wechselweise ins Abwasser eingetaucht. Zur Sauerstoffaufnahme werden sie dann wieder der Umgebungsluft ausgesetzt. Dabei erfolgt die Sauerstoffaufnahme durch Diffusion aus der Umgebungsluft in den Biofilm. Die Tauchkörper können je nach System auch mit zusätzlicher suspendierter Biomasse betrieben werden, wodurch die Raumabbauleistung steigt. Die Einsetzbarkeit der Scheibentauchkörper ist durch die Anzahl der bereitstellbaren Aufwuchsflächen bzw. der Scheibentauchkörpereinheiten begrenzt, weshalb solche Anlagen zumeist nur im Bereich < 5.000 E eingesetzt werden. Der spezifische Energieeinsatz für die Rotation der Scheibentauchkörper ist jedoch gering. Er beträgt nur **2,5 W/E_{BSB40}** (Einwohnerwert mit Vorklärung), im Jahresmittel nur **5 kWh/(E · a)** [Klargester, 2015], sodass dieses Verfahren, ggf. in Kombination mit anderen Vorreinigungsstufen, auch bei Anschlussgrößen > 5.000 E eine interessante und energetisch günstige Verfahrenstechnik darstellt. Auch hier muss für die Denitrifikation eine verfahrenstechnisch günstigere Lösung gefunden werden.

Effizienzmaßnahmen

Bei Tauchkörpern ergeben sich Optimierungsansätze in erster Linie aus der Umdrehungsgeschwindigkeit der rotierenden Walzen, die an den tatsächlichen Sauerstoffbedarf angepasst werden sollte.

3.3.4.3 Tauchtropfkörper

Tauchtropfkörper (Walzentauchkörper nach Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 281 [ATV-DVWK, 2001]) stellen eine Mischform zwischen Tauchkörpern analog Scheibentauchkörpern und dem Belebtschlammssystem mit Oberflächenbelüftung dar. Profilierte Elemente oder Hohlkörper, die an ein rotierendes Gestell montiert sind, dienen einerseits als Aufwuchsträger für sessile Biomasse. Andererseits tragen sie aber durch die eintauchenden Hohlkörper Luft in das Abwasser-Schlamm-Gemisch ein. Dies wird durch das „Ausgießen“ der Hohlkörper unterstützt, da das dort mitgeschleppte Wasser-Belebtschlamm-Gemisch in vielen Tropfen in den Wasserkörper eintaucht. Der spezifische Energiebedarf ist höher als bei Scheibentauchkörpern. Typische Einsatzgebiete sind Anlagen bis etwa 5.000 E.





Effizienzmaßnahmen

Maßnahmen für Tauchtropfkörper entsprechen denjenigen für die Scheibentauchkörper (vgl. Kapitel 3.3.4.2).

3.3.4.4 Wirbelbettverfahren

Beim Wirbelbettverfahren (MBBR = Moving Bed Bio Reactor) wird die Biomasse im Gegensatz zum klassischen Belebtschlammverfahren nicht in Suspension gehalten, sondern wächst auf einem inerten Trägermaterial, das sich frei im Abwasser bewegt.

MBBR-Systeme können auch in Kombination mit suspendierter Biomasse betrieben werden, wodurch das Behandlungsvolumen des klassischen Belebtschlammverfahrens stark verkleinert werden kann.

Wie auch im klassischen Belebtschlammverfahren, ist der größte Energieverbrauch für den Sauerstoffeintrag zum Kohlenstoffabbau und die Nitrifikation aufzubringen. Dabei muss allerdings auch eine ausreichende Turbulenz für die Umwälzung der Trägermaterialkörper erzeugt werden, die von der Form und Dichte der bewachsenen Trägermaterialkörper abhängig ist. In Abhängigkeit von der Beckengeometrie und dem Füllgrad kann dadurch der Energiebedarf über dem des klassischen Belebungsverfahrens liegen. Im Denitrifikationsbecken wird das Trägermaterial mit Rührwerken in Bewegung gehalten, wofür in Abhängigkeit vom System ebenfalls deutlich mehr Energie im Vergleich zum Belebungsverfahren benötigt wird. Die auf den Trägermaterialkörpern aufwachsende Biomasse wird durch die Bewegung und Reibung kontinuierlich abgetragen und dem Nachklärbecken zugeführt.



Effizienzmaßnahmen

Bei den Wirbelbettverfahren ist zu prüfen, ob sich ein Stand-by-Betrieb einzelner Straßen in Abhängigkeit von der Belastung einrichten lässt. Dies ist jedoch nur bei MBBR-Anlagen ohne nennenswerten Belebtschlammanteil für längere Zeit möglich, da sonst anaerobe Zustände des Belebtschlammes zu befürchten wären. Des Weiteren ist die Rezirkulation in Abhängigkeit vom Nitratgehalt zu steuern, um den Stromverbrauch für die Rezirkulationspumpen zu senken. Im Bereich der Belüftung des Wirbelbetts erfolgt die Anforderung der erforderlichen Luftmenge aufgrund der notwendigen Turbulenz und nicht der Sauerstoffabdeckung. Daher sind die Einsparmöglichkeiten beim Lufteintrag eher gering.

3.3.4.5 Biofiltration mit Festbettreaktoren

Biofilteranlagen kombinieren die Filtrationstechnologie mit der biologischen Reinigung mittels trägerfixierter Biomasse. Sie werden häufig als ergänzende nachgeschaltete Stufe zum Belebtschlammverfahren eingesetzt. Als eigene biologische Hauptstufe finden sie in Deutschland im kommunalen Bereich nur selten Anwendung. Sie werden aufgrund ihrer hohen volumenspezifischen Umsatzleistungen, bis **1,25 kg NH₄-N/(m³·d)** und bis **4 kg BSB5/(m³·d)** [Rother und Cornel, 2003], besonders dort eingesetzt, wo nur sehr wenig Fläche zur Verfügung steht oder Anlagen komplett eingehaust bzw. abgedeckt werden müssen. Es befinden sich sowohl aerobe als auch anoxische Biofilter im Einsatz. Als Aufwuchsträgermaterial werden überwiegend Blähton und Quarzsand, aber auch Anthrazit, Juraperle und weitere Materialien eingesetzt.

Aerobe Biofilter werden zur Erreichung ihrer maximalen Leistung zumeist mit Sauerstoffkonzentrationen zwischen 2 und 4 mg/l betrieben. Dies und der durch das Trägermaterial hervorgerufene Druckverlust begründen maßgeblich den hohen spezifischen Energiebedarf von aeroben Biofiltern, der zwischen **0,3** und bis zu **1,0 kWh/m³** betragen kann [Rother und Cornel, 2003]. Hinzu kommen weiterhin die recht hohen Energieverbräuche für das Zulaufpumpwerk sowie die Filterrückspülung. Hier werden hohe Leistungsspitzen für die großen Spülluftgebläse (bis 100 kW je Aggregat) und Spülwasserpumpen (bis 75 kW) benötigt. Eine Übersicht über die Verteilung der Verbräuche auf die einzelnen Gruppen einer Biofilteranlage gibt exemplarisch Bild 3-13.



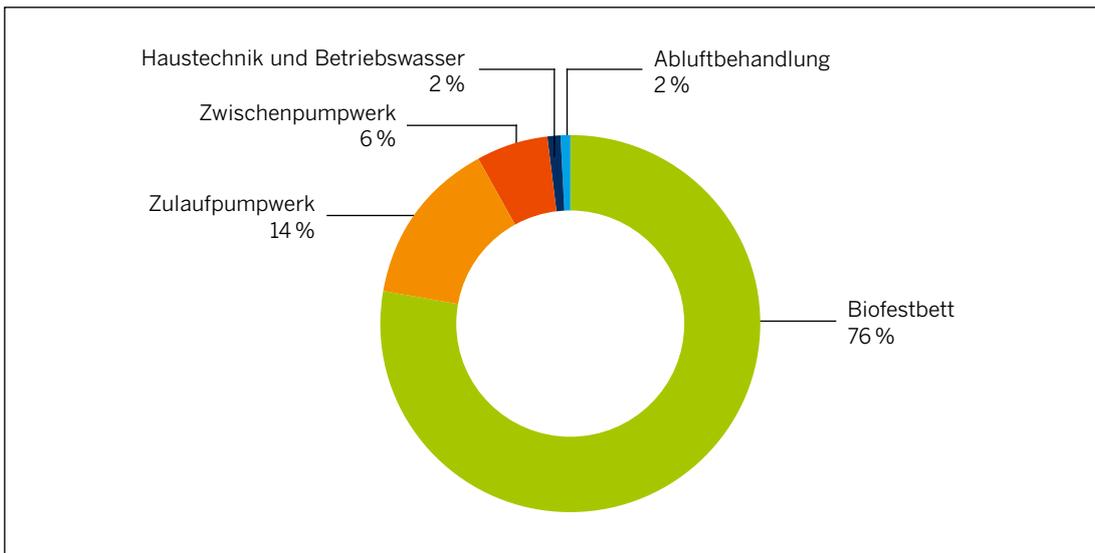


Bild 3-13 Übersicht über Energieverbraucher einer Biofilteranlage nach [Rother und Cornel, 2003]

Effizienzmaßnahmen

Bei Biofiltrationsanlagen sind – aufgrund der hohen Anschlussleistungen der Spülwasserpumpen und der Spülluftgebläse – die Spülzyklen an die Anforderungen anzupassen. Der Schlammwasserrücklauf sollte in einem ausreichend großen Puffer zwischengespeichert werden, um hydraulische Spitzen in der Anlage und damit auch energetische Spitzen in den Schlammwasserpumpen zu vermeiden.

Weitere Optimierungsansätze für Biofilteranlagen ergeben sich zunächst durch eine optimale Auslastung der Pumpwerke und der Filterstraßen, sodass nur die je nach Betriebszustand bzw. je nach Zulaufmenge und -fracht notwendige Anzahl an Filtern in Betrieb ist. Weiterhin ist eine Begrenzung des für die Denitrifikation notwendigen Rezirkulationsvolumenstroms auf das verfahrenstechnisch notwendige Maß angezeigt. Die Begrenzung des Rezirkulationsstroms wirkt sich unmittelbar auf die in Betrieb befindliche Anzahl an Biofiltern aus. Durch die reduzierte Anzahl der in Betrieb befindlichen Biofilter lassen sich die Anzahl der in Betrieb befindlichen Rezirkulationspumpen und die notwendige Luftmenge bzw. damit die Gebläseleistung reduzieren.

Da Biofilteranlagen häufig eine intensivierete Vorklärung aufweisen, muss zur Einhaltung der Stickstoffablaufwerte bei den meisten Anlagen zusätzlich Methanol oder eine andere CSB-Quelle in eine nachgeschaltete Filterdenitrifikation dosiert werden. Dabei ist abzuwägen, ob etwas mehr C-Dosierung in der nachgeschalteten Filterdenitrifikation ggf. deutliche Energieeinsparungen, z. B. durch verringerte Rezirkulationswassermengen und damit geringere Anzahl an Filterstraßen in Betrieb, ermöglichen kann. Ein weiterer Ansatz zur Optimierung ist die Wahl eines geeigneten Aufwuchsträgermaterials für die belüfteten Filter, um den Filterwiderstand möglichst gering zu halten. Ganz essenziell für die Vermeidung von extremen Spitzenlasten beim Stromverbrauch ist auch die Bewirtschaftung bzw. Zwischenspeicherung von $\text{NH}_4\text{-N}$ -Spitzenbelastungen im Zulauf sowie in den Prozesswässern.

3.3.5 Verfahren zur Phosphorelimination

In jedem biologischen Abwasserbehandlungsprozess wird Phosphor in die Biomasse eingebaut und somit dem Abwasser entnommen. Allerdings sind diese Eliminationsleistungen nur begrenzt gezielt beeinflussbar und zudem oft nicht ausreichend zur Erreichung vorgegebener Einleiterlaubnisswerte. Daher wird unterstützend eine weitergehende chemische oder verstärkte biologische Phosphorelimination eingesetzt. Bei der chemischen Phosphorelimination werden Fällmittel eingesetzt, um gelöste Stoffe aus dem Abwasser in unlösliche Stoffe umzuwandeln (Fällung) und abzutrennen (Sedimentation, Filtration). Bemessungshinweise können dem DWA-A 202 [DWA, 2011a] entnommen werden. Bei der chemischen Reinigung von Abwasser werden neben dem Phosphor



zusätzlich kolloidale Stoffe und Metallionen ausgefällt. Als Fällmittel können sauer oder alkalisch reagierende Salze, Lösungen oder Suspensionen eingesetzt werden. Beispiele dafür sind Aluminiumsulfat, Eisen-III-chlorid oder Kalk.

Oftmals werden auch 2-wertige Eisensalze eingesetzt. Diese müssen aufoxidiert werden, was zu einem leicht erhöhten Energiebedarf führt und dennoch einen Kostenvorteil gegenüber anderen Fällmitteln darstellt. Die Zugabe des Fällmittels erfolgt im Überschuss, dadurch werden die im Wasser gelösten Stoffe in eine ungelöste partikuläre Form überführt. Nachfolgend werden sie teilweise mit Flockungsmitteln, Sedimentations- und Filtrationsprozessen vom Wasser abgetrennt.

Es gibt unterschiedliche Varianten des Einsatzes der Fällung während der Reinigung auf der Kläranlage. Unterschieden werden hierbei:

- die Vorfällung, bei der die Chemikalien vor dem Vorklärbecken zudosiert werden,
- die Simultanfällung (vor, nach oder direkt in die Belebungsbecken),
- die Nachfällung nach der Nachklärung in die Filtrationsstufe oder mit einem zusätzlichen Absetzbecken.



Der Energieverbrauch für die Fällmitteldosierung selbst ist nur gering und beträgt rund **0,5 Wh/m³**. Die höhere Produktion von Überschussschlamm mit geringeren organischen Anteilen erfordert jedoch einen erhöhten energetischen Einsatz bei der Schlammbehandlung. Dieser kann bei der überwiegend im Einsatz befindlichen Simultanfällung durch verbesserte Eindickeigenschaften kompensiert werden.

Um die durch die Bakterien immer stattfindende Phosphoraufnahme zu steigern und dadurch die chemische Phosphorelimination zu ersetzen, kann in einem separaten Becken mit dem Zulauf für den Rücklaufschlamm eine Stresssituation unter anaeroben Bedingungen geschaffen werden. In der anaeroben Phase geben die Mikroorganismen den gespeicherten Phosphor ab, um die im Abwasser enthaltenen organischen Säuren aufzunehmen. In der aeroben Phase im Belebungsbecken können sich diese phosphorspeichernden Mikroorganismen mit einem Selektionsvorteil durch die aufgenommenen Säuren nun vermehren und wiederum das Phosphor aufnehmen. Diese Aufnahme ist größer als die Rücklösung während der anaeroben Phase („Luxury-Uptake“). In Zeiten geringer Belastung kann unter Umständen dieser Prozess nicht im gewünschten Ausmaß ablaufen. Daher muss dieses Verfahren, um die geforderten Einleitbedingungen sicher einhalten zu können, zumeist mit einer chemischen Fällung unterstützt werden. Eine genaue Aufteilung des Energieverbrauchs für die biologische Phosphorelimination ist aufgrund des Zusammenspiels mit der Denitrifikation und bei einer evtl. Kombination mit der chemischen Fällung nicht möglich.



Effizienzmaßnahmen

Der im Vergleich zur reinen chemischen Fällung niedrigere Überschussschlammfall durch eine gezielte biologische Elimination des Phosphors hat Energie- und Kosteneinsparungen bei der Schlammbehandlung und -entsorgung zur Folge. Diesen Vorteilen ist die zusätzliche Energie für die Durchmischung des Beckens gegenüberzustellen. Zudem wird das Potenzial zur Erzeugung eines guten Phosphorzyklats bei möglicher Phosphorrückgewinnung, z. B. mittels MAP-Fällung (vgl. Kapitel 3.6.2) im Prozesswasserbereich, begünstigt.



Bei der chemischen P-Elimination wird empfohlen, die Effizienz der Dosierstelle zu gewährleisten. Dazu zählen der Betrieb der Dosierpumpe im Auslegungsbereich und die regelmäßige Prüfung des Dosiersystems auf Undichtigkeiten.

3.3.6 Nachklärung

Die Nachklärung ist beim klassischen Belebtschlammverfahren und einigen vorstehend beschriebenen Modifikationen integraler Bestandteil der biologischen Hauptstufe. Sie ist über den Rücklaufschlamm und den Belebungsbeckenablauf verknüpft und dient der Trennung des gereinigten Abwassers vom Belebtschlamm.

Durch Verringerung der Fließgeschwindigkeit kommt es zur Sedimentation des Belebtschlamm, der als Rücklaufschlamm wieder in die biologische Stufe zurückgeführt wird. Ein Teil des Belebtschlammes wird als Überschussschlamm der Schlammbehandlung zugeführt. Die Nachklärung dient zudem als Zwischenspeicher von belebtem Schlamm bei erhöhten Zuflussereignissen.

Die Nachklärbecken unterscheiden sich grundsätzlich in ihrer Bauform und Durchströmungsrichtung. Unterschieden wird hierbei zwischen Rundbecken und Rechteckbecken sowie zwischen vertikal, horizontal oder quer durchströmten Becken. Weitere Unterscheidungsmerkmale gibt es durch die Gestaltung der Zu- und Abläufe sowie die Art der Schlammräumung.

Die am häufigsten angewendete Bauform in Deutschland sind horizontal oder vertikal durchflossene Rundbecken mit zentrischer Beschickung. Eine weitere verbreitete Bauform ist das längsdurchflossene Rechteckbecken.

Bei Rundbecken ist die Sohle meist geneigt ausgeführt und die Schlammräumung erfolgt mit Schildräumern. Wird die Sohle eben ausgeführt, erfolgt die Räumung mit Saugräumern. Energetisch ist die Variante mit dem Schildräumer jedoch effizienter, da aufgrund der geringeren Bodenschlammkonzentration sowie der vorgegebenen Einlaufgestaltungen (z. B. Aufnahme von Kurzschlussströmungen durch Saugräumer an den Beckenrändern der Belebungsbecken) bei Saugräumern mehr Wasser zurückgefördert werden muss. Der Ablauf erfolgt meist über eine periphere Ablaufrinne oder zunehmend auch über radial in das Becken eingetauchte, gelochte Ablaufrohre.

Wichtige Faktoren für die konstruktive Gestaltung und damit für den Betrieb sind:

- Maximaler Zufluss bei Regenwetter,
- Form und Abmessung der Nachklärbecken,
- Anordnung und Gestaltung des Zu- und Ablaufs,
- Zulässige Schlamm- und Eindickzeiten,
- Art und Betriebsweise der Räumereinrichtung,
- Rücklaufschlammstrom sowie dessen Regelung.

Detaillierte Prinzipskizzen und die Bemessung von Nachklärbecken für einstufige Belebtschlamm-anlagen sind im DWA-A 131 [DWA, 2016b] umfassend dargestellt und werden daher nachfolgend nicht näher erläutert.

Durch den zurückgeführten Belebtschlamm wird der Trockensubstanzgehalt der Belebung beeinflusst. Die erforderliche Schlammrückführung ist maßgeblich durch die hydraulische Belastung der Anlage und das Absetzverhalten des belebten Schlammes in der Nachklärung bestimmt.

Effizienzmaßnahmen

Da die Nachklärung selbst nur einen geringen Energieverbrauch aufweist und nur geringe Möglichkeiten des gezielten betrieblichen Eingriffs bietet, sind Energieeffizienzmaßnahmen hauptsächlich über den Einfluss der Nachklärung auf andere Verfahrensstufen zu erreichen.

Dabei ist die maßgebliche Einflussgröße die Effizienz der Schlammabtrennung. Um diese gezielt erfassen und Verbesserungsmöglichkeiten erkennen zu können, ist eine CFD-Simulation sinnvoll. Diese gibt Aufschluss über das Absetzverhalten und somit den Flocken- und Schlammtrieb und ermöglicht so die hydraulische Optimierung des Einlaufs, der Räumergeschwindigkeit sowie -schildhöhe und des Rücklaufschlammverhältnisses. Weiterhin sollten bei der Nachklärung die relevanten Parameter (ISV, Trübung, TS-Gehalt im Belebungsbecken, TS-Gehalt im Rücklaufschlamm, Schlamm Spiegel etc.) gemessen werden, um Verschlechterungen frühzeitig zu erkennen.

Maßnahmen zur Optimierung sind beispielsweise:

- die Optimierung der Steuerung und Regelung des Rücklaufschlammvolumenstroms und somit Vergleichmäßigung hydraulischer Belastungsspitzen in der Belebung und Optimierung des Trockensubstanzgehalt in der Belebung (vgl. Kapitel 3.3.2.2.5),



- die Installation energieeffizienter Antriebe (Räumer, Schwimmschlammumpfen, Rücklaufschlammumpfen etc.),
- die Optimierung des Einlaufbauwerks (z. B. adaptiver Einlauf). Empfohlen werden Einlaufschlitze bei Rechteckbecken über die Breite des Einlaufs und bei Rundbecken über den Umfang des Mittelbauwerks,
- die Vermeidung von Schwimmschlamm durch ausreichende Denitrifikation (wilde Denitrifikation);
- der Einsatz von Flockungsmitteln bei schlechter Eindickung,
- die Umstellung der Schwimmschlammumpfen auf Intervallbetrieb,
- die Abdeckung der Ablaufrinnen zur Unterbindung des Algenbewuchses.

Betriebliche Optimierungen in der Nachklärung führen zu einer Verringerung der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf und bei nachgeschalteten Filteranlagen zu Energieeinsparungen.

3.4 Weitergehende Reinigung

3.4 Weitergehende Reinigung

3.4.1
Nachgeschaltete
Filteranlagen

3.4.2
Spurenstoffelimination

3.4.3
Desinfektion von biologisch
gereinigtem Wasser

Die weitergehende Abwasserreinigung ist kein feststehender Begriff, sondern hat sich im Laufe der Entwicklung der Abwassertechnik hinsichtlich ihrer Bedeutung verändert. Im vorliegenden Handbuch werden unter diesem Begriff der biologischen Hauptstufe nachgeschaltete Verfahren („dritte und vierte Reinigungsstufe“) verstanden.

3.4.1 Nachgeschaltete Filteranlagen

Nachgeschaltete Filteranlagen werden in der Abwasserreinigung eingesetzt, wenn erhöhte Anforderungen an die Ablaufkonzentrationen bestehen. Mit dieser Verfahrensstufe können niedrige CSB-, AFS- und P-Ablaufkonzentrationen und die Unterstützung einer Entkeimung erreicht werden. Zur Restreinigung werden auch durch eine Belüftung biologisch aktivierte Filteranlagen mit einer Kombination von chemisch/physikalischen und mikrobiellen Prozessen eingesetzt, um geringe $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen zu erreichen.

Bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit können folgende langjährig bewährte Abwasserfiltrationsverfahren unterschieden werden:

- Die Filtration, die sich ausschließlich auf die Elimination der abfiltrierbaren Stoffe im Abwasser beschränkt,
- Die Flockungsfiltration, bei der mittels Fällungs- und/oder Flockungshilfsmittelzugabe zusätzlich abfiltrierbare Stoffe erzeugt werden, vorzugsweise mit dem Ziel einer weitgehenden Phosphorelimination (siehe auch Kapitel 3.3.5),
- Die biologisch intensivierete Filtration (meistens Trockentuchfiltration), die mit Hilfe geeigneter Filtermaterialien und ausreichender Sauerstoffversorgung zusätzlich auf eine Verringerung der organischen Restbelastung des Abwassers abzielt. In bestimmten Fällen ist damit auch eine Restnitrifikation oder mit Hilfe von Kohlenstoffverbindungen eine zusätzliche Restdenitrifikation möglich. Der Energieeinsatz steigt durch eine zusätzliche Reduktion des Stickstoffs in der Filtration (Restnitrifikation). Weitere Hinweise sind im Arbeitsblatt DWA-A 203 [DWA, 2016c] zu finden.



Filteranlagen werden aufgrund ihrer Beschickungsgeschwindigkeit in Langsamfilter (**0,1–0,2 m/h**) und Schnellfilter (**15 m/h**) unterschieden. In der Abwasserreinigung werden in der Regel Schnell-

filter in Form von Raumfilteranlagen eingesetzt. Diese können nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden, wie z. B. Aufbau des Filtermediums, Strömungsrichtung und Spülzyklus. Grundsätzlich wird unterschieden in:

- Raumfilter: Suspensarückhalt im Filterbett, Filterbetthöhe zwischen **1,0 und 2,5 m**
- Flächenfilter: Suspensarückhalt vorwiegend auf der Oberfläche des Filterbetts



Raumfilter

Raumfilter werden in Deutschland überwiegend als abwärtsdurchströmte Filter ausgeführt. Der üblicherweise mehrschichtige Filteraufbau ist durch eine Abstufung des Filterkorns von grob nach fein in Fließrichtung gekennzeichnet. Eine häufig eingesetzte Bauart ist der Dreischichtfilter. Bei diesem wird die obere Schicht aus einem groben, jedoch spezifisch leichteren und weniger dichten Material als die darunter liegende Schicht gebildet, sodass der Schichtaufbau nach der Spülung innerhalb des Absetzvorgangs einfach wiederhergestellt werden kann. Die unterste Stüttschicht, die wiederum etwas grobkörniger ausgeprägt ist, dient nicht der Filtration, sondern dem Schutz der Düsen. In der Abwasserreinigung werden folgende Raumfiltertypen unterteilt und eingesetzt:

Nach dem Filterbettaufbau:

- eine Filterschicht
- zwei Filterschichten
- Mehrschicht (inkl. Stüttschicht)

Nach Filtermaterial:

- Anthrazit
- Basalt
- Bims
- Blähschiefer
- Blähton
- Kies
- Quarzsand

Nach der Fließrichtung:

- abwärts durchströmte Raumfilter
- aufwärts durchströmte Raumfilter

Nach der Spülart:

- Filter mit diskontinuierlicher Spülung
 - Aufstauspülung (Klappenfilter)
 - Durchlaufspülung (Rinnenfilter oder Aufwärtsanlage)
- kontinuierlich gespülte Filter (Moving bed Filteranlagen)

Nach Beschickung des Filterbetts:

- Trockenfilter (kein Überstau im Filterbett, Luftzufuhr)
- Nassfilter (Überstau im Filterbett)

Flächenfilter

Abhängig von der Bauform kann ein Flächenfilter auch radial oder horizontal im Filterbett angeordnet sein oder eine vertikale zylindrische Fläche bilden. Wie bei den Raumfilteranlagen können Flächenfilter kontinuierlich oder diskontinuierlich gespült werden. Flächenfilter werden in folgende Typen unterteilt:

- Mikrosiebe
- Tuchfilter
- Zellenfilter
- Membranfilter (siehe auch Kapitel 3.3.3.3)
- Kombiverfahren



Bezogen auf die Ausbaugröße werden seit 1998 mehr als die Hälfte aller deutschen Filteranlagen in NRW betrieben, vor allem abwärts durchströmte, diskontinuierlich gespülte Raumfilter [Schröder, 1998]. Nach 1998 sind nur noch wenige Filteranlagen in Deutschland neu gebaut worden. Zu erwähnen ist, dass sich derzeit wieder einige Filteranlagen im Zuge der Spurenstoffelimination und zur verstärkten P-Elimination in Planung und Bau befinden. In nachfolgender Tabelle 3-7 sind die zu filtrierenden Stoffe aufgeführt und Beispiele für geeignete Filteranlagen gegeben.

Tabelle 3-7 Auswahlkriterien für den Einsatz von Filtrationsverfahren, modifiziert nach [Meyer, 1979a]

Suspensa		gelöste Stoffe, Kolloide (zusätzlich zum Suspensa-Rückhalt)		
große Partikel > ~10 bis 20 µm	kleine Partikel < ~10 µm	C	N	P
überwiegend org. C-Verbindungen (Belebtschlammreste)	organische C-Verbindungen P-Kristalle	gelöste organische C-Verbindungen	Ammonium-Verbindungen gelöste organische C-Verbindungen	P-Verbindungen ggf. auch gelöste organische C-Verbindungen u. Ammonium-Verb.
Flächenfilter		Raumfilter und Flächenfilter		
Beispiele ■ Mikrosiebe ■ Tuchfilter ■ Zellenfilter ■ Membranfilter	Beispiele ■ Mikrosiebe ■ Membranfilter	Beispiele ■ biologisch intensivierte Filter	Beispiele ■ biologisch intensivierte Filter ■ Trockenfilter	Beispiele ■ Flockungsfilter ■ Membranfilter

Die Bemessung von Abwasserfilteranlagen ist von vielen verschiedenen Prozessvariablen abhängig, welche die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Anlage bestimmen. Prinzipskizzen sowie die Bemessung von Filteranlagen sind im Arbeitsblatt DWA-A 203 [DWA, 2016c] dargestellt. Zur Erfolgskontrolle und Aufnahme der energetischen Situationen sollte bei einer Filteranlage die benötigte Energie auf die durchgesetzte Wassermenge bezogen werden (kWh/m³). Es sind alle zur nachgeschalteten Filteranlage zugehörigen Anlagenteile zu berücksichtigen (Hebwerke, Spüleinrichtungen, Gebläse etc.). Es gilt, die Betriebsweise der Filteranlage für unterschiedliche Zuflusssituationen zu planen. So können zur Optimierung und Effizienzsteigerung bei geringen Zuflüssen die Filtereinheiten gereinigt und notfalls auch phasenweise aus dem Beschickungskonzept genommen und auf Stand-by gehalten werden. Dadurch wird die bestmögliche Nutzung der Filteranlage erreicht. Diese Maßnahme verringert den Verschleiß der Armaturen und führt zu sauberen, einsatzbereiten Filtereinheiten bei steigender hydraulischer Belastung.



Effizienzmaßnahmen

Filteranlagen gehören mit einem Anteil von ca. 5–15 % des Gesamtstromverbrauchs zu den energieintensiven Verfahrensstufen auf Kläranlagen. Der Energiebedarf hängt dabei grundlegend von dem eingesetzten Verfahren und der zugehörigen Maschinenteknik ab. Er ergibt sich durch die Summation der Energieverbräuche des Zulaufhebwerks, der Spülluftgebläse, der Spülwasserpumpen sowie der Schlammwasserförderung. Auch der Abscheidegrad der vorherigen biologischen Stufe hat Einfluss auf den Energiebedarf. Werden durch die Nachklärung vermehrt Belebtschlammflocken in den Ablauf abgetrieben, so steigt die Filterbelegung schneller und der Spülzyklus ist öfter zu wiederholen.

Bei den diskontinuierlich betriebenen Raumfiltern ergeben sich durch die kurzzeitige Zuschaltung der Spülwasserpumpe und der Spülluftgebläse hohe Stromspitzen.

Um hohe Stromspitzen (vgl. Kapitel 5.3.4) bei der Filterspülung zu vermeiden, können bei der Neuplanung von Filteranlagen hochliegende Spülwasserbehälter eingesetzt werden. Die Spülung erfolgt in diesem Fall im Freigefälle. Der Vorteil liegt in der geringeren Leistung der Spülwasserpumpen, da für die Befüllung des Spülwasserspeichers deutlich längere Zeiten zur Verfügung stehen als beim Direkteinsatz der Pumpen für die Spülung. Als weitere Effizienzverbesserung kann

bzw. sollte die Anpassung der Rückspülgeschwindigkeit an das Filtermaterial erfolgen. Welches Potenzial hier erschließbar ist, zeigen bereits die Untersuchungen von [Meyer, 1979b], wonach die Rückspülgeschwindigkeiten bei einer 30 %-igen Filterbettausdehnung zwischen 37 und 270 m/h variieren können. Dabei ist auch die Wahl des Filtermaterials zu überprüfen. Weitere Energieeinsparungen können durch folgende Maßnahmen erreicht werden:

1. Spülwasserpumpen

Grundsätzlich sollte eine Anpassung der Spülwasserpumpen an die tatsächlichen Spülerfordernisse (hydraulischer Widerstand, Spülgeschwindigkeit, Spüldauer, Ausrüstung, Spülwasserpumpen mit Frequenzumrichter) erfolgen.

2. Spülzyklus

Es wird empfohlen, den Anstieg der Filterwiderstände zu überwachen. Oft werden bei Filteranlagen die Spülungen der Filter ausgelöst, wenn anhand der (Zulauf-)Klappenstellung oder der Differenzdruckmessung im Filterbett ein erhöhter Filterwiderstand erkannt wird. Um den Filterwiderstand exakt ermitteln zu können, muss das Signal der Druckdifferenzmessung beziehungsweise der Filterklappe durch eine durchflussbezogene Division auf das zur Steuerung wesentliche Maß (Filterwiderstand ausgelöst durch die Feststoffanlagerung) normiert werden. Oftmals wird die Filterspülung aber nicht über die mengenkorrigierte Differenzdruckmessung ausgelöst, sondern nach Ablauf einer vorgegebenen Betriebszeit. Dies erhöht zwar die Betriebssicherheit, ist aber aus energetischen Gründen nicht zielführend.

Darüber hinaus ist die Filterwirkung eines belegten Filterbetts insbesondere hinsichtlich der AFS besser.

Durch einen ansteigenden Durchfluss im Zulauf, bspw. bedingt durch ein Niederschlagsereignis, kann es zum schnellen Anstieg der Belegung des Filters bzw. des Filterbetts kommen. Für diesen Fall können verkürzte (Not-)Spülprogramme hilfreich sein. Somit kann sichergestellt werden, dass alle Filtereinheiten mit der vorhandenen Spülwasserkapazität gespült werden können und sie wenigstens so lange verfügbar sind, bis die Standardspülprogramme durchgelaufen sind.

Eine weitere Maßnahme zur Energieoptimierung und zur Erhöhung der Betriebssicherheit bei einsetzendem Regenwasserzufluss ist das Zuschalten einzelner Filtereinheiten, die während der Trockenwetterperiode außer Betrieb genommen werden. Dies sollte jedoch nicht bei biologisch aktiven Filtern angewendet werden.

Bei kontinuierlich beschickten Filteranlagen kann zur Reduzierung der Spülwassermenge ein Lamellenabscheider vorgeschaltet werden. Dieser bewirkt eine Feststoffabscheidung im Bereich des Filters, was zur Reduzierung der Spülwassermenge führt. Des Weiteren wird empfohlen, aus dem Schlammwasserbehälter in der ersten Phase den Schlamm abzuziehen und evtl. direkt in die Schlammbehandlung abzuleiten. Die Wasserphase des Schlammwassers sollte, wenn möglich, über den Sandfang geführt werden, um einen Austrag des Filtermaterials visuell erkennbar zu machen.

Als weitere Effizienzmaßnahme gilt es nach dem DWA-Themenband [2009e], die Außerbetriebnahme der Vorbelüftung einer Filteranlage zu prüfen, da diese nur einen geringen Effekt auf die Nitratbildung, jedoch einen hohen Energiebedarf hat.

3. Spülluftgebläse

Die Energieeinsparungen beim Spülluftgebläse sind eher gering, da ein bestimmter Turbulenzgrad aufgebracht werden muss, um das Filterbett schnell aufzubrechen. Mögliche Variablen sind die notwendige Spülluftgeschwindigkeit und die Dauer des Lufteintrags. Allerdings kann wegen der in der Regel kurzen Betriebszeiten der Spitzenstrombedarf in ansonsten lastarme Zeiten verschoben werden.

4. Fällmittel

Die zusätzliche Zugabe von Fällmitteln im Bereich der Filtration hat einen sehr geringen Energiebedarf. Maßnahmen können dem Kapitel 3.3.5 entnommen werden.

3.4.2 Spurenstoffelimination

Zur Elimination von anthropogenen Spurenstoffen aus Abwasserströmen stehen verschiedene oxidative, adsorptive und membranbasierte Verfahren zur Verfügung. Dabei können diese Verfahren entweder in den Abwasserreinigungsprozess integriert oder in nachgeschalteten Stufen einer konventionellen Abwasserreinigungsanlage eingesetzt werden.

Großtechnisch erprobte Verfahren für die Spurenstoffelimination sind:

- Ozonung mit Sandfilter. Der Ablauf der Nachklärung wird mit Ozon behandelt und anschließend über eine Filteranlage als biologisch aktive Stufe geführt.
- Ozonung mit biologisch aktiviertem Aktivkohlefilter. Der Ablauf der Nachklärung wird mit Ozon behandelt und anschließend durch eine Filteranlage oder einen Festbettreaktor mit Wirbelbett geleitet.
- Filtration als biologisch aktive Stufe und/oder Pulveraktivkohle (PAK)-Filtration mit Rücklaufkohleführung. Die Körnung von PAK liegt im Bereich $< 0,045$ mm. Die Abtrennung der PAK erfolgt in einem Absetzbecken und in der nachgeschalteten Filteranlage.
- Filtration über granuliert Aktivkohle (GAK) in Druckkesseln oder in einer umgerüsteten Flockungfiltrationsstufe. Die Körnung von GAK liegt im Bereich von 0,5–4,0 mm.

Hinweise für die Auslegung dieser und weiterer Verfahren können der „Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination“ des Kompetenzzentrums Mikroschadstoffe.NRW [Alt et al., 2015] und dem DWA-Themenband „Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen“ [DWA, 2015d] entnommen werden.

Aus energetischer Sicht lässt sich grundsätzlich für die Elimination von anthropogenen Spurenstoffen sagen, dass der Energieverbrauch auf der Kläranlage für die Ozonung deutlich höher ist als der für die adsorptiven Verfahren mit der Zugabe von PAK und der Filtration über GAK. Dieser Unterschied ist hauptsächlich auf die energieintensive Ozonproduktion vor Ort zurückzuführen. Erweitert man den Betrachtungsraum über die Bilanzgrenzen der Kläranlage hinaus, sollten bei der Aktivkohle der Energiebedarf für die Herstellung sowie bei der Ozonung der Energiebedarf der Reinsauerstofferzeugung und die unterschiedlichen Transportwege in die Betrachtungen mit einbezogen werden.

3.4.2.1 Ozonung

Die chemische Oxidation mit Ozon (O_3) hat zum Ziel, die biologisch bzw. adsorptiv nicht entfernbaren Verbindungen zu entfernen. Für einen effizienten Einsatz ist eine möglichst vollständige Nitrifikation eine Grundvoraussetzung, da Ozon schnell mit Nitrit reagiert. Der Ozonbedarf hängt vom Rest-DOC und Rest-Nitrit ab [DWA, 2015d].

Der Energiebedarf setzt sich aus den Vorgängen „Ozonerzeugung (Kühlung)“, „Ein- und Austrag“ und „katalytische Restozonvernichtung“ zusammen. Bei Messungen an großtechnischen Anlagen liegt der elektrische Energiebedarf ohne die Berücksichtigung eines Anteils an Pumpenergie im Bereich von $0,04 \text{ kWh}_{el}/\text{m}^3$ bis ca. $0,9 \text{ kWh}_{el}/\text{m}^3$ bei zugegebenen Dosiermengen im Bereich von **$2-7 \text{ g } O_3/\text{m}^3$** . Für die Erzeugung des Ozons werden **$8-14 \text{ kWh}_{el}/\text{kg } O_3$** benötigt. Der Ein- und Austrag des Ozons sowie die Restozonvernichtung tragen in Summe nur geringfügig zum Energiebedarf bei [Alt et al., 2015, Pinnekamp et al., 2015].



Um vor allem den Energiebedarf für die Ozonerzeugung, den Eintrag und die Restozonvernichtung sowie alle damit verbundenen Prozesse weitestgehend zu minimieren, sollte die eingebrachte Ozonmenge möglichst bedarfsgerecht gesteuert werden. Diese Steuerung der zu dosierenden Ozonmenge kann anhand der Restozonkonzentrationen im Ablauf des Reaktors, in Abhängigkeit vom Durchfluss oder bei stark schwankenden DOC-Konzentrationen anhand des DOC-Gehalts im Kläranlagenablauf, erfolgen (ggf. anhand eines vorab bestimmten Korrelationsfaktors und der zumeist online bestimmten CSB-Konzentrationen).

Wird als Einsatzgas für die Ozonerzeugung technisch reiner Sauerstoff verwendet, ist für eine Gesamtbilanz auch der Energieeinsatz für die Herstellung und den Transport des Sauerstoffs zu berücksichtigen. Nach DWA-M 205 [DWA, 2013c] beträgt der spezifische Energieverbrauch der Ozonerzeugung unter Verwendung von Reinsauerstoff, allerdings ohne Berücksichtigung der Reinsauerstoffherzeugung, rund **8–10 kWh/kg O₃** [Pinnekamp et al., 2015]. Dieser Wert erhöht sich bei der nicht den Regelfall darstellenden Verwendung von Luftsauerstoff um ca. **1,31 kWh/kg O₃** [Bahr et al., 2007]. Eine detaillierte Aufschlüsselung des auf die eingesetzte Ozonmenge bezogenen Energiebedarfs wird für den Einsatz bei der Spurenstoffelimination in [Pinnekamp et al., 2011a] gegeben, allerdings mit sehr großen Spannweiten.

Effizienzmaßnahmen

Durch Auswahl einer optimierten, auf den DOC bezogenen Ozondosiermenge kann der zusätzliche Energieverbrauch auf der Kläranlage so gering wie möglich gehalten werden. Die Ozonanlage arbeitet zudem effizienter, wenn sie im Bereich ihrer Auslegungsgröße betrieben wird. Die Anlage sollte so ausgelegt sein, dass eine ausreichende Kontaktzeit zwischen Wasser und Gas gegeben ist und ein Austrag des Ozons aus der Gasphase vermieden wird.

Weitere Ansätze sind:

- Minimierung der DOC- und Nitritkonzentration im Zulauf der Ozonungsanlage,
- Ozondosierung in Abhängigkeit von Qualität und Quantität der zu eliminierenden Abwasserkompartimente sowie der Restkonzentration oxidierbarer Stoffe,
- Wahl eines energetisch optimierten Ozongenerators,
- Kühlung des Ozongenerators mit Abwasser und Verzicht auf ein gesondertes Kühlaggregat,
- Nutzung entstehender Abwärme bei der Ozonerzeugung in anderen Prozessschritten bzw. bei der Ozonerzeugung selbst (vgl. nähere Ausführungen in [Plath et al., 2010]),
- Prüfung einer Wirkungsgraderhöhung bei der Ozonerzeugung aus Reinsauerstoff durch Zugabe von geringen Mengen Stickstoff zum Rohgas [Plath et al., 2010],
- Einstellen eines Optimums aus dem Energiebedarf für höhere Ozonkonzentrationen im Eintragsgas und dem Energiebedarf für den Gasgemischeintrag [Plath et al., 2010]),
- Nutzung katalytischer Verfahren zur Restozonvernichtung aus dem abgeleiteten Luftstrom (vgl. nähere Ausführungen in [Plath et al., 2010]).

3.4.2.2 PAK-Filtration

Es gibt verschiedene Varianten einer Pulveraktivkohledosierung. PAK kann direkt in die Belüftungsstufe zudosiert werden, jedoch ist die Effizienz gegenüber nachgeschalteten Dosierungen geringer. Bei der nachgeschalteten Dosierung wird Aktivkohle in einen Kontaktreaktor intensiv eingemischt. Die Aktivkohle wird anschließend in einem Sedimentationsbecken abgetrennt und in den Kontaktreaktor zurückgeführt. Da die Aktivkohle im Sedimentationsbecken nicht weitestgehend abgetrennt werden kann, wird eine Filtrationsstufe nachgeschaltet, in der die Kohlepartikel hinreichend zurückgehalten werden.

Der Energieverbrauch wird durch die Arbeitsschritte PAK-Zugabe, Rühren und Rezirkulieren beeinflusst. Im Gegensatz zur Ozonung gibt es hier keinen wesentlichen Einfluss der Dosis auf den Energieverbrauch, da sich die Höhe der Aktivkohledosis nicht auf die Vorgänge wie Rezirkulieren oder Rühren auswirkt. Einen größeren Einfluss auf den Energiebedarf dieser Reinigungsstufe hat die anfallende Pumpenergie. Bei PAK-Dosiermengen von 5–20 g PAK/m³ bewegt sich der spezifische Energiebedarf der nachgeschalteten Zugabe für Dosierung und Umwälzung im Bereich von **0,025–0,035 kWh_{el}/m³**. Die abschließende Trennung der PAK durch eine Filtrationsstufe erhöht diesen Wert um **0,01–0,05 kWh_{el}/m³**. Für den Rezirkulationsbetrieb beträgt der spezifische Energiebedarf **0,08–0,18 kWh_{el}/m³** [Alt et al., 2015, Pinnekamp et al., 2015].

Bei den Anlagen mit PAK-Dosierung ist von einem leichten Energiegewinn im Falle einer Schlammverbrennung auszugehen. Bei einer üblichen Faulzeit von 20 Tagen verbessert sich die Entwässerbarkeit durch PAK-Dosierung um etwas mehr als 1% TR, der Heizwert steigt ebenfalls geringfügig an [Kapp et al., 2014].



C

2

3

4

5



Literatur

3.4.2.3 GAK-Filtration

Die granulierten Aktivkohle (GAK) kann als Adsorptionsmaterial in Druckkesseln verwendet werden, oder man rüstet vorhandene Flockungsfilter für eine GAK-Adsorption um.

Bei GAK-Filtern ist der Energiebedarf stark von den örtlichen Randbedingungen im Hinblick auf die notwendige Förderhöhe und das Rückspülintervall abhängig. Messwerte liegen zwischen **0,02 und 0,06 kWh_e/m³**. Eine pauschale Angabe des Energiebedarfs ist jedoch nicht zu empfehlen, der Verbrauch ist ortsspezifisch zu ermitteln [Alt et al., 2015, Pinnekamp et al., 2015].



Effizienzmaßnahmen

Ansatzpunkte für eine Energiebedarfsminderung bei der Adsorption mittels PAK und GAK sind:

- Einstellung einer optimalen Aktivkohledosis. Eine Unter- oder Überschreitung der Dosiermenge muss vermieden werden. Das Dosiersystem sollte in regelmäßigen Abständen kalibriert werden,
- Nutzung feiner vermahlener PAK für eine bessere Ausnutzung der Kohle und geringere notwendige Kontaktzeiten. Eine nachgeschaltete Membranfiltration ist dafür eine Grundvoraussetzung,
- Rückspülintervalle des Filterbetts bei der GAK-Filtration verlängern, z. B. keine zu feine Kornabstufung wählen, damit der Filterwiderstand niedrig bleibt.

3.4.2.4 Ausblick

Weitere verfahrenstechnische Maßnahmen werden diskutiert und auf ihr Einsparpotenzial getestet. Beispiele sind hier die energieeffiziente Herstellung von Aktivkohle/Ozon/Sauerstoff und die geregelte Ozondosierung und/oder Aktivkohledosierung. Bei der Ozonung ist zu prüfen, inwieweit einzelne Belüfter bedarfsweise zu- oder abgeschaltet werden können. Für die Ermittlung der benötigten Belüftereinheiten sollten auch die Schwachlastzeiten berücksichtigt werden.

Andere alternative Verfahren wie die Nanofiltration, die Umkehrosiose und das Verfahren Advanced Oxidation Process (AOP) oder der Einsatz der simultanen PAK-Dosierung in Membranbioreaktoren (MBR) werden weiter auf ihre Anwendbarkeit für die Spurenstoffelimination getestet.

3.4.3 Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser

Die im Abwasser enthaltenen Fäkalien können unterschiedlichste Krankheitserreger enthalten (Viren, Bakterien, Protozoen, Pilze, Würmer). Die Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser wird zur Verbesserung der hygienischen Qualität eingesetzt. Flussgebiete, in denen die Abwasserdesinfektion angewandt wird, sind u. a. die obere Isar und die Spree.

Aber auch in NRW finden sich einige wenige Anlagen, bei denen eine gezielte Abwasserdesinfektion (UV-Bestrahlung) stattfindet. Auch MBR-Anlagen ermöglichen eine Abwasserdesinfektion, wobei dies nicht ihr primärer Einsatzzweck ist (vgl. hierzu Kapitel 3.3.3.3).

Das zur Desinfektion am häufigsten angewandte Verfahren ist die UV-Bestrahlung [DWA, 2013c]. Weitere technische Möglichkeiten sind zum Beispiel:

- nachgeschaltete Membranfiltration (Membrandesinfektion),
- oxidative Verfahren wie die Ozonung (Ozonierung) oder die Desinfektion mit organischen Peroxidverbindungen oder Wasserstoffperoxid,
- Desinfektion mit Paraminsäure oder Chlor.

Letztere wird aus Gründen des Umweltschutzes in Deutschland nicht zur Abwasserdesinfektion eingesetzt und daher hier nicht weiter betrachtet. Die Verwendung von Peroxidverbindungen zur Abwasserdesinfektion wurde bisher kaum großtechnisch angewandt und wird daher hier ebenfalls nicht näher dargestellt. Weiterführende Informationen, Beschreibung der Funktionsprinzipien, Bemessung und Auslegung sowie betriebliche Aspekte der Abwasserdesinfektionsverfahren können dem DWA-M 205 [DWA, 2013c] entnommen werden.



3.4.3.1 UV-Bestrahlung

Gängiges Verfahren bei der UV-Desinfektion auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland ist die Offenkanal-UV-Bestrahlung. Für Austausch und Wartungsarbeiten sind diese Strahler in herausnehmbaren Modulen parallel zur Fließrichtung nebeneinander zu UV-Bestrahlungseinheiten (Banks) angeordnet [DWA, 2013c].

Der spezifische Energieverbrauch zur Abwasserdesinfektion mittels UV-Bestrahlung liegt zwischen **0,03 kWh/m³** und **0,06 kWh/m³** [DWA, 2013c]. Faktoren, die die benötigte Bestrahlungsstärke (in W/m²) und damit den Energieverbrauch beeinflussen, sind [DWA, 2013c]:

- Zu erreichende Reduktion der humanpathogenen Keime,
- Abwassermatrix (abfiltrierbare Stoffe, Transmission etc.),
- Art der UV-Strahler (Niederdruckstrahler, Mitteldruckstrahler, UV-LEDs),
- Durchflussmenge,
- Strahlerzustand und -anordnung,
- Regelungskonzept der UV-Desinfektionsanlage.

Voraussetzung für den effizienten Betrieb einer UV-Desinfektionsanlage ist eine ausreichende Transmission (in %/cm) des Abwassers gegenüber einer Strahlung der Wellenlänge von 260 nm (UV-C-Strahlung). Erhöhte Konzentrationen an abfiltrierbaren Stoffen mindern somit die Effizienz der UV-Desinfektion. In [Nelle, 1994] wird beispielsweise gezeigt, dass eine Erhöhung der UV-Transmission von **25 %** eine **Halbierung** der benötigten Bestrahlungsstärke bewirkt.

Effizienzmaßnahmen

Zur Gewährleistung der Transmission des Abwassers gegenüber der UV-C-Strahlung ist ab einer Konzentration an abfiltrierbaren Stoffen von 10 mg/l im Zulauf der UV-Desinfektion die Nachrüstung einer nachgeschalteten Filteranlage (vgl. Kapitel 3.4.1) bzw. die Wirksamkeit entsprechender bereits installierter Komponenten zu prüfen und zu optimieren [Londong et al., 2006]. Weiter ist für eine ausreichende Desinfektionswirkung eine gleichmäßige Bestrahlung durch eine möglichst ideale Pfropfenströmung und Quervermischung sicherzustellen [DWA, 2013c] [Londong et al., 2006].

Die UV-Strahler sind regelmäßig mechanisch und ggf. auch chemisch von Verschmutzungen und Ablagerungen zu befreien, um eine optimale Wirkleistung zu erzielen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine mit dieser Reinigung einhergehende höhere Abnutzung der Strahleroberfläche zu einer Minimierung der Lichtleistung und damit der Nutzungsdauer der Lampen führen kann.

Die Bestrahlung des Abwassers ist auf den Durchfluss anzupassen, um nicht unnötig Energie zu verbrauchen. So ist eine Dimmung der UV-Strahler möglich, wobei im Einzelfall zu prüfen ist, ob sich hieraus energetische Vorteile ergeben, wie dies nach [Gnirß, 2016] einige Praxisbeispiele zeigen. Weiter kann durch die Außerbetriebnahme einzelner Gerinne der UV-Desinfektion der Energieverbrauch minimiert werden. [Plath et al., 2010]

Aufgrund der für die Desinfektion gut geeigneten Wellenlänge von UV-Niederdruckstrahlern von 254 nm bei einer typischen Leistungsaufnahme von 10 W bis 600 W sind diese bei ausreichenden Platzverhältnissen gegenüber den Mitteldruckstrahlern (240 nm bis 280 nm) mit 1.000 W bis 30.000 W aus energetischen Gründen zu bevorzugen [DWA, 2013c]. Die Wirtschaftlichkeit eines entsprechenden Austausches und der damit verbundenen baulichen Änderungen ist zu prüfen. Weiter ist die Leistungsdichte von Niederdruckstrahlern geringer als von Mitteldruckstrahlern, wodurch für die Desinfektion eine erhöhte Strahlerlänge benötigt wird und sich energetische Vorteile relativieren können [Plath et al., 2010].

Im Bereich der UV-Desinfektion ist in Zukunft durch die Weiterentwicklung von UV-LED-Lampen mit einer energieeffizienten Alternative zu den bisher eingesetzten Quecksilberdampflampen zu rechnen [Bischoff, 2013].



3.4.3.2 Ozonung



Zur Desinfektion von Kommunalabwasser wird die Ozonung derzeit in Deutschland noch nicht im großtechnischen Routinebetrieb eingesetzt. Jedoch wurden einige Pilotversuche durchgeführt. Neben einigen Anlagen zur Spurenstoffelimination (vgl. Kapitel 3.4.2) wird die Ozonung bereits großtechnisch in der Trinkwasseraufbereitung angewandt (vgl. bspw. [Plath et al., 2010] oder [DVGW, 1999]).

Das Wirkprinzip der Ozonung zur Desinfektion beruht auf der Abtötung oder Inaktivierung von Bakterien, Parasiten und Viren durch eine oxidative Veränderung von deren organischen Bestandteilen. Daher ist für eine ausreichende Desinfektion die Einhaltung einer wirksamen Kombination von Ozonkonzentration und Einwirkzeit entscheidend.

Auf Basis durchgeführter Pilotversuche lassen sich folgende wesentliche Betriebsparameter festhalten:



- Erforderliche Ozonkonzentration: **2 bis 10 g Ozon/m³** bzw. ca. **0,5 bis 1 g Ozon/g DOC** [DWA, 2013c],
- Erforderliche Aufenthaltszeit im Reaktorbehälter: mindestens 5 bis 10 Minuten [DWA, 2013c]. In der Praxis werden jedoch teilweise deutlich längere Aufenthaltszeiten von 15 bis 30 Minuten gewählt [Gnirß et al., 2016].



Unter Verwendung von reinem Sauerstoff und einer Ozonkonzentration von 10 g Ozon/m³ im Kläranlagenablauf kann nach [DWA, 2013c] von einem spezifischen Energieverbrauch von **0,1 – 0,15 kWh/m³** ausgegangen werden.



Weitere Informationen zum Energieverbrauch und zu Effizienzmaßnahmen sind dem Kapitel zur Spurenstoffelimination (Kapitel 3.4.2) zu entnehmen, wobei die für die Abwasserdesinfektion abweichenden Reaktionszeiten und Ozondosiermengen zu berücksichtigen sind.

3.4.3.3 Membrandesinfektion

Die nachgeschaltete Membrandesinfektion wurde bisher nur bei wenigen Kläranlagen großtechnisch umgesetzt bzw. erprobt, um den Kläranlagenablauf aufgrund besonderer gewässergüteschaftlicher Anforderungen bzw. einen Teilstrom zur Brauchwasseraufbereitung zu desinfizieren [Gnirß, 2001, Lange et al., 2003, Müller, 2003]. Auch wenn die bei den MBR-Verfahren eingesetzten Membranen einen Teilrückhalt humanpathogener Keime ermöglichen, dienen sie im Wesentlichen der Phasenseparation. Die derzeit in der Abwasserdesinfektion eingesetzten Mikro- und Ultrafiltrationsmembranen ermöglichen, wie in Bild 3-14 ersichtlich, einen weitergehenden Rückhalt von Bakterien und Viren.

Es können die Verfahrensweisen Dead-End-Filtration (statische Filtration) und Cross-Flow-Filtration (dynamische Filtration) unterschieden werden. Wenn große Abwasservolumenströme mit geringer Feststoffbelastung (z. B. Kläranlagenabläufe) behandelt werden, weist das Dead-End-Verfahren Vorteile gegenüber dem Cross-Flow-Verfahren auf. Durch die beim Dead-End-Verfahren nicht notwendige Rezirkulation lässt sich ein wesentlich geringerer Energiebedarf von rund **0,1 bis 0,2 kWh/m³** [DWA, 2013c] erzielen.



Die in der Literatur belegten spezifischen Energieverbräuche für eine Membrandesinfektion zeigen eine deutliche Anlagenspezifität und variieren zwischen **0,1 und 0,4 kWh/m³** (vgl. [DWA, 2013c]). Die Faktoren die zu dieser Variation führen, entsprechen denen der Membranbelebungsanlagen (vgl. Kapitel 3.3.3.3).



Effizienzmaßnahmen

Einer der wesentlichen Faktoren zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser mittels Membranen ist eine Optimierung der Membranrückspülung. Entsprechende Effizienzmaßnahmen finden sich in Kapitel 3.3.3.3 unter dem Unterpunkt Spülung.



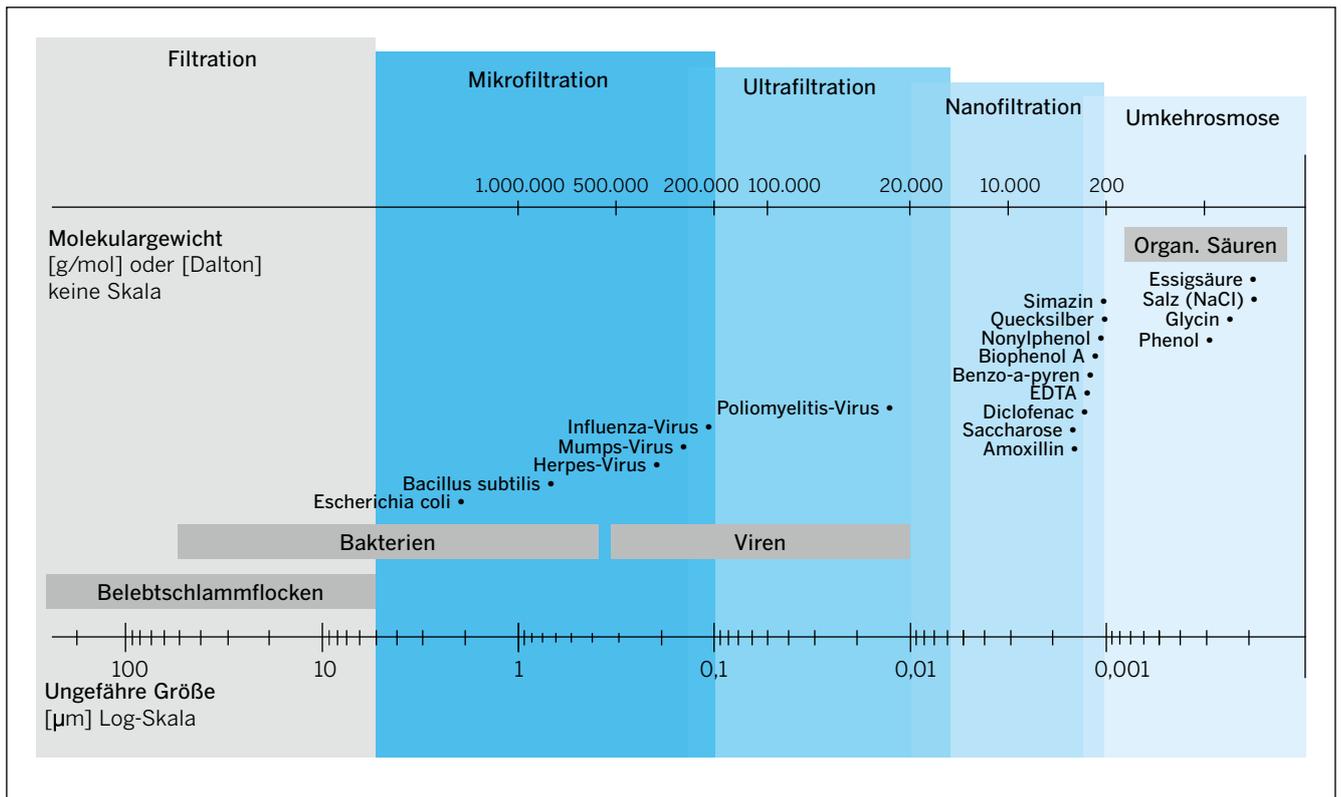


Bild 3-14 Membrantypen und ihr Rückhaltevermögen gegenüber humanpathogenen Keimen und weiteren Stoffen nach [Lange et al., 2003]

3.5 Schlammbehandlung und Schlammentsorgung

3.5 Schlammbehandlung und Schlammentsorgung

3.5.1

Allgemeine Hinweise

3.5.2

Schlammförderung

3.5.3

Schlamm-eindickung & -entwässerung, -konditionierung

3.5.4

Schlammstabilisierung

3.5.5

Schlamm-trocknung

3.5.6

Schlamm-verwertung

3.5.7

Phosphorrückgewinnung bei der Schlammbehandlung

3.5.1 Allgemeine Hinweise

Die Schlammbehandlung umfasst alle Verfahren, mit denen die Verwertbarkeit, die Lager- oder die Transportfähigkeit von Klärschlamm verbessert wird.

Grundsätzlich kann die Schlammstabilisierung aerob oder anaerob erfolgen.

Die aerobe Schlammstabilisierung erfolgt bei kleineren Kläranlagen (< 20.000 E) im Belebungsbecken und wird daher auch als simultane aerobe Schlammstabilisierung bezeichnet. Die dazu erforderlichen wenigen Verfahrensschritte (entsprechend groß dimensioniertes Belebungsbecken, Eindicker und Schlamm entwässerung) sind in Bild 3-15 schematisch dargestellt.

Bei Kläranlagen mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung fällt Primärschlamm (PS) aus der Vorklärung und Überschussschlamm (ÜS) aus der Nachklärung an (Bild 3-16).

Die anaerobe Schlammstabilisierung benötigt eine Vorklärung, ein kleiner dimensioniertes Belebungsbecken, Voreindicker, Faulbehälter sowie Nacheindicker und Schlamm entwässerung



(siehe Schema in Bild 3-16). Dieses Verfahren wird bei größeren Kläranlagen aus verfahrenstechnischen (bessere Schlammuntersorgungseigenschaften), energetischen (Stromeinsparung im Belebungsbecken, Stromerzeugung aus dem entstehenden Faulgas) und wirtschaftlichen Gründen (Schlammuntersorgungskosten sinken um **30 %**, Stromeigenerzeugung und Volumeneinsparung im Belebungsbecken) meist eingesetzt.

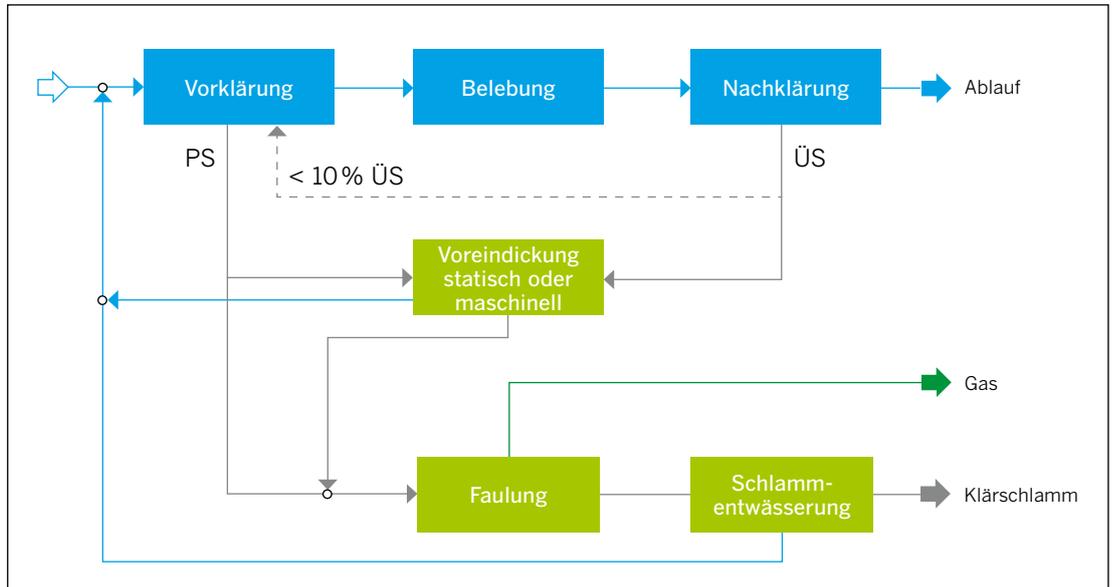


Bild 3-15 Schematische Darstellung einer Kläranlage mit simultaner aerober Schlammstabilisierung

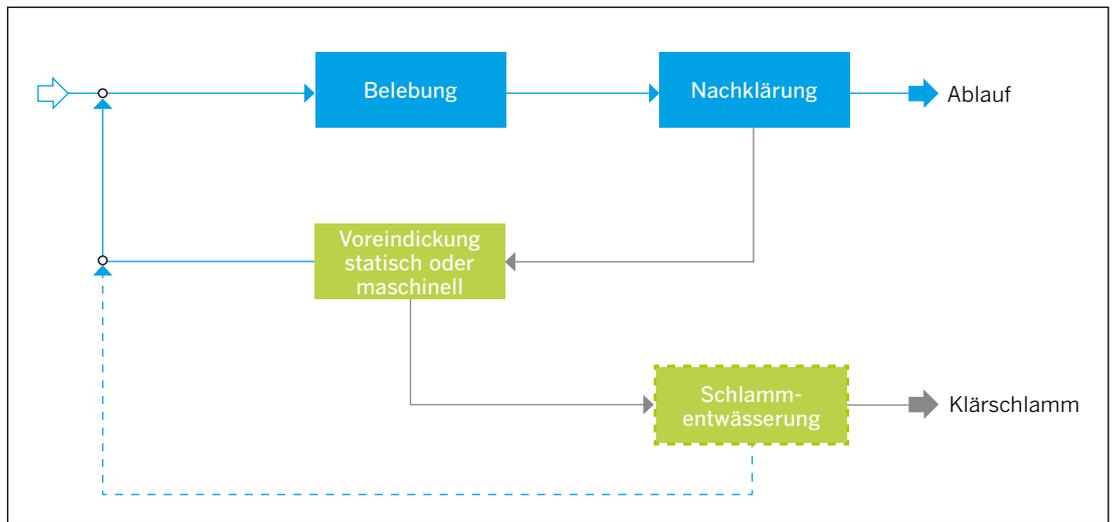


Bild 3-16 Schematische Darstellung einer Kläranlage mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung



Nachfolgend werden daher die am häufigsten eingesetzten Verfahren (mit Ausnahme Kapitel 3.5.4.3) zur Schlammbehandlung beschrieben.

Bei der Schlammbehandlung wird elektrische Energie zum Fördern, Durchmischen, Eindicken und Entwässern sowie thermische Energie zum Aufheizen und Trocknen benötigt. Die Schlammbehandlung beansprucht bis zu 20 % des elektrischen Energieverbrauchs der gesamten Kläranlage und verursacht beinahe den gesamten Wärmebedarf.



Durch die Nutzung des Faulgases mittels Kraft-Wärme-Kopplung (siehe Kapitel 5.6.1) kann ein großer Teil des Wärmebedarfs (Median aus Energieanalysen in NRW nach [Kolisich et al., 2014] rd. 95 %) und des elektrischen Energiebedarfs (Median aus Energieanalysen in NRW nach

[Kolisich et al., 2014] rd. 43 %) abgedeckt werden. Die Energiebilanz wird dadurch positiv beeinflusst. Durch eine weitergehende Nutzung des Schlammes als Nährstoffquelle (Stickstoff und Phosphor) oder (bei weiterer Trocknung) als Brennstoff zur Strom- und Wärmeproduktion kann zudem die Ressourcen- und Energiebilanz der Schlammbehandlung noch weiter verbessert werden.

3.5.2 Schlammförderung

Bei vielen Verfahrensstufen der Schlammbehandlung muss der Schlamm mittels Pumpen gefördert werden. Die Auswahl geeigneter Pumpen hängt dabei von den rheologischen Eigenschaften des Schlammes, der durch Menge und Förderhöhe bestimmten Förderaufgabe und den verfahrenstechnischen Anforderungen der nachfolgenden Verfahrensstufe ab.

In der Regel kommen zum Fördern von Schlämmen Verdrängerpumpen in Betracht. Weitere Hinweise zur Auswahl und zur Effizienz finden sich in Kapitel 4.2. Besondere Aufmerksamkeit gilt den Druckleitungen. Diese sollten nach Erfahrungswerten eine Nennweite von mindestens DN 100 aufweisen und eine Fließgeschwindigkeit von **0,7 m/s** nicht unterschreiten.

Zudem werden bei der Schlammförderung zum Faulbehälter oft Zerkleinerer vor den Pumpen eingesetzt. Der Vorteil liegt in der Verbesserung der Schlammeigenschaften (Vermeidung von Verzopfungen, Zerkleinerung von Grobstoffen, Verbesserung des Gasertrags).

Die Leistungsaufnahme der meist in Reihe mit der Pumpe verwendeten Nasszerkleinerer liegt bei **1–2 kW (8.000–16.000 kWh/a)** für Pumpen im Leistungsbereich von 100–250 m³/h.

Regelmäßige Kontrollen der Stromaufnahme der Pumpenmotoren und der Manometer auf Pumpendruckseite sowie der Volumenströme machen Effizienzverschlechterungen rechtzeitig sichtbar.

Effizienzmaßnahmen

Bei Verschlechterung der Pumpeneffizienz für die Förderung des Schlammes und/oder gleichzeitig höherem Druckverlust bzw. vermindertem Durchfluss können Schlammleitungen mit einer Hochdruckspülung gereinigt werden, sofern die Pumpe selbst nicht ineffizient ist (Laufradverschleiß). Feste Ablagerungen (zum Beispiel Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP/Struvit) können durch eine Säurebehandlung oder ggf. durch Ausfräsen beseitigt werden. Eine gezielte Phosphorrückgewinnung (vgl. Kapitel 3.5.7 und 3.6.2) sollte bei Auftreten von massiven MAP/Struvit-Ausfällungen geprüft werden.

Die räumliche Anordnung von Schlammeindickern, Entwässerungsaggregaten und der Schlamm-trocknung ist für den Energiebedarf des Schlammtransports entscheidend. Weite und verwinkelte Wege sind dabei zu vermeiden.

Im Vergleich mit der Förderung von Abwasser fallen bei Schlämmen die Rohrleitungsverluste deutlich höher aus. Bekannte Fördertechniken für entwässerten Schlamm sind Rohrschnecken und Förderbänder, wobei Förderbänder als die mit Abstand energetisch effizienteste Lösung gelten.

3.5.3 Schlammeindickung, -entwässerung und -konditionierung

3.5.3 Schlammeindickung, -entwässerung und konditionierung

3.5.3.1

Allgemeine Hinweise

3.5.3.2

Statische Voreindickung

3.5.3.3

Entspannungsflotation

3.5.3.4

Schlammkonditionierung

3.5.3.5

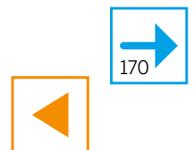
Maschinelle Überschuss-schlamm-eindickung

3.5.3.6

Statische Nach-eindickung des ausgefauten Schlammes

3.5.3.7

Maschinelle Entwässerung des ausgefauten Schlammes



3.5.3.1 Allgemeine Hinweise

Die statische und maschinelle Eindickung sowie die maschinelle Schlammwässerung sind neben der (thermischen) Trocknung und Verbrennung Verfahrensschritte zur Volumen- und Masseverminderung durch Reduzierung des Wassergehalts.

Die Eindickung hat zum Ziel, Wasser aus dem Schlamm abzuscheiden und damit die Erhöhung des Trockenrückstands TR (%) und eine Volumenreduktion zu bewirken. Dies führt zu Energieeinsparungen bei den nachfolgenden Behandlungsstufen (Faulung, Konditionierung, Entsorgung) durch geringere Fördermengen und geringeren Wärmebedarf.

Die maschinelle Schlammwässerung ist für den Energieverbrauch der ihr nachfolgenden Prozesskette maßgeblich, da die maschinelle Entwässerung spezifisch viel weniger Energie benötigt als eine mögliche anschließende Trocknung. Andererseits ist zu beachten, dass viele Entsorgungsoptionen einen bestimmten Entwässerungsgrad erfordern. So erfordern Verbrennungsanlagen häufig für entwässerte Schlämme die Pumpfähigkeit mit Dickstoffpumpen (**20–35% TR**) oder für getrocknete Schlämme die Blasfähigkeit des Trockenguts, damit es pneumatisch gefördert werden kann (**> 90% TR**) [DWA, 2010c]. So gesehen sind die Entwässerung, die Trocknung und auch die spätere Entsorgung bzw. Verwertung eng miteinander verknüpft und müssen unter Beachtung des Heizwertes energetisch gemeinsam betrachtet werden.

Wesentliche verfahrenstechnische Gegebenheiten (z. B. Vorhandensein von Feinrechen oder Feinsieben, Funktion des Sandfangs, Durchflusszeit der Vorklärung, Bio-P-Elimination, aerobes Schlammalter, Art und Ort der Fällmittelzugabe) müssen berücksichtigt werden. Sie haben signifikante Auswirkungen auf die Schlammigenschaften und somit auf das Entwässerungs- und Eindickverhalten. Die Schlammigenschaften unterliegen auch infolge von Änderungen der Rohabwasserzusammensetzung, des Schlammalters und der biochemischen Abbauvorgänge jahreszeitlichen Schwankungen.

Die anfallenden Prozesswässer aus der Eindickung und Entwässerung werden in die biologische Stufe zurückgeführt oder getrennt behandelt.

Primärschlamm dickt zumeist stärker ein als Überschussschlamm. Bei gemeinsamer Eindickung von ÜS und PS werden mittlere TR-Gehalte von **4 bis 6%** erreicht. Eine gemeinsame Eindickung von Primär- und Überschussschlamm stößt häufig an ihre Grenzen, da beide Schlammfraktionen hinsichtlich ihrer Eigenschaften unterschiedliche Merkmale aufweisen. Daher ist eine getrennte Behandlung von Primär- und Überschussschlamm gängig, wobei vorzugsweise der Primärschlamm statisch und der Überschussschlamm maschinell eingedickt werden. Jedoch kann eine Teileinleitung von Überschussschlamm (bis ca. **10%**) in die Vorklärung die Konsistenz des Primärschlammes in Bezug auf die Pumpfähigkeit verbessern [Schröder et al., 2009].

Der mögliche Entwässerungsgrad der Voreindickung ist durch die notwendig beizubehaltende Pumpfähigkeit und die Sicherung des störungsfreien Betriebs der Wärmetauscher für die Schlammaufheizung limitiert. Eine Feststoffkonzentration von **6–8% TR** sollte man nicht überschreiten, da anderenfalls ein erhöhter Aufwand bei der Faulbehälterbeschickung und -umwälzung entstehen kann [Schröder et al., 2009]. Verallgemeinern lässt sich eine maximal zulässige Feststoffkonzentration nicht und sollte gemäß den örtlichen Gegebenheiten geprüft werden.

3.5.3.2 Statische Voreindickung

Mit der statischen Eindickung (Sedimentation) wird vor den weiteren Behandlungsstufen aus dem Schlamm Wasser abgetrennt. Dies beginnt bereits in den Trichtern der Sedimentationsbecken.

Die Eindickung erfolgt überwiegend mit energetisch günstigen, gravitationsgetriebenen statischen Eindickern. Sie können als Stand- oder Durchlaufeindicker betrieben werden. Eine erste Möglichkeit zur Optimierung der Eindickleistung beginnt beim Schlammabzug aus der Vorklärung. Beim Abzugsvorgang kommt es darauf an, einen Mindest-TR-Gehalt genau zu erkennen und den Abzugsvorgang bei Unterschreitung des Mindest-TR-Gehalts unmittelbar abubrechen. Hierfür kann ein automatischer Schlammabzug mit Hilfe von Feststoffsonden eingesetzt werden. Der Abzug

wird zeitgesteuert für jeden einzelnen Trichter eingeleitet. Bei Unterschreitung eines einstellbaren Mindestfeststoffgehalts wird der Abzugsschieber unmittelbar geschlossen. Hierzu eignen sich besonders sog. Schnellschlusschieber.

Zur Vermeidung von Wassertaschen und somit zur Erhöhung des Eindickgrades kann der Eindicker mit einem Krählwerk ausgerüstet werden. Dafür reicht aber ein kleinerer Antriebsmotor (etwa 100 W für 200 m³ Behälter). Bei der statischen Eindickung wird i. d. R. kein eigenes Flockungsmittel (pFM) benötigt, es wirkt sich aber unterstützend auf den Feststoff-Abscheidegrad beim Überschussschlamm aus [DWA, 2014d].

Effizienzmaßnahmen

Ansatzpunkte für eine Energiebedarfsminderung bei Planung und Betrieb sind:

- Bei einer Ausrüstung mit Krähl- und Rührwerken sollte ein bedarfsgerechter Betrieb eingestellt werden. Ein Dauerbetrieb ist zu vermeiden, auch um bewusst die Bildung von Kanälen im Schlamm zuzulassen, damit Wasser schneller abfließen kann.
- Das Prozesswasser eines Primärschlamm-Voreindickers kann bei Einleitung in die biologische Stufe die biologische P-Elimination oder Denitrifikationsleistung bei geringem C/N-Verhältnis verbessern und externe CSB-Quellen substituieren. Der Voreindicker wird um eine Kreislauf-führung erweitert, sodass sich im Eindicker bildende organische Säuren gezielt ausgewaschen werden können.



3.5.3.3 Entspannungsfotation

Die Entspannungsfotation eignet sich zum Abscheiden und Eindicken von Schlamm mit schlechten Absetzeigenschaften (Überschussschlamm), wird aber erfahrungsgemäß kaum in der Praxis eingesetzt. Bei der Flotation lagern sich durch den Eintrag von Luft feindisperse Luftbläschen an die Schlammflocken an und bringen diese an die Oberfläche. Die aufschwimmende Schlamm-schicht wird oben abgeschieden und der schwere Teil, der am Beckenboden sedimentiert, durch Räumler abgezogen. Beim sogenannten Recycleverfahren wird ein Teil des Klarwassers vom Ablauf zur Begasungseinrichtung zurückgeführt. Bei der Entspannungsfotation wird Strom für die Verdichtung der Luft, die Druckerhöhung, die Förderung des Flotats und die Räumermotoren benötigt. Für die Flotatförderung haben sich Verdrängerpumpen bewährt, die das mit Luft ange-reicherte Flotat problemlos abfordern können. Übliche Drücke in der Begasungseinrichtung liegen zwischen **3 bar** und **5 bar** [DWA, 2007d].

Effizienzmaßnahmen

Ansatzpunkte für eine Energiebedarfsminderung bei Planung und Betrieb sind:

- Ausreichende Verweilzeit des Flotats in der Flotatschicht für eine zusätzliche Eindickung oberhalb des Wasserspiegels,
- Einstellung der Flotaträumgeschwindigkeit und der Flotatschichthöhe über die Höhe des Wasserspiegels,
- Die Entspannungsventile sollten so angebracht werden, dass sie während des Betriebs einzeln gewechselt und leicht gereinigt werden können.



3.5.3.4 Schlammkonditionierung

Der Verfahrensschritt der Konditionierung ist unerlässlich, um bei der maschinellen Eindickung und Entwässerung von Klärschlämmen ausreichende Feststoffanteile im Austrag bei hohen Abscheidegraden zu erreichen. In Einzelfällen wird die Eindickung mit Zentrifugen ohne Konditionierung betrieben. Eine Schlammkonditionierung kann durch chemische und/oder physikalische (mechanische/thermische) Verfahren erfolgen. Eine mechanische Konditionierung verändert die Struktur von Schlammsuspensionen durch Zugabe anorganischer oder organischer Zuschlagstoffe (Asche, Stroh, Zellstoff, Sand etc.), die nicht chemisch reagieren. Bei thermischen Verfahren werden Proteine als Bestandteil der extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) in ihrer natürlichen Struktur verändert (denaturiert). Dadurch nimmt das Wasserbindungsvermögen von EPS ab, wodurch eine weitergehende Wasserabtrennung möglich ist. Je höher die Behandlungstemperatur ist, umso größer werden die Rückbelastung und Geruchsemissionen.

Klärschlämme werden in der Regel mit polymeren Flockungsmitteln (pFM) chemisch konditioniert. Dabei handelt es sich um synthetisch hergestellte, organische, wasserlösliche Polymere. Diese werden in Aufbereitungsanlagen für den Einsatz vorbereitet. Eine unsachgemäße Polymeraufbereitung führt zu Einbußen von gewünschten und erreichbaren Eindickungs- bzw. Entwässerungsergebnissen [DWA, 2014c]. Alternativ werden auch Metallsalze (Eisen- und Aluminiumsalze) verwendet und eventuell mit einem entsprechenden Polymer kombiniert.



Ein hoher Einsatz von synthetischen polymeren Flockungsmitteln bei der Voreindickung kann einen negativen Einfluss auf die Faulgasproduktion (vgl. Kapitel 5.2) haben [DWA, 2014d].



Effizienzmaßnahmen

Eine optimale Schlammkonditionierung führt zu Energieeinsparungen bei der Eindickung und Entwässerung. Die optimierte Schlammkonditionierung führt bei der Entwässerung zu höheren Trockenrückstandsgehalten, die bei Transport, Trocknung und Verbrennung zu Energieeinsparungen führen.

- Für die optimale Dosierung von Zuschlagstoffen, insbesondere bei häufig und stark schwankenden Schlammeigenschaften, eignen sich kontinuierliche Feststoffmessungen in einer Bypass-Rohrleitung und Trübungsmessungen im Zentrat oder Filtrat. Zusammen mit entsprechenden Durchflussmessungen können die Schlammfrachten ermittelt und eine dazu proportionale Dosierung eingestellt werden.
- Für eine Aufbereitung von polymeren Flockungsmitteln werden diskontinuierlich arbeitende Chargenanlagen (zum Beispiel Zweikammer-Chargenanlagen) mit einer Reifezeit von mindestens 45 Minuten nach Zugabe des Flockungsmittels und des Ansetzwassers empfohlen. Die Ansatzkonzentration des Flockungsmittels sollte regelmäßig durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit und Bestimmung des Trockenrückstands kontrolliert und dokumentiert werden (weitere Hinweise: DWA-M 350 [DWA, 2014c]).
- Durch den Einsatz eines dynamischen Inline-Mischers wird das Flockungsmittel ohne Nachverdünnung direkt in den Schlamm eingemischt. Dadurch sinkt der elektrische Leistungsbedarf für die Dosiereinrichtungen und der Wasserverbrauch wird deutlich reduziert [DWA, 2014d].

3.5.3.5 Maschinelle Überschussschlamm eindickung

Es ist gängige Praxis, Überschussschlamm maschinell einzudicken, da das Eindickverhalten gegenüber Primärschlamm schlechter ist. Insbesondere in den Winter- und Frühjahrsmonaten tritt verstärkt das Wachstum von fadenförmigen Mikroorganismen auf, welches das Sedimentations-, Eindick- und Entwässerungsverhalten vor allem des Überschussschlammes deutlich verschlechtert. Ist eine maschinelle ÜS-Eindickung vorzusehen, erfolgt diese in der Regel mit Bandeindickern, Trommeleindickern, Schneckeneindickern, Scheibeneindickern oder Zentrifugen, wobei sich die Aggregate im Stromverbrauch sehr stark unterscheiden. Unter diesen Aggregaten zeichnen sich Bandeindicker und Siebtrommeln durch einen geringen Energieverbrauch aus.



Die maschinelle Überschussschlamm-Voreindickung erlaubt eine Verringerung des Schlammvolumens um etwa **80 %** (ca. **5 bis 7 % TR**). Siebe (Trommel oder Band) benötigen für diesen Prozess Flockungsmittel, aber nur halb so viel Strom wie Zentrifugen für das gleiche Ergebnis ohne Flockungsmittel.

Im nächsten Abschnitt wird ausführlicher auf Effizienzmaßnahmen im Entwässerungsbetrieb eingegangen, die ebenfalls für den Eindickungsbetrieb Gültigkeit besitzen.



Die Aggregate und Hinweise zu Effizienzmaßnahmen in der Anlagentechnik werden in Kapitel 4.5.2 beschrieben.

3.5.3.6 Statische Nacheindickung des ausgefaulten Schlammes

Für die statische Nacheindickung von ausgefaultem Schlamm werden neben Eindickern mit Krählwerken auch einfache Stapelbehälter genutzt. Bei einer Ausführung mit flachen oder nur leicht geneigten Böden werden die Behälter zwecks Vermeidung von Ablagerungen mit Rührwerken oder

Bodenräumschilden ausgerüstet. Die Rührwerke werden vor der Schlammmentnahme zur Homogenisierung des Behälterinhalts betrieben.

Eine gasdichte Abdeckung der statischen Nacheindickung kann entstehendes Methangas auffangen und es bietet sich eine Verwertung in einem BHKW an. So können Treibhausgasemissionen vermieden werden.

3.5.3.7 Maschinelle Entwässerung des ausgefaulten Schlammes

Eine wichtige Größe für die Auswahl einer maschinellen Entwässerung des ausgefaulten Schlammes ist zunächst der in Abhängigkeit vom weiteren Entsorgungs- oder Verwertungsweg zu erzielende TR-Gehalt. Faulschlamm erreicht je nach Verfahren einen Entwässerungsgrad von bis zu **38 %** Trockenrückstand (TR). Nicht-Faulschlamm kann je nach Jahreszeit und Anteil an organischen Stoffen nur auf **18–25 % TR** entwässert werden [Müller et al., 2010]. Eine ungenügende Stabilisierung führt damit indirekt zu einem größeren Wassergehalt.

Die Auswahl geeigneter Entwässerungsaggregate (vgl. Kapitel 4.5.3) bzw. der Konditionierungsart sollte aufgrund der unterschiedlichen Schlammqualitäten auf der Basis von Versuchsergebnissen erfolgen. Hinweise dazu finden sich in [DWA, 2013e] und [DWA, 2008b]. Bei der Auslegung und dem Vergleich verschiedener Entwässerungsaggregate ist der Schlammumsatz im Dauerbetrieb und nicht die maximale Umsatzleistung zu berücksichtigen. Vorversuche dienen dem Ziel, eine definierte Entwässerungsleistung unter praxisnahen Bedingungen mit möglichst geringem Strom-, Wasser- und Flockungsmittelverbrauch zu erreichen. Üblicherweise machen aber die Energiekosten bei Verfahren mit Entwässerungsaggregaten nur einen Anteil von **2–5 %** der Betriebskosten aus und sind daher von untergeordneter Bedeutung. Eine Einsparung beim Stromverbrauch sollte demnach wohlüberlegt sein und darf keinesfalls zu Lasten des angestrebten TR-Gehalts bzw. der Betriebszuverlässigkeit führen. In erster Linie ist ein hoher Entwässerungsgrad anzustreben, da die Entwässerung spezifisch viel weniger Energie benötigt als die spätere Wasserverdampfung bei der Trocknung von Klärschlamm bzw. im Hinblick auf den Transport.

Zur Entwässerung von ausgefaultem Schlamm werden in der Regel Bandfilter-, Schneckenpressen, Dekantier-Zentrifugen und Kammerfilterpressen eingesetzt. Auf kleinen Kläranlagen wird häufig die Entwässerung von externen Entsorgern mit mobilen maschinellen Aggregaten durchgeführt [Haberkern et al., 2008]. Hierbei ist ein zusätzlicher Zwischenspeicher für das Prozesswasser zu berücksichtigen, da aufgrund hoher Umsatzmengen und des diskontinuierlichen Betriebs auf den Stickstoff-Abbau der Kläranlage Rücksicht genommen werden muss.

Effizienzmaßnahmen

Folgende Maßnahmen können eine energetische Optimierung bewirken. Die Beschreibung der Aggregate und Hinweise zu Effizienzmaßnahmen in der Anlagentechnik werden in Kapitel 4.5 gegeben.

- Die Eindick- und Entwässerungsleistung wird signifikant beeinflusst von einer guten Aufbereitung der Konditionierungsmittel, insbesondere von polymeren Flockungsmitteln, einer geeigneten Dosierstelle und ausreichender Einmischenergie. Zeichen für eine ungünstige Betriebsweise sind ein hoher Trockenrückstand im Trübwasser von Eindick- und Entwässerungsmaschinen und ein höherer spezifischer Verbrauch von Konditionierungsmitteln. Weitere Hinweise für eine ungünstige Betriebsweise sind hoher Stromverbrauch, hoher Wasserverbrauch, geringer Schlamm- und Feststoffumsatz sowie schlechter Feststoff-Abscheidegrad im Vergleich zum Regelbetrieb [DWA, 2013e].
- Ein übermäßiges Auskühlen des zu entwässernden Klärschlammes vor der maschinellen Entwässerung ist wegen der Erhöhung der Viskosität und deren negativer Auswirkung auf die Entwässerbarkeit zu vermeiden. Vorgesaltete Nacheindicker sollten daher evtl. abgedeckt werden. Dahingehend ist die Abwärmenutzung für die Erhaltung der Schlammtemperatur sinnvoll, nicht aber für eine erneute Schlammwärmerung bereits ausgekühlten Schlammes [Denkert, 2015].
- Eine Optimierung betrifft die Einstellung der Maschinenparameter und damit eine Verminderung von Stromverbrauch und Verschleiß. In Kapitel 4.5 werden entsprechende Maschinenparameter genannt.



3.5.4 Schlammstabilisierung

3.5.4 Schlammstabilisierung

3.5.4.1
Allgemeine
Hinweise

3.5.4.2
Anaerob-mesophile
Stabilisierung

3.5.4.3
Aerobe
Stabilisierung

3.5.4.4
Getrennte aerobe Schlamm-
stabilisierung & Faulgasverwertung

3.5.4.1 Allgemeine Hinweise

Bei der anaeroben Stabilisierung (Schlammfäulung) werden organische Verbindungen durch anaerobe Mikroorganismen abgebaut. Die Stabilisierung verfolgt das Ziel, den Rohschlamm bezüglich Geruch und Hygiene in einen stabilen Zustand zu bringen und dessen Behandlungseigenschaften, wie zum Beispiel die Entwässerbarkeit und die Transportfähigkeit, zu verbessern. Sie bewirkt eine Verringerung des organischen Anteils im Schlamm, was mit einer Erhöhung des mineralischen Anteils einhergeht. Dabei wird einerseits zwischen den Milieubedingungen – aerob (mit Unterstützung von Sauerstoff) und anaerob (unter Ausschluss von Sauerstoff) – so wie den Temperaturniveaus kalt (psychrophil) und warm (mesophil bzw. thermophil) unterschieden.

Anaerob-thermophile Stabilisierung



Die anaerob-thermophile Stabilisierung bei **50–55 °C** ist in Deutschland auf kommunalen Kläranlagen nur selten großtechnisch realisiert. Auf wenigen Anlagen wird dieses Verfahren als Vorversäuerungsstufe mit einer Verweilzeit von **2–5 d** mit einer mesophilen Fäulung kombiniert. Der Wärmebedarf ist in etwa doppelt so hoch wie bei der mesophilen Fäulung.



Anaerob-psychrophile Stabilisierung (kalte Fäulung)

Die Fäulung kann auch in einem Temperaturniveau **< 30 °C** erfolgen, sodass auf die Errichtung einer Wärmeerzeugungsanlage verzichtet werden kann. Ein wärmegeprägter Faulraum ist empfehlenswert. Die erreichbaren Abbaugrade liegen deutlich unter denjenigen der anaerob-mesophilen Stabilisierung. Die kalte Fäulung wird, wenn überhaupt, in Deutschland ausschließlich auf kleinen Kläranlagen vor allem in Form von Emscherbrunnen eingesetzt. Das entstehende Faulgas wird auf kleineren Kläranlagen mit kalter Fäulung selten gefasst und entweicht in die Atmosphäre. Somit ist die Ökobilanz, insbesondere wegen des entweichenden klimaschädlichen CH_4 (mehr als 20-mal so schädlich wie CO_2) sehr schlecht. Der Energiebedarf (Pumpen für Umwälzung, Erwärmung des Faulraums) ist hingegen für die kalte Schlammfäulung sehr klein (bei Betrieb eines Emscherbrunnens ist der elektrische Bedarf nahe null).

3.5.4.2 Anaerob-mesophile Stabilisierung



Die anaerob-mesophile Stabilisierung ist bezogen auf die Anschlussgröße das in Deutschland am häufigsten eingesetzte Verfahren zur getrennten anaeroben Schlammstabilisierung. Hierbei werden die organischen Stoffe bei einer Temperatur von **30 bis 40 °C** zu Methan und Kohlendioxid umgesetzt. Eine einstufige Fäulung wird üblicherweise für eine Aufenthaltszeit zwischen 15 und 25 Tagen bemessen, wobei der Höchstwert des gleitenden 2-Wochen-Mittels für den Schlamm-anfall zugrunde zu legen ist. Weitere Bemessungshinweise zu Sicherheitsfaktoren, Raum- und Schlammbelastungen sind dem Merkblatt DWA-M 368 [DWA, 2014d] zu entnehmen.



Bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe (5.000–50.000 Einwohnerwerte) kann die Umstellung auf eine anaerobe Stabilisierung (vgl. Kapitel 3.5.4.4) oder die semizentrale Schlammbehandlung im Verbund mehrerer Kläranlagen interessant sein [DWA, 2015f]. Bei der Mitbehandlung von Schlämmen benachbarter Kläranlagen sind die zusätzlichen Belastungen aus der Schlammbehandlung bei der Bemessung des Abwasserweges, u. a. Maßnahmen zur Stickstoffelimination (vgl. Kapitel 3.6), zu berücksichtigen. Neben den verfahrenstechnischen Aspekten sind die energetischen Randbedingungen zu beachten. Hier kommt es vor allem darauf an, das bei der Schlammfäulung produzierte Faulgas effizient und wirtschaftlich zu nutzen. Wenn der Eigenbedarf der Kläranlage gedeckt ist, muss für die überschüssige Energie (Gas oder Strom und Wärme) eine externe Nutzungsmöglichkeit (vgl. Kapitel 5.4.2.5) gegeben sein.



Der spezifische Energieverbrauch bei einer anaerob-mesophilen Stabilisierung variiert stark, weil der größte Anteil des Stromverbrauchs auf die von der Faulbehältergröße abhängige Umwälzenergie entfällt.

Zum Durchmischen (siehe auch Kapitel 4.4.2) werden überwiegend folgende Einrichtungen eingesetzt (Leistungsbedarf in W/m^3 FB-Volumen):

- außen liegende Umwälzpumpen (ca. **6 W/m^3** bis **10 W/m^3**),
- Faulschlammischer (z. B. Schraubenschaufler) (ca. **3 W/m^3** bis **6 W/m^3**),
- außen liegende Verdichter zur Faulgaseinpressung über Ringdüsen, Einhängelanzen oder Gasdruckheber (ca. **3 W/m^3** bis **10 W/m^3**),
- Rührwerke (ca. **3 W/m^3** bis **6 W/m^3**).

Die in der vorstehenden Aufzählung nach DWA-A 368 in Klammern angegebene Leistungsdichte allein ist kein hinreichendes Maß zum Vergleich von Durchmischungssystemen, da sie deren Effizienz (Schub), die Faulbehälterform sowie die Eigenschaften des Faulschlammes nicht berücksichtigt. Die Wahl des Durchmischungssystems hängt von der Form und Größe der Faulbehälter ab. Generelle Empfehlungen für oder gegen das eine oder andere System sind deshalb nicht möglich.

Tabelle 3-8 Energieverbrauch der anaerob-mesophilen Stabilisierung je m^3 Rohschlamm [Müller et al., 2010]

	Energieverbrauch je m^3 Rohschlamm	
	Strom $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{m}^3$	Wärme $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$
Faulung (anaerob-mesophile Stabilisierung)	1,6 – 2,3 <ul style="list-style-type: none"> ■ Pumpen zur Faulraumbeschickung ■ Heizschlammumpen zu Förderung des Schlammes über Wärmetauscher ■ evtl. Feststoffzerkleinerer und motorbetriebene Schwimdeckenzerstörer ■ Umwälzung des Faulraums durch Umwälzpumpe, Schraubenschaufler, Rührwerke, Faulgaseinpressung, Phasensystem mit Impulspumpe (Hochlastfaulung) 	24 – 30 <ul style="list-style-type: none"> ■ Rohschlammzufuhr (Schlammaufheizung) ■ Wärmeaustag durch Abzug des ausgefaulten Schlammes ■ Wärmeaustag durch Faulgasentnahme ■ Transmissionsverluste an den außen liegenden Leitungen des Umwälzsystems ■ Transmissionsverluste an der Oberfläche des Faulbehälters

Gesamter Wärmeverbrauch (Q_{thSB})

Der jährliche thermische Energieverbrauch für die gesamte Schlammbehandlung (Q_{thSB}) addiert sich aus dem Wärmeverbrauch für die Schlammaufheizung, den Transmissionsverlusten und den Erzeugungs-, Speicher- und Verteilverlusten.

Erzeugungs-, Speicher- und Verteilverluste (Q_{thV}) können mit **5 bis 10 %** des Wärmebedarfs für die Schlammaufheizung (Q_{thS}) und für Transmissionsverluste (\dot{Q}_T) abgeschätzt werden [Lindtner, 2008].

Wärmebedarf für die Schlammaufheizung (Q_{thS})

Für die anaerob-mesophile Schlammbehandlung muss der Schlamm auf Temperaturen von 30 bis 40 °C erwärmt werden. Der Energiebedarf ist von der voreingedickten Schlammmenge und der Temperaturdifferenz zwischen Faulraum- und Rohschlammtemperatur abhängig. Die Schlammaufheizung ist von der Luft- und Bodentemperatur unabhängig – letztere spielt nur bei der Deckung der Transmissionsverluste eine Rolle.



Der Wärmebedarf für die Schlamm aufheizung wird folgendermaßen berechnet:

Formel 3-1 Berechnung des Wärmebedarfs für die Schlamm aufheizung

$$Q_{\text{thS}} = m \cdot (T_{\text{FR}} - T_{\text{RS}}) \cdot \eta_{\text{th}} \cdot c_p$$

Q_{thS} Wärmebedarf (Nutzenergie) für die Schlamm aufheizung in kWh/a

m Rohschlammmenge in m^3/a

T_{FR} Faulraumtemperatur in K

T_{RS} Temperatur des Rohschlammes in K

c_p spezifische Wärmekapazität des Rohschlammes: $1,16 \text{ kWh}_{\text{th}}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

η_{th} thermischer Wirkungsgrad des Wärmetauschers

Da der Rohschlamm etwa zu 95 % aus Wasser besteht, kann für c_p in erster Näherung mit **$1,16 \text{ kWh}_{\text{th}}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$** , also der spezifischen Wärmekapazität von Wasser ($c_p = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 1,16 \text{ kWh}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$), gerechnet werden.

Wärmebedarf durch Transmissionsverluste (Q_T)

Die Deckung der Transmissionsverluste des Faulbehälters erfordert eine zusätzliche Wärmemenge, da die Prozesstemperatur im Jahresmittel ca. $20 \text{ }^\circ\text{C}$ über der Außentemperatur liegt (bei $15 \text{ }^\circ\text{C}$ Jahresmitteltemperatur des Abwassers/Rohschlammes und $35 \text{ }^\circ\text{C}$ Faulbehältertemperatur). Daher müssen mit einer guten Wärmedämmung der Faulräume die Transmissionsverluste entsprechend reduziert werden.

Die abfließende Wärmemenge (= Transmission) berechnet sich aus der Faulbehälteroberfläche, der Temperaturdifferenz zwischen Faulbehälter und Umgebung (Außenluft bzw. Boden) und dem Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Wände des Faulbehälters. Der U-Wert ist ein Maß für die Höhe des spezifischen Wärmedurchflusses durch eine Wand und ist abhängig vom Baumaterial. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird aus dem Wärmedurchlasswiderstand $R = 1/U$ berechnet (Werte vgl. zum Beispiel DIN 4108, EN ISO 6946 [DIN; 2008b] bzw. Firmenangaben). Übliche U-Werte schwanken zwischen **$0,3$** und **$1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$** [Lindtner, 2008].

Formel 3-2 Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten

$$U = \frac{1}{R_{\text{si}} + \sum \left(\frac{d_i}{\lambda_i} \right) + R_{\text{se}}}$$

U Wärmedurchgangskoeffizient in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

R_{si} Wärmedurchlasswiderstand innen in $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$

R_{se} Wärmedurchlasswiderstand außen in $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$

d_i Schichtdicke in m

λ_i Wärmeleitfähigkeit der Schicht in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$\lambda_{\text{i Beton}}$ 2,10 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$\lambda_{\text{i Polyurethan}}$ 0,035 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$\lambda_{\text{i Schaumglas}}$ 0,04 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

Tabelle 3-9 Wärmedurchlasswiderstand innen und außen aus EN ISO 6946 nach [DIN, 2008b]

Richtung des Wärmestroms	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
R_{si} [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	0,1	0,13	0,2
R_{se} [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]	0,04	0,04	0

Für jede unterschiedliche Baumaterialfläche und jedes Umgebungsmedium (Boden, Luft, angrenzende Bauwerke etc.) sind die Transmissionsverluste einzeln zu berechnen und die Verluste der Teilflächen zu summieren. Die Faulbehälterflächen von eiförmigen (Ellipsoid-)Behältern können mit Kegelstümpfen ausreichend genau angenähert werden. Wo Näherungswerte genügen, können Teilflächen mit ähnlichen Parametern zusammengefasst und mit Mittelwerten die Wärmedurchgangsverluste berechnet werden.

Die Norm EN ISO 6946 „Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren“ beschreibt die Verfahren zur Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten von baulichen Konstruktionen.

Die maximale Wärmeleistung der Transmissionsverluste (Leistung in W) wird für die Außentemperatur im Auslegungsfall folgendermaßen berechnet:

Formel 3-3 Berechnung der Transmissionsverluste

$$\dot{Q}_T = A \cdot (t_{FR} - t_{UT}) \cdot U$$

\dot{Q}_T Transmissionsverluste in W (Leistung) auf Nutzenergiestufe

A Faulbehälteroberfläche in m²

ΔT Temperaturdifferenz in K

t_{FR} Faulraumtemperatur in K

t_{UT} Umgebungstemperatur in K

U Wärmedurchgangskoeffizient des Faulraums in W/(m²K) (früher k-Wert)

Eine durchaus praxistaugliche und betrieblich einfach durchzuführende Methode ist die experimentelle Bestimmung durch eine zeitweilige wärmetechnische Abkopplung des Faulbehälters von der Schlamm- und Wärmezufuhr [DWA, 2015a]. Dadurch können die Transmissionsverluste unter Betriebsbedingungen bestimmt werden. In Kapitel 2.3.4.3.2 „Messkonzepte für thermische Energie“ werden weitere Hinweise hierzu gegeben. Eine qualitative Methode ist die Aufnahme eines Wärmebildes, um problematische Schwachstellen zu identifizieren.



Effizienzmaßnahmen Schlammaufheizung

Die Schlammaufheizung kann durch die Optimierung der Verfahrenstechnik (zum Beispiel vorangehende Reduktion der Schlammmenge durch bessere Voreindickung) reduziert werden. Jedoch muss hierbei auf die Pumpfähigkeit und die Umwälzfähigkeit des Gemisches geachtet werden.

Zur Schlammwärmung werden üblicherweise Wasser-Schlamm-Doppelrohrwärmetauscher verwendet. Die Reinigung der Wärmetauscher wird in der Regel alle ein bis zwei Jahre durchgeführt, dabei vereinfacht eine Platzierung der Wärmetauscher mit guter Erreichbarkeit die Tätigkeit.

Generell sollte Schlamm in Wärmetauschern turbulent strömen, um Beläge zu vermeiden. Auch das Wasser sollte turbulent strömen, um einen guten Wärmeübergang zu erreichen [DWA, 2014d]. Vorteilhaft wirkt sich auch eine reichlich bemessene Wärmeübertragungsfläche aus. So kann ggf. auch mit niedrigeren Temperaturen (50–60 °C) auf der Heizwasserseite gearbeitet werden. Geringere Heizwassertemperaturen haben den Vorteil, dass die Wärmeverluste geringer sind und eine größere Anzahl potenzieller Abwärmequellen nutzbar gemacht wird.

Die Anhebung der Rücklaufemperatur mittels eines Vierwegemischers kann zu einer falschen Einschaltung der Notkühler im Heizkreis und zu einem unnötigen Wärmeverlust führen. Ein Dreiwegemischer eignet sich hierfür besser. Insbesondere in den Sommermonaten (siehe Bild 3-17) kann es zu hohen Wärmeüberschüssen kommen, die vorwiegend über elektrisch betriebene Notkühler abgeleitet werden.

Stattdessen kann in den Sommermonaten die Wärme anteilig für eine schrittweise Temperaturerhöhung im Faulbehälter auf ≥ 40 °C genutzt bzw. gespeichert werden. Bei ausgelasteten Faulbehältern (Aufenthaltszeit rd. 15 d) und einer nicht entsprechend groß dimensionierten Prozesswasserbehandlung besteht jedoch die Gefahr einer deutlichen Erhöhung der Rückbelastung durch Trübwasser. Die Faulbehältertemperatur sollte nicht schneller als um **1–2 °C** pro Woche erhöht werden, da Methanbakterien auf kurzfristige Änderungen der Temperatur empfindlich reagieren [DWA, 2014d].



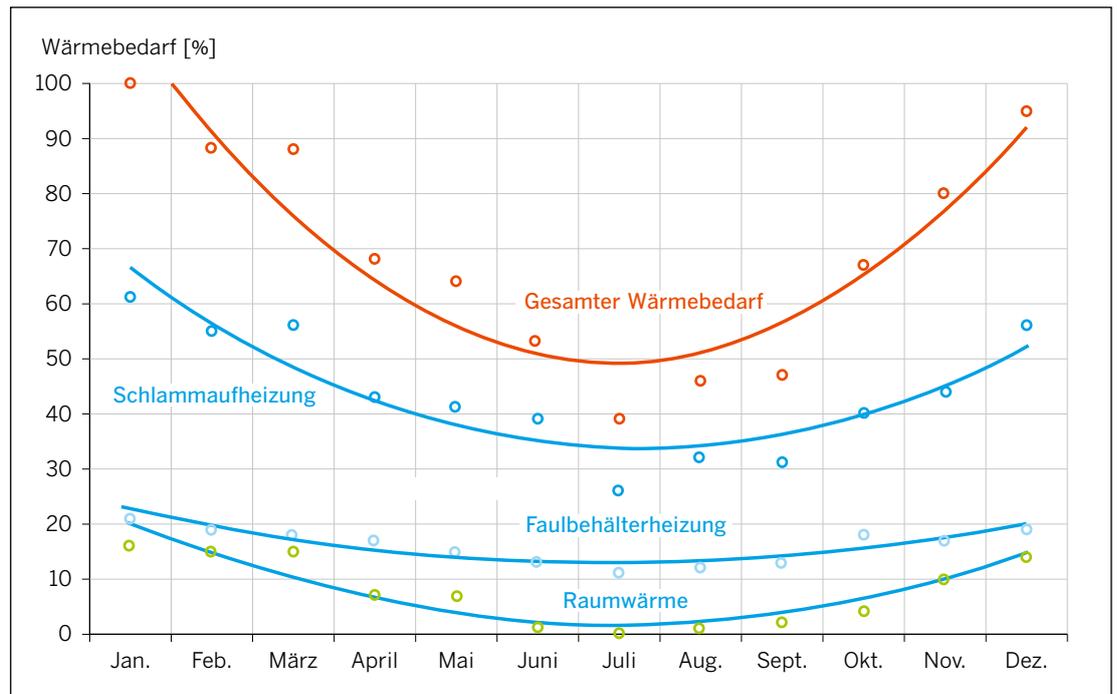


Bild 3-17 Wärmebedarfsanteile (Nutzenergie) im Jahresverlauf für Schlamm-aufheizung, Faulbehälterheizung und die Raumwärme (einzeln) und die Summe der drei Verbraucher am Beispiel einer Kläranlage mit anaerob-mesophiler Stabilisierung

Aus energetischen Gründen (z. B. Reduzierung der Betriebsstunden einer Heizkesselanlage) ist die Überprüfung der Abwärmenutzung für die Schlamm-aufheizung und Aufrechterhaltung der Faulbehältertemperatur aus den folgenden Prozessen sinnvoll:

- Abwärme Verdichter (siehe Kapitel 5.4.7)
- Warme Abluft von Betriebsräumen (Antriebe Hebewerke, Kompressorenräume, IT-Technik etc.) in zu temperierende Räume leiten (siehe Kapitel 5.4.10)
- Wärme aus Faulschlamm (siehe Kapitel 5.4.11)

248
249
250



Effizienzmaßnahmen Transmission

Transmissionsverluste werden durch konsequente Dämmung reduziert, insbesondere durch Dämmmaterialien mit besseren U-Werten. Beim Dämmen der prozesstechnischen Anlagen ist Folgendes zu beachten:

- Alle Teile inklusive Behälter, Rohrleitungen, exponierte Armaturen und Anschlüsse dämmen.
- Vermeidung von Wärmebrücken, zum Beispiel durch das versetzte Anbringen der Dämmschalen. Wärmebrücken können durch den Einsatz einer Wärmebildkamera sichtbar gemacht werden.
- Die Faulbehälterverkleidung kann zu einer erhöhten Reflexion wie auch einer erhöhten Absorption von Sonneneinstrahlung führen und sollte daher entsprechend berücksichtigt werden. Die Materialwahl hat weiterhin Einfluss auf wärmetechnische Untersuchungen (Wärmebildkamera in Abhängigkeit von der Reflexion).

Entscheidend sind auch die Untergrundbedingungen am Standort der Faulbehälter. Stehen die Faulbehälter direkt in einem fließenden Aquifer, wird die Transmission von Wärme verstärkt, bei ruhenden Grundwasserleitern wiederum wirken diese wie ein Wärmespeicher.



Effizienzmaßnahmen Elektrizität für die Schlammstabilisierung

Hauptsächlich wird elektrische Energie für die Umwälzung des Faulraums benötigt [Baumann et al., 2014]. Bei der Ermittlung des Stromverbrauchs ist der Heizschlammkreislauf für die Durchmischung des Faulraums mit anzusetzen.

Der auf das umgewälzte Volumen bezogene erforderliche spezifische Leistungseintrag (Kapitel 4.4.2) nimmt mit kleiner werdendem Faulbehältervolumen und mit höherem Feststoffgehalt des Schlammes zu. Der Leistungseintrag allein ist allerdings kein hinreichendes Maß zum Vergleich von Durchmischungssystemen, da er deren Effizienz nicht einbezieht. Ein Anstieg der organischen Säuren, des Glühverlustes im Faulschlamm sowie des CO_2 -Anteils im Faulgas und ein Rückgang des Gasanfalls können Anzeichen für eine nicht effiziente Durchmischung sein. Bei der Durchmischung darf die Minimierung der Umwälzleistung nicht dem Selbstzweck dienen und muss immer im Zusammenhang mit dem Stabilisierungsergebnis und der Betriebssicherheit gesehen werden.

Bei TR-Gehalten größer **6 bis 8 %** im Rohschlamm kann eine schonende Volldurchmischung und eine gleichmäßige Temperaturverteilung oft nicht gewährleistet werden. Hierauf ist bei der Betriebsweise insbesondere einer maschinellen Voreindickung zu achten.

Falls in der mechanischen Stufe oder im Rücklaufschlamm Feinrechen eingesetzt werden, können mögliche Verstopfungen verhindert werden und es ist zu prüfen, ob ein Feststoffzerkleinerer im Umwälzkreislauf entfallen kann. Motorbetriebene Schwimmdeckenzerstörer (zum Beispiel Glockenschrauben) können ebenfalls diskontinuierlich betrieben werden. Empfohlene Einschaltzeiten sind **10–15 min/h**.

Im Bereich der Wärmetauscher kann es infolge von Inkrustierungen und Anbackungen in den Schlammleitungen zu Druckverlusten kommen. Die Stromaufnahme der Pumpen steigt an bzw. der Durchfluss geht zurück. Hier sollte darauf geachtet werden, dass die Vorlauftemperaturen nicht zu hoch ($< 70 \text{ }^\circ\text{C}$) und die Fließgeschwindigkeiten im Wärmetauscher ausreichend sind. Eine regelmäßige Entkalkung der Heizwasserleitungen reduziert die Betriebszeiten für Brenner und Umwälzpumpen und damit deren Energiebedarf in der Heizanlage.

3.5.4.3 Aerobe Stabilisierung

Bei der simultanen aeroben Schlammstabilisierung erfolgt die Stabilisierung der im Belebtschlamm enthaltenen Biomasse gemeinsam mit der biologischen Abwasserreinigung. Es herrschen aerob-psychrophile Bedingungen. In der Regel werden die Anlagen ohne Vorklärung betrieben, da diese Schlammfraktion nicht vor Ort stabilisiert werden kann. Der Sauerstoffbedarf und damit der Energiebedarf der biologischen Stufe liegt im Vergleich zu einer vom Belebungsbecken getrennten anaeroben Stabilisierung deutlich höher.

Es resultiert ein aerob stabilisierter Schlamm, der aus der Nachklärung abgezogen und zumeist in Stapelbehältern eingedickt wird (Bild 3-15). Es gelten die Anmerkungen und Effizienzmaßnahmen, wie sie in Kapitel 3.5.3 „Schlammeindickung, -entwässerung und -konditionierung“ beschrieben wurden.

Das Verfahren der getrennten aeroben Schlammstabilisierung wird selten eingesetzt.

Überwiegend wird die aerobe Schlammstabilisierung auf Kläranlagen $< 20.000 \text{ E}$ angewandt.

Unter Berücksichtigung individueller örtlicher Gegebenheiten und günstiger wirtschaftlicher Rahmenbedingungen ist eine Umstellung auf anaerobe Stabilisierung auch bei kleineren Kläranlagen sinnvoll [Schmitt et al., 2014] [DWA, 2014d].

3.5.4.4 Getrennte anaerobe Schlammstabilisierung und Faulgasverwertung auf kleinen und mittleren Anlagen

Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe (5.000 bis 50.000 E) wurden in den letzten Jahrzehnten des vorigen Jahrhunderts oft als Belebungsanlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung errichtet oder ausgebaut. Diese Anlagen stehen jetzt insbesondere hinsichtlich der Maschinen und EMSR-Technik vor größeren Re-Investitionen. Dabei lässt sich eine verfahrenstechnische Umstellung auf die getrennte anaerobe Schlammstabilisierung (Faulung) wegen gestiegener Energie- und Klärschlammkosten selbst bei diesen Kläranlagen heute oftmals wirtschaftlich umsetzen, wenn in der Planung an diese Baugrößen angepasste Lösungen berücksichtigt werden. So bieten spezielle Faulbehälterformen und -umwälzeinrichtungen sowie Faulgasspeicher und die



innovative Faulgasverwertung technisch-wirtschaftlich effiziente Ansätze. Zudem kann durch diese Umstellung der Wasserweg einer Kläranlage in seiner Leistung gesteigert oder durch Umnutzung von Beckenvolumina der biologischen Stufe an einen möglichen Belastungsrückgang (Stichwort „Demografischer Wandel“) angepasst werden. Einen zusätzlichen, wenn auch nur begrenzt monetär bewertbaren Vorteil bietet die damit verbundene deutliche Verringerung der Treibhausgasemissionen. Viele wichtige Hinweise gibt weiterhin der DWA-Themenband „Schlammfäulung oder gemeinsame aerobe Stabilisierung bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe“ [DWA, 2015 f].

Durch die zunehmenden Preissteigerungen beim Energiebezug und der Schlamm Entsorgung hat sich der mögliche Einsatzbereich der getrennten anaeroben Schlammstabilisierung im Vergleich zu früher daher deutlich nach unten verschoben. Er wird in Bild 3-18 dargestellt.

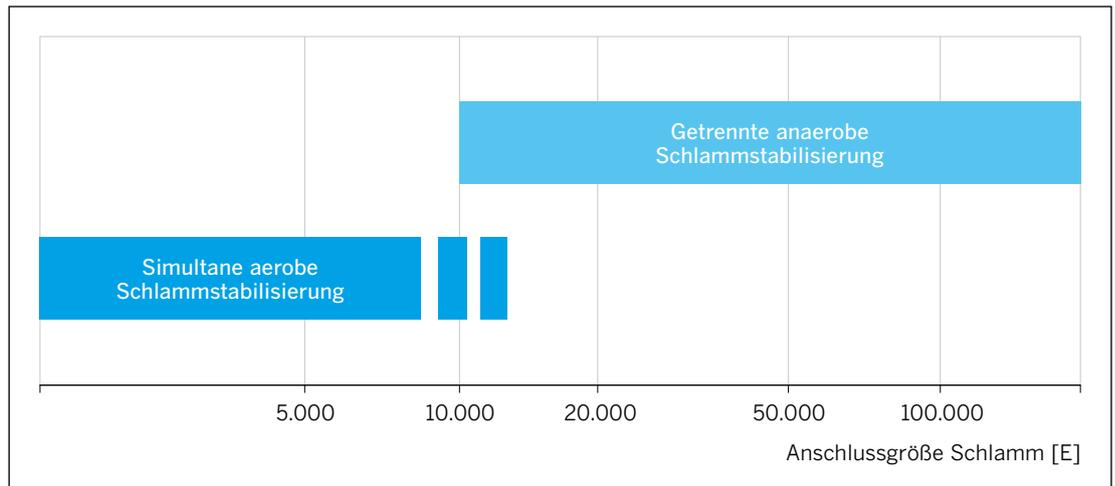


Bild 3-18 Empfohlene Einsatzbereiche der simultanen aeroben und getrennten anaeroben Schlammstabilisierung nach [Schröder, 2011]

Beweggründe für einen Systemwechsel können sein:

- Erweiterung oder Neubau einer Kläranlage,
- Sanierung oder Modernisierung einer bestehenden Kläranlage in Verbindung mit einer Energieoptimierung,
- Gemeinsame Behandlung des Schlammes mehrerer Kläranlagen auf einer Kläranlage.

Unabhängig von dieser grundsätzlichen Einschätzung muss aber in jedem Einzelfall und auf Basis fundierter Untersuchungen entschieden werden, ob der Bau einer Faulungsanlage mit Faulgasverwertung sinnvoll ist. Dabei sind wesentliche Einflussgrößen zu untersuchen:

- Verhältnis von organischer (oTR) zu mineralischer (mTR) Masse im Rohschlamm,
- spezifischer Gasertrag bezogen auf den oTR im Zulauf der Faulbehälter.

Es gilt grundsätzlich, dass für Faulbehälter und Anlagen zur Gasverwertung auf kleinen und mittleren Kläranlagen alternative technologische Möglichkeiten bestehen, aber auch die klassischen Möglichkeiten eingesetzt werden können.

Insbesondere bei sehr kleinen Anlagen können die Faulbehälter statt aus Beton auch als Stahlbehälter in Leichtbauweise ausgeführt werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Wahl der Umwälzeinrichtung zu legen. Die eingesetzten Rührwerke sollten keine innen liegenden unteren Lager haben, sondern frei aufgehängt sein, da ansonsten bei eventuellem Versagen, Wartung oder Erneuerung des Lagers der gesamte Faulbehälter entleert werden müsste. Zudem ist die Lebensdauer solcher Stahlbehälter auf nur ca. 20 Jahre konzipiert. Die Frage, ob eine einstufige oder zweistufige Schlammfäulungsanlage wirtschaftlich ist, ist individuell zu prüfen. Die Investitionskosten sind bei zweistufigen Anlagen in der Regel höher, bieten jedoch betriebliche Vorteile (energetische Effizienz und Außerbetriebnahme eines Faulbehälters). Zur Faulgasspeicherung müssen zusätzliche Gasspeicher und als Noteinrichtungen Gasfackeln gebaut werden.

Die Umrüstung einer Belebungsanlage mit simultaner aerober auf eine getrennte anaerobe Schlammstabilisierung kann nur dann (wirtschaftlich) erfolgreich sein, wenn neben dem Schlammweg auch der Wasserweg angepasst wird. In der Regel ist der Bau einer Vorklärung (Grobschlammung) sinnvoll bzw. notwendig, da der abgetrennte Primärschlamm einen hohen organischen Anteil und damit ein hohes Energiepotenzial hat. Auch lässt er sich viel besser und ohne die Zugabe von Konditionierungsmitteln eindicken. Je nach baulichen Gegebenheiten können dazu aber vorhandene Becken vollständig oder teilweise genutzt bzw. umgestaltet werden. Des Weiteren müssen die Belegung des Belebungsbeckens mit Belüftern, die Gebläseauslegung sowie die Regelung der Belüftung an die veränderten Bedingungen angepasst werden. Ebenfalls ist der Prozesswasseranfall aus der Schlammbehandlung zu beachten, insbesondere wenn die Entwässerung des ausgefaulten Schlammes diskontinuierlich zum Beispiel durch Leihmaschinen erfolgt. Hier ist evtl. ein Prozesswasserspeicher vorzusehen oder sogar eine Prozesswasserbehandlung.



3.5.5 Schlamm-trocknung

3.5.5 Schlamm-trocknung

3.5.5.1
Hochtemperatur- & Mitteltemperatur-trocknung

3.5.5.2
Niedertemperatur-trocknung

Die thermische Trocknung von Klärschlamm hat die Aufgabe, den Heizwert durch die Verdampfung von maschinell nicht weiter abtrennbarem Wasser so weit zu erhöhen, dass eine Verbrennung gewährleistet werden kann. Allgemein ist dies ab einem Heizwert von **3,5 MJ/kg** erreichbar [ATV-DVWK, 2004].

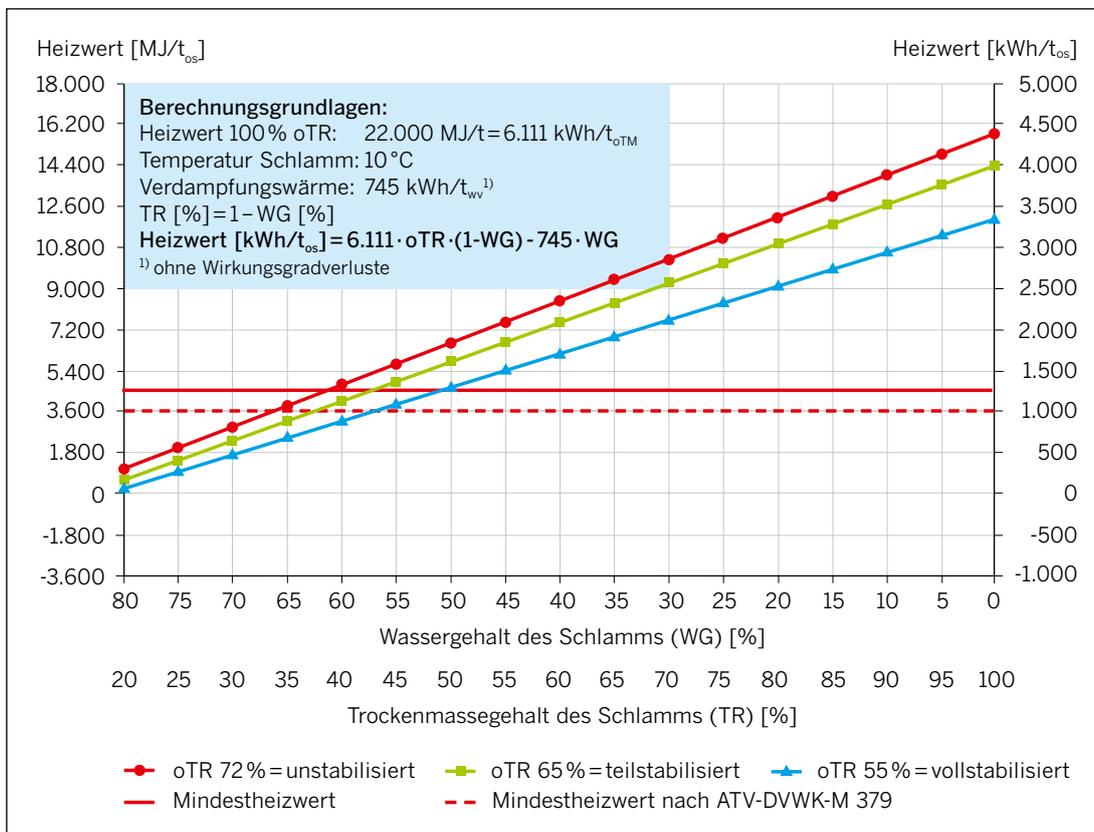


Bild 3-19 Heizwert von Klärschlamm je Tonne (t) Originalsubstanz (OS) in Abhängigkeit vom Wassergehalt und vom Stabilisierungsgrad



Die selbstgängige (autotherme) Verbrennung von Klärschlamm wird nach [Friedrich et al., 2013] ab Heizwerten von ca. **3.5 MJ/kg** bis **4.5 MJ/kg** praktiziert. Dieser Heizwert ist mit herkömmlichen Mitteln zur Klärschlammmentwässerung nicht zu erreichen, sodass eine Klärschlamm-trocknung erforderlich ist. Der Heizwert ausgefallter Klärschlämme bezogen auf die Originalsubstanz (OS) [DWA, 2011d] [DWA, 2012b] kann wie folgt unterschieden werden:



- mechanisch entwässerte Schlämme mit einem Trockenrückstand (TR) von ca. **20 %** bis **35 %** und einem Heizwert von ca. **1 MJ/kg** bis **3,5 MJ/kg OS**,
- teilgetrocknete Schlämme mit einem Trockenrückstand von ca. **40 %** bis **85 %** und einem Heizwert von etwa 4 MJ/kg bis 7 MJ/kg OS sowie
- vollgetrocknete Schlämme mit einem Trockenrückstand **> 85 %** und einem Heizwert bis zu **12 MJ/kg OS**.

Dabei hängt der Heizwert auch vom Stabilisierungsgrad des Klärschlammes ab, da im Verlauf der Schlammstabilisierung, sowohl aerob als auch anaerob, der organische Anteil (Glühverlust) im Klärschlamm reduziert wird. In Bild 3-19 sind Wassergehalt (WG), Trockenrückstand (TR) in Prozent (%) einer Tonne Originalsubstanz des Schlammes (tOS) zur Trocknung/Verbrennung und der organische Trockenrückstand (oTR) in % des Trockenrückstandes angegeben. In der Heizwertbestimmung wird der Heizwert der im Schlamm enthaltenen organischen Masse um die Heizenergie für Aufheizung und Verdampfung des enthaltenen Wassers gemindert.



Je nach erreichtem Feststoffgehalt ist die sogenannte „Leimphase“ zwischen **40 %** bis **50 % TR** von Bedeutung. In dieser Phase ändert der Klärschlamm seine rheologischen Eigenschaften, es stellt sich eine „klebrige Masse“ ein, die zu förder-technischen Problemen führen kann. Zur Vermeidung dieser Probleme wird i. d. R. vor Eintritt in den Trockner bereits vollgetrocknetes Gut zurückgeführt. Das Rückführverhältnis schwankt von 4–7-fach, d. h. die 5–8-fache Menge des eigentlichen Feststoffdurchsatzes muss durch den Trockner geschleust werden.

In einer gesamtheitlichen Lösung der Klärschlamm-entsorgung ist genau zu prüfen, ob oder inwieweit eine Schlamm-trocknung notwendig und sinnvoll ist.



Im Kapitel 5.4.2 Integrale Wärmekonzepte ist in einem Beispiel dargestellt, dass eine Schlamm-trocknung ohne Wärmenutzung aus einer Schlamm-verbrennung einen sehr hohen Energiebedarf verursacht.



Zur Verbesserung der Energiebilanz einer Trocknung sollte vorab die Einbindung folgender Wärmequellen nach Priorität geprüft werden (siehe hierzu Kapitel 5.4.1):

- Abwärmennutzung aus höherem Temperaturniveau (Kraftwerke, sonstige Industrieabwärme, Abgasabwärme BHKW etc.),
- Strahlungsenergie (solare Trocknung),
- Abwärmennutzung aus tiefem Temperaturniveau mit Hilfe von Wärmepumpen (Abwasserabwärme, Umgebungswärme, etc.) bzw. mittlerem Temperaturniveau 60–95 °C (Kühlwasser BHKW, Gebläseluft, etc.),
- Regenerative Energie (Holzhackschnitzel/Pellets, Solarthermie, Geothermie).

Der Einsatz fossiler Brennstoffe (Erdgas, Erdöl) sollte im Sinne der Nachhaltigkeit vermieden werden. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht sind Trocknungsverfahren vorzuziehen, die preiswerte Abwärme oder regenerative Energiequellen wie Sonnenenergie nutzen. Es sollte geprüft werden, ob anfallende Mittel- und Niedertemperaturabwärme in näherer Umgebung der Kläranlage verwertet werden kann.

Generell ist die Standortfrage für eine Trocknung mit verfügbaren Wärmequellen verbunden. Aus dieser Sicht ist die Anordnung einer Trocknung zum Beispiel bei einer zentralen Monoverbrennung sinnvoll, dies führt aber wegen der großen Mengen des nur entwässerten Schlammes zu höherem Verbrauch von Transportenergie. Eine regionale gemeinsame Trocknung von Klärschlämmen aus verschiedenen Anlagen muss in diesem Zusammenhang ebenfalls ein Szenario sein.

Die Klärschlamm-trocknungsverfahren können nach der Art der Wärmeübertragung unterschieden werden in:

- Konvektionstrocknung oder Direkttrocknung: Die zur Trocknung notwendige thermische Energie wird hauptsächlich durch den direkten Kontakt mit Heißgas oder (erwärmter) Luft zugeführt (z. B. Band-, Trommeltrockner),
- Kontaktstrocknung oder Indirektstrocknung: Die zur Trocknung notwendige thermische Energie wird hauptsächlich durch den Kontakt mit Heizflächen zugeführt. Der Wärmeübergang erfolgt somit indirekt (z. B. Scheiben-, Dünnschichttrockner),
- Strahlungstrocknung: Die zur Trocknung notwendige thermische Energie wird durch elektromagnetische Strahlen bzw. Infrarotstrahlen zugeführt (z. B. solare Trocknung).

Eine Kombination aus Kontakt- und Konvektionstrocknung ist der sogenannte Wirbelschichttrockner. Weiterhin wird je nach Trocknungstemperatur in Hoch-, Mittel- und Niedertemperaturtrocknung unterschieden.

Bei bestimmten Trocknern und in nachgeschalteten Anlagenteilen verursachen Klärschlämme in der Leimphase erhebliche fördertechnische Probleme. Nicht alle Trockner/Trocknungsverfahren sind dazu geeignet, diesen Bereich sicher zu durchfahren. Zur Teiltrocknung werden daher fast ausschließlich Anlagen nach dem Prinzip der Kontaktstrocknung eingesetzt [DWA, 2011d]. In der Regel wird aber der entwässerte Schlamm vor dem Trockner mit einem Teilstrom des Trockenguts (Rückführverhältnis 4 bis 7fach) vermischt, um die Leimphase zu überwinden.

Neben den Entscheidungskriterien der Geruchsentwicklung und Anlagensicherheit sind für die Wahl eines Trocknungsverfahrens folgende Faktoren von Bedeutung:

- der notwendige Trockenrückstand,
- die erforderliche Korngröße des Produkts,
- der Stromverbrauch,
- die wärmetechnische Einbindung der Trocknungsanlage an einem Kläranlagenstandort.

Verfahrenstechnische Kennwerte

Der größte Teil der eingesetzten Energie wird bei der Schlamm-trocknung zur Wasserverdampfung eingesetzt. Der Wasserdampf wird in die Brüden überführt und kann als Kondensationswärme zurückgewonnen werden kann. Nach den physikalischen Gesetzen der Thermodynamik braucht jede Trocknung unabhängig vom Verfahren

- die spezifische Verdampfungswärme für Wasser bei 100 °C und 1.013 mbar von **2.261 MJ/t (627 kWh/t)**,
- den spezifischen Wärmebedarf zum Aufheizen des Wassers von **4,19 MJ/(t·K) (1,16 kWh/(t·K))** und
- den spezifischen Wärmebedarf zum Aufheizen des Trockenrückstands von ca. **1,05 MJ/(t·K) (0,35 kWh/(t·K))**.

Der theoretische Energiebedarf für die Verdampfung von einer Tonne Wasser beträgt bei Normaldruck **627 kWh**. Hinzu kommt für die Aufheizung des Wassers von rund 10 °C auf 100 °C eine Wärmemenge von 104 kWh und für das Aufheizen des Trockenrückstands von 14 kWh [ATV-DVWK, 2004]. Direkte Transmissionsverluste und Verluste durch den Wirkungsgrad der Wärmeübertragung bzw. des Wärmeerzeugers verursachen unter einer Annahme von ca. **10 – 20 %** einen Brutto-Wärmebedarf von etwa **820 bis 890 kWh/t_{WV}** (t_{WV} = Tonne Wasserverdampfung). Überschlüssig werden für das Trocknen von einer Tonne Schlamm von **30 % TR** auf **90 % TR** rund **540 – 590 kWh** benötigt.

Die nachstehende Tabelle 3-10 und Tabelle 3-11 zeigen auf Grundlage einer Modellkläranlage [Müller et al., 2010] Leistungs- und mittlere Verbrauchsdaten verschiedener Hoch-, Mittel- und Niedertemperaturtrocknungsverfahren.





Tabelle 3-10: Leistungs- und mittlere Verbrauchsdaten verschiedener Hochtemperaturtrocknungsverfahren [Müller et al., 2010]

		Hochtemperaturtrocknung anhand Modellanlage			
		Wirbelschicht-trocknung	Trommel-trocknung	Scheiben-trocknung	Dünnschicht-verdampfung mit Bandtrocknung
Grunddaten					
Wasserverdampfung (WV)	kg _{WV} /h	> 1.500	> 1.500	> 1.500	< 3.000
Eingangs-TR	% TR	25 – 33	25 – 33	25 – 32	25 – 32
Elektrische Energie pro t Wasserverdampfung					
Energiebedarf elektrisch	kWh/t _{WV}	64 – 93	85	64	128 – 156
Thermische Energie pro t Wasserverdampfung					
Endenergiebedarf thermisch	kWh/t _{WV}	820 – 880	800 – 865	876	790 – 850
Energiebedarf pro t entwässerter Schlamm (Mittelwerte)					
Elektrischer Energiebedarf	kWh/t _{OS}	52	57	43	95
Thermischer Energiebedarf	kWh/t _{OS}	567	555	584	546
Energiebedarf pro t Trockensubstanz (Mittelwerte)					
Elektrischer Energiebedarf	kWh/t _{TS}	174	189	142	316
Thermischer Energiebedarf	kWh/t _{TS}	1.889	1.850	1.947	1.818



Tabelle 3-11 Leistungs- und mittlere Verbrauchsdaten verschiedener Mittel- und Niedertemperaturtrocknungsverfahren [Müller et al., 2010]

		Mittel- und Niedertemperaturtrockner anhand Modellanlage			
		Mittel-temperatur-Bandtrockner	Niedertemperatur-Umlufttrockner	Niedertemperatur-Umlufttrockner mit Abwärmenutzung aus Abwasser mit Wärmepumpen	Solare Trocknung
Grunddaten					
Wasserverdampfung (WV)	kg _{WV} /h	< 1.500	< 1.500	< 1.500	< 1.500
Eingangs-TR	% TR	25 – 30	25 – 30	25 – 30	3 – 30
Elektrische Energie pro t Wasserverdampfung					
Energiebedarf elektrisch	kWh/t _{WV}	129	95 – 100	215 – 295	10 – 30
Thermische Energie pro t Wasserverdampfung					
Endenergiebedarf thermisch	kWh/t _{WV}	863	843 – 1.000	0	0
Energiebedarf pro t entwässerter Schlamm (Mittelwerte)					
Elektrischer Energiebedarf	kWh/t _{OS}	86	65	170	13
Thermischer Energiebedarf	kWh/t _{OS}	575	614	0	0
Energiebedarf pro t Trockensubstanz (Mittelwerte)					
Elektrischer Energiebedarf	kWh/t _{TS}	287	217	567	44
Thermischer Energiebedarf	kWh/t _{TS}	1.918	2.048	0	0

3.5.5.1 Hochtemperatur- und Mitteltemperaturtrocknung

Zu den Verfahren der Hochtemperaturtrocknung zählen Wirbelschichttrocknung, Trommel-trocknung, Scheibentrocknung und Dünnschichtverdampfung mit anschließender Bandtrocknung. Strom wird hauptsächlich für die Antriebsaggregate sowie für den Klärschlammtransport und die Rauchgasbehandlung benötigt. Die Wärmeträger sind i. d. R. Heißdampf, Thermoöl und heiße Brennerluft. Je nach Anlage stehen zwischen **20–90 %** der eingesetzten thermischen Energie als Abwärme für die interne Wärmenutzung rekuperativ zur Verfügung.



Von den o.g. Verfahren hat die Dünnschichtverdampfung mit nachgeschaltetem Bandtrockner eine gute thermische Bilanz (vgl. Tabelle 3-11). Hierbei handelt es sich um ein zweistufiges Verfahren, wobei die Verdampfungsenthalpie für den nachgeschalteten Bandtrockner wiederverwertet wird. Als Endprodukt resultiert ein gleichmäßiges Granulat oder kurze Stäbchen.

Bei einem Mitteltemperatur-Bandtrockner wird der Nassschlamm ohne Vortrocknung bei einer Zulufttemperatur von 80–115 °C getrocknet. Dazu wird ein nutzbares Abwärmemeterniveau von 150–200 °C benötigt. Bei den Kontaktrocknern (zum Beispiel Scheibentrockner) kommt der Schlamm mit heißen Flächen in Berührung, wodurch Anbackungen die Wärmeübertragung stören können. Regelmäßiges Reinigen verbessert die Betriebssicherheit.

3.5.5.2 Niedertemperaturtrocknung

Zu den Verfahren zählen die Niedertemperatur-/Umlufttrocknung und die solare Trocknung. Strom wird für die Luftzirkulation benötigt und zusätzliche Energie für die Umwälz- bzw. Wendeaggregate bei einer Solartrocknung. Ein wesentlicher energetischer Aspekt ist, dass der Wärmebedarf mit kläranlagenseitiger Abwärme (Temperaturniveau >10 °C) gedeckt werden kann. Dennoch muss häufig weitere Wärme z. B. durch einen Erdgasheizkessel bereitgestellt werden. Bei der Einbindung in ein vorhandenes Wärmesystem ist das erforderliche bzw. verfügbare Temperaturniveau (vgl. Kapitel 5.4.2.1) ein zentrales Entscheidungskriterium.



Der Niedertemperatur-/Umlufttrockner ist ein Bandtrockner, der mit einem Umluftkreislauf und ohne Schlammrückmischung betrieben wird. Dabei bildet sich nur gering belastetes Kondensat (Brüden) für die Rückführung in die Kläranlage aufgrund eines geringen Temperaturunterschieds zwischen Umgebungsluft und Prozessluft. Weitere Vorteile der niedrigen Temperatur sind, dass das Granulat vor einer Anlieferung, beispielsweise in ein Zementwerk, nicht gekühlt werden muss und aufgrund der geringen Temperaturen der Verschleiß des Trockners generell gering ist. Daraus resultiert eine hohe Betriebssicherheit. Dies kann einen 24-h-Betrieb über das Wochenende ohne Personaleinsatz ermöglichen. Auch das Abstellen und Anfahren der Anlage ist jederzeit möglich, da bei Stillstand das Trockengut nicht brandgefährdet ist und damit nicht heruntergekühlt werden muss [Schmid und Müller, 2010].

Bei der solaren Trocknung sind die Trocknungsleistung und auch der Flächenbedarf sehr stark von den Witterungsbedingungen (Sonnenstundendauer, Sonnenstrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit) abhängig. In NRW stellt diese Trocknungsart, bedingt durch die klimatischen Verhältnisse, oftmals keine Option dar, wenn keine unterstützende Wärme aus anderen Quellen zugeführt wird („solar unterstützte Schlamm-trocknung“). Aus der unterschiedlichen Bewirtschaftung der Anlage und den saisonal abhängigen klimatischen Bedingungen resultiert eine entsprechend stark schwankende Trocknungsdauer. Diese variiert zwischen 2 und 7 Wochen [Gödecke, o. J.]. Die Leistung kann aber durch zusätzliche Wärmezufuhr, beispielsweise durch die Zuführung warmer Luft in Bodennähe oder einen Infrarotstrahler, verbessert werden. Weiterhin begünstigt eine mehrfache systematische Umschichtung des Klärschlammes den Trocknungsprozess deutlich. Bei reiner solarer Betriebsweise ohne Abwärmenutzung werden Verdunstungsraten pro Quadratmeter Anlagenfläche von **0,7 t** bis maximal **1,0 t** Wasserverdampfungsleistung pro Jahr (abhängig von Eingangs-TR und Austrags-TR) erzielt. Elektrische Energie wird für die Luftzirkulation und die Umwälz- bzw. Wendeaggregate benötigt und bewegt sich zwischen 25 und 40 kWh/t entzogenes Wasser. Die Abluft muss z. B. in Biofiltern oder -wäschern gereinigt werden (vgl. Kapitel 3.7.6).



Da im Winterhalbjahr ohne Zusatzenergie nur eine stark reduzierte Trocknungsleistung zu erwarten ist, sollten genügend Speicherkapazitäten für den entwässerten Schlamm vorhanden sein.

3.5.6 Schlammverwertung

3.5.6 Schlammverwertung

3.5.6.1 Klärschlamm-Mitverbrennung

3.5.6.2 Klärschlamm-Monoverbrennung

Klärschlamm ist eine Schadstoffsенке und enthält neben Schwermetallen und organischen Schadstoffen auch Pflanzennährstoffe. Traditionell wurde Klärschlamm daher zu Düngezwecken in der Landwirtschaft verwendet. Der derzeit häufigste Entsorgungsweg ist die Nutzung des Klärschlammes als erneuerbarem Brennstoff in der Mit- oder Mono-Verbrennung. Die dabei entstehende Asche wird überwiegend deponiert [Adam und Simon, 2010].

Ziel aller thermischen Behandlungsverfahren ist es, den Klärschlamm zu mineralisieren, d. h. den Wasseranteil zu verdampfen und den organischen Anteil zu oxidieren. Dabei bestimmt der enthaltene organische Anteil das energetische Potenzial. Bei ausgefaultem Klärschlamm kann dieser organische Anteil etwa dem Glühverlust des Trockenrückstandes gleichgesetzt werden, der je nach Ausfaltungsgrad zwischen **40** und **50 %** liegen kann.



Klärschlamm ist biogenen Ursprungs und kann als klimaneutraler Brennstoff eingestuft werden, da bei der Verbrennung lediglich regeneratives CO₂ frei wird. Der Heizwert von getrocknetem Klärschlamm ist mit dem Heizwert von Braunkohle vergleichbar. In diesem Kontext sollte aber die Transportentfernung zur Verbrennung oder Verwertung wegen der CO₂-Emissionen aus dem Kraftstoffverbrauch klein gehalten werden.

Nicht nur der Aspekt der Treibhausgasemissionen ist beim Klärschlammtransport von Bedeutung. Die aufzuwendende Transportenergie (Kraftstoffverbrauch für Leerfahrt und Abtransport) sollte den Energiegehalt des zu entsorgenden Klärschlammes nicht überschreiten. Der spezifische Energieverbrauch für einen Lkw-Transport (Dieselverbrauch 30 l je 100 km) mit einem Abrollcontainer von 10 m³ Fassungsvermögen und einer mittleren Klärschlammichte von 1.300 kg OS/m³ wird in [Schröder, 2007] mit **0,8 kJ/(km · kg)** angesetzt. Dieser verringert sich mit einem höheren Fassungsvermögen des Abtransports.



Die thermische Entsorgung erfolgt in Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen oder durch die Mitverbrennung in Kraftwerken, Müllverbrennungsanlagen und Zementwerken. Hohe Transportkosten zum Verbrennungsort sowie die Preisabhängigkeit vom Verbrennungsanlagenbetreiber machen die Mitverbrennung gerade für kleinere Kläranlagen aber oft unattraktiv. Neue thermische Verfahren (Vergasung, Pyrolyse u. a.) und das Downscaling von etablierten Verfahren (Wirbelschichtfeuerung u. a.) sollen hier Alternativen bieten.

Aus energetischer Sicht ist es erforderlich, die thermische Klärschlammbehandlung gemeinsam mit der Klärschlamm-trocknung zu betrachten. Nach derzeitigem Stand unter Berücksichtigung des Eigenstrombedarfs und der Wärmeverluste der thermischen Verwertungs- und Entsorgungsanlagen erreicht kein Verfahren einen elektrischen Energieüberschuss in der Gesamtbilanz [Bauerfeld, 2015].

Im Kontext des Phosphorrecyclings ist die Klärschlammmonoverbrennung (evtl mit Zwischen-deponierung der Asche) für die Verwertung der Asche vorteilhaft. Die Anwendbarkeit der Verfahren ist eng mit dem Phosphorrückgewinnungspotenzial und der Qualität des Rezykls verknüpft.

3.5.6.1 Klärschlamm-Mitverbrennung

Bei einer Mitverbrennung ersetzt entwässertes oder getrockneter Klärschlamm i. d. R. fossile Energieträger. Bei der Verbrennung in einem Zementwerk muss Klärschlamm einen TR-Gehalt über 90 % einhalten. Diese Voraussetzung im Hinblick auf den TR-Gehalt kann eine Anforderung des

Betreibers sein, ist aber nicht zwangsläufig die Regel. Die Annahme von Schlämmen mit geringerem TR-Gehalt und Trocknung im Zementwerk ist in der Praxis ebenfalls üblich.

Die notwendige Trocknung des Klärschlammes kann durch Nutzung der Abwärme der Verbrennung erfolgen. Bei der Verbrennung des getrockneten Schlammes im Kraftwerk entspricht die Stromerzeugung nochmals etwa dem in der KWK-Anlage aus dem Faulgas erzeugbaren Strom.

Zu beachten ist auch, dass viele Kraftwerke vermehrt im Teillastbetrieb gefahren werden. Dies wiederum bedeutet eine deutliche Verringerung des Durchsatzes und damit auch eine Verringerung der Mitverbrennungskapazität gegenüber dem Volllastbetrieb.

Aufgrund des geringen Anteils der Klärschlammmasche in der Flugasche ist die Phosphorrückgewinnung bei einer Mitverbrennung nicht sinnvoll.

3.5.6.2 Klärschlamm-Monoverbrennung

Bei einer energetisch effizienten Klärschlamm-Monoverbrennung ist darauf zu achten, dass möglichst kein Zusatzbrennstoff benötigt wird. Daher sollte der Klärschlamm entsprechend entwässert bzw. getrocknet sein.

Üblicherweise werden mechanisch entwässerte Schlämme in Etagenöfen und teiltrocknete Schlämme (ca. 40–85 % TR) in stationären Wirbelschichtöfen – ohne Ascheumlauf – verbrannt. Wichtige Prozessbedingungen sind dabei:

- Verbrennungstemperatur: mindestens **850 °C**,
- Verweilzeit der Rauchgase bei dieser Temperatur: mindestens **2 Sekunden**,
- Mindestsauerstoffgehalt im Rauchgas: **6 Vol.-%**.

Die etablierten Verfahren sind im Merkblatt DWA-M 386 „Thermische Behandlung von Klärschlämmen – Monoverbrennung“ [DWA, 2011d] ausführlich dargestellt. In Deutschland werden in erster Linie stationäre Wirbelschichtanlagen mit einem Jahresdurchsatz von mehr als 6.000 t TR betrieben.

Bei der Verbrennung wird hochkalorische Abwärme über die Rauchgase frei, die mittels Abhitzeessel und Dampfturbine zur Stromerzeugung und Abwärmenutzung, z. B. für eine Trocknung der Schlämme, verwertet werden kann.

Die Klärschlamm-Monoverbrennung eignet sich für die Rückgewinnung von Phosphor aus den Aschen, da diese nicht mit anderen Stoffen durch eine Mitverbrennung vermischt werden. Die Asche enthält zwischen **60 und 80 g Phosphor pro kg Asche** (vgl. Kapitel 3.6.2).

Sonderverfahren

Zu den alternativen Verfahren zählen andere thermische Prozesse und Feuerungstechnologien, aber auch die Optimierung etablierter Verfahren für kleine Durchsatzmengen (bis 6.000 t TR/a). Unterschieden werden die Prozesse in Verbrennung, Vergasung oder thermische Zersetzung des Klärschlammes unter Sauerstoffausschluss (bez. Pyrolyse). Im Unterschied zur Verbrennung besteht das Prozessziel bei den Vergasungs- und Pyrolyseverfahren nicht in der vollständigen Umwandlung der organischen Bestandteile zu CO₂, sondern vielmehr in der Gewinnung eines verwertbaren Synthesegases oder eines Kohlesubstrats. In den Produkten dieser Verfahren bleibt die Energie zur Umwandlung gespeichert und kann später gezielt und bedarfsgerecht genutzt werden. Voraussetzung für die Vergasung und die Pyrolyse ist ein voll getrockneter Klärschlamm (TR ≥ 85 %).

Das bei der Vergasung entstehende Schwachgasgemisch wird üblicherweise für den eigentlichen Vergasungsprozess genutzt. Der Prozess kann bei niedrigeren Temperaturen erfolgen, was im Hinblick auf die mögliche Verwertung der festen Rückstände von Vorteil sein kann, da der darin enthaltene Phosphor besser pflanzenverfügbar ist.



Beim Prozess der Pyrolyse entstehen je nach Temperatur Pyrolysegas, Pyrolyseöl, Kondenswasser und Pyrolysekoks. Im Pyrolysekoks befindet sich i. d. R. ein Anteil von Restorganik, womit die Entsorgung entsprechend dem geltenden Deponierecht zu prüfen ist.

3.5.7 Phosphorrückgewinnung bei der Schlammbehandlung

Bei den Prozessen der kommunalen Abwasser- und Klärschlammbehandlung besteht die Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung prinzipiell am Kläranlagenablauf, aus dem Prozesswasser, dem Klärschlamm und der Klärschlammasche (vgl. Tabelle 3-12). In diesem Kapitel werden die Hinweise gegeben, die sich auf Klärschlamm sowie Klärschlammasche beziehen. Die Betrachtung der Phosphorrückgewinnung aus dem Stoffstrom Prozesswasser erfolgt in Kapitel 3.6.2.



Phosphorrückgewinnungsverfahren sind Techniken, durch die der Nährstoff Phosphor von Schadstoffen separiert und rückgewonnen werden kann. Ziel ist die Rückführung des Phosphors in den Nährstoffkreislauf und eine damit einhergehende Schonung der Primärrohstoffe. Die Recyclingprodukte (Rezyklate) können dazu direkt in der Landwirtschaft als Dünger, in der Düngemittelindustrie oder in der Phosphorindustrie verwertet werden [Montag et al., 2014].

Trotz einer Vielzahl an erforschten Aufbereitungstechnologien existierten zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Handbuchs nur wenige großtechnische Anlagen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm oder Klärschlammasche. Dies liegt unter anderem an den derzeit niedrigen Marktpreisen für Phosphor aus konventioneller Produktion. Dadurch sind Verfahren der Phosphorrückgewinnung zurzeit wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig. Wenn Klärschlamm aber, wie zu erwarten ist, nicht mehr direkt als Dünger auf Felder ausgebracht werden darf, muss unabhängig vom momentanen Marktpreis eine Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser oder Klärschlamm erfolgen, um die endliche Ressource Phosphor zu schonen. Daher müssen heute schon Überlegungen zur Phosphorrückgewinnung in eine energetische Optimierung mit einfließen.

Unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit und Planungssicherheit scheint auf Basis der aktuell vorgesehenen Regelungen zur Phosphorrückgewinnung eine vermehrte Zunahme einer zentralisierten Klärschlamm-Monoverbrennung mit einer daran angeschlossenen rückholbaren Lagerung bzw. einer direkten Gewinnung eines Phosphorrezyklats aus der Verbrennungssasche am wahrscheinlichsten [Montag et al., 2014].

Die Vorstellung der Technologien wird aufgrund des Entwicklungsstandes bzw. der unterschiedlichen Anwendungsreife hier nicht ausgeführt. Weitere Hinweise und eine Systematisierung der Verfahren finden sich in [Montag, 2013], [Egle et al., 2013] und [Adam et al., 2015].



Tabelle 3-12 Einsatzstellen der Phosphorrückgewinnung nach [Montag, 2013, Montag et al., 2014]

Einsatzstelle	Volumen/ Massenstrom	Phosphor- konzentration	Bindungsform	Rückgewinnungs- potenzial (bezogen auf Zulauf- fracht der Kläranlage)
Kläranlagenablauf	200 l/(E · d)	< 5 mg/l	gelöst	max. 55 % ¹⁾
Schlammwasser	1–10 l/(E · d)	20–100 mg/l	gelöst	max. 50 % ²⁾
Faulschlamm	0,–0,8 l/(E · d)	30–40 g P/kg TR	gelöst sowie biologisch/ chemisch gebunden	max. 90 %
Klärschlammasche	0,03 kg/(E · d)	60–80 g/kg	chemisch gebunden	max. 90 %

1) sofern keine gezielte P-Elimination stattfindet

2) bei biologischer Phosphorelimination und Klärschlammdeintegration

Phosphorrückgewinnung aus Faulschlamm

Im Faulschlamm liegt Phosphor biologisch und/oder chemisch gebunden vor. Die Wahl eines Verfahrens ist abhängig von der Art der Phosphorelimination auf der Kläranlage bzw. der Bindungsform des Phosphors im Faulschlamm [Montag et al., 2014].

Die Phosphorrückgewinnung erfolgt über eine chemische Rücklösung des Phosphors mittels Säure (Schwefelsäure bzw. Kohlensäure), eine Metallabtrennung und eine anschließende Kristallisation bzw. Fällung von MAP oder Calciumphosphat aus der wässrigen Phase.

Als Potenzial für eine Rückgewinnung steht sämtlicher auf der Kläranlage eliminiertes Phosphor zur Verfügung. Damit beträgt das Rückgewinnungspotenzial 90 % der Zulaufmenge zur Kläranlage (vgl. Tabelle 3-12).

Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche

Bei der Monoverbrennung liegt der zuvor im Schlamm enthaltene Phosphor vollständig in der Klärschlammasche vor und muss vor einer Rückgewinnung in eine wässrige Phase überführt werden. Dies kann entweder elektro-, thermo- oder nasschemisch erfolgen [Lehrmann, 2013], [Montag et al., 2014]. Neben dem Phosphor enthält die Klärschlammasche auch Schwermetallverbindungen, die bei rund 2/3 der Aschen eine direkte landwirtschaftliche Verwertung aufgrund der Düngemittelverordnung unterbinden und daher vom Phosphor separiert werden müssen. Zudem wird eine Überführung des enthaltenen Phosphors in eine pflanzenverfügbare Form angestrebt.

Energetische Aspekte

Bei einigen Verfahren wurden erste Daten über deren Energieverbrauch veröffentlicht. Es zeigen sich große Spannbreiten für die aufzuwendende Energie bezogen auf die zurückgewonnene Phosphormenge. Eine grobe energetische Einordnung einiger Phosphorrückgewinnungsverfahren findet sich in [Egle et al., 2013].

3.6 Prozesswasserbehandlung und -bewirtschaftung

3.6 Prozesswasserbehandlung

3.6.1
Behandlung von
stickstoffbelasteten Teilströmen

3.6.2
Phosphorrückgewinnung
aus Prozesswasser

3.6.1 Behandlung von stickstoffbelasteten Teilströmen

Auf Kläranlagen fallen an verschiedenen Stellen stickstoffbelastete Prozesswässer an:

- Schlammstabilisierung,
- Schlammeindickung und -entwässerung,
- Schlammintegration,
- Schlamm Trocknung (Brüdenkondensate)
- und Co-Fermentation.

Bei einer Mitbehandlung der Schlämme weiterer Kläranlagen muss eine Erhöhung der Stickstofffrachten (und -konzentrationen) in den Prozesswässern berücksichtigt werden. Für die Prozesswässer einer getrennten anaeroben Schlammstabilisierung mit nachgeschalteter Schlamm-entwässerung bedeutet dies z. B. eine zusätzliche Stickstoff-Rückbelastung von etwa **1,5 g N/(E · d)** bzw. etwa **15 %** bis **25 %** bezogen auf den Gesamtstickstoff im Zulauf [Jardin et al., 2005]. Bei Behandlung von Fremdschlämmen oder Co-Substraten steigt diese Rückbelastung. Auch eine Desintegration der anfallenden Rohschlämme mit einem erhöhten Aufschluss der organisch gebundenen Stickstofffracht führt zu einem Anstieg der Stickstoffrückbelastung und der Rückbelastung mit inertem CSB. Die Stickstoffrückbelastung kann eine zusätzliche Prozesswasserbehandlung erfordern [DWA, 2015c].

Die zusätzliche Stickstofffracht beeinflusst die Leistungsfähigkeit der biologischen Stufe durch die Erhöhung des Sauerstoffbedarfs für die Oxidation insbesondere des Ammoniums. Außerdem kann



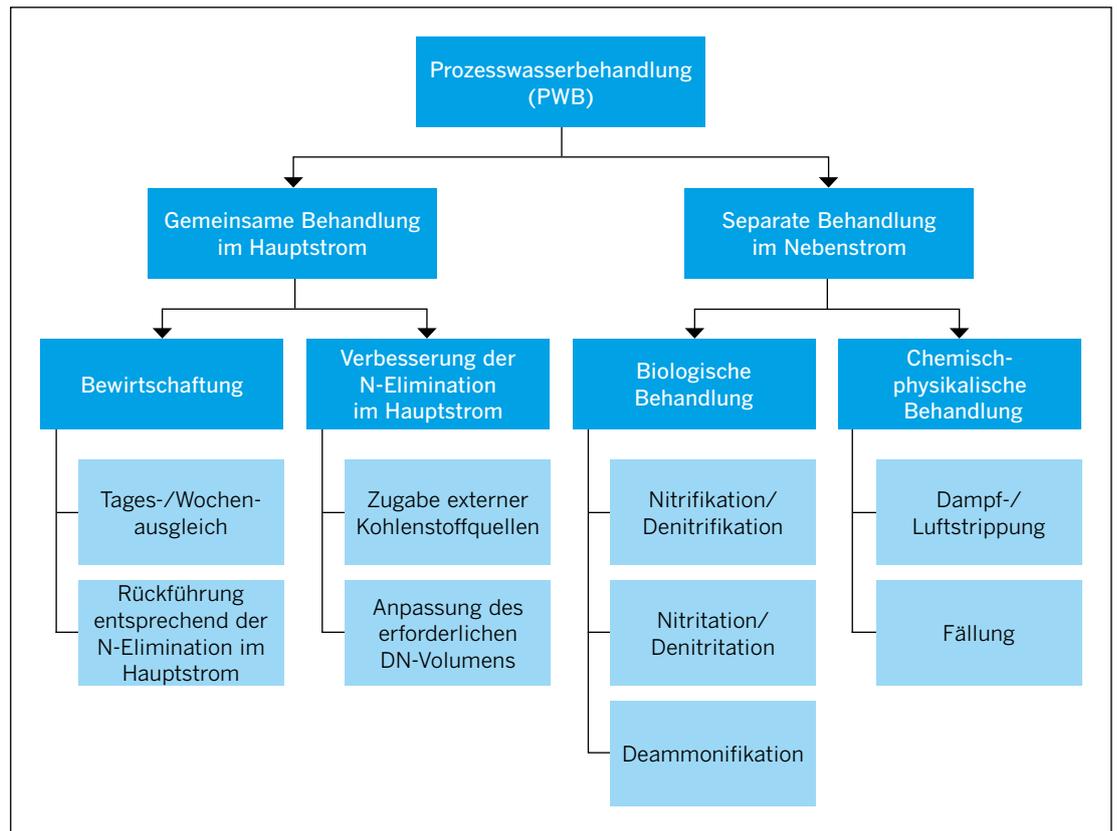


Bild 3-20 Möglichkeiten der Prozesswasserbehandlung modifiziert nach [Jardin et al., 2005]



Tabelle 3-13 Gegenüberstellung der verschiedenen Verfahren zur Stickstoffumsetzung anhand prozessrelevanter Größen [Beier et al., 2008] [Haberker et al., 2008]

Prozess	theor. O ₂ -Bedarf kg O ₂ /kg N	Spez. Strombedarf	Wärmebedarf	Schlammanfall	Nährstoffhaltiges Produkt
Nitrifikation	4,3	2,6 ¹⁾ kWh/kg N	-	Niedrig 0,12–0,14 g TS/g N (AOB)	-
Denitrifikation	-2,86	1 ²⁾ kWh/kg N	-	Hoch 1,65 g TS/g N	-
Nitritation	3,4	< 2 ³⁾ kWh/kg N	-	Niedrig 0,12–0,14 g TS/g N	-
Denitritation	-1,71	< 0,5 ⁴⁾ kWh/kg N	-	Mittel ≈ 1,0 g TS/g N	-
Deammonifikation (Nitritation + Anammox)	1,7	1,5 ³⁾ kWh/kg N	-	Niedrig 0,23 g TS/g N	-
MAP-Fällung	-	1,6–1,8 kWh/kg N 1,5–1,7 kWh/m ³	-	-	Magnesium-Ammonium-Phosphat, MAP (100 %) 17,5–19 kg/kg N
Dampfstrippung	-	2,9–3,7 kWh/kg N 2,8–3,5 kWh/m ³	42–47 kWh/kg N 40–45 kWh/m ³	-	Ammoniakwasser (25 %): 3,9–4,1 kg/kg N
Luftstrippung mit saurer Wäsche	-	1,6–1,9 kWh/kg N 1,5–1,8 kWh/m ³	8,4–10,5 kWh/kg N 8–10 kWh/m ³	-	Ammoniumsulfat (38 %): 11–13 kg/kg N

1) Ansatz: rechnerische Ermittlung N-Anteil

2) unter Berücksichtigung von Umwälzung und internem Recycle

3) abgeschätzt aus großtechnischen Daten

4) ausschließlich Rührenergie, damit abhängig vom Volumen, dieses wiederum abhängig von der Umsatzgeschwindigkeit als Funktion des Substrats, Temperatur und Biomasseanreicherung

AOB – Ammoniumoxidierer, NOB – Nitritoxidierer

bei einem bereits ungünstigen C/N-Verhältnis die zusätzlich zu denitrifizierende Fracht zu einer Vergrößerung des benötigten Denitrifikationsvolumens führen oder die Dosierung einer zusätzlichen Kohlenstoffquelle erfordern. Die Denitrifikationsleistung bildet i. d. R. den limitierenden Faktor für die Behandlung der Prozesswässer im Hauptstrom.

Vor Einrichtung einer separaten Prozesswasserbehandlung empfiehlt es sich, die Zwischenspeicherung von Prozesswässern zur späteren Behandlung im Hauptstrom und die Zudosierung von externen Kohlenstoffquellen zu prüfen. Eine separate Prozesswasserbehandlung kann zusätzliche Prozessstabilität der Stickstoffelimination wie auch die Freisetzung von Anschlusskapazitäten erbringen. Sie kann sich bei großen Kläranlagen (GK 5: Nges < 13 mg/l) bzw. solchen, für die geringe Ablaufwerte erforderlich sind, oder bei Kläranlagen mit einer Umstellung auf anaerobe Schlammbehandlung und fehlenden Speichermöglichkeiten für das Prozesswasser lohnen [Haber Kern et al., 2008].

Die Möglichkeiten der Prozesswasserbehandlung werden im Bild 3-20 dargestellt. Hierbei wird zwischen einer Behandlung im Hauptstrom und einer separaten Behandlung des Prozesswassers durch ein zusätzliches Verfahren unterschieden.

Die prozessrelevanten Verfahrensparameter der Verfahren für eine separate Behandlung können der Tabelle 3-13 entnommen werden. Ein Bedarf an elektrischer Energie ist bei allen Verfahren zu berücksichtigen. Bei den biologischen Verfahren dominiert als wichtigster Verbraucher die Belüftung. Auch bei der Luftstrippung wird der Gesamtenergiebedarf wesentlich durch das Strippluftgebläse bestimmt. Die Dampfstrippung und Luftstrippung mit saurer Wäsche benötigen zusätzlich thermische Energie.

Bewirtschaftung von Prozesswasser und Entlastung der biologischen Stufe

Eine erhöhte Stickstofffracht führt i. d. R. zu einer Vergrößerung des benötigten Denitrifikationsvolumens. Bei vorgeschalteter Denitrifikation erfordert diese ein erhöhtes Rezirkulationsverhältnis, um erhöhte Nitrat-Ablaufkonzentrationen auszugleichen. Eine Alternative ist die Zugabe von externen Kohlenstoffquellen in den Hauptstrom, wobei auch die wässrige Phase einer Primärschlammversauerung für eine Verwendung geprüft werden sollte [Jardin et al., 2005].

Auf die Bemessung des Volumens zur Stickstoffelimination wirkt sich eine erhöhte Stickstofffracht direkt und über den Stoßfaktor aufgrund ggf. verstärkter Belastungsspitzen volumenvergrößernd aus. Je nach Betriebsweise der Schlammwässerung können Rückbelastungen auftreten, bei denen Tageszulaufspitzen von Stickstoff und Kohlenstoff zusammentreffen. Relevant sind diese Frachtspitzen für die Ermittlung des Sauerstoffbedarfs und damit für die Auslegung der Gebläse- und Belüftungseinrichtungen. Diese Erhöhung/Addierung von Frachtspitzen kann auch zu Energiebedarfsspitzen (vgl. Kapitel 5.3.4) führen.

Eine Möglichkeit zur Dämpfung dieser Frachtspitzen ist die Bewirtschaftung (Mengenausgleich), entweder durch eine Veränderung der Entwässerungszeiten oder durch die Nutzung eines Prozesswasserspeichers in Kombination mit bevorzugter Dosierung in Schwachlastzeiten.

Eine Anpassung der Entwässerungszeiten bedeutet eine dynamisch angepasste Entwässerung in Abhängigkeit von der aktuellen Belastung der biologischen Stufe. Dies setzt die genaue Kenntnis der Zulaufdynamik von Frachtschüben in die Kläranlage voraus. Für die Bedienung der mechanischen Entwässerung sind ebenfalls die Anwesenheitszeiten des Betriebspersonals zu berücksichtigen.

Die tägliche, wöchentliche und saisonale Variation des Prozesswasseranfalls bestimmt das erforderliche Ausgleichsvolumen eines Prozesswasserspeichers (= Pufferbehälter) [Jardin et al., 2005]. Neben einer reinen Bewirtschaftung kann ein Pufferbehälter mit Belüftung auch als Durchlaufreaktor (ohne Feststoffrückhaltung) zum Teilabbau durch Nitritation (= unvollständige Nitrifikation) genutzt werden.

Die Bewirtschaftung von Prozesswasser stellt für sich eine verfahrenstechnische Effizienzmaßnahme zur Vergleichmäßigung des Energiebedarfs dar. Der zusätzliche Aufwand einer Teilstrombehandlung kann damit umgangen werden.



Teilstrombehandlung – separate Prozesswasserbehandlung

Eine Stickstoffelimination aus Prozesswasser im Teilstrom kann mit den klassischen biologischen Prozessen der Nitrifikation/Denitrifikation sowie der Nitritation/Denitritation oder durch eine direkte biologische Umsetzung von Ammonium (NH_4^+) zu elementarem Stickstoff (bez. Deammonifikation) erfolgen. Für diese Prozesse kommen üblicherweise das SBR-Verfahren (vgl. Kapitel 3.3.3.2), das klassische Belebtschlammverfahren sowie Festbett- bzw. Wirbelbettverfahren zum Einsatz.



Die technische Umsetzung der Nitrifikation/Denitrifikation von Prozesswässern ist vergleichbar mit der im Hauptstrom. Das meist ungünstige C/N-Verhältnis der Schlammwässer kann die Zugabe einer externen CSB-Quelle erfordern, wobei zu prüfen ist, ob sich diese nicht auch durch interne Quellen wie Rohabwasser, Primärschlamm oder das Filtrat aus der Schlammintegration substituieren lässt. Analog zur Stickstoffelimination mit dem Belebtschlammverfahren im Hauptstrom (vgl. Kapitel 3.3.2) wird der Energiebedarf der Prozesswasserbehandlung mittels Nitrifikation/Denitrifikation vornehmlich durch die Belüftung bestimmt.



Bei dem erprobten Verfahren der Nitritation/Denitritation erfolgt die Ammoniumoxidation nur bis zum Nitrit, welches anschließend durch Denitrifikation zu molekularem Stickstoff reduziert wird. Mit dem Verfahren der Nitritation/Denitrifikation lassen sich im Vergleich zur Nitrifikation/Denitrifikation etwa 25 % des Sauerstoffbedarfs und somit auch entsprechende Belüftungsenergie sowie ca. 40 % des Bedarfs an externem CSB einsparen [Jardin et al., 2005]. Die Umstellung auf dieses Verfahren kann somit als eigene Effizienzmaßnahme gesehen werden.

Eine weitergehende Reduktion des benötigten Sauerstoffeintrags zur Ammoniumoxidation kann bei einer separaten Prozesswasserbehandlung mit dem, nach Erkenntnissen aus Betriebserfahrungen in halb- und großtechnischen Anlagen, bewährten Verfahren der Deammonifikation erreicht werden [Horn et al., 2009].

Bei dem Prozess der Deammonifikation erfolgt in einem ersten Schritt unter aeroben Bedingungen eine Umwandlung von ca. der Hälfte des im Prozesswasser enthaltenen Ammoniums zu Nitrit. Das Nitrit wird in einem zweiten Schritt unter anaeroben Bedingungen mit Hilfe spezialisierter Bakterien (Planktomyceten) zusammen mit der anderen Hälfte des Ammoniums zu gasförmigem Stickstoff und etwa 10 Prozent Nitrat umgewandelt. Mit der Deammonifikation lassen sich im Vergleich zum Verfahren der Nitrifikation/Denitrifikation etwa **60 %** des Sauerstoffbedarfs und somit auch entsprechende Belüftungsenergie einsparen (vgl. Tabelle 3-13). Daher steht die Deammonifikation für sich als energetische Effizienzmaßnahme. Ebenfalls wird im Gegensatz zur Denitrifikation und Denitrifikation gänzlich auf eine externe CSB-Quelle zur Umwandlung des Stickstoffs verzichtet. Geringere Wachstumsraten der für die Deammonifikation eingesetzten Mikroorganismen führen zu einem geringeren Überschussschlammaufkommen. Die Umsatzleistung ist stark temperaturabhängig. Das optimale Temperaturniveau liegt über **25 °C**, darunter läuft die Umsetzung deutlich langsamer ab. Bei Temperaturen unter **20 °C** kann eine Prozessstabilität nicht gewährleistet werden und die Gefahr einer erhöhten Nitratkonzentration im Ablauf steigt. Der Temperaturübergang im Prozess muss insbesondere im Winterbetrieb überwacht werden. Bei niedrigen Temperaturen erweist sich ein Schwebebett-/Wirbelbettreaktor aufgrund einer größeren Biofilmdicke als geeigneter als ein SBR-Reaktor [Neifer et al., 2014]. Außerdem ist dieser unempfindlicher gegenüber Feststoffeinträgen und kurzzeitigen Belastungsstößen. Bei der Anwendung eines SBR-Reaktors ist eine gute Betriebsstrategie zu entwickeln, die die Milieubedingungen für die Mikroorganismen optimiert und hemmende Konzentrationen vermeidet. Hemmend sind in Abhängigkeit vom pH-Wert Ammoniak und salpetrige Säure. Toxisch bzw. im Sinne einer Substratüberschusshemmung ist Nitrit. Die Phasen der Beschickung des Reaktors, die Belüftungsphasen und die biologische aktive Phase sind aufeinander abzustimmen. Als Regelgröße empfiehlt sich hierfür der Ammoniumwert. Alternativ bieten sich auch die Leitfähigkeit oder das Redox-Potenzial an. Die Betriebsweise kann aber auch in Abhängigkeit von pH-Wert-Änderungen geregelt werden [Groemping et al., 2014] [Jardin et al., 2008]. Neben einigen bereits publizierten Hinweisen zum Betrieb, der Umsatzleistung und dem Energieverbrauch (vgl. z. B. [Beier et al., 2008, Lackner et al., 2014, Sander et al., 2010]) zu den Verfahren der biologischen Stickstoffelimination von Schlammwässern können dem Merkblatt DWA-M 349 [DWA, o. J.] weitere Hinweise zur Planung, dem Bau sowie dem Betrieb entnommen werden [DWA, 2015e].



Neben den biologischen Verfahren können auch chemisch-physikalische Verfahren zur Stickstoffelimination im Prozesswasser eingesetzt werden. Hierzu zählen die MAP-Fällung, die Dampfstrippung und die Luftstrippung mit saurer Wäsche. Der Wärmebedarf der Dampfstrippung ist sehr groß: **> 40 kWh/kg N** (siehe Tabelle 3-13). Überschüssige thermische Energie, wie beispielsweise Heizdampf aus der Verbrennung bzw. Trocknung oder Abwärme aus Blockheizkraftwerken, kann daher vorteilhaft vor allem bei Strippanlagen genutzt werden [Jardin et al., 2005]. Bei den Stripverfahren kann es bei der Temperaturanhebung zu Ausfällungen im Bereich der Wärmetauscher kommen. Damit gehen eine Reduzierung der Durchflussleistung und eine Abnahme der Wärmeübertragung einher. Hier empfiehlt es sich, eine regelmäßige ggfs. vollautomatisierte Spülung oder eine Redundanz des Anlagenteils zu schaffen [Jardin et al., 2005]. Bei den chemisch-physikalischen Prozessen entsteht ein stickstoffhaltiges Produkt, das als Düngemittel eingesetzt werden kann (siehe Tabelle 3-13).



3.6.2 Phosphorrückgewinnung aus Prozesswasser

Phosphor kann neben den in Kapitel 3.5.7 beschriebenen Möglichkeiten bei Klärschlamm und Klärschlammasche auch aus Schlamm- und Prozesswässern rückgewonnen werden. Grundsätzlich handelt es sich bei den bekannten Methoden der Phosphorrückgewinnung aus Prozesswasser um Fäll- oder Kristallisationsverfahren, bei denen i. d. R. als Produkt Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP), Calciumphosphat oder Magnesiumphosphat entsteht. Die Anwendung der Kristallisation wird bereits großtechnisch umgesetzt und entsprechende Betriebserfahrungen liegen vor. Bei den Verfahren, die den Phosphor u. a. mittels Fällung abtrennen, werden entweder Demonstrationsanlagen betrieben oder es fand eine kurzzeitige großtechnische Erprobung statt [DWA, 2013f, Montag, 2013].



Neben dem Phosphor liegt im Prozesswasser ebenfalls Ammonium vor. Das MAP-Verfahren bietet den Vorteil einer partiellen Stickstoffentfrachtung des Prozesswassers und damit verbunden eine Entlastung der biologischen Stufe.

Eine entsprechende wirtschaftlich und energetisch günstige Umsetzung ist vor allem von der auf der Kläranlage bereits installierten Verfahrenstechnik abhängig. Die Verfahren, die MAP aus Schlammwasser fällen oder kristallisieren, bieten den Vorteil, bei bestehender Bio-P- Elimination relativ leicht implementierbar zu sein [Montag et al., 2014]. Bei diesen Verfahren können jedoch nur **30–50 %** des Phosphors gewonnen werden (vgl. Tabelle 3-13).



Im Bereich der Energieeffizienz der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm ist weiterer Forschungsbedarf gegeben.

3.7 Kläranlageninterne Infrastruktur

3.7 Kläranlageninterne Infrastruktur

3.7.1
Trink- &
Brauchwasser

3.7.2
Druckluft
(Kompressoren)

3.7.3
Beleuchtung

3.7.4
Heizen von
Gebäuden

3.7.5
Kühlen von
Gebäuden

3.7.6
Abluftbehandlung
& Lüftungstechnik

3.7.7
IK-Technik

3.7.1 Trink- und Brauchwasser

Trinkwasser

Für die Förderung und Bereitstellung von Trinkwasser auf der Kläranlage wird i. d. R. keine elektrische Energie benötigt. Dies resultiert daraus, dass der Bezug von Trinkwasser überwiegend aus dem öffentlichen Netz stammt und der schon vorhandene Netzdruck für die Kläranlage ausrei-

chend ist. Es wird lediglich Wärmeenergie für das Aufheizen des Wassers zum Duschen, Händewaschen und Laboruntersuchungen benötigt. Der Wärmebedarf hierfür ist jedoch sehr gering und kann über folgende Formel überschlägig berechnet werden:

Formel 3-4 Berechnung des Wärmebedarfs für die Wasseraufheizung

$$E = n \cdot Q \cdot d \cdot 1,16 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \cdot \Delta T$$

E = Wärmebedarf für die Wasseraufheizung [kWh]

n = Anzahl Personal [-]

Q = Wasserbedarf [m^3/d]

d = Tage [d]

ΔT = Temperaturdifferenz zur Warmwassererwärmung [K]

In bestimmten Fällen wird zu Kühlzwecken auch Trinkwasserqualität gefordert. Heutzutage sind jedoch die meisten Maschinen so konstruiert, dass zur Kühlung auch Brauchwasser eingesetzt werden kann. Auf größeren Anlagen mit Küchen bzw. Kantinen sind die zusätzlichen Warmwassermengen zu berücksichtigen.

Brauchwasser

Die Nutzung von Brauchwasser erfolgt als Spülwasser, Kühlwasser sowie für Reinigungszwecke und stammt i. d. R. aus dem gereinigten Abwasser der Nachklärung bzw. Filteranlage oder Brunnenanlagen auf der Kläranlage. Je nach Anforderungen an das Brauchwasser und der Entnahmestelle ist eine Brauchwasseraufbereitung notwendig, z. B. mittels Filtration. Um eine ausreichende Versorgung zu garantieren, wird ein Betriebsdruck von **6–10 bar** benötigt. Netze mit niedrigerem Druck können je nach Verwendungsart auch bei **3–4 bar** betrieben werden. Der Energiebedarf für die Förderung des Brauchwassers entsteht damit durch die Druckerhöhungspumpen und die Aufbereitung. Der Elektrizitätsverbrauch liegt bei rund **0,25–0,5 kWh/m³** Brauchwasser.



Effizienzmaßnahmen

Bei der energetisch optimierten Versorgung steht immer die Einsparung von Trink- und Brauchwassermengen im Vordergrund. Trinkwasser ist, wenn möglich, durch Brauchwasser zu ersetzen. Um Belastungsschwankungen auszugleichen, ist ein Windkessel mit entsprechender Pumpensteuerung vorzusehen. Die zugehörigen Pumpen sind optimal auf den Betriebspunkt bzw. bedarfsgerecht zu dimensionieren (vgl. Kapitel 4.2.3).

Neben den Pumpen kann vor allem bei der Erwärmung von Wasser Energie gespart bzw. regenerativ erzeugt werden:

- Verringerung des Wasserverbrauchs durch verbrauchsoptimierende Mechanik bei der Wasserverteilung (z. B. Armaturen etc.),
- Verwendung von Erneuerbaren Energien (z. B. die Erwärmung von Wasser durch solare Energie (vgl. Kapitel 5.4.6)).

Bei größeren Kläranlagen ist eine Aufteilung in zwei Brauchwassernetze zu prüfen, die mit unterschiedlichen Drücken betrieben werden. Damit lassen sich unnötige Druckverluste an den verschiedenen Einsatzorten vermeiden. Für Maßnahmen bei der Desinfektion von Trink- und Brauchwasser wird weiterhin auf Kapitel 3.4.3 verwiesen.

3.7.2 Druckluft (Kompressoren)

Die Verwendung von Druckluft erfolgt auf Kläranlagen hauptsächlich in der Werkstatt oder bei pneumatischen Antrieben bzw. Regelorganen. Die durch Kompressoren gespeisten Druckluftnetze werden i. d. R. bei **3** oder **6 bar** betrieben. Die Luftversorgung für die Belebungsbecken, Sandfänge, Flotation etc. werden in einem separaten Kapitel (Kapitel 4.3) detailliert beschrieben. Der Energiebedarf für die Kompressoren ist aufgrund der nur sehr geringen Laufzeiten bzw. Luftmengen vernachlässigbar gering und kann mit rund **0,1 kWh/m³** Druckluft abgeschätzt werden.



Effizienzmaßnahmen

Für die Bestimmung des optimalen Energieverbrauchs einer Anlage zur Druckluftherzeugung sind mehrere Kriterien zu betrachten. Wichtig für die richtige Bemessung ist der Wirkungsgrad der Anlage, der sich unter anderem aus dem Druckverhältnis von Lieferdruck und Ansaugdruck und der Anzahl der Druckstufen zusammensetzt. Eine Überwachung des Leitungsnetzes, z. B. mittels Ultraschallgeräten, kann zu einer großen Energieeinsparung führen, da schon durch kleine Lecks hohe Mengenverluste und somit Leistungsverluste entstehen können. Ferner ist zu empfehlen, anstelle eines weit verzweigten Druckluftnetzes die Erzeugung eher dezentral in der Nähe der Verbrauchsstellen vorzusehen. Bei der Auslegung der Kompressoren ist darauf zu achten, dass die Aggregate eine möglichst hohe Auslastung besitzen und häufiges Schalten mit langen Nachlaufzeiten des Motors vermieden wird, da in diesen Leerlaufphasen **30 – 50 %** der Nennleistung aufgenommen werden, ohne Druckluft zu erzeugen.



3.7.3 Beleuchtung

Das Ziel der Beleuchtung der Kläranlage besteht überwiegend in der Arbeitssicherheit nach Anhang 1 und Anhang 2 der Technischen Regeln für Arbeitsstätten und der DIN EN 12464-1 [DIN, 2011a], [ASTA, 2014].

Effizienzmaßnahmen

Die Benutzung von LED-Lampen zur Beleuchtung des Kläranlagengeländes und der Innenräume ist auf vielen Kläranlagen schon verbreitet. LED-Lampen brauchen für die Erzeugung der äquivalenten Lichtstärke in Lumen weniger Watt als herkömmliche Leuchtmittel und benötigen nach Angaben verschiedener LED-Hersteller dadurch nur noch rund 20 % der Energie einer herkömmlichen Glühbirne; Energiesparlampen dagegen noch rund 30 % und Halogenlampen rund 60 % (vgl. Tabelle 3-14).

Tabelle 3-14 Vergleich der durchschnittlichen Leistungsaufnahme verschiedener Leuchtmittel

Glühbirne	LED-Lampe	Energiesparlampe	Halogenlampe
15 Watt	3 Watt	5 Watt	9 Watt
25 Watt	5 Watt	8 Watt	15 Watt
40 Watt	8 Watt	12 Watt	24 Watt
60 Watt	12 Watt	18 Watt	36 Watt
75 Watt	15 Watt	23 Watt	45 Watt
100 Watt	20 Watt	30 Watt	60 Watt



Für den Ersatz einer 58-W-Leuchtstoffröhre müsste beispielhaft bei gleichem Lichtstrom nur eine 24-W-LED eingesetzt werden. LED-Lampen leuchten eine geringere Fläche aus, was jedoch am Arbeitsplatz als vorteilhaft angesehen werden kann, da das Licht der LED in eine Richtung abgestrahlt wird und dadurch einen höheren auf die Nutzfläche bezogenen Lichtstrom besitzt.

Auf Kläranlagen, die noch alte Beleuchtungsmittel verwenden, kann eine Effizienzsteigerung durch den Umstieg auf die LED-Technik erfolgen. Dies kann zu einer hohen Einsparung an Energie führen. Es müssen in diesem Kontext aber wie bei allen Energieoptimierungsmaßnahmen auch die Kosten für die Umstellung eingerechnet werden. Des Weiteren gilt hier der Grundsatz der Vermeidung von unnötiger und dauerhafter Beleuchtung, soweit dies möglich ist. Durch den Einsatz von Bewegungsmeldern und Lichtsensoren kann ein weiterer Teil an Energie eingespart werden.



Eine veränderte Einschalthelligkeit ermöglicht eine Reduzierung der Betriebsstunden der Außenbeleuchtung und verringert gleichzeitig die aufzuwendende elektrische Energie. Bei der Erarbeitung eines Beleuchtungskonzeptes ist darauf zu achten, dass die gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich des Arbeitsschutzes und der Arbeitsstättenverordnung eingehalten werden.

3.7.4 Heizen von Gebäuden

In den meisten Fällen erfolgt die Versorgung mit Heizwärme über ein Warmwassernetz, in wenigen Fällen auch über elektrische Heizungen. Beheizt werden auf der Kläranlage hauptsächlich Betriebsgebäude sowie auch bestimmte Einrichtungen mit Frostschutz (Probenehmer, Schaltschränke etc.). Bei älterem Gebäudebestand kann i. d. R. ein spezifischer Wärmebedarf von **140 bis 200 kWh/m² Nutzfläche** und Jahr abgeschätzt werden. Mit der Steigerung der Energieeffizienz von Heizsystemen und Gebäudedämmung mit Einhaltung der EnEV lassen sich heute aber bereits Werte von **40 bis 100 kWh/(m² · a)** erreichen (Bild 3-21). Der Wärmebedarf auf Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung wird in der Regel bilanziell durch die Verwertung des Faulgases in BHKW-Anlagen oder Kesselanlagen gedeckt. Lediglich im Winter ist, je nach örtlichen Bedingungen, noch eine zusätzliche Wärmezufuhr notwendig. Auch bei der Nutzung ist die Unterscheidung der verschiedenen Wärmetemperaturniveaus wichtig, da bspw. eine Niedertemperaturheizung (z. B. Fußbodenheizung) einen eigenen Heizkreislauf benötigt.

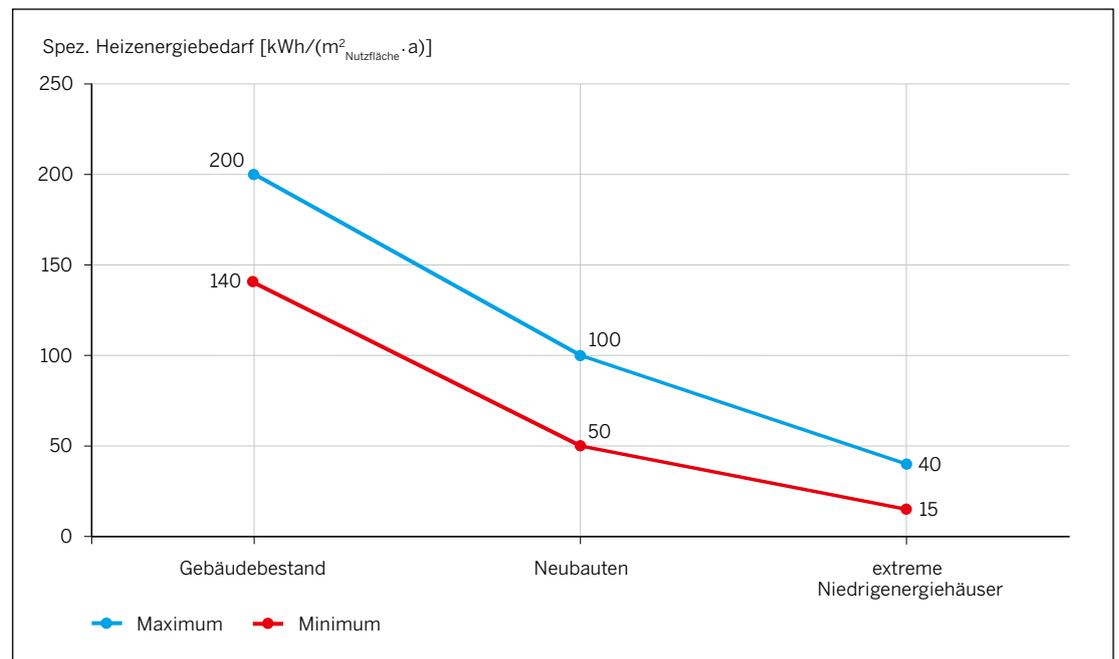


Bild 3-21 Spezifischer Heizenergiebedarf in Kilowattstunden pro m² Nutzfläche im Jahr nach [ASUE, 2006]



Effizienzmaßnahmen

Betriebsgebäude einschließlich Werkstatt, Lager und Labor etc. sind beheizt. In den Wintermonaten laufen die Heizungen fast durchgehend, obwohl die Anlage werktags nur an wenigen Stunden pro Tag besetzt ist. Es erscheint daher grundsätzlich sinnvoll, die Heizungen auf bedarfsgerechten Betrieb mittels wochen- und tagesabhängiger Temperaturabsenkung zu steuern. Die Steuerung kann mit einer konventionellen Heizungssteuerung erfolgen, welche die Temperatur tageszeitabhängig und wochentagsabhängig absenkt. Im Bedarfsfall kann die Heizung auch von Hand oder über programmierbare Thermostate eingeschaltet werden. Die Heizungsanlage kann durch solarthermische Anlagen oder weitere Wärmequellen unterstützt werden (vgl. u. a. Kapitel 5.4.3, 5.4.6 und 5.4.7).

Selbstregulierende Pumpen der ersten Generation sind in vielen Heizungsanlagen falsch eingestellt oder überdimensioniert. Mittels einer modernen Pumpentechnik und eines hydraulisch abgeglichenen Heizsystems kann Strom für die Gebäudeheizung eingespart werden. Weiterhin sollten die Heizleitungen regelmäßig entlüftet werden. Zudem sollten die Anlagen mit konditioniertem Wasser befüllt werden, um Ablagerungen im Heizsystem zu vermeiden. Sind die Leitungen bereits verkalkt, sollten diese entkalkt und die Anlage anschließend mit konditioniertem Wasser befüllt werden.

Bei der Optimierung des Heizbedarfs für die Gebäudebeheizung aus BHKW- oder Kesselanlagen ist auf eine ausreichende Wärmedämmung der gesamten Gebäude zu achten. In vielen Fällen geht viel Wärme durch unzureichende Dämmung verloren. Ob sich eine neue Isolierung der Betriebsgebäude oder der Rohrleitungen rechnet, ist im Einzelfall nachzuprüfen. Als wesentliche Merkmale des Wärmeschutzes sind zu nennen:

- Wärmedämmung,
- Kompakte Bauweise,
- Vermeidung von Wärmebrücken,
- Luftdichte Gebäudehülle.

Bei einer Stromüberproduktion kann eine Beheizung mittels Elektroheizung in den Wintermonaten (z. B. durch eine elektrische Wärmepumpe (vgl. Kapitel 5.6.4.3)) sinnvoll sein. Ansonsten ist die Beheizung auf das jeweilige Wärmekonzept bzw. den Anschluss an Wärmeproduzenten zu prüfen (vgl. Kapitel 5.4.2). Bei Probenehmern oder Schaltanlagen ist zu prüfen, ab welcher Temperatur die Heizungen eingeschaltet werden. Oft reicht ein niedriger Temperatursollwert aus. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass die relative Luftfeuchte nicht überschritten wird. Als Alternative bietet sich auch die Messung über Hygrostate an.

266
→
236

3.7.5 Kühlen von Gebäuden

Die Kühlung der Betriebsgebäude, Schaltschrank- und Arbeitsräume erfolgt i. d. R. durch elektrische Klimageräte. Es gibt im Wesentlichen zwei verschiedene Varianten von Raumklimageräten, bei denen elektrische Kompressoren eingesetzt werden:

- Splitgeräte (bzw. Multi-Splitgeräte),
- Kompaktgeräte (mobile Klimageräte).

Die Kühlung von verfahrenstechnischen Prozessen oder für den Abwärmeabtransport wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt und in Kapitel 5.3 näher beschrieben. Repräsentative Kennwerte über den spezifischen Energiebedarf pro m² Nutzfläche liegen für die Kühlung nicht vor. Notkühler werden in den Kapitel 2.3.4.3.1 und 3.5.4 beschrieben.

221
→
53
130

Effizienzmaßnahmen

Die einfachste Möglichkeit, den Kühlbedarf in Gebäuden zu minimieren, ist die Regulierung des Sonneneinfalls. Mittels der damit verbundenen Vermeidung oder Verminderung der direkten Sonneneinstrahlung kann die Kühllast begrenzt werden. Möglichkeiten für diesen Sonnenschutz sind vorspringende Bauteile, Dachüberstände, starre und bewegliche Sonnenschutzanlagen, Dach-/Fasadenbegrünung, Sonnenschutzgläser und Sonnenschutzfolien. Des Weiteren ist es auch möglich, die internen Wärmequellen zu reduzieren, wie z. B. durch Ausschalten von Monitoren oder die Vermeidung von Stand-by-Betrieb. Dies hat jedoch nur einen sehr geringen Anteil an der Reduzierung des Energiebedarfs der Kühlung. Weiterhin sollten an der Kühlungsanlage die Filter regelmäßig ausgewechselt und die Regelparameter für Temperatur und Luftmengen geprüft werden.



Die Kühlung von Schaltschränken oder Laborgeräten sollte nicht verringert werden. Es kann allerdings sinnvoll sein, nur die temperaturempfindlichen Bauteile zu kapseln und zu kühlen.

Bei der Anschaffung von neuen Klimageräten ist auf die höchste Energieeffizienzklasse zu achten. Die Energieeffizienz von Kühlanlagen wird durch die Nennkälteleistungszahl (EER) beschrieben. Die Nennkälteleistungszahl ist das Verhältnis zwischen erreichter Kühlungsleistung und benötigter elektrischer Leistung.

Neben den konventionellen Klimageräten ist es möglich, die benötigte Kühlung durch sogenannte „Free-cooling-Geräte“ bereitzustellen. Diese Art der Kühlung benötigt keine Wärmepumpe, denn sie nutzt Wasser und Luft aus natürlichen Wärmesenken:

- adiabatische Abluftkühlung,
- adiabatische Kühlung,
- Erdwärmetauscher,
- Luftbrunnen,
- Grundwasser.



Die Erzeugung von Kälte aus Wärme mittels der Sorptionstechnik ist eine weitere Art der Kühlung über die Nutzung überschüssiger Wärme und wird in Kapitel 5.6.2 beschrieben.

Anders als bei Heizungsanlagen wird der Energieverbrauch von Klimaanlage auf Kläranlagen zu meist nicht separat gemessen. Eine Messung dieses Energiebedarfs stellt jedoch die Grundvoraussetzung zur energetischen Beurteilung dar. Obwohl die Messung damit keine direkte Maßnahme zur Reduzierung der Kühlungsleistung ist, soll sie daher an dieser Stelle hervorgehoben werden.

3.7.6 Abluftbehandlung und Lüftungstechnik

Die Notwendigkeit einer Abluftabsaugung und Abluftbehandlung auf der Kläranlage bzw. in der Abwasserableitung (Pumpstationen, Ausmündungen von Leitungen) ergibt sich durch die Nähe zur Wohngebieten und gesetzlichen Vorgaben (wasserrechtliche Bestimmungen, immissionschutzrechtliche Bestimmungen sowie baurechtliche und zivilrechtliche Bestimmungen). Zum Teil resultiert diese Notwendigkeit auch aus den Vorschriften zum Explosionsschutz oder zum Arbeitsschutz, da in den Aerosolen auch Krankheitserreger enthalten sein können. Allgemeine Hinweise sind dem Merkblatt ATV-M 204 [ATV, 1996] zu entnehmen. Für den Kanalbereich gilt das Merkblatt ATV-DVWK-M 154 [ATV-DVWK, 2003b].

Als maßgebende Emissionsquelle erweist sich die Klärschlammbehandlung. Günstig sind hier Verfahren, die vollkommen bzw. gasdicht abgekapselt arbeiten, sodass nur eine Ablufferfassung notwendig ist. Bei der biologischen Reinigung sind Belüftungsverfahren vorzuziehen, die eine hohe Sauerstoffausnutzung realisieren und einen geringen Luftbedarf und damit einen entsprechend geringen Strippeffekt haben [Rudolph, 1981]. Auch niedrige Schlammbelastungen sind tendenziell von Vorteil. Bei der mechanischen Reinigung sind lange Aufenthaltszeiten und lange Schlammstandzeiten zu vermeiden.

Die Abluftbehandlung erfordert zunächst eine Ablufferfassung und eine Abluftabsaugung bzw. -weiterleitung durch Ventilatoren. Ob nur eine Ablufferfassung oder eine weitere Abluftbehandlung notwendig ist, ist vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Im Verlauf der Verfahrensstufen zur Abwasserreinigung nehmen die Geruchsemissionen des Abwassers deutlich ab. Daher sind auf dem Abwasserweg insbesondere die ersten Anlagenbauteile von Bedeutung, wobei je nach Anforderungen auch mehrere Verfahrensstufen eine Abluftbehandlung erfordern.

Auf der Abwasserseite können nach dem Merkblatt ATV-M 204 [ATV, 1996] hiervon insbesondere betroffen sein:

- Einlaufbauwerk,
- Rohwasserpumpwerk,
- belüfteter Sandfang,
- Belebungsbecken,
- Tropfkörper,
- alle Stellen erhöhter Turbulenz.

Weitere maßgebliche Emissionsquellen sind Stoffströme (in der Regel Reststoffe), bei denen aufgrund der Lagerungs- und Reaktionsbedingungen ein anaerober Abbau der enthaltenen organischen Stoffe stattfinden kann.

Kritische Bereiche sind:

- Rechengutlagerung,
- Sandfanggutlagerung,
- Fettfanggutlagerung,
- Eindicker,
- Schlammentwässerung und Schlamm Trocknung,
- Lagerung sonstiger Reststoffe.

Bei der Abluftweiterleitung ist darauf zu achten, dass sich in den Rohrleitungen Fette abscheiden können, die zu einer Verstopfung der Rohrleitungen führen. Die Luftgeschwindigkeit in den Kanälen sollte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, Vermeidung von Geräuschen u. a. den Wert von 15 m/s nicht übersteigen. Allgemein üblich sind Werte zwischen **3 m/s** und **10 m/s**.



Wenn Geruchsemissionen aus Kläranlagen nicht durch vorbeugende Maßnahmen gesenkt werden können, ist es erforderlich, die Abluft zu behandeln.

Auf Kläranlagen kommen die in Bild 3-22 dargestellten Abluftbehandlungsverfahren zur Anwendung und unterscheiden sich grundsätzlich in:

- biochemische Verfahren (Biofilter, Biowäscher),
- chemische-oxidative Verfahren (Verbrennung, Ozonierung, Wäscher),
- physikalische Verfahren (Adsorption).

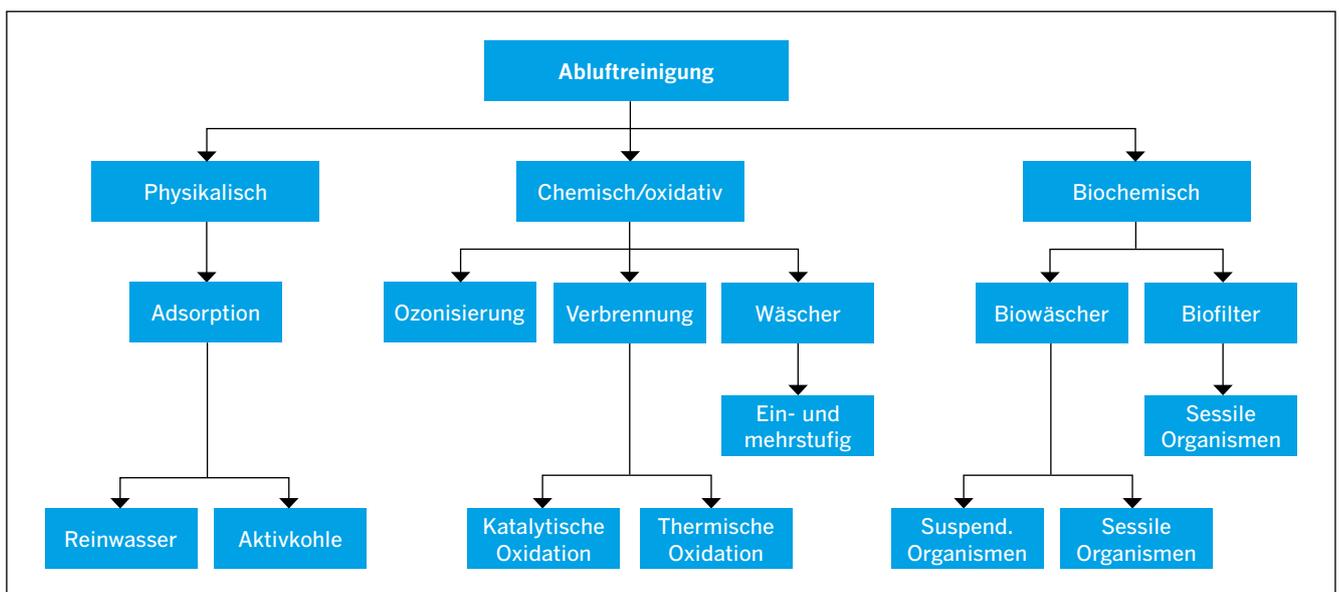


Bild 3-22 Verfahren zur Abluftbehandlung nach [Eitner, 1992]

Die Auswahl der verschiedenen Verfahren ist abhängig von der Luftmenge, den jeweiligen Inhaltsstoffen und dem Reinigungsziel. Da überwiegend alle Geruchsstoffe biologisch oxidierbar sind und auf Kläranlagen in den Belebungsbecken die nötigen Mikroorganismen ohnehin vorhanden sind, ist es möglich, die zu behandelnde Abluft in das Belebungsbecken mit einzublasen. Von dieser Möglichkeit wird jedoch abgeraten, da sich mit diesem Verfahren Probleme bezüglich der Gewährleistungen der Verdichter und der Prozessstabilität der Abluftreinigung ergeben. Auf deutschen Kläranlagen kommen vor allem die Biofilter und die Wäscher häufig zur Anwendung [ATV-M 204]. Die Vorteile des Biofilters liegen in seinem verfahrenstechnisch einfachen Einsatz und den relativ geringen Kosten. Als Nachteil ist der im Regelfall hohe Platzbedarf anzumerken. Einzelne Verfahren können bei ungünstigen Randbedingungen völlig versagen. Es ist sinnvoll, die spezifischen, für bestimmte Abluftbehandlungsverfahren geeigneten Teilströme zusammenzufassen und entsprechende Abluftbehandlungsverfahren einzusetzen.

Die biologischen Verfahren benötigen überwiegend Energie für die Luftförderung und für die Systembefeuchtung. Bei den Abluftbehandlungsanlagen wird Energie für die Waschwasserzirkulation, Luftförderung, Chemikaliendosierung etc. benötigt. Für den Energieverbrauch (Behandlung und Transport) ergeben sich nach [Eitner, 1992] folgende Richtwerte pro 1.000 m³ Abluft:



- Biofilter **2,0 – 2,5 kWh/1.000 m³/h**
- Luftwäscher **1,7 – 2,0 kWh/1.000 m³/h**
- Aktivkohle **0,8 – 0,9 kWh/1.000 m³/h**

Die mechanische Lüftung der Betriebsgebäude einer Kläranlage ohne eine weitere Behandlung der entnommenen Luft erfolgt wie bei den Abluftbehandlungen über Ventilatoren und ein Rohrleitungsnetz. Je nach Anwendungsfall gibt es Anlagen mit kontrollierter Zuluft, kontrollierter Abluft oder kombinierte Zu- und Abluftanlagen. Die Lüftung des Gebäudes wird meist auf eine feste Luftmengenförderung eingestellt, die sich durch die benötigte Luftwechselzahl ergibt. Diese beschreibt den Austausch der gesamten Luftmenge in einem Raum innerhalb einer Stunde und liegt in der Regel zwischen 4 und 6.



Effizienzmaßnahmen

Die größten Energieverbraucher bei der Lüftungstechnik und der Abluftabsaugung bzw. -weiterleitung sind die eingesetzten Ventilatoren. Deshalb sind die wesentlichen Ziele einer energetischen Optimierung, die Lüftungsmenge möglichst genau an den aktuellen Bedarf anzupassen und die Rohrleitungssysteme entsprechend auszulegen. Beim Rohrleitungssystem ist zudem auf möglichst kurze und geradlinige Netze zu achten. Die Strömungsgeschwindigkeit sollte **3 bis 10 m/s** nicht überschreiten oder unterschreiten. Zur variablen Einstellung der Luftmenge sollten keine Drosselorgane, sondern Antriebe mit Frequenzumrichter eingesetzt werden. Bei kleineren Räumen ohne ständigen Aufenthalt von Personal kann unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen auch ganz auf eine mechanische Lüftung verzichtet werden und eine freie Lüftung erfolgen. Bei Abluftanlagen sollte der Luftwechsel ausreichend groß gewählt werden (2- bis 20-facher Luftwechsel pro Stunde) und die Materialien sollten gegen Korrosion geschützt werden. Der Korrosionsschutz ist besonders bei eingekapselten Anlagenteilen (z. B. Zulaufpumpwerk) zu beachten.



Bei Zuläufen aus Abwasserpumpwerken können durch ein ständig untergetauchtes Rohrende Turbulenzen und damit die Geruchsbildung vermieden werden. Im Kanal können zusätzlich in die Schächte Aktivkohle- oder Biofilter eingehängt werden oder die Deckel mit einer Klappe oder Wassertasse verschlossen werden [Frechen, 2014].

Insgesamt ist zu untersuchen, inwieweit die Abluftbehandlung bedarfsgerecht angepasst werden kann. Es kann z. B. sinnvoll sein, anstelle des gesamten Raums Anlagenteile einzeln konzentriert abzusaugen. Dadurch wird ein hoher Volumenstrom vermieden und die Abluftbehandlungsanlage weniger belastet. Allgemein ist auch auf die Sauberkeit aller Anlagenteile zu achten und Turbulenzen bei der Abwasserweiterleitung sind zu vermeiden (Leitbleche, Einstau, Verringerung von Absturzhöhen) [Frechen, 2014]. Bei Biofiltern ist das Material an der Oberfläche von Zeit zu Zeit aufzulockern und ggfs. zu befeuchten. Bei Wäschern sollten die Füllkörper bei stärkerer Verschmutzung gereinigt werden.

Die Notwendigkeit sowie die Einsparmaßnahmen der Abluftbehandlung sind immer mit besonderer Vorsicht umzusetzen, da z. B. die Reduzierung der Abluftbehandlung zu einer erhöhten Geruchsentwicklung oder Problemen beim Ex-Schutz führen kann.

3.7.7 Informations- und Kommunikationstechnik

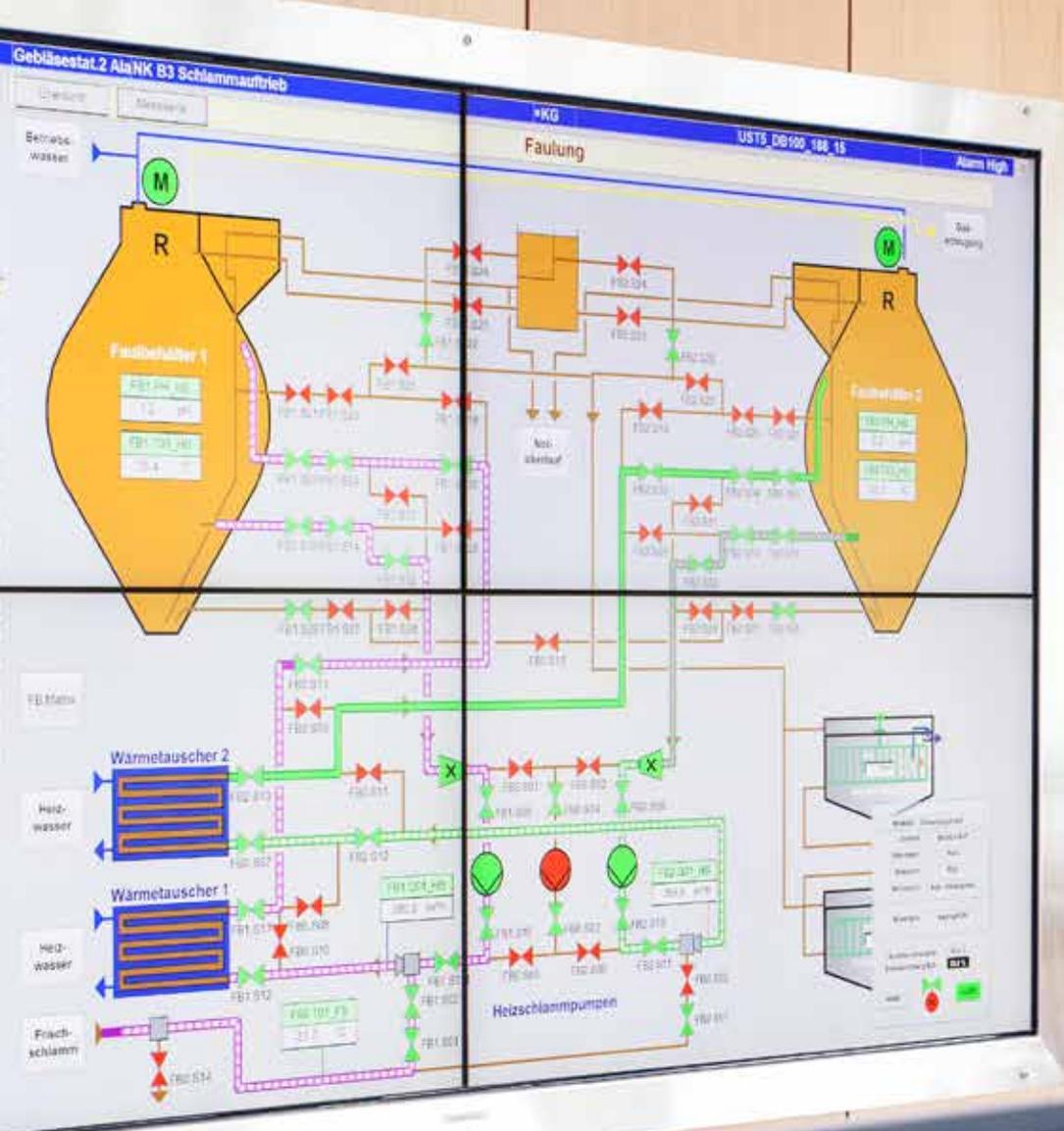
Unter der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) auf Kläranlagen und im Kanalnetz wird allgemein die gesamte EDV, auch über die Grenzen der Kläranlagen hinaus (Fernüberwachung), verstanden. In Bezug auf den Gesamtstrombedarf der Anlagen ist der Anteil der Informations- und Kommunikationstechnologie jedoch gering.

Effizienzmaßnahmen

Der Stromverbrauch der IKT entsteht in den Rechenzentren und Servern bei der unterbrechungsfreien Stromversorgung, Stromverteilung und Kühlung. Die wesentlichen Einsparungen ergeben sich durch die Optimierung der Kühlung von Serveranlagen durch moderne Mess- und Kühlungstechnik sowie die bauliche Anordnung oder den modularen Aufbau.

Weitere Einsparungen ergeben sich durch die Abkopplung von Geräten der EDV vom Strom, wenn die Geräte nicht gebraucht werden. In vielen Fällen werden die Geräte lediglich auf den Stand-by-Modus geschaltet. Neuere Geräte verbrauchen im Stand-by-Modus zwar nicht mehr so viel Energie wie früher, trotzdem ist hier ein geringes Einsparpotenzial vorhanden.





The secondary monitor displays a data table with multiple columns and rows of numerical values. The table appears to be a log or a data record, with columns for various parameters and their corresponding values. The data is organized in a grid format, typical of a process control interface.



4 Effizienzsteigerung bei der Anlagen- und EMSR-Technik

4 Effizienzsteigerung bei der Anlagen- und EMSR-Technik

4.1
Elektrisch
angetriebene
Aggregate

4.2
Pumpen &
Förderaggregate

4.3
Druckluft-
erzeuger

4.4
Aggregate zur
Durchmischung

4.5
Aggregate für die
Eindickung &
Entwässerung

4.6
Prozessleit- &
EMSR-Technik

4.1 Elektrisch angetriebene Aggregate

4.1 Elektrisch angetriebene Aggregate

4.1.1
Allgemeine
Hinweise

4.1.2
Grundlagen der Energie-
und Elektrotechnik

4.1.3
Der Elektromotor

4.1.4
Das mechanische
Getriebe

4.1.1 Allgemeine Hinweise

Der Stromverbrauch von Kläranlagen verteilt sich nicht gleichmäßig auf alle elektrischen Antriebe, sondern ein großer Anteil entfällt auf eine kleine Anzahl energieintensiver Aggregate. Die technischen Fortschritte in den Bereichen Elektro- und Maschinentechnik und deren Zusammenführung zur Mechatronik bilden sich gerade bei den energetisch relevanten Aggregaten ab. Durch den Einsatz von Kompaktaggregaten, bei denen Elektromotor, Getriebe und Arbeitsmaschine eine aufeinander abgestimmte Einheit mit integrierter elektronischer Steuerung bilden (Bild 4-1), kann die energetische Effizienz deutlich gesteigert werden.

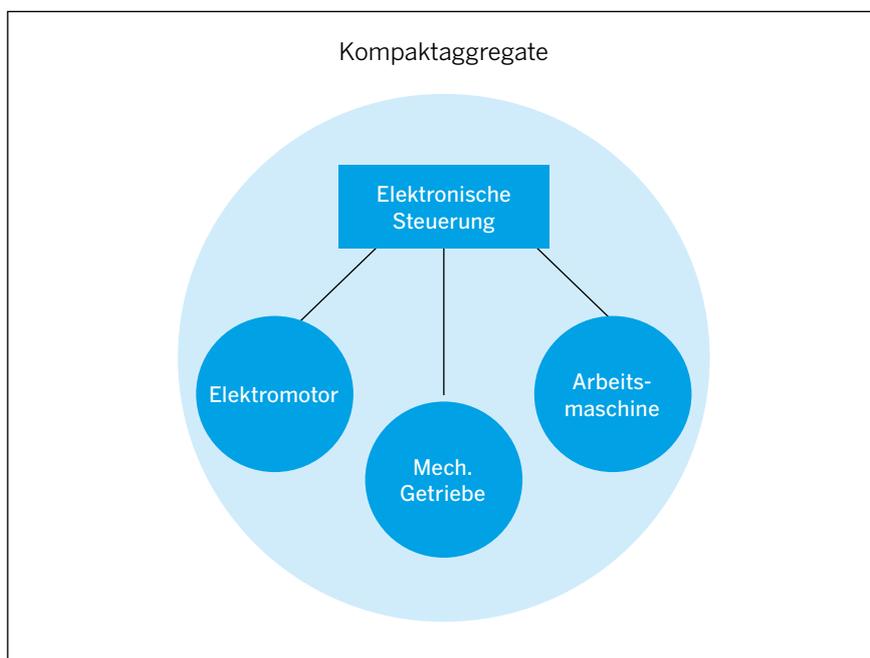


Bild 4-1 Wesentliche Bestandteile eines Kompaktaggregats



Auf einer Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 100.000 E sind in grober Näherung etwa 500 elektrische Antriebe im Einsatz. Davon sind aus energetischer Sicht rd. 70–100 Antriebe relevant. Es handelt sich dabei um solche Aggregate, die einerseits für den Betrieb der Kläranlage wichtige, vorzugsweise verfahrenstechnische Aufgaben erfüllen und einen am Gesamtstromverbrauch relevanten Anteil ausmachen (vgl. Kapitel 2.3.4.3.1). Das sind vor allem Pumpen, Verdichter und Rührwerke. Alle anderen Antriebe erfüllen nur Hilfsaufgaben und weisen einen im Verhältnis geringen jährlichen Stromverbrauch auf. Bei dieser Einteilung wird bewusst nicht nach der Antriebsleistung unterschieden, weil im Dauerbetrieb laufende Aggregate mit kleiner Leistung (< 3 kW) durchaus einen ähnlich hohen Jahresverbrauch erreichen wie beispielsweise große Pumpen mit einer Leistung von 30 kW, die nur eine Betriebsdauer von 1.000 Stunden im Jahr oder weniger erreichen. Die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung zeigt sich bei einem leistungsstarken Hochwasserpumpwerk, welches im Einsatzfall innerhalb weniger Tage einen sehr hohen Verbrauch verursacht. Außerdem kann eine hohe Bezugsleistung, auch wenn sie nur für kurze Zeit (Spitzenlast vgl. Kapitel Lastmanagement und Interaktion mit dem Stromnetz) beansprucht wird, zu hohen Bereitstellungskosten führen, wenn dafür keine besonderen vertraglichen Vereinbarungen (z. B. Reserveleistung) getroffen sind. Man darf auf der anderen Seite nicht übersehen, dass der Verbrauch in der übrigen Zeit durch den Bereitschaftsstatus (Trafoverluste, Steuerung, Warmhaltung etc.) nicht vernachlässigbar ist. Die Notwendigkeit einer energetischen Betrachtung ergibt sich durch eine Gegenüberstellung des durch die Einschaltdauer und die Leistungsaufnahme verursachten Verbrauchs und der Kosten für energiesparende Maßnahmen einschließlich des Aufwands für die Planung. Hinweise zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit finden sich im Arbeitsblatt DWA-A 216. Der Schwellenwert ist ebenso von der Anlagengröße und den Energiepreisen abhängig. Kleinere Einsparungen können ebenfalls interessant sein, wenn die Umsetzung einer Maßnahme keinen Planungsaufwand erfordert (Austausch von Leuchtmitteln etc.) und sich möglicherweise dann, aufgrund der Anzahl gleichartiger Betriebsmittel, sogar eine große Einsparung ergibt.

Bezogen auf den Kläranlagenbetrieb spielen die in großer Zahl vorhandenen elektrischen Stellantriebe aufgrund ihrer geringen Einschaltdauer bei einer Leistung von ca. 1 kW energetisch nur eine untergeordnete Rolle. Hingegen können im Dauerbetrieb laufende elektrische Anlagen mit Kleinsteuerungen, z. B. für den Betrieb von Räubern oder Messstationen, in Verbindung mit den zum Betrieb im Außenbereich erforderlichen Heiz- und Kühlelementen einen höheren Jahresverbrauch verursachen. Bei Verfahrensstufen mit einem zeitlich überwiegenden Stand-by-Betrieb (Rechen, Sandfang) ist dieser Effekt besonders auffällig.

Die nachfolgende Betrachtung bezieht sich auf eine reale Kläranlage mit einer Ausbaugröße von ca. 100.000 E. Nach den Ergebnissen einer durchgeführten Energieanalyse sind ca. 90 Aggregate im Leistungsbereich von 0,9–110 kW energetisch relevant. Etwa 20 Aggregate haben eine Nennleistung größer 20 kW, das sind vor allem die Gebläse der Belebung und große Pumpen des Zulauf- und Zwischenpumpwerks. Von den verbleibenden 70 Aggregaten entfällt eine große Anzahl im kleinen Leistungsbereich bis 3 kW auf Rührwerke in der Belebung und in der Schlammbehandlung. Im mittleren Leistungsbereich sind im Wesentlichen die Pumpen für die Rückführungen im Abwasserreinigungsprozess und den Transport der Schlämme im Bereich der Schlammbehandlung zu finden.

Die Aufteilung des Gesamtverbrauchs auf die einzelnen Verfahrensstufen in Bild 4-2 zeigt, dass der größte Teil auf die Belebung (Belüftung, Umwälzung, Rezirkulation) und die beiden Pumpwerke (Zulauf- und Zwischenpumpwerk) entfällt. Der ungewöhnlich hohe Anteil für die Infrastruktur ist in diesem Fall auf eine ältere und zu groß dimensionierte Betriebswasserpumpe und eine durch eine verfahrenstechnische Umstellung vermeidbare Abluftanlage zurückzuführen. Bezogen auf den insgesamt hohen Verbrauch liegt der Anteil für die biologische Stufe allerdings noch unter 50 % und fällt damit kleiner aus, als dies nach üblichen statistischen Auswertungen zu erwarten wäre.

Im Vergleich mit dem Zustand nach einer energetischen Optimierung (Bild 4-2) mit nun deutlich reduziertem Verbrauch bei der Infrastruktur und beim Zulaufpumpwerk ergeben sich anteilige Verbrauchswerte in den bekannten Relationen. Dennoch bleibt der Anteil der biologischen Stufe unter 50 %. Das ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Fall schon zuvor die Verdichter, die Luftverteilung und die Belüfter erneuert wurden. Da durch diese Maßnahmen gerade bei der Belüftung große Einsparungen erzielt werden können, fallen die übrigen Verbraucher umso mehr ins Gewicht.

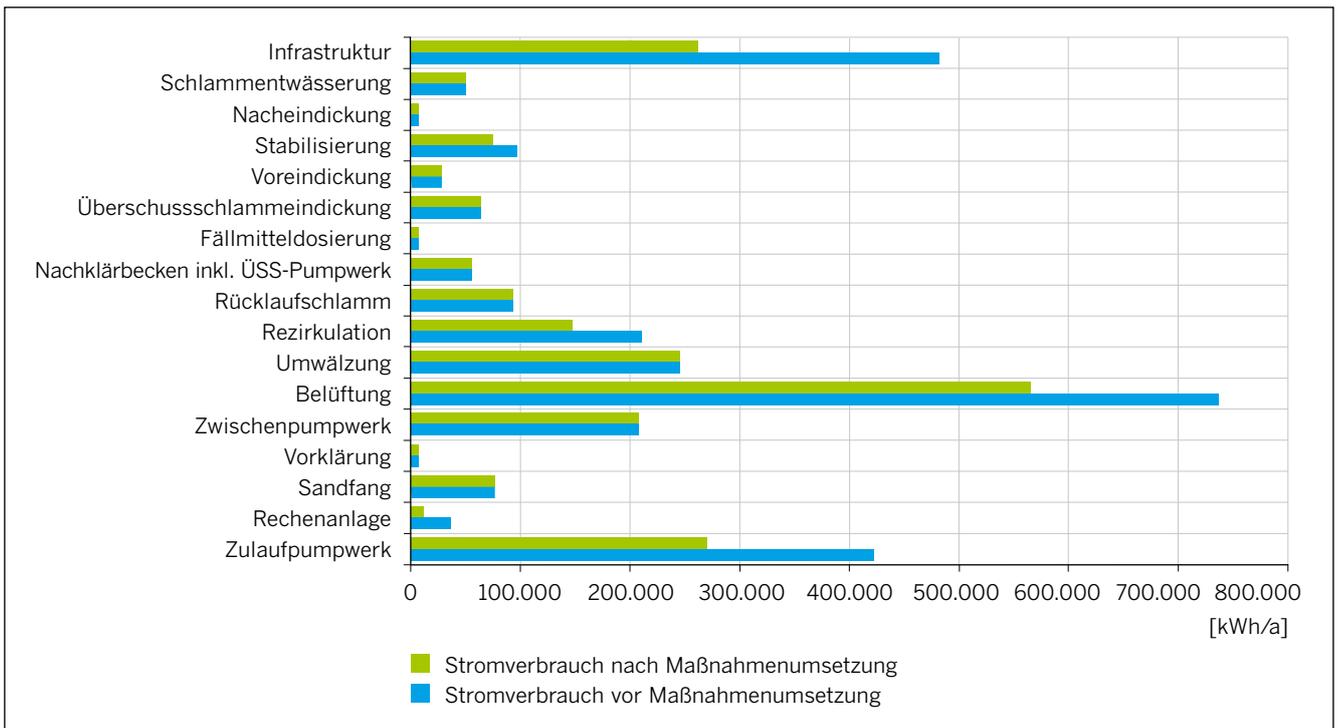


Bild 4-2 Stromverbrauch einzelner Verfahrensstufen (blau: vor Umsetzung der Maßnahme, grün: nach Umsetzung der Maßnahme)

4.1.2 Grundlagen der Energie- und Elektrotechnik

Ordnungsgemäße Planung, Betrieb und Instandhaltung von Energieverbrauchern sind eine wesentliche Voraussetzung für die Funktion abwassertechnischer Anlagen. Die Bewältigung der sich daraus ergebenden Aufgaben gelingt nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mehrerer Fachleute aus den Fachgebieten Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, Maschinen- und Anlagenbau, Bauwesen sowie Elektro- und Energietechnik. Die sich dadurch ergebenden Schnittstellen müssen durch eine untereinander abgestimmte Festlegung von Begriffen, Daten und Symbolen definiert werden. Das dazu notwendige Grundlagenwissen ist nachfolgend zusammengestellt, wobei der Schwerpunkt auf der interdisziplinären Betrachtung der Antriebstechnik liegt. Grundkenntnisse in den einzelnen Fachgebieten werden als bekannt vorausgesetzt; hierzu wird auf die Standardliteratur [Böhm, 2009, 2014, Teigelkoetter, 2013] und die technischen Regelwerke im Bereich der Energietechnik und Energiewirtschaft verwiesen (VDI 3985 [VDI, 2004], VDI 4002 [VDI, 2011b], VDI 4660 [VDI, 2005], VDI 4661 [VDI, 2014a]). Darauf aufbauend können durch eine Kombination von energetischem und abwassertechnischem Spezial- und Erfahrungswissen anspruchsvolle Ziele im Sinne eines energetisch optimierten und zugleich prozessstabilen Kläranlagenbetriebs erreicht werden.

Die technisch-wirtschaftlichen Zusammenhänge sind in Bild 4-3 am Beispiel eines Verdichters für die Belüftung als typische Antriebseinheit einer Kläranlage dargestellt. Grundsätzlich dient ein solcher Antriebsstrang zur Umwandlung von elektrischer Energie in die für den jeweiligen Prozess benötigte Energieart, in dem gewählten Beispiel Druckluft zur Sauerstoffversorgung der Belebung. Der dazu eingesetzte Verdichter (Arbeitsmaschine) wird von einem Elektromotor angetrieben. Die Übersetzung der unterschiedlichen Drehzahlbereiche erfolgt mit einem mechanischen Getriebe. Mit einem Frequenzumformer kann die Drehzahl des Elektromotors und damit die Leistung des Verdichters (Luftmenge, Druck) in dem festgelegten Bereich stufenlos an die schwankende Belastung angepasst werden.

Die bei der Planung und beim Betrieb relevanten Energiearten, Fachgebiete und Qualifikationen sind im rechten Teil des Bildes dargestellt. Aus der übergeordneten Sicht ist eine Zusammenarbeit von Spezialisten der Abwasser- und der Energietechnik erforderlich, um das Ziel eines energie-

effizienten Betriebs zu erreichen. Der Energiespezialist deckt die Schnittstelle zwischen Elektrotechnik und Maschinenbau (Mechatronik) ab, und der Abwasserspezialist stimmt die Eigenschaften der Arbeitsmaschine auf die verfahrenstechnischen Anforderungen ab.

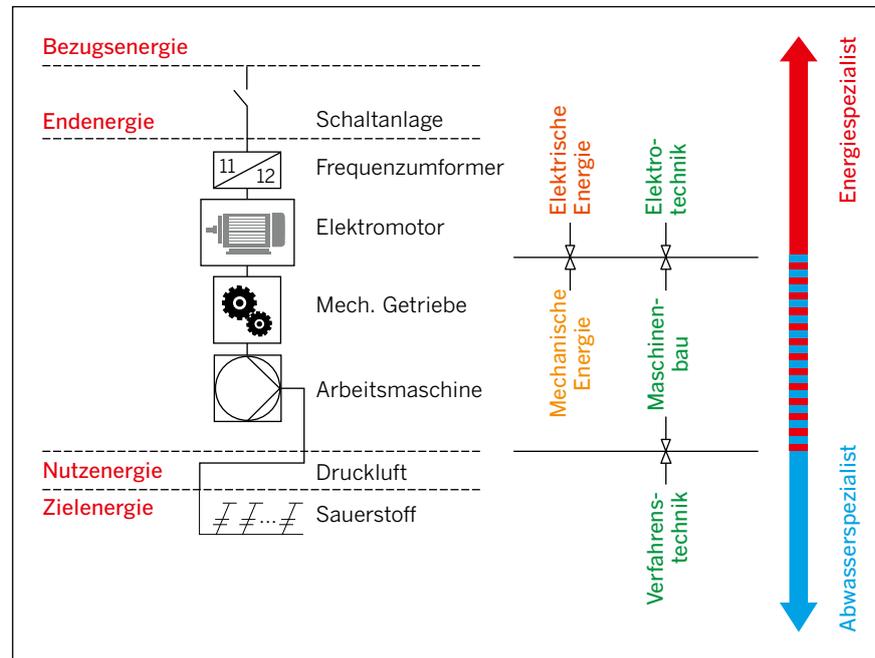


Bild 4-3 Technische, energetische und fachliche Schnittstellen am Beispiel eines typischen Antriebsstrangs (hier: Verdichter für die Belüftung)

In diesem Sinne wird Bezugsenergie aus dem Netz oder aus Eigenerzeugung auf einer elektrischen Verteilungsebene bereitgestellt. Die dem Antriebsstrang zugeführte Endenergie wird dann mit dem Elektromotor und der Arbeitsmaschine in Nutzenergie (Druckluft) umgewandelt. Diese wird dem verfahrenstechnischen Prozess (Belebung) zugeführt und dort in die erforderliche Zielenergie (Sauerstoff) umgewandelt.

Die Effizienz der beschriebenen Energieumwandlung lässt sich durch die Wirkungsgrade der Einzelkomponenten bzw. der Umwandlungsstufen beschreiben. Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade.

Formel 4-1 Berechnung des Gesamtwirkungsgrades bei der energetischen Umwandlung

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{el,Uf}} \cdot \eta_{\text{M}} \cdot \eta_{\text{G}} \cdot \eta_{\text{AM}}$$

η_{ges} = Gesamtwirkungsgrad [-]

$\eta_{\text{el,Uf}}$ = Elektrischer Wirkungsgrad des Umformers [-]

η_{M} = Wirkungsgrad des Motors [-]

η_{G} = Wirkungsgrad des Getriebes [-]

η_{AM} = Wirkungsgrad der Arbeitsmaschine [-]

Der Wertebereich eines Wirkungsgrads liegt zwischen 0 und 100 % bzw. als Zahlenwert zwischen 0 und 1. Bei einer Multiplikation kann das Ergebnis nie größer werden als der kleinste Einzelwirkungsgrad bzw. das schwächste Glied in der Kette. Bei einer Optimierung ist daher sorgfältig zu prüfen, welche Wirkung eine Einzelmaßnahme auf die gesamte Kette bzw. den Antriebsstrang hat. Dies soll anhand von drei Beispielen verdeutlicht werden:



■ Sandfanggebläse

Zur Anpassung der Luftmenge eines Sandfanggebläses kann es sinnvoller sein, die Übersetzung des Keilriemengetriebes zu ändern und auf einen Frequenzumformer zu verzichten. Zu den im niedrigen Leistungsbereich nicht unerheblichen zusätzlichen Verlusten durch den Einsatz des Umrichters kommen weitere Einbußen durch den Betrieb des Motors bei kleineren

Drehzahlen (Kühlungsprobleme, Fremdlüfter) hinzu. Währenddessen verursacht eine Änderung des Übersetzungsverhältnisses durch Anpassung des Keilriemengetriebes kaum zusätzliche Verluste. Der sich ggf. verschlechternde Wirkungsgrad des Verdichters wirkt sich in beiden Fällen gleich aus.

■ **Pumpe**

Pumpen laufen in der Regel nur in einem Bereich von $\pm 15\%$ um den Auslegungspunkt (Bestpunkt) energetisch effizient. Bei größeren Abweichungen fällt der hydraulische Wirkungsgrad deutlich ab. Eine häufig vorzufindende Auslegung mit 20 % Leistungsreserve ist daher nicht sinnvoll (vgl. Kapitel 4.2.3). Insbesondere sollte ein Frequenzumformer nicht in erster Linie dazu verwendet werden, diese Überdimensionierung zu kompensieren, weil dann zu den hydraulischen Verlusten die Verluste des Umformers und des Motors durch den Teillastbetrieb hinzukommen.

■ **Einsatz energieeffizienter Motoren**

Der Einsatz hocheffizienter Motoren ist nur dort sinnvoll, wo deren Wirkung nicht durch andere besonders schlechte Maschinen- oder Getriebewirkungsgrade aufgehoben wird. Häufig erweist sich in solchen Fällen der Austausch der betreffenden Pumpe oder des Verdichters als insgesamt wirtschaftlicher.

Die durch den Gesamtwirkungsgrad beschriebene energetische Effizienz ist vor dem Hintergrund hoher spezifischer Energiekosten ein wesentliches Kriterium für die Auslegung eines Antriebsstrangs und für die Auswahl der Einzelkomponenten. Für den Kläranlagenbetrieb sind weiterhin Robustheit und Zuverlässigkeit wichtige Argumente für die Gestaltung von Antriebssystemen.

Bisherige Vorgehensweise bei der Aggregateauslegung

Die Auslegung von Aggregaten wurde ursprünglich als eine vorwiegend maschinentechnische Aufgabenstellung gesehen. Insofern beschränkte sich die konstruktive Lösung auf die Betrachtung der Maschine und allenfalls noch des Getriebes. Die Auslegung des elektrischen Antriebs wurde als von der Maschinentechnik abgetrennte Aufgabenstellung der Elektrotechnik betrachtet. Diese wenig aufeinander abstimmbare Bauweise erwies sich vor allem unter energetischen Gesichtspunkten als limitierend für eine weitere Optimierung:

- Bei Verdichtern wurde zur Vermeidung einer Überlastung des elektrischen Antriebsmotors ein mechanisches Sicherheitsventil auf der Druckseite eingebaut. Dies führte zu teilweise erheblich größeren Motoren, als sie für den gewöhnlichen Betriebsdruck notwendig waren.
- Bei Pumpen und Umwälzaggregaten wurden wegen der getrennten Bauweise lange Zeit trocken aufgestellte Aggregate bevorzugt. Bei Rührwerken war man deshalb auf Aggregate mit vertikaler Strömungsrichtung beschränkt.

Der Einsatz hocheffizienter Elektromotoren muss mit Blick auf den gesamten Antriebsstrang bewertet werden. In den meisten Einsatzfällen ist der Wirkungsgrad der Arbeitsmaschine dominant, deshalb sollte die energetische Optimierung an diesem Punkt ansetzen. Ein hocheffizienter Elektromotor sollte dann auf den energieoptimierten Leistungsbereich der Arbeitsmaschine abgestimmt sein.

Neuer Ansatz bei der Aggregateauslegung – hocheffiziente Kompaktaggregate

Durch den Einsatz hocheffizienter Kompaktaggregate, bei denen sämtliche zur Erfüllung der anlagentechnischen Aufgabenstellung erforderlichen mechanischen und elektrischen Komponenten einschließlich der Steuerung als eine integrierte und aufeinander abgestimmte Einheit konstruiert werden, lassen sich deutliche Verbesserungen bei der energetischen Effizienz erzielen.

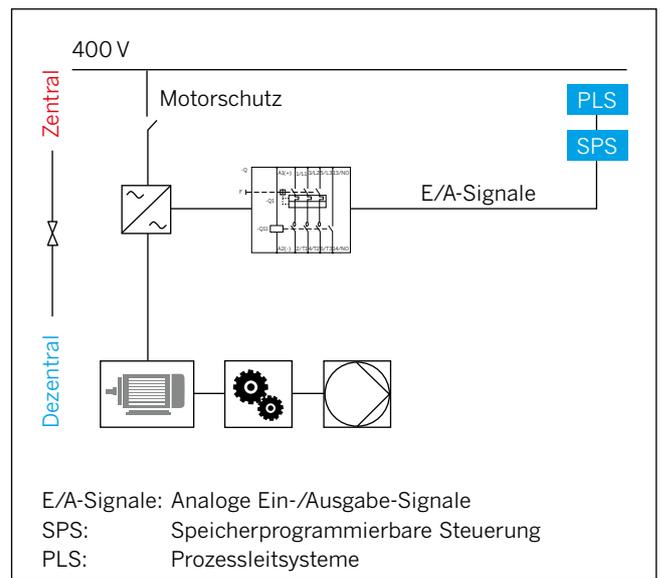
Der Trend zur integrierten Bauweise wurde vor etwa 30 Jahren durch den Einsatz der Mikroelektronik ausgelöst und hat sich bis heute kontinuierlich fortgesetzt. Der Fokus lag in den ersten Jahren auf den Stellantrieben, weil sich durch die Zusammenfassung der Schaltelemente vor Ort große Einsparungen bei der Verkabelung und Elektroinstallation ergaben. Zudem konnte durch den Einsatz der Buskommunikation anstelle der konventionellen Signalverkabelung der Aufwand für die Datenverarbeitung reduziert werden.



Nachdem sich diese Technik in der Praxis etabliert und langfristig bewährt hat, überträgt sich diese Entwicklung auch auf die größeren und energetisch relevanten Aggregate. In Bild 4-4 sind die drei wesentlichen Entwicklungsstufen dargestellt:

1. Getrennte Auslegung und Bauweise

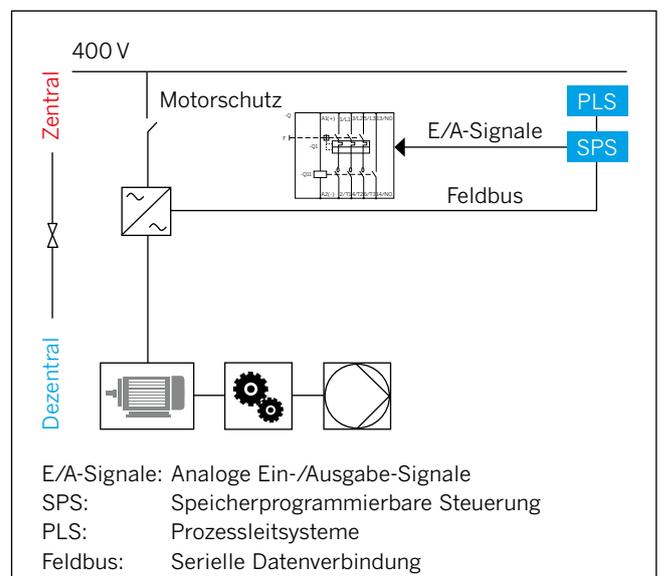
Ursprünglich wurden alle Komponenten getrennt geplant, was wegen der gegenseitigen Absicherung und Gewährleistung zu hohen Sicherheiten und zur Überdimensionierung führt.



2. Einsatz von Frequenzumformern

Durch den Einsatz von Frequenzumformern und einer Feldbuskommunikation konnte die Anpassung der Aggregateleistung an die vom Prozess geforderte Nutzenergie erheblich verbessert werden.

In dieser Entwicklungsstufe sind jedoch noch alle wesentlichen Komponenten einzeln mechanisch oder elektrisch gekoppelt; die Hersteller sind somit immer noch an die üblichen Abstufungen von Motoren, Getrieben und weiteren Hilfsaggregaten gebunden.



3. Kompaktaggregate

Erst in dieser letzten Entwicklungsstufe verschmelzen die Einzelaufgaben gewissermaßen zu einem Gesamtsystem, bei dem die bisher gewohnten Einzelkomponenten nicht mehr isoliert erkennbar sind. Markante Beispiele sind getauchte, elektronisch drehzahlverstellbare Getriebemotoren für Umwälzaggregate oder magnetgelagerte Antriebe von Turboverdichtern. Hier ist aufgrund der hohen technischen Komplexität die gesamte Maschinensteuerung im Aggregat integriert. Der elektrische Anschluss wird vereinfacht, weil die gesamte Schutztechnik und die Motorsteuerung Bestandteil des Aggregates sind. In der Schaltanlage muss lediglich noch ein Kabelschutz vorgesehen werden.

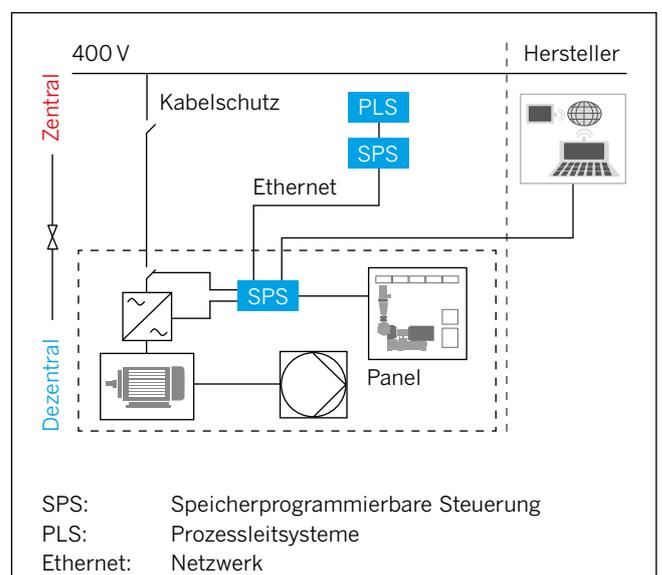


Bild 4-4 Entwicklungsstufen bei hocheffizienten Aggregaten

Bei Kompaktaggregaten befindet sich in der Regel am Aggregat ein kleiner Bildschirm (Panel) für die lokale Bedienung. Der Datenaustausch mit dem Automatisierungs- bzw. Leitsystem der Anlage erfolgt über eine Busverbindung (serielle Datenübertragung). Häufig verfügen die Aggregate sogar über eine Zugriffsmöglichkeit per Internet, damit der Hersteller Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben aus der Ferne durchführen oder diagnostizieren und Personaleinsätze vor Ort besser vorbereiten kann. Eine diskontinuierliche Zugriffsmöglichkeit, also die Freischaltung nur für Wartungs- und/oder Instandsetzungsarbeiten, hat sich in der Praxis bewährt. Die Regeln der IT-Sicherheit müssen in jedem Fall beachtet werden (vgl. Kapitel 4.6.6).

Derartige Aggregate werden vom Hersteller sehr genau auf die Aufgabenstellung abgestimmt und erreichen folglich eine sehr hohe energetische Effizienz. Gleichwohl kann an den ausgelieferten Aggregaten kaum noch – wie in früheren Zeiten – eine Anpassung (Keilriemenübersetzung o. Ä.) vorgenommen werden. Umso höher sind deshalb die planerischen Anforderungen an eine exakte Auslegung. Das betrifft die Einzelaggregate, vor allem aber die Zusammenstellung einer Aggregategruppe unter Berücksichtigung der an den Prozess angepassten Staffelung und einer ausreichenden Überdeckung in den Umschaltpunkten.

Gegenüber konventionellen Aggregaten lässt sich die energetische Effizienz unter sonst gleichen Bedingungen um ca. **20–30 %** steigern.

Die Betrachtung der Energieeffizienz wird sich zukünftig weniger mit den Einzelkomponenten befassen, sondern mit dem jeweiligen Gesamtsystem zur Erfüllung einer bestimmten Aufgabe. In der Norm DIN EN 50.598 [DIN, 2015a] werden entsprechende Auslegungshinweise und Prüfbedingungen für Antriebssysteme unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz und unter ökologischen Aspekten festgelegt, welche unter Betriebsbedingungen erreicht werden müssen.

4.1.3 Der Elektromotor

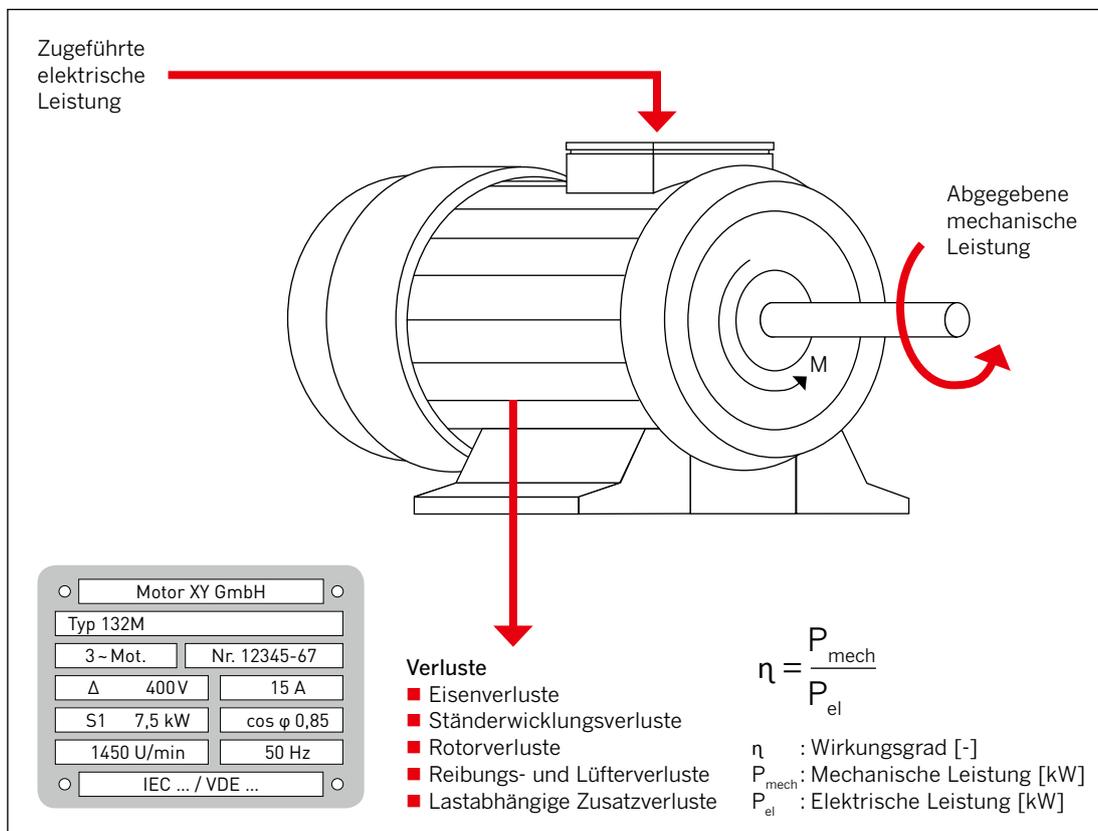


Bild 4-5 Energiebilanz eines Elektromotors, Verluste, Wirkungsgrad, Mustertypenschild nach [Volz, 2010]



C

2

3

4

5

Literatur

Mit einem elektrischen Antriebsmotor wird die zugeführte elektrische Energie in mechanische Energie umgesetzt, die an der rotierenden Welle abgegeben wird (Bild 4-5). Die Nennleistung eines Motors ist die an der Welle bereitgestellte mechanische Nutzleistung für den Auslegungsfall. Die aufgenommene elektrische Leistung ist höher, weil bei der Energieumwandlung unterschiedliche Verluste auftreten, die in der Summe durch den Wirkungsgrad beschrieben werden. Die wesentlichen technischen Angaben (Betriebsspannung, Strom, Leistung, Drehzahl, Frequenz, etc.) müssen vom Hersteller auf dem Typenschild angegeben werden. Im Rahmen einer Energieanalyse sollten als weiterer Schritt die Angaben auf dem Typenschild mit den Auslegungsdaten verglichen werden.

Bei der Leistungsversorgung ist zu unterscheiden zwischen einem Direktantrieb mit unmittelbarem Anschluss an das Drehstromnetz und einem drehzahlverstellbaren Antrieb mittels Frequenzumformer. Darüber hinaus gibt es noch Sonderschaltungen für spezielle Aufgaben (Polumschaltung für zwei Drehzahlen, Stern-Dreieck-Schaltung zum Anlauf großer Motoren etc.).

Bei einem Direktantrieb lässt sich die aufgenommene Leistung aus den elektrischen Grundgrößen nach folgender Gleichung berechnen:

Formel 4-2 Leistung eines Elektromotors (Direktantrieb)

$$P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\varphi)$$

P = Elektrische Leistungsaufnahme [kW]
 U = Spannung [V]
 I = Strom [A]
 $\cos(\varphi)$ = Leistungsfaktor [-]

Die zur Durchführung von Leistungsmessungen üblicherweise eingesetzten Energieanalysatoren führen diese Berechnung intern durch und zeigen die Leistung unmittelbar an. Die angegebene Gleichung gilt uneingeschränkt allerdings nur für Direktantriebe.

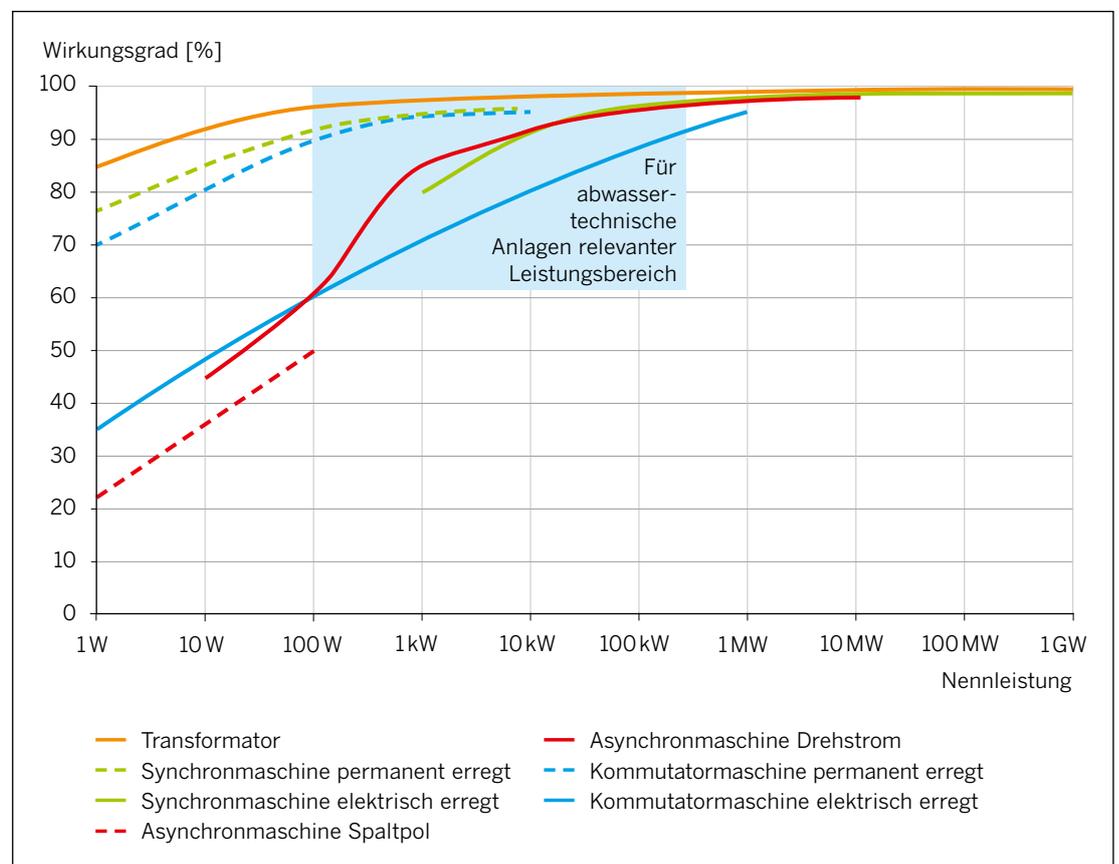


Bild 4-6 Leistungsbereiche und Wirkungsgrade unterschiedlicher Elektromotoren nach [energie.ch, 2015]

Elektrogeräte sind in der Regel für eine bestimmte Spannung (230 V oder 400 V) ausgelegt. Die Betreiber der Stromnetze sind dafür verantwortlich, dass diese Werte in einer festgelegten Bandbreite eingehalten werden. Viele Elektrogeräte funktionieren aber nur dann ordnungsgemäß, wenn die bereitgestellte Wechselspannung einen sinusförmigen Verlauf hat. Solange die Stromversorgung allein aus großen Kraftwerken mit mechanischen Generatoren erfolgte, war diese Forderung aufgrund der physikalischen Voraussetzung erfüllt. Durch den vermehrten Einsatz dezentraler Erzeugungsanlagen und durch nicht rückwirkungsfrei arbeitende elektronische Verbraucher (Frequenzumrichter) wird dieser sinusförmige Verlauf gestört. Es kommt zu Verzerrungen des Kurvenverlaufs zum Nachteil der Verbraucher, die bei einer nicht sinusförmigen Versorgung zu Ausfällen oder Funktionsstörungen neigen.

Die Verschlechterung der Netzqualität [DIN, 2011b, Höck o. J.] durch den vermehrten Einsatz von Komponenten der Leistungselektronik (Frequenzumformer für Antriebe, Schaltnetzteile für IT-Komponenten, Vorschaltgeräte für Leuchtstoffröhren, Netzteile für LED-Beleuchtung) hat immer häufiger zur Folge, dass einerseits die von den Stromnetzbetreibern vorgegebenen Grenzwerte für die Netzqualität nach EN 50160 [DIN, 2011b] nicht mehr eingehalten werden. Andererseits häufen sich Schäden und Ausfälle von Einzelgeräten. Auf der Verbraucherseite müssen deshalb entweder an den Einzelgeräten Maßnahmen zur Verminderung von Störeinflüssen eingefordert werden oder es müssen in den elektrischen Verteilungen zentrale Netzfilter eingesetzt werden.

Von den unterschiedlichen Bauformen der Elektromotoren (Tabelle 4-1) hat sich aufgrund der Anforderungen an die Robustheit und Zuverlässigkeit und vor allem wegen des nahezu wartungsfreien Betriebs der Asynchronmotor durchgesetzt. Im niedrigen Leistungsbereich (bis etwa 10 kW) kommen allerdings immer häufiger permanent erregte Synchronmotoren zum Einsatz, insbesondere wegen des höheren Wirkungsgrades (Bild 4-6). Gleichstrommotoren, auch als Kommutatormaschinen bezeichnet, kommen im Abwasserbereich nur selten zum Einsatz, weil für den relevanten Leistungsbereich drehzahlgeregelte Asynchronmotoren technisch-wirtschaftlich günstiger sind. Der Wirkungsgrad geschalteter Reluktanzmotoren hat einen ähnlichen Verlauf wie der von Asynchronmotoren, liegt allerdings etwa **1 – 3 %** höher. Für die Auswahl von Elektromotoren aufgrund der energetischen Effizienz wurde ein international einheitliches System (IEC 60034, IE-Code [IEC, 2013]) mit einer nach oben offenen Skalierung von Wirkungsgradklassen eingeführt (Bild 4-7).

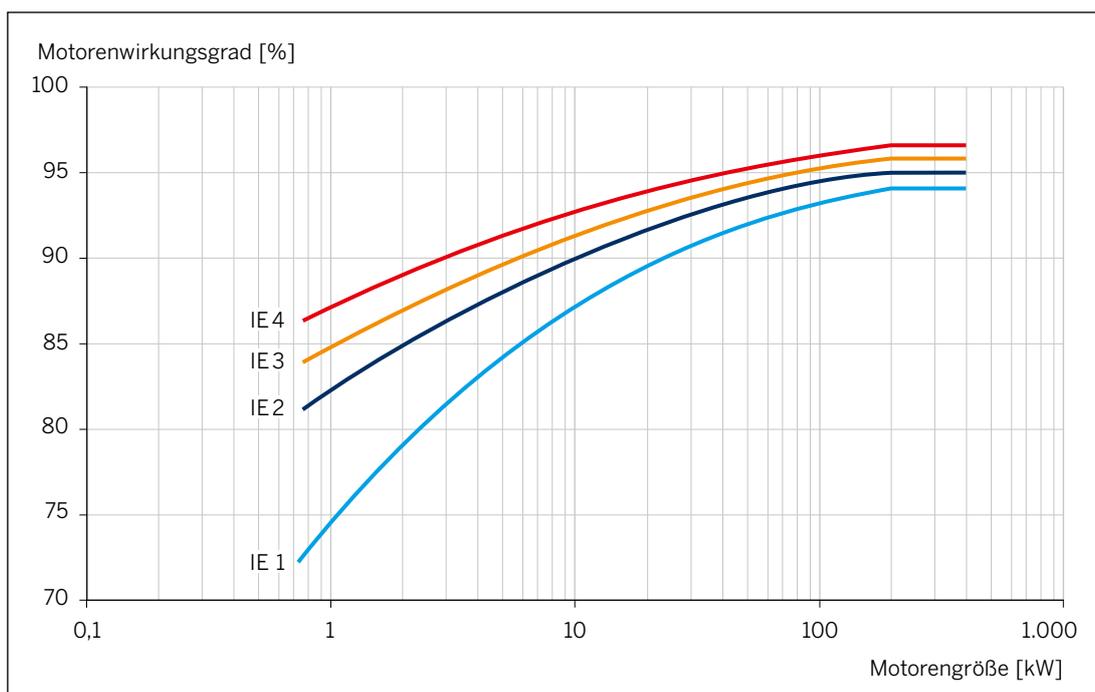


Bild 4-7 Wirkungsgradklassen nach IE-Code für Elektromotoren (hier 4-polig, 50 Hz) nach [Nowak, 2014]

Tabelle 4-1 Bauarten von Elektromotoren mit Auswahlkriterien für den Einsatz (relative Bewertung)

Antriebsystem (Motor und Regelgerät)	Permanent erregter Gleichstrommotor	Permanent erregter Synchronmotor	Standardisierter Asynchronmotor	Geschalteter Reluktanzmotor
Leistungsbereich	1W bis 1 kW	1 W bis 10 kW	1,5 kW bis 630 kW	10 W bis 300 kW
Kosten Motor	Teuer	Teuer	Günstig	Günstig
Kosten Elektronik	Günstig bis Mittel	Mittel bis teuer	Günstig bis mittel	Mittel
Robustheit	Mittel	Gut	Sehr gut	Sehr gut
Regelgüte	Sehr gut	Gut	Mittel bis gut	Gut
Standardisierung	Gering	Gering	Hoch	Keine
Wirkungsgrad	Schlecht bis gut	Mittel bis sehr gut	Schlecht bis gut	Mittel bis gut

Permanent erregte Gleichstrommotoren besitzen einen Stator aus einem Permanentmagneten, der das für den Betrieb erforderliche Magnetfeld erzeugt. Sie eignen sich insbesondere für Anwendungen mit kleiner Leistung (Lüfter, Ventilatoren).

Beim permanent erregten Synchronmotor wird das Magnetfeld des Stators durch einen Elektromagneten erzeugt. Je nach Verschaltung der Wicklungen im Motor unterscheidet man dann Nebenschluss- und Reihenschlussmotoren.

Der Asynchronmotor besitzt einen sog. passiven Läufer (Kurzschlussläufer). Die dadurch bedingte einfache und robuste Bauweise hat dazu geführt, dass der Anteil bei 60–70 % der weltweit eingesetzten elektrischen Antriebe liegt.

Das Arbeitsprinzip von Reluktanzmotoren basiert auf einem von den bisher aufgezählten Motoren abweichenden magnetischen Grundprinzip. Kennzeichnend sind der gegenüber einem Asynchronmotor verbesserte Wirkungsgrad und die höhere Robustheit bei Überlastung.

4.1.4 Das mechanische Getriebe

4.1.4 Das mechanische Getriebe

4.1.4.1

Abgestimmte Auslegung eines Antriebsstrangs

4.1.4.2

Anpassung der Nutzenergie

Die Mehrzahl der im Abwasserbereich eingesetzten Arbeitsmaschinen erfordert niedrige Drehzahlen, einerseits, weil das i. d. R. zu einem geringeren Verschleiß führt und andererseits, weil die Aufgabenstellung eine schonende Behandlung der jeweiligen Medien (Belebtschlamm mit Flockenstruktur) erfordert. Übliche Drehzahlen von Arbeitsmaschinen liegen für großflügelige Rührwerke oder archimedische Schneckenpumpen bei etwa **60 –100 min⁻¹**. Kreiselpumpen bewegen sich abhängig von der Förderleistung bei etwa **750 –1.500 min⁻¹**. Konventionelle Drehkolbengebläse liegen im Bereich von **1.000 – 4.000 min⁻¹**. Einen Sonderfall stellen die Turboverdichter mit sehr hohen Drehzahlen im Bereich von ca. **15.000 bis 40.000 min⁻¹** dar.



Von den bekannten Getriebebauarten (Bild 4-8) kommen in der Abwassertechnik grundsätzlich alle zum Einsatz. Bei der Auswahl standen früher die konstruktiven Anforderungen (Platzbedarf, Gewicht, Wartung) und zuweilen auch die Notlaufeigenschaften (Verhalten bei Blockierung der Arbeitsmaschine durch Verstopfung) im Vordergrund. Die Bedeutung des Wirkungsgrades hat aber aufgrund der hohen Energiekosten erheblich zugenommen. Der Trend geht deshalb bei Verdichtern zum Einsatz von Stirnradgetrieben anstelle der bisher üblichen Keilriemenübersetzung. Pumpen mit Keilriemenantrieb haben weiterhin ihre Daseinsberechtigung, weil die Vorteile bei

der energetischen Effizienz die entstehenden Nachteile (Schwingungsdämpfung, Verhalten bei Blockierung oder bei Rückschlägen aufgrund hoher Druckdifferenzen) nicht aufwiegen.

				
Getriebeart	Stirnrad	Kegelrad	Schnecke	
Max. Übersetzung	ca. 7	ca. 5	ca. 50	
Wirkungsgrad	ca. 98 %	ca. 98 %	ca. 50 % ... ca. 90 %	
				
Getriebeart	Flachriemen	Keilriemen	Zahnriemen	Kette
Max. Übersetzung	5	8	8	6
Wirkungsgrad	96 % ... 98 %	92 % ... 94 %	96 % ... 98 %	96 % ... 98 %

Bild 4-8 Bauarten von mechanischen Getrieben nach [ZVEI]

4.1.4.1 Abgestimmte Auslegung eines Antriebsstrangs

Bei der Auslegung eines kompletten Antriebsstrangs müssen Kompromisse in Bezug auf die Nennleistung der Einzelkomponenten gefunden werden, weil Elektromotoren, Getriebe und Arbeitsmaschinen nur in abgestuften Baugrößen gefertigt werden. Die Wahl der Baugrößen ist bei Elektromotoren durch sog. Normreihen einheitlich festgelegt, um eine herstellerübergreifende Austauschbarkeit zu gewährleisten. Bei Getrieben ist die Standardisierung weniger ausgeprägt, hier sind herstellereigenschaftliche Merkmale bestimmend; allerdings sind die verbindenden Elemente (Wellen, Kupplungen, etc.) in Normen festgelegt. Bei den Arbeitsmaschinen dominieren die herstellereigenschaftlichen Eigenschaften.

Der sich für eine bestimmte Verfahrensstufe ergebende Bedarf an Nutzenergie hängt beim Abwasserreinigungsprozess von der hydraulischen Belastung, dem Verschmutzungsgrad des Abwassers und der sich ergebenden Frachtbelastung ab. Die durch das Verhältnis von maximalem zu minimalem Leistungsbedarf festgelegte Schwankungsbreite der Belastung liegt üblicherweise bei mindestens **3:1**. Sie kann aber auch einen Wert von **10:1**, beispielsweise bei der Belüftung oder bei Pumpwerken, erreichen.

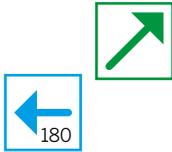
Eine Anpassung der Nutzenergie an den prozessbedingten Bedarf ist nur möglich, wenn die Aggregate bzw. Aggregategruppen auch für die tatsächlich auftretenden betrieblichen Verhältnisse ausgelegt sind. Standardmäßig erfolgt die Bemessung auf einen Ausbaustand, der mit den Verhältnissen bei der Inbetriebnahme von Anlagen i. d. R. nicht übereinstimmt (Ausbaureserve). Als Kompromiss bietet sich beispielsweise an, die Verdichter auf den Ist-Zustand auszulegen und für den Ausbaustand eine Platzreserve zu belassen.

Bisher ist es bei einer Auslegung üblich, unter den Gesichtspunkten der einfachen Bedienung, der Ersatzteilhaltung, der Steuerung und einer Angleichung der Jahresbetriebsstunden (Vertauscherschaltung) möglichst gleichartige und gleich große Aggregate einzusetzen. Aus Verfügbarkeitsgründen sollte zudem ein zusätzliches Aggregat als Reserve vorgehalten werden (n + 1-Strategie).

Die Anpassungsfähigkeit an die tatsächlichen Verhältnisse ergibt sich unter diesen Voraussetzungen (gleich große Aggregate) unmittelbar aus deren Anzahl. Ausgehend von einer 3 + 1-Auslegung und der Annahme, dass übliche Antriebsmaschinen nur im Bereich von 50–100 % ihres eigentlichen Auslegungswertes betrieben werden dürfen, erreicht man als niedrigsten Betriebspunkt dennoch nur 1/6 des Auslegungswertes der Antriebsgruppe. Damit verfehlt man die zum Teil erforderliche Bandbreite von 10:1. Eine Anpassung an kleinere Werte ist faktisch nicht möglich. Es



kommt in diesem Fall zu einem verfahrenstechnischen unnötigen Energiemehrverbrauch. Typische Folgen sind ein überhöhter Sauerstoffgehalt im Belebungsbecken bei zu großen Gebläsen oder die Drosselung von Durchflüssen mittels Schiebern bei zu großen Pumpen.



Abhilfe kann durch eine bessere Abstufung bzw. Staffelung der Aggregate geschaffen werden, bei der außerdem die Reservehaltung bereits in der Auslegung berücksichtigt wird. Die Vorgehensweise wird vereinfacht an dem Beispiel eines einfachen (fiktiven) Pumpwerks verdeutlicht (vgl. Kapitel 4.2.5). In seiner Systematik kommt das Beispiel den realen Verhältnissen auf einer Kläranlage sehr nahe und ist in der Methodik auf die Druckluftherzeugung und andere Antriebsaufgaben übertragbar. Durch die deutlich gestiegenen Anforderungen an die energetische Effizienz haben sich die Prioritäten bei der Auslegung und dem Betrieb von Antriebsgruppen verschoben. Die Gleichartigkeit als Voraussetzung für die einheitliche Ersatzteilhaltung und der Ausgleich der Betriebsstunden zur Erzielung eines gleichmäßigen Verschleißes sind heute nachgeordnet. Die dafür bisher eingesetzte Vertauscherschaltung ist nicht mehr üblich. Stattdessen setzen sich Konzepte mit Laststufen, denen die Aggregate frei zugeordnet werden können, immer häufiger durch.

4.2 Pumpen und Förderaggregate

4.2 Pumpen und Förderaggregate

4.2.1
Allgemeine
Hinweise

4.2.2
Einteilung von Pumpen
nach Arbeitsprinzip
und Bauart

4.2.3
Hinweise zur Auslegung,
Planung & Projektierung
von Pumpen

4.2.4
Pumpenauswahl für
energieeffizienten &
sicheren Betrieb

4.2.5
Energieeffizienz-
maßnahmen &
Praxisbeispiel

4.2.1 Allgemeine Hinweise

Abwasser und Schlamm müssen im Kanalnetz und auf Kläranlagen auf vielfältige Art und Weise bewegt und transportiert werden. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf ein Einzelaggregat und dessen technische, betriebliche und energetische Eigenschaften. Darauf aufbauend wird am Ende des Kapitels die energieoptimierte Auslegung eines Pumpwerks an einem Beispiel erläutert.

Pumpen lassen sich zunächst nach dem hydraulischen Arbeitsprinzip in zwei Hauptgruppen (Strömungspumpen, Verdrängerpumpen) einteilen (Bild 4-9). Zur Förderung von Medien mit hohem Feststoffanteil oder bei Verstopfungsneigung (Abwasser-Sand-Gemisch, Granulate, Pellets) eignen sich Airliftverfahren (Drucklufthebeanlagen). Für Medien mit sehr hoher Viskosität (trockener Sand, entwässerter Klärschlamm mit hohem TR-Gehalt) ist es günstiger, speziell dafür geeignete Förderanlagen (Wendelförderer, Förderbänder, Radlader) einzusetzen; konventionelle Pumpen versagen meist bei solchen Aufgabenstellungen (Bild 4-10).

In den letzten Jahren sind einige robuste und langlebige Aggregate (Mammutpumpen und archimedische Schnecken) mit dem Argument der schlechten energetischen Effizienz durch Kreiselpumpen verdrängt worden. Diese Aggregate können jedoch bei korrekter Auslegung und an die Aufgabenstellung angepasster Betriebsweise teilweise sogar günstigere Werte als Kreiselpumpen erreichen [Kantert, 2008].

Strömungspumpen	Verdrängerpumpen			
Kreiselpumpen (Radial-, Halbaxial- und Axialpumpen)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hubkolbenpumpen ■ Kolben(membran)pumpen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Rotationskolbenpumpen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Exzentrerschneckenpumpen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Archimedische Schnecke

Bild 4-9 Einteilung der Pumpen nach dem hydraulischen Arbeitsprinzip

Airliftverfahren		Förderanlagen		
Mammutpumpen	Pneumatische Pumpen	Wendelförderer	Förderbänder	Radlader

Bild 4-10 Verfahren für spezielle Förderaufgaben

4.2.2 Einteilung von Pumpen nach Arbeitsprinzip und Bauart

Pumpen lassen sich nach den für das Arbeitsprinzip typischen Bauarten einteilen. In Bild 4-11 sind in dem durch Fördermenge und Förderhöhe aufgespannten Kennfeld die Einsatzbereiche der unterschiedlichen Pumpenbauarten eingetragen. Grundsätzlich eignen sich axiale Pumpen für große Fördermengen bei geringer Förderhöhe und Radialpumpen für kleine Fördermengen bei großer Förderhöhe.

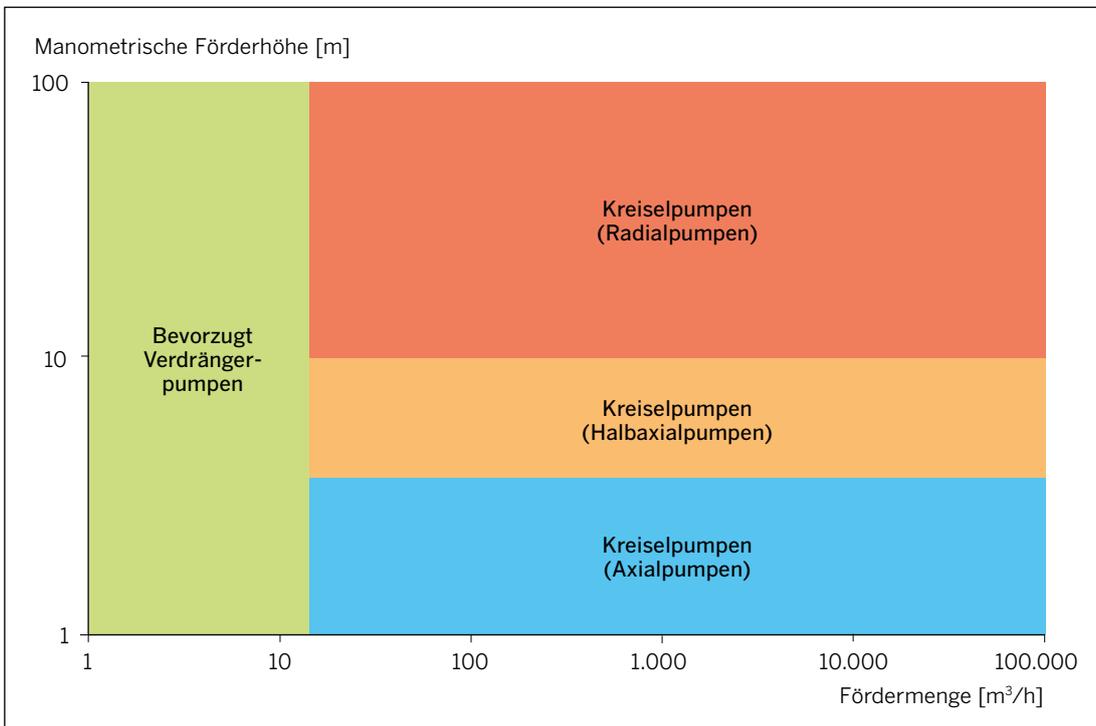


Bild 4-11 Schematische Darstellung der Einsatzfelder verschiedener Pumpenbauarten (logarithmische Skalierung)

Kreiselpumpen

Am häufigsten werden für die Abwasserförderung **Kreiselpumpen** eingesetzt, bei denen durch die Bauform bzw. die Art des Laufrades eine große Bandbreite bezüglich der Fördermedien einerseits und der anlagenseitigen hydraulischen Aufgabenstellung andererseits abgedeckt werden kann.

Für Kreiselpumpen ist die Strömungsumlenkung (radial, halbaxial, axial) das wesentliche Merkmal zur Unterscheidung der Bauart und der hydraulischen Eigenschaften (Bild 4-12).

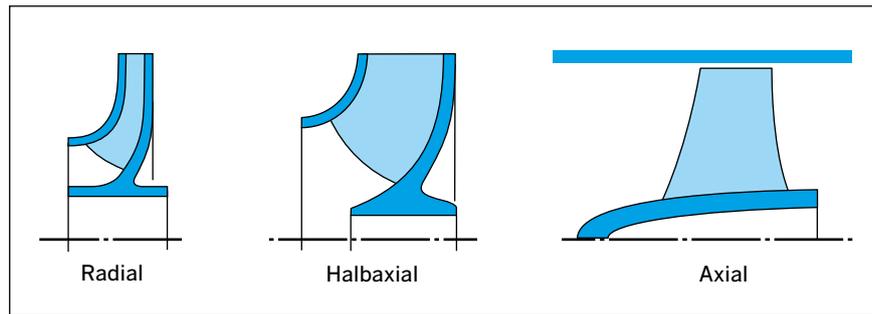


Bild 4-12 Bauform von Kreiselpumpenlaufrädern nach [Surek, 2014]

Die betrieblichen und energetischen Eigenschaften werden weiterhin durch die Wahl des Laufrades bestimmt. Die im Abwasserbereich üblichen Grundformen der Laufräder (offen/geschlossen, Einstrom/Mehrstrom) sind in Bild 4-13 dargestellt. Die energetische Effizienz ist unter gleichen Randbedingungen bei geschlossenen Mehrstrom-Kanalrädern deutlich höher als bei Freistromrädern mit großem freiem Durchgang. Offene Laufräder sind hingegen unanfälliger gegen Störungen durch Verstopfung. Es ist daher zwischen den Forderungen nach störungsfreiem Betrieb und energetischer Effizienz abzuwägen. Man kann bei einer aus mehreren Aggregaten bestehenden Pumpengruppe allerdings durchaus auch unterschiedliche Bauformen gemischt betreiben.

Kreiselpumpen						
Klassen-Einteilung	Radialrad		Halbaxialrad		Axialrad	
	Offen	Geschlossen		Offen		Geschlossen
		Einstrom	Mehrstrom			
Marktübliche Bezeichnungen	Freistromrad	Kanalrad		Schraubenrad	Propellerpumpe Rohrschachtpumpe	

Bild 4-13 Klassifizierung der Kreiselpumpen

Verdrängerpumpen

Bei **Verdrängerpumpen** wird die Bauart nach der Bewegungsart des Verdrängungskörpers in Hubkolbenpumpen (linear) und Rotationskolbenpumpen (kreisförmig) unterschieden (Bild 4-14), wobei Exzentrerschneckenpumpen sich durch den speziellen Aufbau mit einem Stator und einem Rotor auszeichnen. Archimedische Schnecken gehören ebenfalls zu den Verdrängerpumpen, wengleich die Verdrängung drucklos erfolgt. Schnecken werden unterschieden nach der Art der Ausführung des Troges und nach der Lagerung. Weiterhin können sie offen oder geschlossen (Rohrschnecke) betrieben werden.

Verdrängerpumpen				
Klassen-Einteilung	Hubkolbenpumpe	Rotationskolbenpumpe	Exzentrerschneckenpumpe	Archimedische Schnecke
	Axialkolbenpumpe	<ul style="list-style-type: none"> ■ Drehkolbenpumpe ■ Zahnradpumpe ■ Drehschieberpumpe ■ Kreiskolbenpumpe ■ Kolbenmembranpumpe 		

Bild 4-14 Klassifizierung der Verdrängerpumpen

Verdrängerpumpen werden vorwiegend im Schlammbereich eingesetzt. Verbreitete Bauarten sind Kolben(membran)pumpen, Drehkolbenpumpen und Exzentrerschneckenpumpen. Die Auswahl richtet sich sehr stark nach der Konsistenz des Fördermediums (Viskosität) und dem erforderlichen Druck. Die energetische Effizienz ist bei der Auswahl solcher Pumpen häufig nachrangig hinter den Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit (Tabelle 4-2).

Archimedische Schnecken

Die Wirkungsweise einer archimedischen Schnecke basiert auf dem Prinzip einer Schraube. Der Raum zwischen den Flügeln und dem Kernrohr bildet einen nach oben offenen Kanal, in dem das Wasser drucklos nach oben geschraubt wird. Bei den Bauarten unterscheidet man je nach Einbausituation Trogschnecken, Kompaktschnecken und Rohrschnecken. Archimedische Schnecken werden vor allem wegen ihrer Robustheit und Unempfindlichkeit gegen Grobstoffe geschätzt und daher gerne in Zulaufpumpwerken eingesetzt.

Der Wirkungsgrad der Schneckenpumpen hängt sehr stark von den Anströmverhältnissen im Tast- und Füllpunktbereich ab. Eine unzureichende Trogfüllung durch zu geringen Wasserspiegel im Pumpensumpf reduziert den Wirkungsgrad der Schneckenpumpen.

Eine etwas in Vergessenheit geratene Eigenschaft ist die äußerst schonende Förderung des Mediums. Deshalb eignen sich Schnecken besonders für die Förderung von Rücklaufschlamm. Zudem liegt die erforderliche Förderhöhe für Rücklaufschlammumpen üblicherweise im Bereich von **0,5–1,5 m** und somit in einem für Kreiselpumpen sehr ungünstigen Bereich.

Aus hydraulischer Sicht ist interessant, dass der Wirkungsgrad von Schneckenpumpen nahezu unabhängig von der Förderhöhe und der Fördermenge ist. Bei einer Auslastung von **50 %** tritt nur eine leichte Verschlechterung der Effizienz ein. Erst bei einem Teillastbetrieb mit weniger als **40 %** der Auslegungsmenge nimmt der Wirkungsgrad stärker ab (Bild 4-15).

Beim Vergleich von Schnecken- und Kreiselpumpenwirkungsgraden ist zu berücksichtigen, dass die Verluste in den Rohrleitungen und Armaturen im Pumpenwirkungsgrad der Kreiselpumpen üblicherweise nicht berücksichtigt sind. Schneckenpumpen weisen diese Verluste nicht auf.

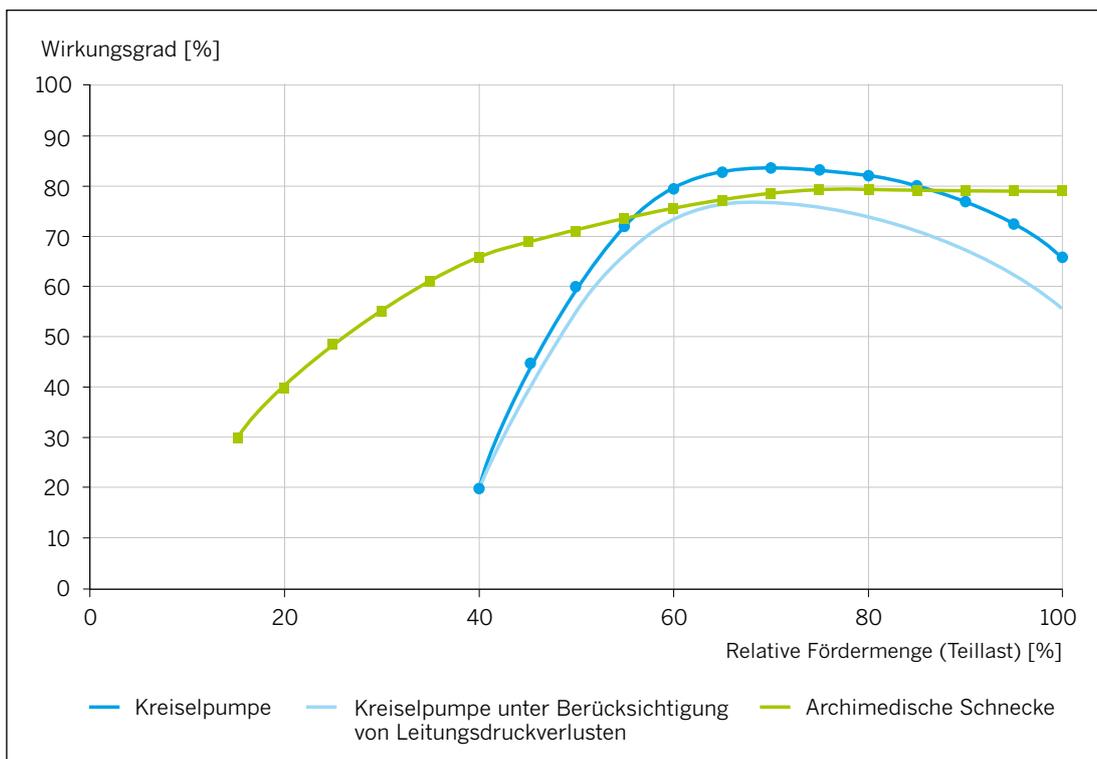


Bild 4-15 Teillastverhalten und Wirkungsgrad von Schnecken- und Kreiselpumpen



Airliftverfahren

Unter Airliftverfahren sollen hier diejenigen Förderanlagen zusammengefasst werden, bei denen Druckluft als Antriebsenergie für die Bewegung bzw. Hebung des Mediums eingesetzt wird (Druckluftheber). Im Abwasserbereich ergeben sich im Wesentlichen zwei Einsatzfälle: einerseits die Förderung des Abwasser-Sand-Gemisches bei Sandfanganlagen und andererseits der Abwassertransport über große Höhendifferenzen.

Der Transport des Mediums erfolgt bei solchen Anlagen ohne mechanische Berührung eines antreibenden Körpers allein durch die infolge des Lufteintrags entstehenden Dichte- und Druckunterschiede.

Besonders bei Sandfanganlagen haben sich die sog. Mammutpumpen über viele Jahre im Betrieb bewährt. Zuletzt wurden sie allerdings häufiger durch Kreiselpumpen mit Freistromrädern ersetzt. Für die Laufräder ist in diesem Fall wegen der abrasiven Eigenschaften des Sandes eine Panzerung erforderlich. Solche Pumpen werden nach ihrer bevorzugten Anwendung als Schlickpumpen bezeichnet.

Die vermeintlich schlechte energetische Effizienz von Mammutpumpen ist jedoch in den meisten Fällen auf eine erhebliche Überdimensionierung der eingesetzten Gebläse zurückzuführen. Nach neueren Untersuchungen ist durch Messungen belegt, dass die Fördermenge (Sand-Wasser-Gemisch) nur in einem sehr schmalen Band proportional zur Luftmenge ist. Weil eine Berechnung aufgrund der komplexen hydraulischen Zusammenhänge schwierig ist [Ingerle, 2006], empfiehlt es sich bei Bestandsanlagen, die optimale Luftmenge durch Versuche an der realen Anlage experimentell zu bestimmen.

Druckluft als Antriebsenergie wird im Bereich der Abwasserableitung zur Überwindung großer Höhendifferenzen eingesetzt. Der Transport erfolgt durch Verdrängung des Abwassers durch die Luft. Weil es sich bei diesen Pumpen nicht um Einzelaggregate, sondern um eine auf die Anwendung abgestimmte Systemtechnik handelt, werden diese Sonderformen von Pumpwerken im Kapitel 3.1 beschrieben.



Förderanlagen

Für hochviskose Medien mit eingeschränkter Fließfähigkeit (entwässerter oder getrockneter Klärschlamm) oder Gemische mit überwiegendem Feststoffanteil (Sandfanggut, Rechengut) sollten vorzugsweise speziell auf den Anwendungsfall abgestimmte Fördersysteme eingesetzt werden. Im Abwasserbereich haben sich folgende Systeme bewährt:

- Wendelförderer sind Förderschnecken, die nach dem archimedischen Prinzip arbeiten und speziell für die verstopfungsfreie Förderung von Schüttgütern konzipiert sind. Hier haben sich besonders sog. seelenlose Schnecken ohne Schneckenwelle bewährt. Förderschnecken können in offenen Trögen oder in geschlossenen Rohren betrieben werden. Der Transport ist, abhängig von der Bauart, horizontal, schräg oder vertikal möglich.
- Förderbänder sind stationäre Förderanlagen zur stetigen Förderung nicht fließfähiger Medien. Sie zeichnen sich durch eine einfache und robuste Bauweise, niedrigen Verschleiß, hohe Betriebssicherheit und geringen Energieverbrauch aus. Der Transport ist horizontal unproblematisch. Ein schräg ansteigender Transport ist eingeschränkt möglich; teilweise müssen hier profilierte Bänder mit Rippen eingesetzt werden.
- Radlader oder ähnliche mobile Baumaschinen sollen der Vollständigkeit halber ebenfalls genannt werden.

4.2.3 Hinweise zur Auslegung, Planung und Projektierung von Pumpen

Die Übersicht (Bild 4-16) enthält in schematischer Form die Funktionsweise, die Q-H-Kennlinien und den für die elektrische Ansteuerung relevanten Verlauf des Drehmoments über der Drehzahl.

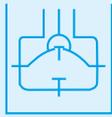
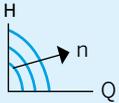
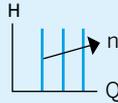
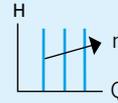
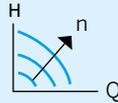
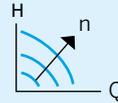
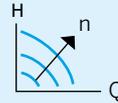
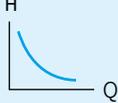
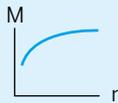
	Verdrängerpumpen				Strömungspumpen Kreiselpumpen		Andere Förder- einrichtungen
	Exzenter- schnecken- pumpe	Kolbenpumpe	Membran- pumpe	Archimedische Schnecke	Radialrad, z. B. Kanalrad	Mehrstufiges Radialrad	Mammut- pumpe
Prinzipskizze							
H-Q-Kennlinien							
M-n-Kennlinien							-

Bild 4-16 Hydraulische und betriebliche Eigenschaften von Pumpen und Fördereinrichtungen

Die erzielten technischen Fortschritte betreffen weniger die Pumpentechnologie selbst als vielmehr die Anpassung an die unterschiedlichen Aufgabenstellungen durch spezielle Laufräder, die Einbausituation und die Abstimmung auf die Anlagenkennlinie. Die verbesserte energetische Effizienz darf jedoch nicht zu Lasten eines sicheren und störungsfreien Betriebs gehen. Die sich daraus ergebenden, teilweise konträren Anforderungen sind in den letzten Jahren im Rahmen von Forschungsarbeiten (u. a. von Prof. Jaberg, Österreich und Prof. Thamsen, Berlin [Thamsen et al., 2011]) untersucht worden. Ein nicht unwesentlicher Teilaspekt waren dabei die durch den verbreiteten Einsatz reißfester Feuchttücher aufgetretenen massiven Störungen bei der Abwasserförderung, besonders im Kanal. Die bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse führten zu Modifikationen an den Laufrädern, Gehäusen und Einbauteilen sowie zu Hinweisen für die Steuerung der Pumpen, damit diese Tücher sich gar nicht erst verhaken können. Damit wird wirksam der Bildung von Zöpfen, die am Ende das gesamte Pumpengehäuse verstopfen, entgegengewirkt.

Die Pumpenhersteller bieten inzwischen konfektionierte Steuerungen an, die mit vertretbarem Aufwand parametrierbar werden können und sich teilweise selbstlernend an die jeweilige Situation anpassen. Gerade bei dem im Abwasserbereich üblichen Betrieb von Pumpengruppen ergibt sich ein großes Optimierungspotenzial durch die Größenstaffelung und die Regelung. Bei den zum Antrieb verwendeten Elektromotoren geht der Trend vor allem bei kleineren Pumpen zu kompakten Aggregaten (Pumpe + Motor) mit integrierter Ansteuerung.



Für das Betriebsverhalten von Pumpen spielt die Auslegung eine entscheidende Rolle. Bei Abweichungen vom Auslegungspunkt verschlechtert sich nicht nur die energetische Effizienz, sondern es kommt auch zu Schäden an Lagern und Gleitringdichtungen (= GLRD) oder infolge von Kavitation zu Materialabtragungen an Gehäuse und Laufrad (Bild 4-17).

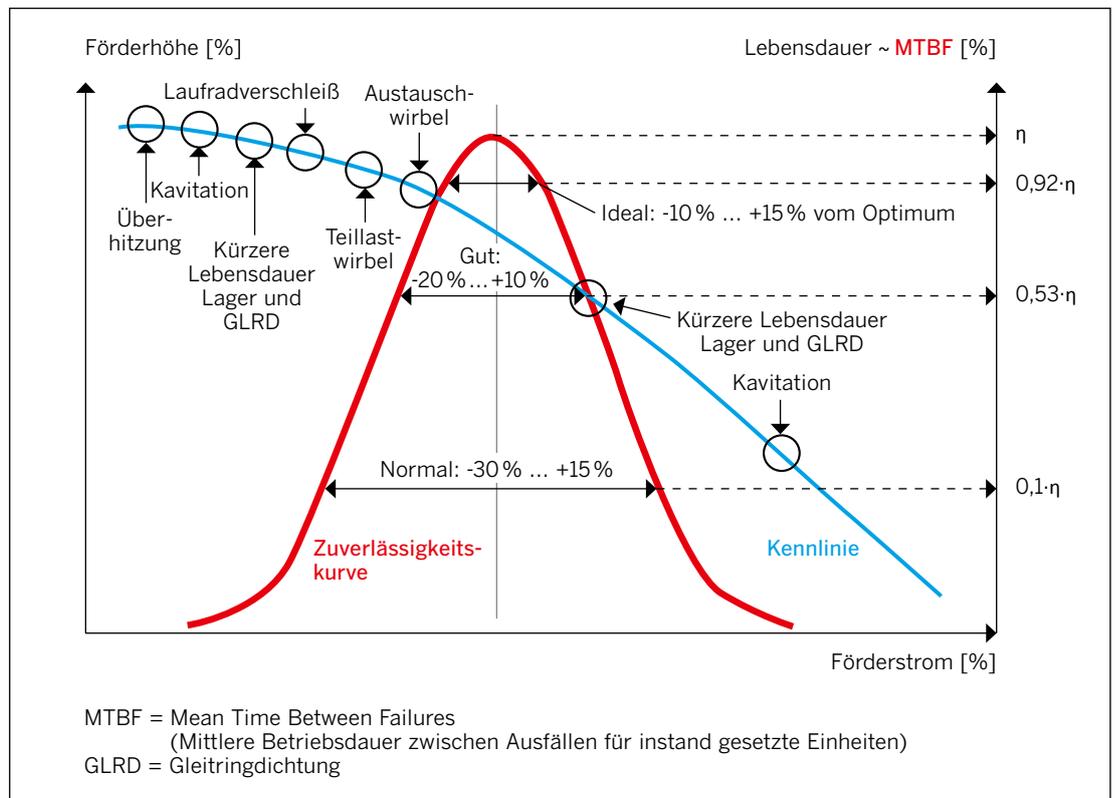


Bild 4-17 Auswirkungen auf das Betriebsverhalten bei Entfernung vom Auslegungspunkt nach [Hodgson, 2004]

4.2.4 Auswahl von Pumpen für einen energieeffizienten und sicheren Betrieb

Bei der Auswahl von Pumpen ist zwischen den Forderungen nach einer hohen Prozessstabilität und Betriebssicherheit einerseits und einem niedrigen Energieverbrauch andererseits abzuwägen. Auf die energetische Effizienz muss grundsätzlich umso mehr geachtet werden, wenn eine Pumpe eine hohe Einschaltdauer erreicht oder sogar im Dauerbetrieb läuft.

Bei einem Hochwasserpumpwerk, welches nur 1–2 Mal pro Jahr anspringt, ist die Effizienz sicherlich zweitrangig. Hier steht klar die Betriebssicherheit im Vordergrund.

Eine Übersicht über die für den Wasser-, Abwasser- und Schlammtransport geeigneten Pumpentypen ist in Tabelle 4-2 mit einer für normale Einsatzfälle vorgenommenen Bewertung der energetischen („E“) und betrieblichen Eignung („B“) mit rotem/gelbem/grünem Hintergrund dargestellt. Dabei ist für die Pumpen zur Faulbehälterbeschickung ein vorgeschalteter Zerkleinerer oder Mazerator empfehlenswert und in der Tabelle 4-2 berücksichtigt.

Nach Wirtschaftlichkeitskriterien muss die Pumpenauswahl vorrangig nach betrieblicher Eignung (grünes „B“ in Tabelle 4-2) und erst bei gleich geeigneten Pumpen nach energetischer Effizienz (Symbol „E“ in Tabelle 4-2) erfolgen. Stromkostensparnisse einer möglicherweise energetisch effizienteren Pumpe sind bei mangelnder betrieblicher Eignung schnell durch zusätzlichen Reparatur- und Wartungsaufwand aufgezehrt.

Tabelle 4-2 kann als Orientierung bei der Planung von Pumpen dienen, entbindet aber nicht von einer detaillierten Prüfung des Einzelfalls.

Bei der Einzelprüfung sind für den jeweiligen Anwendungszweck und unter Berücksichtigung der baulichen und anlagentechnischen Verhältnisse am Einsatzort folgende Fragen, Spezifikationen und Anforderungen zu klären:

- Staffelung der Pumpengrößen und Anpassung an die Häufigkeitslinie der Fördermengen,
- Eignung der Pumpenkennlinie(n) für den gewählten Förderzweck (Rohrkennlinie, Arbeitspunkte),
- Drehzahlbereich (besonders bei Verdrängerpumpen wichtig im Hinblick auf Verschleiß),
- Trocken- oder Nassaufstellung von Pumpe und/oder Motor,
- Zuströmverhältnisse (Sperrstoffsammelraum, Vermeidung luftziehender Wirbel),
- Ex-Schutzklasse,
- Werkstoffe der medienberührten Teile (Korrosionsschutz, Abriebfestigkeit),
- Art und Werkstoffe der Pumpendichtungen,
- Energetische Qualität/Sanftanlauf/FU/Spannung des Motors,
- Wasser- und evtl. Gasdichtigkeit des Motors,
- Antrieb und Pumpe: getrennt oder in Blockbauweise,
- Art der Motorkühlung,
- Thermoschutz des Motors,
- Steuer- und Regelkonzept,
- Gestaltung des Pumpensumpfs.

Tabelle 4-2 Energetische und betriebliche Eignung verfügbarer Pumpentypen für unterschiedliche Aufgaben

		Verdrängerpumpen					
		Kugel- + Kolbenmem- branpumpen	Drehkolben- pumpen	Exzenter- schnecken- pumpen	Kolben- pumpen	Membran- pumpen	Archi- medische Schnecken
Kanal- netz und Regen- becken	Pumpwerk ohne Rechen						E B
	Pumpwerk mit Rechen						E B
Abwasserbehandlung	Zulaufpumpwerk ohne Rechen						E B
	Zulaufpumpwerk mit Rechen						E B
	Rechen (Rechengut)			E B			
	Sandfang (Sandentnahme)						
	Schwimmschlamm						
	Rezirkulation						
	Rücklaufschlamm						E B
	Primärschlamm		E B	E B	E B		
	Überschussschlamm		B B	E B	E B		
	Filterhebewerk						
	Spülwasser						
	Schlammwasser						
	Permeatabzug			E B	E B		
Schlammbehandlung	Rohschlamm ³⁾		E B	E B	E B		
	Faulbehälterbeschickung ³⁾		E B	E B	E B		
	Faulschlammumwälzung		E B				
	Heizschlamm		E B				
	Ausgefauter Schlamm (Transport)		E B	E B			
	Beschickung Entwässerung	E ¹⁾ B ²⁾	E B	E ¹⁾ B ¹⁾	E B		
	Entwässerter Schlamm	E B		E B	E B		
	Trübwasser			E B	E B		
	Fällmitteldosierung					E B	
	Flockmitteldosierung			E B		E B	
Sonstige	Ablauf Nachklärung, Brauchwasser						
	Grundwasserentnahme						
	Heizungsumwälzpumpen						

Anmerkungen: Die Farbmarkierungen kennzeichnen 1. Rechteck: „Energetische Effizienz“ und 2. Rechteck: „Betriebliche Eignung“ (gut-mittel-schlecht) und beziehen sich auf übliche Einsatzbedingungen.

1) Druckbedingt sind für Kammerfilterpressen eher Kolbenmembranpumpen, für Zentrifugen und Bandpressen eher Exzenter-schneckenpumpen betrieblich und energetisch besser geeignet.

2) Bei Stömungspumpen hängt der energetische Wirkungsgrad stark von der Anpassung der Druckhöhe an die Laufradform ab.

3) Mit Mazerator zur Vermeidung von Verzopfungen

4) Tauchmotorpumpe auf dem Kopf stehend eingebaut

Strömungspumpen, Kreispumpen ²⁾					Andere Fördereinrichtungen				
Schlauchpumpen	Radialrad, z. B. Kanalrad	Halbaxialrad	Axialrad-/Propellerpumpen	Freistromrad	Mehrstufiges Radialrad	Pneumatische Pumpen	Mammutpumpen	Band-/Trogkettenförderer	Wendelförderer
	E B	E B		E B		E B			
	E B	E B				E B			
	E B	E B		E B					
								E B	E B
	E B			E B			E B		
				E ⁴⁾ B ⁴⁾					
	E B	E B	E B						
	E B	E B	E B						
	E B								
	E B	E B	E B						
				E B					
	E B ³⁾								
	E B ³⁾	E B							
	E B	E B							
	E B	E B							
								E B	
E B	E B	E B							E B
E B									
	E B				E B				
					E B				
	E B			E B					

C
1
2
3
4
5
Literatur

4.2.5 Energieeffizienzmaßnahmen und Praxisbeispiel

In der Praxis wird die Pumpenauslegung durch variierende Randbedingungen erschwert, die sich aus dem Tagesgang und durch prozessbedingt wechselnde Fördermengen ergeben. Die wesentlichen Ansatzpunkte für eine Steigerung der energetischen Effizienz im laufenden Betrieb ergeben sich im Umkehrschluss aus einer Überprüfung, ob unter den nunmehr bekannten Betriebsbedingungen die in der Planungsphase zugrunde gelegten Verhältnisse möglichst gut getroffen sind. Aus der Höhe und der Dauer der Abweichung lässt sich dann die mögliche Effizienzsteigerung ableiten.



Eine regelmäßige Prüfung von tatsächlichen Fördermengen bei definierten Drehzahlen und Druckhöhen kann Hinweise auf Pumpenverschleiß (Laufräder und Schleißwände bei Kreiselpumpen, Stator und Rotor bei Exzentrerschneckenpumpen) geben, ohne dass die Pumpe geöffnet werden muss.

Effizienzmaßnahmen

- Auslegung auf den Bestpunkt ($\pm 20\%$ der Fördermenge), möglichst keine Reserven für ein Einzelaggregat vorsehen, schwankende Belastungen müssen durch die Staffelung der Pumpengruppe ausgeglichen werden.
- Förderhöhe korrekt bestimmen, z. B. bei Faulbehälterumwälzung keine Auslegung auf die Faulbehälterhöhe, weil aufgrund der „kommunizierenden Röhren“ auf Druck- und Saugseite lediglich die Rohrleitungsverluste für die Förderhöhe bestimmend sind. Der geodätische Anteil entfällt.
- Für entwässerten Schlamm möglichst kurze Transportwege vorsehen. Beispielsweise keine Schlambunker im Keller, aus denen der Schlamm mittels sog. Betonpumpen über große Strecken zu einer Trocknung gefördert werden muss. Besser das Silo über der Trocknung platzieren und den Schlamm möglichst drucklos zur Trocknung fördern.
- Archimedische Schnecken einstauen, wenn dies (zeitweise) betrieblich möglich ist.
- Verringerung der Rücklaufmenge bei Schneckenpumpen, Überprüfung ist durch einfachen Leerlaufversuch möglich.
- Einbau von motorisch (elektrisch, pneumatisch) betätigten Schiebern anstelle von (gewichts- oder federbelasteten) Rückschlagklappen, vor allem bei Pumpen mit großer Fördermenge und niedriger Förderhöhe (Rezirkulationspumpen).
- Förderhöhenreduzierung durch hydraulisch günstige Gestaltung des Druckleitungsauslaufs.

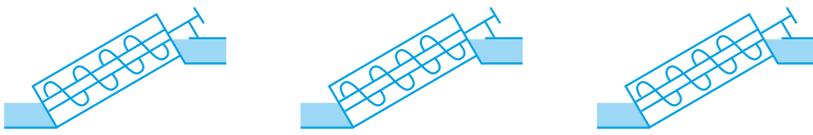
Praxisbeispiel für eine energieoptimierte Pumpenauslegung

Für das Beispieldumpwerk wird von einer Förderleistung bei Trockenwetter von $450 \text{ m}^3/\text{h}$ und bei Mischwasserzufluss von $900 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgegangen. Erfahrungsgemäß liegen die tatsächlichen Durchflüsse mit der größten auftretenden Häufigkeit deutlich unter dem Trockenwetterzufluss, hier angenommen bei $50\text{--}350 \text{ m}^3/\text{h}$. Der kleinste Nachtzufluss soll $80 \text{ m}^3/\text{h}$ betragen.

Eine konventionelle Lösung besteht aus insgesamt drei Förderschnecken mit jeweils $300 \text{ m}^3/\text{h}$; die Summe liegt dann bei $900 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Förderschnecken arbeiten erfahrungsgemäß in einem Bereich von $50\text{--}100\%$ energetisch effizient (siehe auch Bild 4-15); der Verstellbereich soll darauf beschränkt sein (Tabelle 4-3). In dieser konventionellen und auch heute noch üblichen Konfiguration ergibt sich eine hohe Reserve bei großen Durchflusswerten (Bild 4-18). Der Teillastbereich wird jedoch nur unzureichend abgedeckt. Vor allem kann die unzureichende Überdeckung am Übergang von einer auf zwei Schnecken zu einer erhöhten Schalthäufigkeit führen. Der Nachtzufluss kann nicht kontinuierlich gefördert werden. Hier kann zwar eine zeitliche Taktung vorgenommen werden, jedoch mit der Folge einer stoßweisen und betrieblich ungünstigen Beschickung der Kläranlage. Lässt man stattdessen die Schnecke im Dauerbetrieb laufen, wird sie in einem sehr ungünstigen Wirkungsgradbereich betrieben.

Eine alternative Auslegung besteht aus Schnecken mit einer Förderleistung von $500 \text{ m}^3/\text{h}$. Die kleinste Fördermenge soll auch hier bei 50% liegen. Hinzu kommt eine große Kreiselpumpe mit einer Förderleistung von $250 \text{ m}^3/\text{h}$ und eine kleine Kreiselpumpe mit einer Förderleistung von $150 \text{ m}^3/\text{h}$ (Tabelle 4-4). Unterstellt wird hier, dass beide Kreiselpumpen eine eigene Druckleitung haben, bei einer gemeinsamen Druckleitung wird die Auslegung wegen der wechselseitigen Beeinflussung deutlich komplexer.

Tabelle 4-3 Auslegung mit drei gleich großen Schneckenpumpen

			
Förderleistung	300 m ³ /h	300 m ³ /h	300 m ³ /h
Verstellbereich	150–300 m ³ /h	150–300 m ³ /h	150–300 m ³ /h
	S	S	S

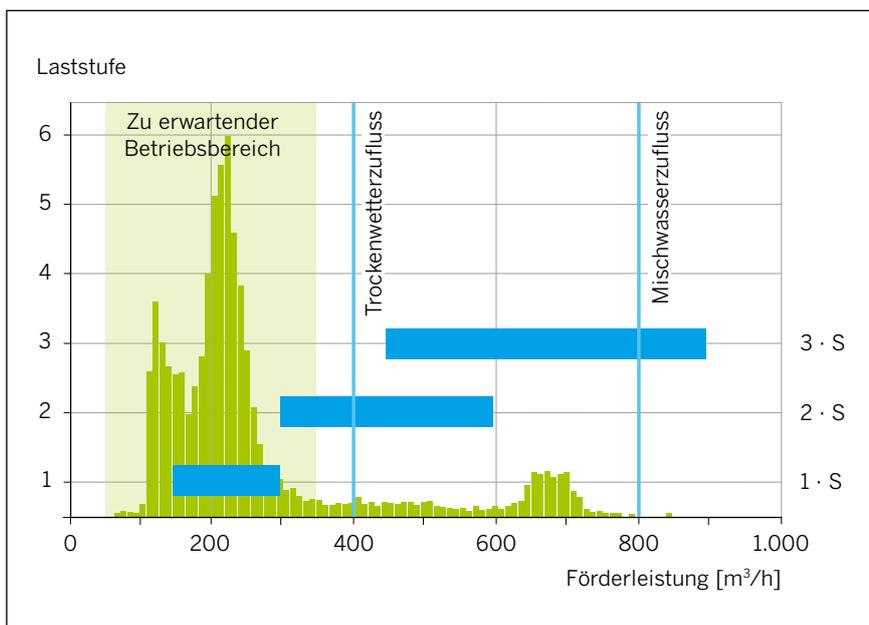
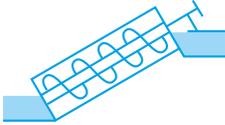


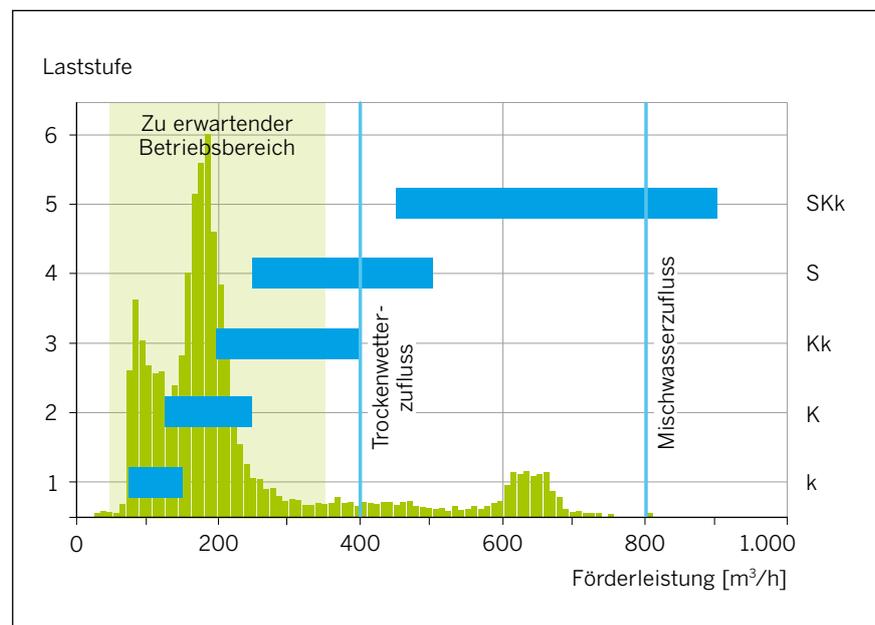
Bild 4-18 Starre Staffelung mit gleich großen Pumpen

Mit der abgestuften Lösung wird der gesamte Bereich von 80–900 m³/h ohne Lücken und ohne wesentliche Beeinträchtigung der energetischen Effizienz abgedeckt (Bild 4-19). Gegenüber der Lösung mit drei Schnecken ist der Einsatz von Kreiselpumpen kostengünstiger. Große Belastungen können mit der Schnecke bewältigt werden. Im Bereich kleiner Durchflüsse kommen die Kreiselpumpen zum Einsatz. Die im Diagramm eingeblendete Häufigkeitsverteilung der Durchflusswerte einer realen Kläranlage zeigt, dass mit dieser Konfiguration gerade der Bereich mit den meisten auftretenden Durchflusswerten sehr flexibel abgedeckt werden kann. Auch größere Schwankungen in diesem Bereich können abgefahren werden, ohne dass es zu unerwünschten häufigen Schaltvorgängen kommt. Die Verfügbarkeit bei Ausfall der Schnecke kann durch die Zuschaltung der großen Kreiselpumpe nur teilweise kompensiert werden.

In den Diagrammen ist auf der x-Achse die Förderleistung dargestellt. Auf der linken y-Achse ist eine fortlaufende Leistungsstufe aufgetragen, die sich aus der Kombination der verfügbaren Einzelaggregate, geordnet nach der jeweils minimalen Fördermenge, ergibt. Die jeweilige Aggregatekombination ist auf der rechten y-Achse in Kurzform angegeben. Dabei werden die Kurzzeichen aus Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 verwendet (S für Schneckenpumpe, k für kleine Kreiselpumpe und K für große Kreiselpumpe).

Tabelle 4-4 Auslegung mit Pumpen unterschiedlicher Bauart und Größe

			
Förderleistung	150 m ³ /h	250 m ³ /h	500 m ³ /h
Verstellbereich	75 – 150 m ³ /h	125 – 250 m ³ /h	250 – 500 m ³ /h
	k	K	S

**Bild 4-19** Bedarfsgerechte Staffelung mit unterschiedlichen Pumpen

4.3 Drucklifterzeuger

4.3 Drucklifterzeuger

4.3.1
Allgemeine Hinweise

4.3.2
Energieeffizienzmaßnahmen &
Praxisbeispiel

4.3.1 Allgemeine Hinweise

Drucklifterzeuger können nach dem Druckverhältnis, dem Funktionsprinzip oder nach der Bauart eingeteilt werden. Verbindliche technische Regeln dazu gibt es nicht. Deshalb erfolgt eine Einteilung stets willkürlich, meist hersteller- oder branchenspezifisch. Eine funktionsorientierte Einteilung für die Druckluftversorgung von Belebungsbecken ist in Bild 4-20 dargestellt.

Zu den Verdrängermaschinen gehören die Drehkolbengebläse und Schraubenverdichter. Als Gebläse werden hier Aggregate mit einer Verdichtung außerhalb des Aggregates bezeichnet und als Verdichter solche mit innerer Verdichtung.

Turboverdichter gehören zu den Strömungsmaschinen. Diese lassen sich einteilen nach der technischen Ausstattung des eigentlichen Verdichters und nach der Art und den Betriebseigenschaften des Antriebs.

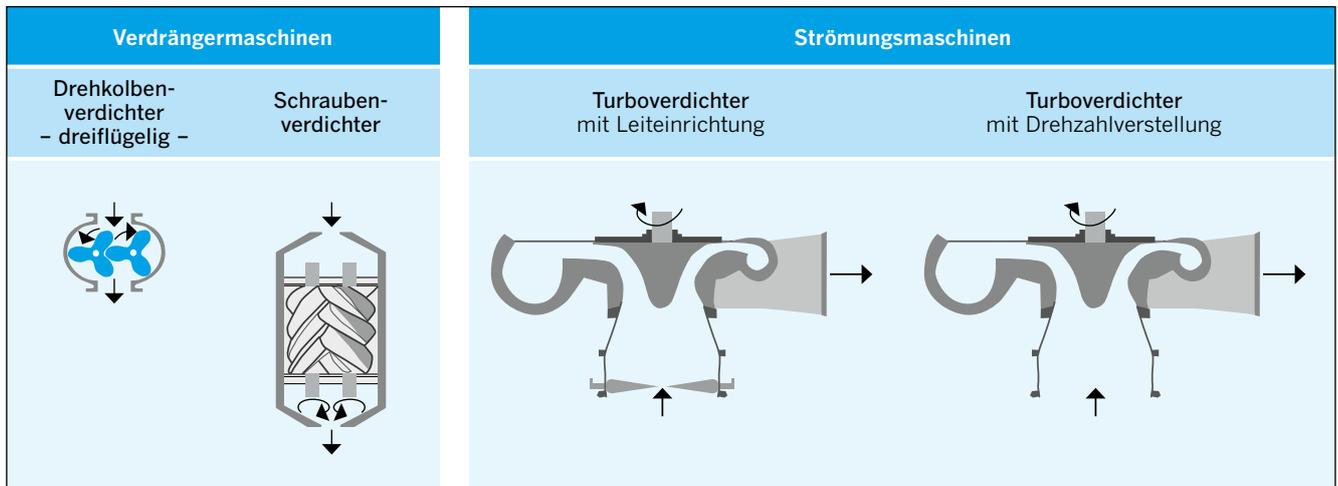


Bild 4-20 Einteilung der Druckluftherzeuger nach dem Funktionsprinzip

Drehkolbengebläse (zwei- und dreiflügelig)

Drehkolbengebläse sind Verdrängermaschinen mit äußerer Verdichtung. Sie bestehen aus zwei oder drei mit gleicher Drehzahl rotierenden, jedoch sich gegenläufig bewegenden Kolben. Die Luft wird quer zu den Kolbenwellen durch das Gehäuse gefördert und auf der Druckseite aus dem Gehäuse hinausgeschoben. Die Verdichtung der Luft findet erst in dem druckseitig angeschlossenen System (Rohrleitung) statt. Die durch die un stetige Förderung auftretende Pulsation ist bei zweiflügeligen Gebläsen stärker als bei dreiflügeligen.

Die Luftmenge kann durch Verstellung der Drehzahl unter Beachtung der sich durch die Übersetzung ergebenden Maschinendrehzahl stufenlos verändert werden (40–100 %). Der Betriebsdruck stellt sich aufgrund der Belastung ein; bei einer Druckbelüftung ist das die erforderliche Druckerhöhung. Wegen der unterschiedlichen mechanischen Beanspruchung aufgrund des Betriebsdrucks gibt es Aggregate für niedrigen Druck (bis ca. 600 mbar) und für höheren Druck (ca. 600–900 mbar), die sich in der Länge der Kolben und der Spaltweite zwischen Kolben und Gehäuse unterscheiden. Bei der Auslegung auf einen speziellen Betriebsdruck wird lediglich die Einstellung des Überdruckventils zum Schutz des Antriebsmotors gegen Überlastung angepasst.

Konstruktionsbedingt kommt es bei Drehkolbengebläsen zu einer nur von der Druckdifferenz abhängigen Rückströmung (Schlupf). Weil dabei ein Teil der durch Verdichtung erwärmten Luft im Kreislauf zirkuliert, kommt es bei geringen Luftmengen im unteren Drehzahlbereich und großer Druckdifferenz zu einer beträchtlichen Erwärmung des gesamten Aggregats.

Bei einer Sonderbauform mit verschraubten Kolbenflanken und einer nicht zentrisch angeordneten Öffnung auf der Druckseite ergeben sich geringere Quetschverluste; die energetische Effizienz ist daher geringfügig höher als bei geraden Kolben.

Schlupfverluste und Quetschverluste haben unterschiedliche Ursachen. Quetschverluste treten beim Eintritt in die Gebläsestufe auf; durch gewendelte Kolben werden sie im Vergleich zu geraden Kolben vermindert.

Drehkolbengebläse sind robust und günstig für niedrige Drücke.

Schraubenverdichter

Schraubenverdichter sind Verdrängermaschinen mit innerer Verdichtung. Sie bestehen aus zwei parallel angeordneten ineinandergreifenden schraubenförmigen Rotoren mit Öffnungen für Ein- und Auslass auf den Stirnseiten. Durch die besondere Konstruktion der beiden Rotoren entsteht in den

Zahngängen ein sich vom Einlass (Saugseite) zum Auslass (Druckseite) hin stetig verkleinerndes abgeschlossenes Volumen (wendelförmiger Luftschlauch), in dem die Luft auf den durch die Steigung und die Länge der Rotoren sowie die Gestaltung der Auslassöffnung festgelegten Druck verdichtet wird. Die Luft verlässt das Aggregat im verdichteten Zustand (innere Verdichtung). Schraubenverdichter arbeiten weitgehend pulsationsfrei. Durch das im Vergleich mit Drehkolbengebläsen (isochore Zustandsänderung) günstigere thermodynamische Arbeitsprinzip der Schraubenverdichter (isentrop Zustandsänderung) begründet sich die deutlich bessere energetische Effizienz [Van Leuven et al., 2010].

Bei einer isochoren Verdichtung bleibt das Volumen des Verdichtungsraums während der Verdichtung gleich. Nach den thermodynamischen Gesetzen entstehen dabei irreversible Wärmeverluste, vor allem bei höherem Druck. Hingegen ist die bei einer isentropen Verdichtung mit gleichbleibender Entropie entstehende Wärme teilweise reversibel und kann mit deutlich geringeren Verlusten im System gehalten werden. In der Praxis äußert sich dieser Effekt in der Verdichtungsendtemperatur. Diese liegt bei Drehkolbengebläsen unter sonst gleichen Bedingungen etwa 15–30 °C höher als bei Schraubenverdichtern.

Zur Belüftung von Belebungsbecken werden Niederdruck-Schraubenverdichter eingesetzt, die für einen Bereich von 0,5–1,5 bar ausgelegt sind und die Luft ölfrei verdichten. Konventionelle Schraubenverdichter arbeiten in einem Bereich von 3–30 bar und erfordern einen Ölkühlkreislauf zur Wärmeabfuhr. Solche Verdichter werden auf Kläranlagen zur Druckluftversorgung pneumatischer Steuerungen und Antriebe sowie im Werkstattbereich eingesetzt.

Die Luftmenge von Niederdruck-Schraubenverdichtern kann durch Verstellung der Drehzahl in weiten Grenzen stufenlos verändert werden (30–100 %). Der Betriebsdruck ergibt sich zunächst durch die konstruktive Auslegung. Bei einer Fehlanpassung kommt es zu einer Über- oder Unterverdichtung, dementsprechend verschlechtert sich die energetische Effizienz.

Niederdruck-Schraubenverdichter liefern kleine bis mittelgroße Luftmengen mit hoher energetischer Effizienz.

Turboverdichter

Turboverdichter sind Strömungsmaschinen. Sie bestehen in der Grundausführung aus einem motorisch angetriebenen beschaufelten Laufrad, mit welchem der strömenden Luft nach den Gesetzen der Strömungsmechanik Energie zugeführt wird. Im Abwasserbereich kommen bevorzugt Radialverdichter zum Einsatz. Bei diesen strömt die Luft axial in das Laufrad und wird dann nach außen abgelenkt. Die überwiegend entstehende kinetische Energie wird mit einem am Druckstutzen angebauten Diffusor möglichst verlustfrei in statische Energie (Druck) umgewandelt.

Zur Leistungsverstellung werden üblicherweise Leiteinrichtungen und seltener eine Drehzahlverstellung eingesetzt:

- Mit dem am Ausgang hinter dem Laufrad angeordneten Verstelldiffusor (Nachleiteinrichtung) kann die Luftmenge verstellt werden. Der Verstellbereich ist aus strömungstechnischen Gründen i. d. R. auf einen Bereich von **45–100 %** beschränkt.
- Mit einem am Eintritt vor dem Laufrad angeordneten Vorleitrad (Vorleitgitter) kann der einströmenden Luft ein Drall aufgeprägt werden. Dadurch wird die energetische Effizienz um ca. **15–20 %** verbessert.
- Eine Drehzahlverstellung wirkt sich auf den Druck und die Luftmenge gleichermaßen aus.



Üblicherweise werden Maschinen entweder mit Leiteinrichtungen oder mit einem drehzahlregelbaren Antrieb ausgerüstet. Gleichwohl lassen sich aus technischer Sicht alle Verstellmöglichkeiten kombinieren. Die energetische Effizienz lässt sich dadurch allerdings nicht weiter steigern, allenfalls kann der Betriebsbereich nach unten erweitert werden.

Turboverdichter laufen mit sehr hoher Drehzahl (ca. 15.000–40.000 min⁻¹). Beim Einsatz konventioneller Elektromotoren mit einer Drehzahl von ca. 3.000 min⁻¹ ist dann ein entsprechend

hoch übersetztes Getriebe erforderlich. Alternativ dazu können Hochgeschwindigkeitsantriebe mit Luft- oder Magnetlagerung eingesetzt werden, welche die erforderlichen Drehzahlbereiche direkt abdecken.

Turboverdichter eignen sich besonders für große Luftmengen. Durch den Einsatz von Leiträdern wird über den gesamten Verstellbereich eine gleichbleibend hohe Effizienz erreicht.

Turboverdichter, die nur über eine Drehzahlverstellung verfügen, eignen sich für mittelgroße Luftmengen. Die Kennlinie dieser Verdichter hängt stark von der Maschinenauslegung ab. Eine hohe energetische Effizienz wird nur in einem schmalen Band des gesamten Verstellbereiches erreicht.

Hinweise zur Auswahl der Druckluftherzeuger

Die wesentlichen Kriterien zur Auswahl von Druckluftherzeugern sind die energetische Effizienz und die aufgrund der Betriebsdaten (Luftmenge, Druck) zur Verfügung stehenden Bauarten. In Bild 4-21 sind für die vorgestellten Druckluftherzeuger als Einzelaggregat die gängigen Einsatzbereiche als bunte rechteckige Felder markiert. Auf der x-Achse ist die Luftmenge im logarithmischen Maßstab aufgetragen, auf der linken y-Achse der Druck. Die energetische Effizienz wird durch die auf der rechten y-Achse aufgetragene spezifische Leistung beschrieben; niedrige Werte stehen für eine hohe Effizienz. Für jede Bauart sind in der gleichen Farbe wie die markierten Einsatzbereiche jeweils zwei Kurven als Maximal- und Minimalwert angegeben, die durch Ergebnisse von Werksabnahmen oder durch Überprüfungen unter Betriebsbedingungen belegt sind. Zunächst zeigt sich der übliche Skalierungseffekt, nach dem die Effizienz unmittelbar von der Baugröße abhängt. Für Schrauben- und Turboverdichter gehen die Kurven fast stetig ineinander über. Im Übergangsbereich zu den Drehkolbengebläsen tritt eine sprunghafte Änderung auf, nach der Schraubenverdichter etwa 20–30 % effizienter sind als Drehkolbengebläse. Allerdings ist zu beachten, dass die ermittelten Werte für einen Druck von 550 mbar ermittelt wurden und sich bei geringerem Druck die energetischen Vorteile vermindern. Bei einem Druck von 450 mbar sind Schraubenverdichter und Drehkolbenverdichter energetisch gleichwertig.

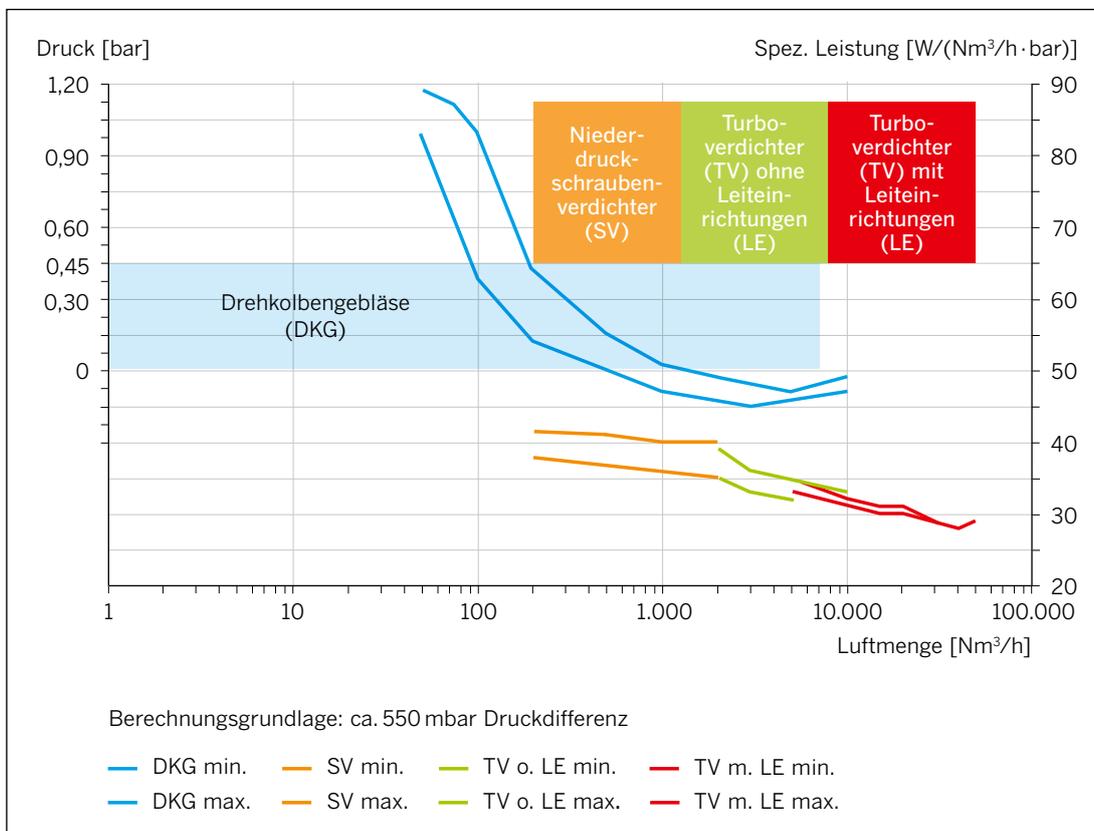


Bild 4-21 Bauarten, Einsatzbereiche und energetische Kennwerte von Druckluftherzeugern (x-Achse logarithmische Skalierung)



Nach dieser groben Vorauswahl kann unter Berücksichtigung der zu erwartenden Belastungsverhältnisse und der energetischen Effizienz (Kennlinie) der Aggregate im kombinierten Betrieb mit weiteren Druckluftherzeugern eine technisch-wirtschaftlich optimierte Auswahl getroffen werden. Aus energetischer Sicht ist anzustreben, dass der sich aus einer Analyse der Belastungsverhältnisse (Häufigkeitsverteilung) ergebende Betriebsbereich mit der größten Häufigkeit durch ein besonders effizientes Aggregat abgedeckt wird. Die zur Vervollständigung einer Gruppe erforderlichen Aggregate können dann nach den übrigen Auswahlkriterien (Verfügbarkeit, betriebliche Flexibilität, Robustheit, Langlebigkeit) ergänzt werden.

4.3.2 Energieeffizienzmaßnahmen und Praxisbeispiel

Die Auswahl der Bauart, die Staffelung der Aggregate und die Berücksichtigung der energetischen Kennlinie sind die entscheidenden Einflussfaktoren für den effizienten Betrieb einer aus mehreren Aggregaten bestehenden Druckluftversorgung. Die Planung einer solchen Anlage ist komplexer geworden. Bisher war es üblich, möglichst gleichartige Verdichter und meistens sogar gleich große Aggregate einzusetzen. Ein energieeffizienter Betrieb über einen großen Leistungsbereich ist jedoch nur mit einer Kombination unterschiedlicher Aggregate zu erreichen. Das erfordert nicht nur einen höheren Aufwand bei der Planung, sondern auch bei der Steuerung und Regelung. Nachfolgend werden nur Maßnahmen beschrieben, die sich ausschließlich auf den Druckluftherzeuger als Aggregat selbst beziehen. Solche Maßnahmen sind allerdings durchweg im Gesamtsystem Belüftung zu betrachten. Weitere Maßnahmen zur Belüftung sind in Kapitel 3.3.2.7 beschrieben.



Effizienzmaßnahmen

- Bedarfsgerechte Staffelung bzw. Dimensionierung der Druckluftherzeuger an die verschiedenen Lastfälle.
- Optimierung der Gebläsesteuerung und -regelung (vgl. Kapitel 4.6.4).
- Vermeidung eines durchgehenden Betriebes einzelner Druckluftherzeuger.
- Vermeidung von Regelungslücken durch große Überdeckung an den Umschaltpunkten.
- Möglichst hohe Flexibilität bei Änderung der Belastung (Anzahl der Aggregate, unterschiedliche Dimensionierung bzw. Größe der einzelnen Druckluftherzeuger).
- Große Überdeckung der verschiedenen Laststufen.
- Einsatz hocheffizienter Antriebe.
- Luftfilter regelmäßig prüfen und bei Bedarf reinigen.
- Prozessluft direkt von außen ansaugen.
- Trennung von Kühl- und Prozessluft – Prozessluft direkt von draußen ansaugen. Bei einer Temperaturreduzierung um 10 °C liegt der Energiebedarf um 3 % niedriger.
- Druckverlustarme Armaturen einsetzen und Bemessung der Saug- und Druckleitung auf optimalen Querschnitt, um große Druckverluste zu vermeiden.

Praxisbeispiel für eine energieoptimierte Auslegung einer Gebläse-/Verdichtergruppe Ausgangssituation

Bei dem nachfolgenden Beispiel aus der Praxis liegt der Bereich mit der größten Häufigkeit bei etwa 3.000–3.500 Nm³/h (Bild 4-22). Zur Druckluftherzeugung dienen vier gleich große drehzahlverstellbare Gebläse; jedes Gebläse ist in einem Bereich von 1.460–2.700 Nm³/h verstellbar. In der Kombination ergibt sich dann die in Bild 4-23 dargestellte Staffelung. Auf der linken Achse sind Laststufen angegeben, auf der rechten Achse die Kombination der in der jeweiligen Stufe in Betrieb befindlichen Gebläse; in der Laststufe 1 nur Gebläse 1, in der Laststufe 2 Gebläse 1 und 2 usw. In der Summe (Laststufe 4) decken alle Gebläse einen Bereich bis 10.800 Nm³/h ab. Nach dem Bemessungsansatz liegt die minimale Luftmenge bei 2.000 Nm³/h (min.), die typische Last bei 4.000 Nm³/h (typ) und die maximale Last bei 10.800 Nm³/h (max.).

Die tatsächlichen Werte weichen aus unterschiedlichen Gründen (Auslastung, Sicherheitsfaktoren etc.) deutlich nach unten ab, was durch die Auswertung der auftretenden Luftmengen bestätigt wird. Die Überdeckung an den Umschaltpunkten ist gering; beim Übergang von einem auf zwei Gebläse ergibt sich sogar eine Deckungslücke. Die aufgenommene Kennlinie eines der Gebläse ergibt, dass der energetisch effiziente Bereich bei etwa 2.100 Nm³/h liegt. Insgesamt ergibt sich

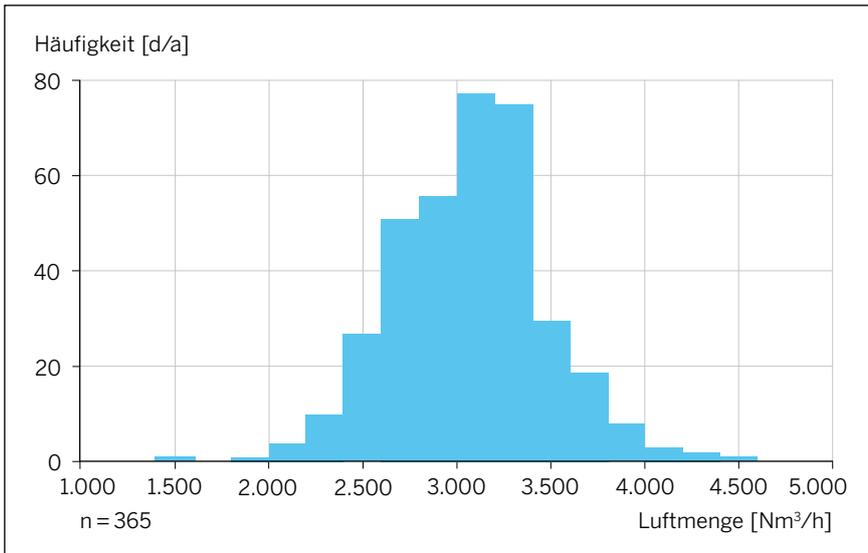


Bild 4-22 Häufigkeitsverteilung der erforderlichen Luftmengen im Fallbeispiel

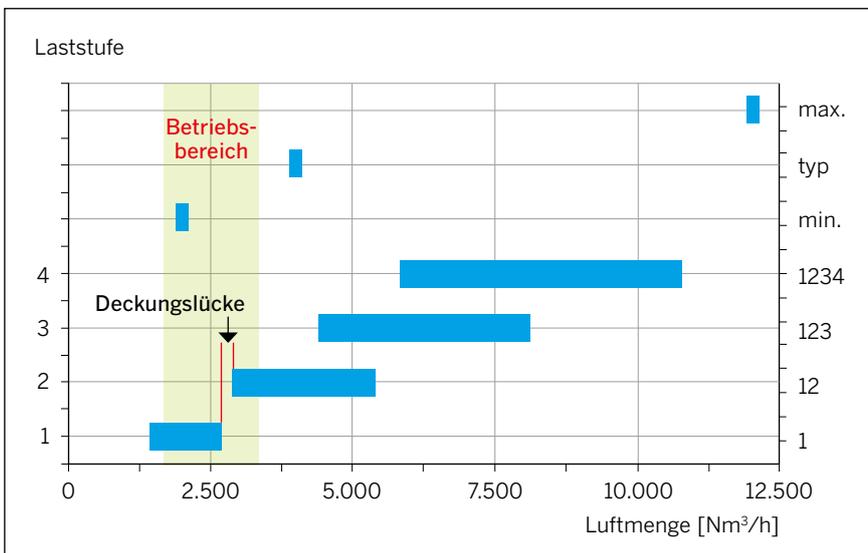


Bild 4-23 Starre Staffelung bei vier gleich großen Gebläsen

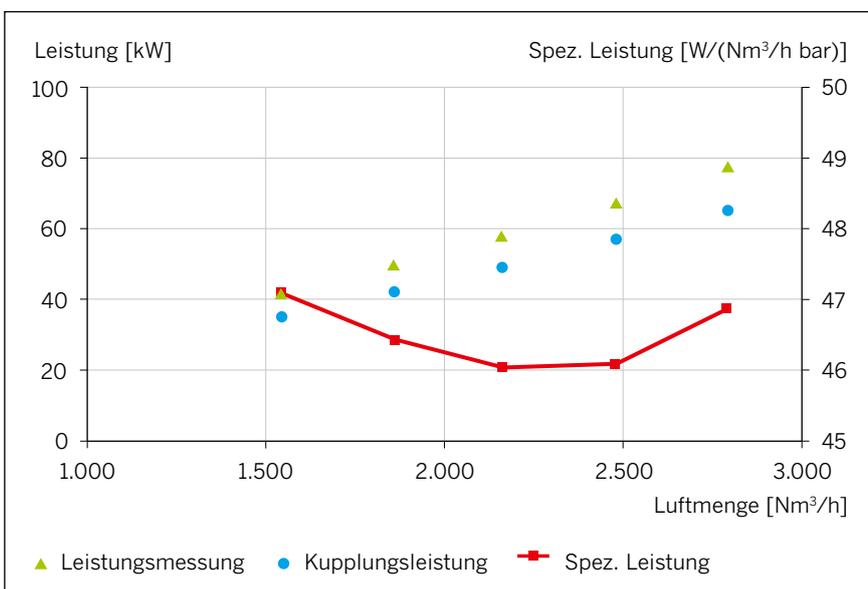


Bild 4-24 Aufgenommene Kennlinie eines Gebläses

somit eine betrieblich und energetisch unbefriedigende Situation, weil im Luftmengenbereich mit der größten Häufigkeit (ca. 2.700–3.200 Nm³/h) keine Überdeckung der Laststufen 1 (Gebläse 1) und 2 (Gebläse 1 und 2) vorhanden ist. Aus regelungstechnischer Sicht wäre eine Überdeckung von etwa 400 Nm³/h erforderlich. Stattdessen ergibt sich sogar eine Deckungslücke von etwa 200 Nm³/h. Im laufenden Betrieb kommt es daher zu häufigen Schaltvorgängen (ca. 10 x pro Stunde), durch welche die Aggregate stark beansprucht werden und sich der Stromverbrauch aufgrund der unregelmäßigen Anfahrvorgänge deutlich erhöht. Die unter Betriebsbedingungen aufgenommene Kennlinie (Bild 4-24) hat bei einer Luftmenge von 2.200 Nm³/h ihren niedrigsten Wert (Bestpunkt). Kombiniert man zwei Gebläse, liegt der nächste Bestpunkt bei 4.400 Nm³/h. Der Betriebsbereich mit der größten Häufigkeit liegt zwischen diesen beiden Punkten, sodass die gewählten Aggregate leider in ihrem energetisch ungünstigen Bereich der Kennlinie betrieben werden müssen.

Modernisierungskonzept

Zur Modernisierung werden zwei alte Gebläse durch einen Schraubenverdichter und einen Turboverdichter ersetzt. Der Turboverdichter ist so gewählt, dass er den Betriebsbereich komplett abdeckt und daher mit geringer Schalzhäufigkeit den größten Teil der Luftmenge energieeffizient abdeckt. Für den unteren Bereich wird ein Schraubenverdichter ergänzt, der sich mit dem Turboverdichter ausreichend überlappt. Werden die neuen Aggregate gemeinsam betrieben, können Luftmengen bis zu 5.500 Nm³/h abgedeckt werden. Es ist also möglich, die gesamte erforderliche Bandbreite der benötigten Luftmengen allein mit den beiden neuen Aggregaten abzudecken. Die beiden verbleibenden Drehkolbengebläse dienen als Reserve. Das Modernisierungskonzept führt zu einem energieeffizienten Betrieb. Die Einsparung liegt im Bereich von 25–30 % aufgrund der deutlich geringeren spezifischen Leistung der neuen Aggregate. Zudem ergeben sich Einsparungen aufgrund des verbesserten Regelverhaltens.

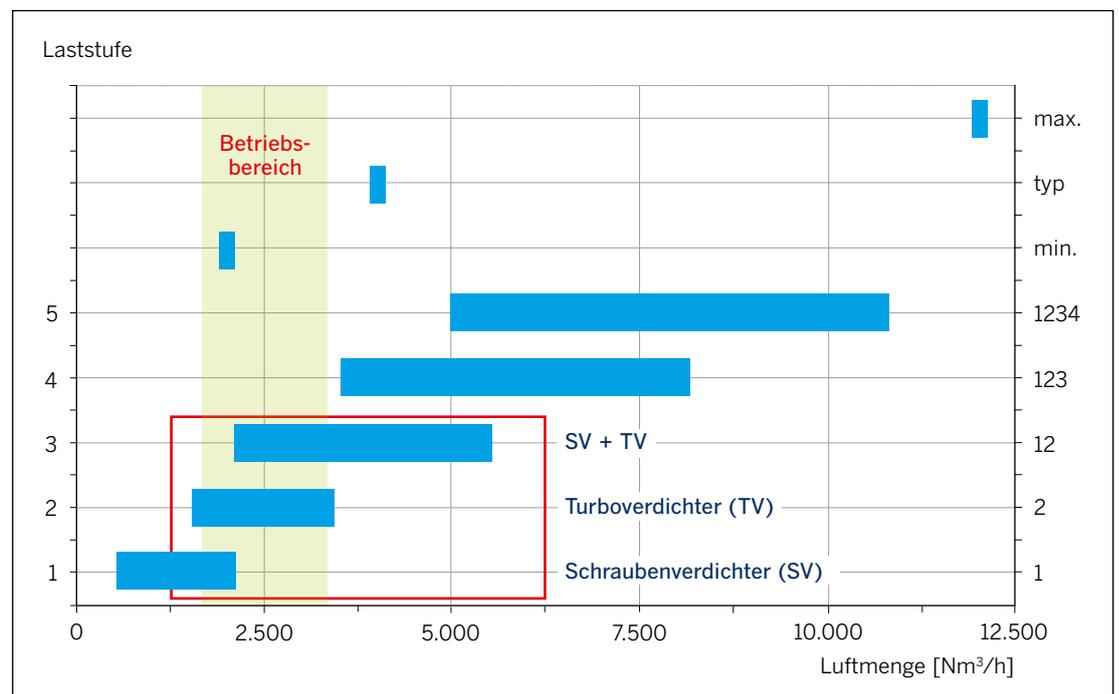


Bild 4-25 Stafflung gemäß dem Modernisierungskonzept

Hinweise zur Qualitätskontrolle bei der Druckluftherzeugung

Energetische Kennwerte von Druckluftherzeugungsaggregaten sind in technischen Regelwerken festgelegt, nach denen Abnahmen und Leistungsversuche durchgeführt werden. Unterschieden wird zwischen der Bestimmung des Leistungsbedarfs durch thermodynamische Bilanzierung [DIN, 1980, ISO, 2005] und der Bestimmung der mechanischen Leistungsaufnahme unter definierten Betriebsbedingungen bei geforderten Werten für Luftmenge und Druck [ISO, 2009]. Die Hersteller verfügen in ihren Werken über entsprechend zertifizierte Prüfstände mit geeichten Messgeräten. Als Ergebnis erhält der Käufer ein Werkzertifikat mit den leistungsbestimmenden Einzelwerten.

Allerdings ist eine Reproduktion der Werte eines Zertifikats nach der Inbetriebnahme eines Aggregats auf einer Kläranlage im laufenden Betrieb faktisch nicht möglich, da sich der reale Betrieb von den Prüfbedingungen deutlich unterscheidet.

Maßgebend ist allerdings das Verhalten der energetischen Effizienz unterschiedlicher Aggregate unter gleichen Betriebsbedingungen. Für eine entsprechende energetische Bewertung müssen die Leistungsaufnahmen, der Druck in der Sammelleitung und die Luftmenge erfasst werden. Als möglichst einfach zu ermittelnder betrieblicher Kennwert hat sich die spezifische Leistung bewährt:

Formel 4-3 Spezifische Leistung eines Druckluftherzeugers

$$P_{\text{spez}} = \frac{P_{\text{el}}}{Q \cdot p}$$

P_{spez} = spezifische Leistung [W/(Nm³/h bar)]

P_{el} = elektrische Wirkleistungsaufnahme des Aggregats (NS-Abgang) [W]

Q = Luftmenge, vorzugsweise gemessen auf der Druckseite [Nm³/h]

p = Druck in der Drucksammelleitung [bar]

Beispiele aus der Praxis zeigen bei Drehkolbengebläsen eine etwa 10–20 % höhere aufgenommene Wirkleistung als die vom Hersteller angegebene Kupplungsleistung. Diese große Differenz erklärt sich teilweise dadurch, dass in der angegebenen Kupplungsleistung zunächst nur der Leistungsbedarf der eigentlichen Gebläsestufe ohne Nebenaggregate (Lüfter, Luftfilter, Schalldämpfer etc.) enthalten ist. Hersteller und Anwender bemühen sich, durch Anpassung der technischen Regelwerke die Vergleichbarkeit zu verbessern.

Anhand der beschriebenen Vorgehensweise zur Überprüfung von Druckluftherzeugern können auf der Anwenderseite einerseits unterschiedliche Aggregate am gleichen Einsatzort und unter gleichen und „echten“ Betriebsbedingungen verglichen werden. Andererseits können die ermittelten Kennlinien des gleichen Aggregats in regelmäßigen Zeitabständen oder bei Auffälligkeiten, vor allem bei erhöhtem Energieverbrauch, auf Veränderungen in der Effizienz überprüft werden. Die separate Überprüfbarkeit der einzelnen Komponenten eines gesamten Belüftungssystems hilft dabei, die Ursachen der durch Alterung und Verschleiß unvermeidlichen Verschlechterung der Effizienz zu quantifizieren und dadurch Schäden an Einzelkomponenten früh zu erkennen und einzugrenzen.

4.4 Aggregate zur Durchmischung

4.4 Aggregate zur Durchmischung

4.4.1
Durchmischung im Belebungsbecken

4.4.2
Durchmischung in Faulbehältern

4.4.1 Durchmischung im Belebungsbecken

Bei der Umwälzung/Durchmischung im Belebungsbecken wurde in den 1990er-Jahren mit der Entwicklung großflügeliger (Durchmesser ca. 1,5–2,5 m), strömungsgünstiger und weitgehend verzopfungsfreier Rührwerke ein Technologiesprung erzielt, dessen Wirkung bis heute anhält. Weiterhin wurde der Einbau vereinfacht (Montage durch Taucher ohne Beckenentleerung) und der Aufwand für die Instandhaltung verringert. Die Zusammenfassung des gesamten Antriebsstrangs (Rührwerk, Getriebe, Motor, Frequenzumformer und Steuerung) im Sinne der beschriebenen Entwicklung zu Kompaktaggregate ist auch bei den Rührwerken zwischenzeitlich abgeschlossen. Dadurch konnte die energetische Effizienz der Aggregate noch geringfügig verbessert werden. Die wesentlichen Vorteile betreffen allerdings den betrieblichen Einsatz und die Projektierung. Durch

die Integration der elektronischen Komponenten in den im Wasser eingetauchten Antrieb entfällt der Aufwand für Frostschutz und Kühlung. Die stufenlose Verstellbarkeit der Leistung lässt auch nach dem Einbau eines Rührwerks noch eine Anpassung an die Einsatzbedingungen zu. Mit der vermehrten Anwendung von Simulationsberechnungen wurde der Kenntnisstand über das Strömungsverhalten der unterschiedlichen Beckentypen verbessert. Dadurch kann die erforderliche Rührwerksleistung genauer ermittelt werden; vor allem aber kann ihre Zahl und Anordnung in den Becken optimiert werden (siehe Kapitel 3.3.2.2.6).



Bei der Durchmischung von Belebungsbecken sind grundsätzlich zwei Aufgabenstellungen zu unterscheiden. Bei Becken mit getrennten Zuläufen für die einzelnen Stoffströme (Abwasser, Rücklaufschlamm, Rezirkulation) ist Durchmischungsenergie erforderlich, um eine gleichmäßige Verteilung aller Inhaltsstoffe zu gewährleisten. Wenn die Durchmischung der Stoffströme hingegen schon vorher, beispielsweise in Verteilerbauwerken, erfolgt, muss im Becken lediglich noch eine gerichtete Strömung hergestellt und der Entmischung (d. h. ständiger Volldurchmischung) und dem Absetzen des Belebtschlammes entgegengewirkt werden.

Rührwerke werden nach der Richtung der Zu- und Abströmung in Horizontal- und Vertikalrührwerke eingeteilt. Horizontalrührwerke bewirken eine Schlepplströmung am Beckenboden, Vertikalrührwerke erzeugen eine schlaufenförmige Strömung.

Horizontalrührwerke unterscheiden sich nach der Bauform, die maßgeblich durch den Laufrad- bzw. Flügeldurchmesser und die entsprechenden Drehzahlbereiche (langsam laufend, mittelschnell und schnell laufend) bestimmt wird. Die Anzahl der Flügel wirkt sich bei vergleichbar großen Aggregaten offensichtlich nur geringfügig auf den Energieverbrauch aus.

Weitere Konstruktionsmerkmale sind die Anordnung des elektrischen Antriebs und der Aufbau der Gesamtkonstruktion. Nachdem technische Probleme mit der Abdichtung der Welle oder der Kabeleinführung gelöst sind, geht der Trend zum Einsatz von Tauchmotorrührwerken. Horizontalrührwerke sind fast ausschließlich mit Unterwassermotoren ausgerüstet.

Bei **Vertikalrührwerken** bietet sich eine trockene Aufstellung des Motors grundsätzlich an. Der Einbau des Rührwerks erfordert jedoch eine entsprechende Brücke über den Becken. Zudem wird es bei besonders tiefen Becken (> 7 m) schwierig, die entsprechend lange Welle zu montieren und schwingungsfrei zu lagern.

Andere Bauformen konnten sich bislang nicht in ähnlicher Art am Markt durchsetzen. Der Einsatz von Oloid-Rührwerken beschränkt sich auf wenige Spezialfälle. Hingegen sind Hyperboloidrührwerke durch Optimierung der Fertigung und Montage wettbewerbsfähig geworden und kommen insbesondere als Ersatz für ineffiziente Vertikalrührwerke immer häufiger zum Einsatz.

Verfahrenstechnische Kennwertrecherche

Im technischen Regelwerk der DWA waren Umwälzaggregate nur indirekt über den erforderlichen spezifischen Leistungseintrag im Arbeitsblatt DWA-A 131 [DWA, 2016b] berücksichtigt. Im Zuge der Novellierung wurde der ursprüngliche Wert deutlich reduziert. In der neuen Ausgabe [DWA, 2016b] werden keine Vorgaben für die Umwälzenergie genannt. Einrichtungen zur Durchmischung werden neuerdings auch im Merkblatt DWA-M 229 [DWA, 2013d] behandelt.

Die Dimensionierung der Einzelaggregate sollte nach dem erforderlichen Schub erfolgen. Dieser ergibt sich aus der zur Vermeidung des Absetzens von belebtem Schlamm erforderlichen Bodengeschwindigkeit; üblicherweise wird ein Wert von **0,10 – 0,30 m/s** angesetzt [DWA, 2016e]. Die Auslegung muss so erfolgen, dass ein Absetzen des Schlammes auch bei niedrigem Schlammindex zuverlässig vermieden wird.



Für die unterschiedlichen Einbauorte können dann aufgrund ihrer Bauform geeignete Aggregate ausgewählt werden. Für die energetische Effizienz des Aggregats selbst ist die spezifische Schubleistung in N/kW ausschlaggebend. Aus der elektrischen Leistungsaufnahme kann dann die auf das umgewälzte Volumen bezogene spezifische Leistungsdichte in W/m³ errechnet werden.

Die spezifische Leistungsdichte in W/m^3 sollte keinesfalls als alleinige Auslegungsgröße für die Rührwerke verwendet werden. Davon wurde in der Vergangenheit oft ausgegangen mit der Folge, dass die Vorgaben aus dem technischen Regelwerk zunächst erfüllt waren. Tatsächlich führte aber der Einsatz ineffizienter Aggregate zu einem überhöhten Energieverbrauch oder es kam durch eine unzulängliche Auswahl der Einbauorte sogar zum unerwünschten Absetzen von Schlamm.

In der Praxis können heute bei sehr günstigen Voraussetzungen (große Becken, günstiges Längen-/Breitenverhältnis, strömungsgünstige Anordnung der Zu- und Abläufe) durchaus Werte von **0,8 – 1,5 W/m^3** erreicht werden. Für Becken mit einem Volumen von mindestens 1.000 m^3 sollten Werte von **1,5 W/m^3** nicht ohne besonderen Grund überschritten werden. Bei einem Volumen von weniger als 1.000 m^3 wurde bisher davon ausgegangen, dass wegen der hydraulisch bedingten Mindestbaugröße von Rührwerken die spezifische Leistungsdichte bis auf **2 – 5 W/m^3** ansteigt. Mit den neuen technischen Möglichkeiten der Drehzahlverstellung kann die Leistung an den Bedarf angepasst werden. Vorhandene Rührwerke können zeitlich getaktet betrieben werden, wobei die Pausenzeiten vorzugsweise durch Versuche und Feststoffkonzentrationsmessungen (Konzentrationsprofile) ermittelt werden sollten. Die charakteristische Größe für das Absetzverhalten ist der Schlammindex. Bei einem gut absetzbaren Schlamm ($\text{ISV} < 80 \text{ ml/g}$) und geringer Feststoffkonzentration ($\text{TS}_{\text{BB}} < 2 \text{ g/l}$) ist von einer Mindestgeschwindigkeit von **0,25 m/s** auszugehen. Weitere Hinweise sind dem Merkblatt DWA-M 229, Teil 1 zu entnehmen. Insgesamt sollte es möglich sein, auch bei nicht optimalen Randbedingungen einen spezifischen Leistungsbedarf von 2 W/m^3 einzuhalten. Der ablagerungsfreie Betrieb sollte dennoch das primäre Ziel bei Auslegung und Betrieb sein, sodass in begründeten Fällen auch ein höherer Leistungsbedarf zu rechtfertigen ist.

Effizienzmaßnahmen

Die erforderliche Anzahl, die Baugröße und die Anordnung der Durchmischungsaggregate werden in erster Linie durch die Beckengeometrie und die notwendigen Strömungsverhältnisse bestimmt. Weitere Maßnahmen zur verfahrenstechnischen Optimierung sind in Kapitel 3.3.2.2.6 beschrieben.

Darüber hinaus ergeben sich für die einzelnen Durchmischungsaggregate folgende Einzelmaßnahmen zur Effizienzsteigerung:

- Beim Einsatz großflügeliger Rührwerke in kleineren Becken ($< 1.000 \text{ m}^3$) können die Rührwerke zeitlich getaktet werden. Die Energieeinsparung ergibt sich unmittelbar aus der reduzierten Einschaltdauer.
- Anpassung der Drehzahl des Rührwerks.
- Durch den Austausch von Vertikalrührwerken einfacher Bauart (gerade oder schräge Schaufeln) gegen Hyperboloidrührwerke lässt sich die Durchmischung insbesondere im Bereich des Beckenbodens verbessern und zugleich der Energieverbrauch senken.
- Bei langgestreckten Becken lassen sich Rührwerke oft nur schlecht platzieren. Hier kann alternativ ein sog. Airlift-Verfahren eingesetzt werden. Ähnlich wie bei einer Sandfangbelüftung wird dadurch eine walzenförmige Strömung erzeugt. Durch den Einsatz grobblasiger Elemente in der Nähe der Beckenwände erfolgt faktisch kein Sauerstoffeintrag, sodass das Verfahren auch in anaeroben Zonen eingesetzt werden kann.

4.4.2 Durchmischung in Faulbehältern

Die Durchmischung des Faulbehälterinhalts hat folgende Aufgaben [DWA, 2014d]:

- Schnelle und gleichmäßige Verteilung des Rohschlammes im Faulbehälter,
- Vermeidung von Konzentrations- und Temperaturgradienten,
- Beschleunigung von Stoff- und Wärmetransportvorgängen,
- Vermeidung von Totzonen und Ablagerungen,
- Minimierung von Kurzschlussströmungen,
- Vermeidung von Schwimmdecken,



- Förderung der Entgasung,
- Vermeidung von Störungen oder Unterbrechungen des Betriebs.

Bei der Umwälzung in Faulbehältern unterscheidet man nach der eingesetzten Systemtechnik die in Bild 4-26 dargestellten Methoden. Richtlinien zur Gestaltung und Bemessung von Einrichtungen zur Durchmischung sind nicht verfügbar, da sie herstellerspezifisch sind. Dem DWA-Merkblatt M 368 können weitergehende Hinweise entnommen werden [DWA, 2014d].

Außen liegende Umwälzung	Innen liegende Umwälzung			Gaseinpressung
Kreiselpumpen	Mischer	Mehrstufige Rührwerke	Tauchmotor-rührwerke	Verdichter

Bild 4-26 Durchmischung von Faulbehältern

Bevorzugt kommen vertikale Mischer mit Schraubenschauflern und einer auf der Welle befestigten Umlenkeinrichtung zum Einsatz. Zudem wird mittels eines unter dem Mischer angebrachten Steigrohrs eine Zwangsumwälzung erreicht. Rührwerke in mehrstufiger Anordnung sind noch selten im Einsatz. Ein besonderes Problem ist hier die Einbringung durch die vergleichsweise kleine Öffnung am Faulbehälterkopf. Tauchmotorrührwerke kommen nur bei kleineren Behältern zum Einsatz. Es handelt sich dabei vorzugsweise um mittelschnell laufende Aggregate.

Der erforderliche Leistungseintrag pro Reaktorvolumen P/V_R nimmt mit kleiner werdendem Faulbehältervolumen und mit höherem Feststoffgehalt des Schlammes zu. Der Leistungseintrag allein ist allerdings kein hinreichendes Maß zum Vergleich von Durchmischungssystemen, da er deren Effizienz nicht einbezieht. Die gesamte Geometrie des Faulbehälters, Schlammigenschaften, Betriebsweise etc. sind bei der Bemessung zu berücksichtigen. Die Durchmischung mit außen liegenden Kreiselpumpen erfordert einen Leistungseintrag von **6–10 W/m³** [DWA, 2015a] und wird vorwiegend für Faulbehälter bis 500 m³ eingesetzt. Diese Bandbreite des Leistungseintrags hängt allerdings sehr stark vom Rohrleitungssystem ab. Die Durchmischung mit Schraubenschauflern benötigt bei größeren Behältern **3–6 W/m³** [DWA, 2015a] (bei ungünstigen Viskositätsbedingungen bis zu **10 W/m³**). Die intermittierende Faulgaseinpressung (bei Betrieb von **8–16 h/d**) benötigt einen Leistungseintrag von etwa **3–10 W/m³** Faulraum [DWA, 2015a], abhängig von Schlammviskosität und Faulbehältergeometrie. Allerdings eignen sich nicht alle Faulbehälterformen für eine Gaseinpressung, da bei kleinen Gassammelräumen der erhöhte Gaseintrag zu Schaum- und Schwamm-schlammproblemen führen kann.

Ebenfalls sind nicht alle Durchmischungsaggregate für alle Faulbehältergeometrien gleichermaßen gut geeignet. Für die bei kleinen Faulbehältern vermehrt zum Einsatz kommenden zylindrischen Behälter kann eine außen liegende Umwälzung mit Pumpen Vorteile gegenüber einem Mischaggregat haben, wenn die Rohrleitungen für den Schlamm möglichst kurz gehalten werden. Zur Unterstützung kann außerdem ein Krählwerk eingesetzt werden.

Effizienzmaßnahmen

Schraubenschaufler, langsam laufende Vertikalachsrührwerke oder die Faulgaseinpressung haben in der Regel bei großen Faulbehältern gegenüber der außen liegenden Umwälzung ausschließlich mittels Pumpen Vorteile in der Energieeffizienz. Eine Umrüstung bestehender Anlagen auf Schraubenschaufler ist aber nur möglich, wenn die aus dem Betrieb der Rührwerke resultierenden Lasten von der bestehenden Baukonstruktion aufgenommen werden können. Dies muss i. d. R. durch eine statische Berechnung nachgewiesen werden.

Darüber hinaus ergeben sich für die einzelnen Durchmischungsaggregate folgende Maßnahmen zur Effizienzsteigerung:

- Bei Umwälzpumpen sollte geprüft werden, ob auf einen intermittierenden Betrieb umgestellt werden kann. Die Mindestumwälzzeit sollte dabei über Versuche ermittelt werden.



- Schraubenschaufler können ebenfalls zeitlich getaktet betrieben werden. Zur Orientierung kann die Förderleistung des Mixers herangezogen und aus der geforderten Umwälzrate die Einschaltdauer berechnet werden.
- Einsatz einer Strömungssimulation für die Dimensionierung bzw. Optimierung der Faulbehälterdurchmischung.
- Eine Erhöhung der Rührgeschwindigkeit bewirkt keine Verbesserung bei der Umwälzung des gesamten Reaktorraums, sondern erhöht nur den Leistungseintrag und verschlechtert damit die energetische Effizienz. Vielmehr soll geprüft werden, ob die Rührgeschwindigkeit verringert werden kann.
- Einsatz von Leitblechen zur Vermeidung des Teetasseneffekts (Hinweis: Der Leistungsbedarf der Durchmischungsaggregate steigt.)

4.5 Aggregate für die Eindickung und Entwässerung von Klärschlamm

4.5 Aggregate für die Eindickung und Entwässerung von Klärschlamm

4.5.1

Allgemeine
Hinweise

4.5.2

Aggregate für die maschinelle
Voreindickung

4.5.3

Aggregate für die maschinelle Entwässerung
des ausgefaulten Schlammes

4.5.1 Allgemeine Hinweise

Die Schlammeindickung und -entwässerung sind verfahrenstechnische Bausteine der Schlammbehandlung, auf die aus prozess- und verfahrenstechnischer Sicht in Kapitel 3.5.3 eingegangen wird. Darauf aufbauend wird in diesem Abschnitt die Anlagentechnik ausführlicher beschrieben. Zudem werden die gängigen Aggregate der maschinellen Voreindickung und der maschinellen Entwässerung des ausgefaulten Schlammes vorgestellt.

An der grundsätzlichen verfahrenstechnischen Aufgabenstellung der Schlammeindickung und -entwässerung hat sich in den vergangenen Jahren wenig geändert. Dafür hat sich die Anlagentechnik im üblichen Rahmen technisch weiterentwickelt; z. B. werden anstelle der früher gängigen hydraulischen Antriebe jetzt elektrisch geregelte Antriebe eingesetzt. Eine Automatisierung der Anlagentechnik umfasst neben dem Betrieb häufig auch die abgestimmte Aufbereitung und Zugabe der Flockungsmittel. Ein zu beobachtender Trend ist der Übergang vom Tagesbetrieb (8 h) auf Dauerbetrieb (24 h). Hierdurch können die Aggregate deutlich kleiner dimensioniert werden. Bei den herstellerbedingten Optimierungen der einzelnen Aggregate in den letzten Jahren haben sich i. d. R. verbesserte Betriebsstabilität, höhere Durchsatzleistungen oder höhere Eindickungs- bzw. Entwässerungsgrade und höhere Energieeffizienz ergeben. Nachträgliche maschinentechnische Änderungen durch das Betriebspersonal auf einer Kläranlage sollten aber ohne Fachkenntnisse vermieden werden. Pauschale Optimierungen der einzelnen Aggregate für eine verbesserte Energieeffizienz lassen sich daher nur schwer festlegen. Jedoch haben Änderungen bzw. die Auswahl der Aggregate einen wesentlichen betrieblichen und energetischen Einfluss auf die nachfolgenden Verfahrensstufen einer Kläranlage (Faulung, Gasertrag, Schlammmentwässerung, Verwertung etc.) und sind bei jeder Optimierung zu berücksichtigen. Die Einflussgrößen sind im Allgemeinen:

- Änderung des TR-Gehalts (Pumpen, Faulbehälterumwälzung, Gasertrag, Entwässerung, Entsorgung),
- Zugabe von synthetischen polymeren Flockungsmitteln (Faulung, Entwässerung),
- Kontinuierliche oder diskontinuierliche Beschickung durch bedarfsgerechte Dimensionierung und Betrieb (Pumpen, Faulung, Gasertrag).



4.5.2 Aggregate für die maschinelle Voreindickung

Ist eine maschinelle Voreindickung von Überschussschlamm unverzichtbar, erfolgt diese i. d. R. mit langsam laufenden Aggregaten wie Trommeleindicker und Bandeindicker. Diese zeichnen sich durch einen geringen Energieverbrauch und eine hohe Zuverlässigkeit aus. Für eine maschinelle Voreindickung werden ebenfalls Zentrifugen eingesetzt. Selten sind Scheibeneindicker und Eindickungspumpen, auf die im Weiteren nicht eingegangen wird.

Für Aggregate der maschinellen Voreindickung von Überschussschlamm zeigt die nachfolgende Tabelle 4-5 typische Leistungsdaten. Der hier angegebene spezifische Stromverbrauch bezieht sich auf die jeweiligen Aggregate inklusive der zum Betrieb erforderlichen Nebenaggregate.



Tabelle 4-5 Austrags-Feststoffgehalt [% TR], spez. Polymer-Flockungsmittelverbrauch und spez. Energieverbrauch von Aggregaten der maschinellen Voreindickung [DWA, 2007d]

		Maschinelle Eindickung		
		Bandeindicker/ Trommeleindicker/ Schneckeneindicker/ Scheibeneindicker/ Eindickungs-Pumpen	Zentrifuge	
			Ohne pFM	Mit pFM
Austrags-Feststoffgehalt ÜS-Schlamm	% TR	5–7	5–7	6–8
Spez. Flockungsmittelverbrauch	kg WS/Mg TM	3–7	0	1–1,5
Spez. Energieverbrauch	kWh/m ³	< 0,2	1–1,4	0,6–1
Spez. Energieverbrauch	kWh/Mg TM	< 30	180–220	100–140

In allen Fällen werden den Aggregaten eine Einmischstrecke für das Flockungsmittel und ein Flockungsreaktor vorgeschaltet. Eine optimale Ausnutzung des Flockungsmittels ist für die Leistungsfähigkeit der nachfolgenden Eindickmaschinen von entscheidender Bedeutung.

Trommeleindicker

Bei einem Trommeleindicker handelt es sich um einen zylindrischen Trommelbehälter, welcher horizontal oder mit einem leichten Neigungswinkel aufgestellt wird. Bei einer Neigung kann das natürliche Schwerefeld für den Transport durch die Trommel genutzt werden. Zum Erhöhen der Durchsatzleistung der Trommel kann als Vorstufe ein Bandfilter vorgeschaltet werden. Steuerungsmöglichkeiten für einen optimierten Betrieb sind die Einstellung der Trommeldrehzahl und des Schlammthroughsatzes.

Bandeindicker

Bei einem Bandeindicker wird der Schlamm gleichmäßig auf einem kontinuierlich umlaufenden Filter- oder Siebband verteilt. Für die Eindickung sorgt die Schwerkraft. Gängig sind auch Vorrichtungen mit pneumatisch einstellbaren Pressplatten oder Druckwalzen, die das Eindickergebnis verbessern. Das Reinigen der Filterbänder erfolgt mit Wasserdrücken bis zu 8 bar. Steuerungsmöglichkeiten für einen optimierten Betrieb sind die Einstellung der Bandgeschwindigkeit und des Schlammthroughsatzes. Die Dicke der Schlammschicht lässt sich über die Wehrhöhe einer Staurampe am Austrag einstellen.

Zentrifugen

Bei Zentrifugen werden unter Ausnutzung eines künstlichen Schwerefelds die Wasserbindungskräfte überwunden. Zentrifugen können daher auch ohne Flockungsmittel betrieben werden. Bei der Eindickung ist die im Betrieb zu optimierende Trommeldrehzahl i. d. R. deutlich geringer, wodurch der Energieverbrauch und der Verschleiß deutlich vermindert werden. Die Zugabe von Flockungsmittel gewährleistet meist ein Drosseln der Trommeldrehzahl.

Eine Zentrifuge mit Varipond-System ermöglicht es, mit einer zusätzlichen beweglichen Drosselscheibe das Flüssigkeitsniveau zu verstellen. Bei laufender Maschine lässt sich damit die Teichtiefe auf unterschiedliche Schlammigenschaften einstellen. Das Ziel besteht darin, bei konstanten Durchsatzmengen trotz ungleichförmigem Zulauf-Feststoffgehalt einen konstanten Austrags-Feststoffgehalt zu erreichen.

4.5.3 Aggregate für die maschinelle Entwässerung des ausgefaulten Schlammes

Zur Entwässerung von ausgefaultem Schlamm werden i. d. R. bei kleineren Kläranlagen Bandfilter- und Schneckenpressen eingesetzt. Vor allem bei größeren Anlagen werden Dekantier-Zentrifugen und Kammerfilterpressen eingesetzt. Kammerfilterpressen und Schlauchfilterpressen werden kaum noch neu installiert.

Für Entwässerungsaggregate zeigt die nachfolgende Tabelle 4-6 auf der Grundlage von Betriebs- und Versuchsergebnissen typische Leistungsdaten. Diese beziehen sich auf normal entwässerbare Schlämme. Die Ergebnisse für sehr gut bzw. sehr schlecht entwässerbare Schlämme können hiervon abweichen.

Tabelle 4-6 Leistungsdaten maschineller Entwässerungsaggregate [DWA, 2013e]

Einheit	Zentri- fugen	Bandfilter- pressen ¹⁾	Filterpressen:		Schnecken- pressen	
			Kammerfilterpressen ³⁾ pFM	Schlauchfilterpressen Kalk-/Eisen- Konditionierung		
Austrags-Feststoffkonzentration TR (%)						
Primärschlamm	%	32–40	30–35	32–40	35–45	30–40
Mischschlamm aus PS + ÜS (Frachtverhältnis ca. 1:1)	%	26–32	34–30	26–32	33–45	24–30
Aerob stabilisierter Überschuss- schlamm (ohne Vorklärung)	%	18–24	15–22	18–24	28–35	18–24
Faulschlamm	%	22–30	20–28	22–30	30–40	20–28
Stromverbrauch						
Spez. Stromverbrauch ⁴⁾	kWh/m ³⁾	1,0–1,6	0,5–0,8	0,7–0,9 1,0–1,2 ⁵⁾	1,0–1,2	0,2–0,5
	kWh/t TR	40–60	20–30	30–40 40–50 ⁵⁾	30–40	8–16
Spez. Stromverbrauch mit Beschickung und Konditionierung ⁴⁾	kWh/m ³⁾	1,6–2,2	1,1–1,4	1,5–1,8	1,8–2,0	0,6–1,0
	kWh/t TR	60–90	40–50	60–70	70–80	20–40

1) TR im Zulauf zwischen 2 % und 7 %

2) Abhängig von Zugabemengen von Kalk und Eisen

3) Membranfilterpressen erreichen im Vergleich zu Kammerfilterpressen bei optimaler Betriebsweise und Konditionierung einen um 2 % bis 4 % höheren TR im Austrag; der Stromverbrauch von Membranfilterpressen ist etwas höher als der von Kammerfilterpressen

4) Stromverbrauch der Maschine bezogen auf den Schlammumsatz bzw. die Feststofffracht ohne Konditionierungsmittelmenge

5) Stromverbrauch von Membranfilterpressen



2

3

4

5

Der hier angegebene spezifische Stromverbrauch bezieht sich auf die jeweiligen Aggregate inklusive der notwendigen Nebenaggregate, zum Beispiel Schneckenantrieb bei Zentrifugen, Spritzwasserpumpe zur Bandreinigung bei Bandfilterpressen und Filterdruck- und Membranpressendruck-Erzeugung (Wasser oder Luft) sowie Pumpenaggregat zur Filtertuch-Reinigung bei Filterpressen. Die Bewertung des spezifischen Stromverbrauchs ist abhängig von der Maschinengröße, dem Auslastungsgrad und der Betriebsweise der Maschine sowie dem gewünschten Abscheidegrad [DWA, 2013e].

Bandfilterpressen

Bei Bandfilterpressen wird der Schlamm zwischen zwei Filterbändern unter steigendem Druck und wechselnder Scherbeanspruchung entwässert. In der Reihenfolge des Durchlaufs werden unterschieden: die Vorentwässerungszone (Schwerkraft), die Vorpress- und Keilzone (Druck), die Press- und Scherzone (Scherspannung) und die Hochdruckzone (Druckerhöhung). Bandfilterpressen arbeiten kontinuierlich. Sie zeichnen sich aufgrund ihrer insgesamt niedrigen Drehzahlen und Arbeitsgeschwindigkeiten durch eine hohe Zuverlässigkeit und Robustheit aus und werden zur Voreindickung und zur Entwässerung eingesetzt.

Der Abscheidegrad von Bandfilterpressen ist entscheidend von einer korrekten Dosierung von polymeren Flockungsmitteln abhängig. Insbesondere bei Fett- oder Eiweißanteilen im Schlamm oder bei besonderen Ausfällungen (zum Beispiel von Calciumcarbonat) sollte hierauf geachtet werden, da es zum Verschmieren oder Verstopfen der Filterbänder kommen kann. Ein wirksames Abspritzen wirkt der Verstopfungsneigung entgegen und erhöht damit die Betriebssicherheit und Verfügbarkeit.

Schneckenpressen

Schneckenpressen sind kontinuierlich arbeitende Entwässerungsaggregate, bei denen sich in einem zylindrischen Siebkorb (Lochblech, Spaltsieb, Stahlringe) eine Schneckenwendel mit konischer Schneckenwelle dreht. In der Reihenfolge des Durchflusses teilt man die Schneckenpresse in eine Eindick-, eine Filtrations- und eine Presszone auf. Das durch den Siebkorb abfließende Wasser wird im Gehäuse aufgefangen und abgeführt.

Zentrifugen

Zentrifugen, speziell Vollmantelschnecken-Zentrifugen (Dekantier-Zentrifugen) setzen sich in der Schlammentwässerung immer stärker durch. Üblich sind hierbei Gegenstromzentrifugen, bei denen die Aufgabe in der Mitte erfolgt, und das Zentrat am einen Ende und der Feststoff am anderen Ende ausgetragen wird.

Filterpressen

Nach der Bauart unterscheidet man Kammer- und Membranfilterpressen. Sie arbeiten chargenweise, wobei sich der Filterkuchen während der Beschickung in den Filtertüchern bildet. Diese sind auf Platten gespannt, die zu einem Paket zusammengefügt sind. Filterpressen arbeiten automatisch, wobei ein Chargenprozess im Wesentlichen in folgende zeitlich nacheinander ablaufende Takte unterteilt wird: Presse schließen – Schlammzufuhr – Pressen – Ausblasen – Entlasten – Öffnen – Entleeren.

Schlauchfilterpressen

Die Arbeitsweise von Schlauchfilterpressen entspricht grundsätzlich der von Filterpressen. Allerdings bestehen sie aus einem liegenden Zylinder, der gegen eine feststehende Platte gedrückt wird. In dem Zylinder ist ein beweglicher Kolben angeordnet, an dessen anderem Ende poröse Schläuche angeordnet sind, die mit der feststehenden Platte verbunden sind. Die Entwässerung erfolgt durch die (hydraulische) Aufbringung von Druck auf den beweglichen Kolben. Das Wasser wird in die Schläuche verdrängt, der Filterkuchen bildet sich in dem Zylinder.

Der wesentliche Vorteil gegenüber einer konventionellen Filterpresse ist die weitgehende automatische Entleerung, während bei Filterpressen üblicherweise eine manuelle Unterstützung und damit ein höherer Personalaufwand erforderlich ist.

4.6 Prozessleittechnik und EMSR-Technik

4.6 Prozessleittechnik und EMSR-Technik

4.6.1

Allgemeine
Hinweise

4.6.2

Automatisierung
abwasser-
technischer
Anlagen

4.6.3

Grundlagen der
Steuerungs- &
Regelungs-
technik

4.6.4

Effizienz-
steigerung durch
Steuerung &
Regelung

4.6.5

Webbasierte
Technologie-
entwicklung,
Industrie 4.0

4.6.6

Datenschutz und
Cybersicherheit

4.6.1 Allgemeine Hinweise

Mit der Automatisierungspyramide (Bild 4-27) lässt sich die Grundstruktur der Leit- und Automatisierungstechnik abwassertechnischer Anlagen darstellen. Zur Führung und Überwachung (Bedienung und Beobachtung) der Prozesse auf Kläranlagen und im Kanalnetz werden Leitsysteme eingesetzt. Mit Automatisierungsgeräten werden die für die Funktion der Verfahren und Prozesse erforderlichen Steuerungen und Regelungen realisiert. Der Informationsaustausch zwischen den Sensoren und Aktoren in der Feldebene, den Automatisierungsgeräten, den Leitsystemen und übergeordneten Systemen zur Datenarchivierung oder zur Betriebsführung erfolgt mit an die jeweiligen Anforderungen angepassten Kommunikationssystemen. Die hierarchische Struktur ist eine wesentliche Voraussetzung für den sicheren Anlagenbetrieb und eine für das Bedienungspersonal transparente Betriebsführung.

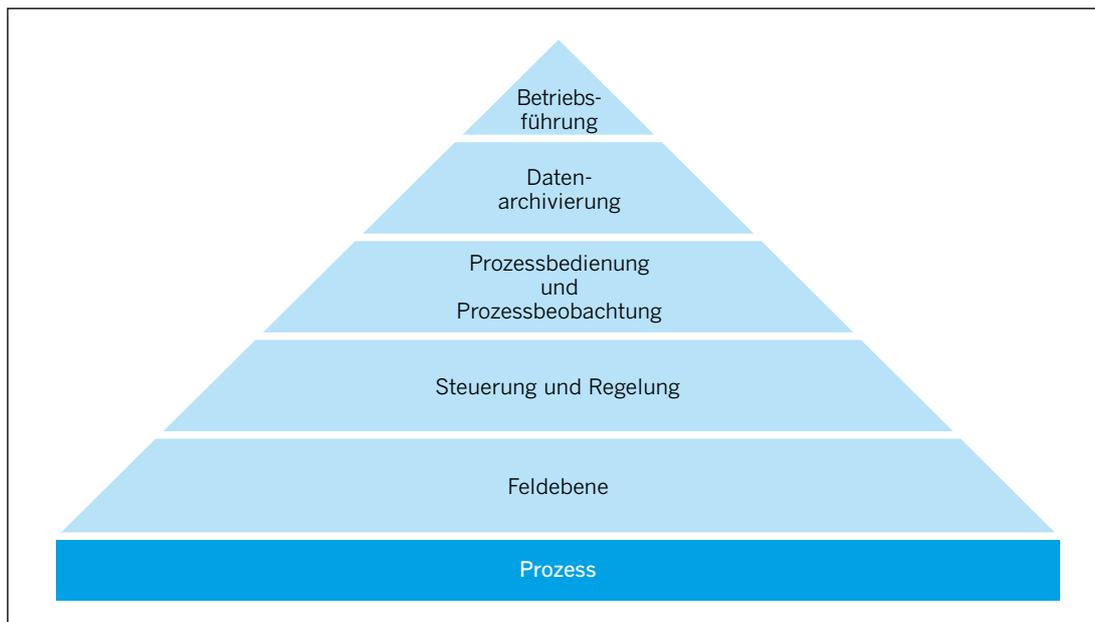


Bild 4-27 Automatisierungspyramide nach [DWA, 2011b]

Das Pyramidenmodell hat sich in der Praxis bewährt. Aufgrund der Fortschritte in der Informationstechnologie kommt es allerdings zu einer Vermischung der Ebenen, wobei der Trend zur Verlagerung von Funktionen hin zum Prozess geht. Beispielsweise übernehmen sog. intelligente Sensoren die Verarbeitung der Messwerte bis hin zu einfachen Regelungsaufgaben. Im Bereich der Betriebsführung kommen weitere Programmsysteme, bspw. zur Optimierung, zur Kennzahlenermittlung (Energiekennzahlen) und zur Instandhaltung zum Einsatz. Diese Entwicklung führt zu einem neuen Referenzmodell (Bild 4-28) mit den heute gebräuchlichen Abkürzungen, beispielsweise HMI (Human-Machine Interface), ERP (Enterprise Resource Planning), MES (Management Execution System).

Durch den Einsatz mobiler Komponenten mit drahtloser Verbindungstechnik verändert sich die automatisierungs- und leittechnische Landschaft [Seibert-Erling und Uecker, 2005]. Handtermi-

nals und die Identifikation von Elementen (Aggregate, Haltungen im Kanal, Geräte) mittels Barcode und RFID haben sich etabliert. Die für Sensoren und Aktoren von den Herstellern bereitgestellte Unterstützung auf der Basis von Web-Technologien (Asset Management) hat sich hingegen nicht durchgesetzt. Ein Fernzugriff auf das Leitsystem oder einzelne Steuerungen wird von den Betreibern immer häufiger genutzt. Den genannten Trends zum Einsatz drahtloser Kommunikation stehen allerdings die immer drängenderen Forderungen nach Daten- und Cybersicherheit entgegen. Hierauf wird in einem gesonderten Kapitel eingegangen (Kapitel 4.6.6).

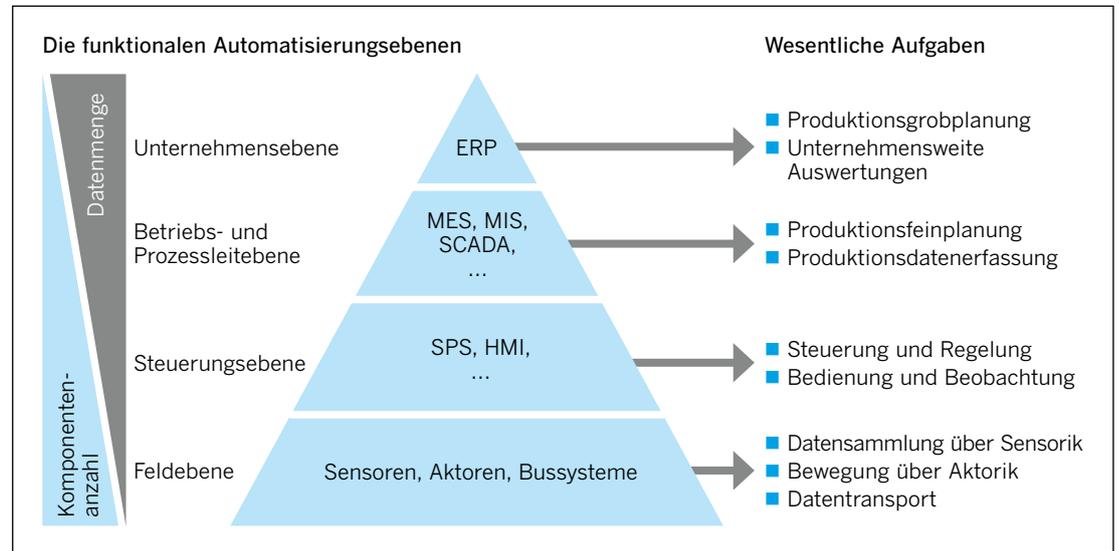


Bild 4-28 Automatisierungspyramide nach [VDMA, 2015]

4.6.2 Automatisierung abwassertechnischer Anlagen

Aufbauend auf der Grundstruktur der Automatisierungspyramide lassen sich die Aufgaben zur Automatisierung einer Anlage einteilen in die Erstellung eines gerätetechnischen Gesamtkonzepts und in die Aufstellung einer Funktionsbeschreibung als Grundlage für die Programmierung. Für eine energetische Optimierung muss i. d. R. die gerätetechnische Ausrüstung erweitert werden (Messgeräte, neue Aggregate) und es müssen die zusätzlichen Aufgaben (Datenerfassung, Steuerung und Regelung) funktionell beschrieben werden.

Gerätetechnisches Gesamtkonzept

Das gerätetechnische Konzept umfasst im Wesentlichen die Anpassung der leittechnischen Grundstruktur einer abwassertechnischen Anlage (Bild 4-29) an die konkrete Aufgabenstellung sowie die Auswahl geeigneter Geräte für die einzelnen Ebenen und das die Ebenen verbindende Kommunikationssystem. Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit der Einzelkomponenten und der durchgängigen Kommunikation hat die Automatisierung insgesamt einen qualitativ guten Standard erreicht.

Bei einer energetischen Optimierung muss geprüft werden, welche Eingriffe auf den einzelnen Ebenen erforderlich sind. Bezogen auf die beschriebenen neuen Anforderungen (Messkonzepte, neue Aggregate, regelungstechnische Optimierung) ergeben sich jeweils Aufgaben auf mehreren Ebenen:

- Bei der Installation zusätzlicher Geräte zur Verbrauchserfassung müssen die Geräte vor Ort eingebaut, elektrisch angeschlossen und in Betrieb genommen werden. Für eine kontinuierliche Erfassung muss über die Feldebene eine Kommunikationsverbindung zu einer SPS hergestellt und das Gerät entsprechend eingebunden werden. Auf der Serverebene müssen die Werte teilweise mehrfach projiziert werden (Systemserver, Archivserver, Protokollserver). Auf der Ebene der Bedienung und Beobachtung müssen Prozessbilder erstellt werden, um die Werte anzuzeigen. Sofern eine zentrale Auswertung mehrerer Anlagen gefordert wird, müssen die Daten entsprechend aufbereitet und exportiert werden.

- Beim Einsatz neuer energieeffizienter Kompaktaggregate muss die vorhandene signaltechnische Anschaltung angepasst werden, weil solche Aggregate i. d. R. nicht mehr über diskrete Ein-/Ausgabesignale, sondern über eine Busverbindung in die Automatisierung eingebunden werden. Weil bei diesen Aggregaten die Schaltanlagengeräte integriert sind, sind entsprechende Umbauten vor Ort erforderlich. Wie zuvor beschrieben, muss die Einbindung dann auf den anderen Ebenen angepasst werden.

Die Optimierung eines Regelkreises betrifft im Wesentlichen die SPS-Ebene und die Prozessbedienung und -beobachtung. Der Aufwand zur Anpassung älterer Programme sollte nicht unterschätzt werden.

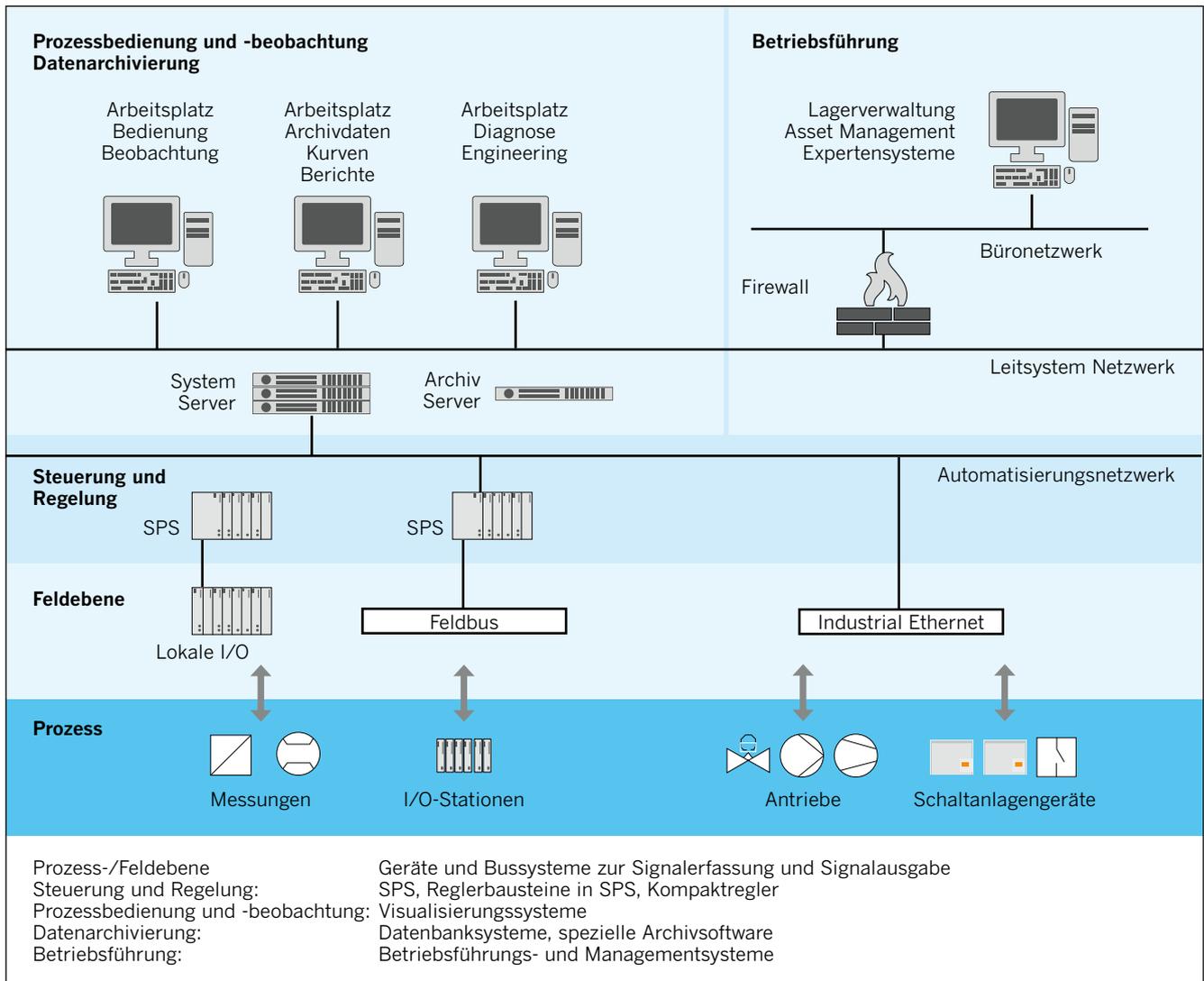


Bild 4-29 Leittechnische Grundstruktur nach DWA-M 253 [DWA, 2011b]

4.6.3 Grundlagen der Steuerungs- und Regelungstechnik

Bei der interdisziplinären Zusammenarbeit von Ingenieuren kommt es immer wieder zu Missverständnissen bei den Begrifflichkeiten „Steuern“ und „Regeln“. Deshalb folgt an dieser Stelle eine kurze Erklärung der in der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik verwendeten Begriffe.

Steuerungen und Regelungen dienen dazu, physikalische oder andere Größen in technischen Systemen oder Anlagen gezielt zu beeinflussen. Nach der akademischen Lehre wird bei einer Steuerung die zu beeinflussende Größe in Abhängigkeit von anderen Prozessgrößen oder von der Zeit verändert. Es erfolgt jedoch keine Rückführung der zu beeinflussenden Größe, sodass diese bei veränderten Randbedingungen deutlich von dem gewünschten Wert abweichen kann (Bild 4-30).

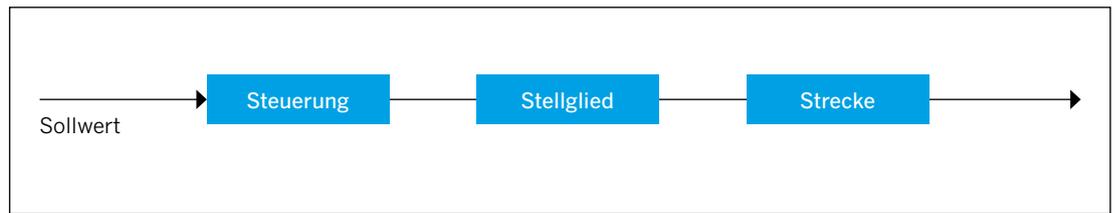


Bild 4-30 Steuerung als offene Wirkungskette

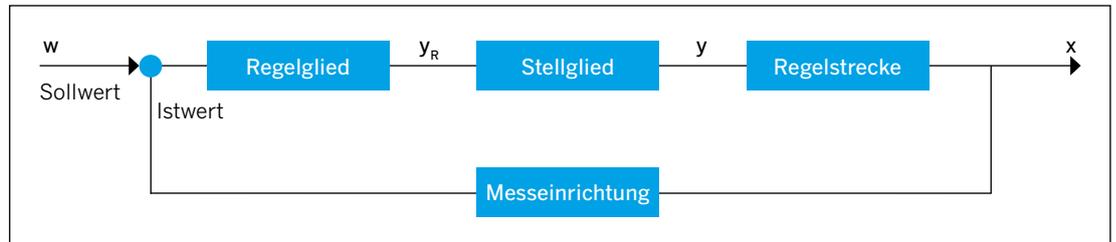


Bild 4-31 Geschlossener Regelkreis

Hingegen wird bei einer Regelung die zu beeinflussende Größe (Regelgröße) messtechnisch erfasst und zum Regler zurückgeführt, sodass ein Regelkreis entsteht (Bild 4-31). Im Regler wird der gewünschte Wert (Sollwert) ständig mit dem gemessenen Wert der Regelgröße verglichen und die Stellgröße so berechnet, dass die Abweichung zwischen dem Sollwert und der Regelgröße möglichst gering bleibt.

Das folgende Bild 4-32 soll anhand eines praxisnahen Beispiels den Aufbau eines Regelkreises noch einmal verdeutlichen.

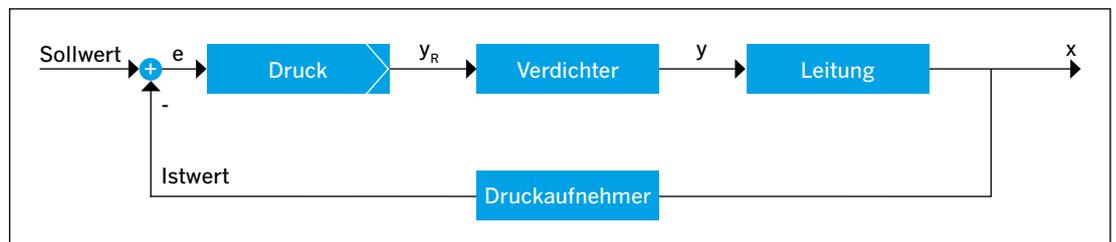


Bild 4-32 Regelkreis Druckluftproduktion

Für die Realisierung von Regelungsaufgaben stehen eine Vielzahl von Reglertypen zur Verfügung. Heutzutage kommen diese als Softwarekomponente mittels standardisierter Funktionsblöcke in Automatisierungs- oder Prozessleitsystemen zur Anwendung.

Grundsätzlich wird zwischen stetigen und unstetigen Reglern unterschieden. Bei unstetigen Reglern kann die Stellgröße (Y) nur zwischen k diskreten Werten ($k \geq 2$) variieren. Aufgrund dieser Eigenschaft spricht man, je nach Anzahl der Schaltzustände, auch von einem Zwei-, Drei- oder Mehrpunktregler. Durch die Variabilität von Schaltintervall und Schaltdifferenz lassen sich bei geringen Anforderungen an die Regelung und mit vergleichsweise geringem Realisierungsaufwand gute Ergebnisse erzielen (Beispiel: Füllstandsregelung).

Stetige Regler haben die Fähigkeit, die Stellgröße (Y) auf jeden Wert zwischen den Stellgrößenbegrenzungen einzustellen. Somit kann die Führungsgröße (Sollgröße) im stationären Zustand immer eingehalten werden. Typische Vertreter der stetigen Regler sind Proportional-, Integral- oder Differenzialregler sowie deren Kombinationen (PI, PD, PID).

Der PID-Regler ist universell einsetzbar, hat eine hohe Verbreitung und eine gute Akzeptanz. Aus den vorgenannten Gründen wird der PID-Regler auch in der Abwassertechnik häufig eingesetzt.

Für die weiterführenden Grundlagen der Regelungstechnik wird im Übrigen auf entsprechende Fachliteratur verwiesen [Hasenjäger, 2015, Philippsen, 2015].

Eine wesentliche Voraussetzung zur Entwicklung einer steuerungs- und regelungstechnischen Lösung zur energetischen Optimierung ist eine für alle beteiligten Fachleute einheitliche und verständliche Planungsgrundlage zur Beschreibung der Aufgabenstellung (Bild 4-33). Dazu werden vorzugsweise verfahrenstechnische Fließbilder nach [DIN, 2015b] und bei Aggregaten Wirkschaltbilder verwendet. Darauf aufbauend erfolgt die Umsetzung zunächst durch eine Festlegung der gerätetechnischen Lösung, in der die Anforderungen an die Aggregate und deren Zusammenwirken beschrieben sind. Die der Aufgabenstellung entsprechende Funktionalität wird in Signalflussbildern (für Regelungen) und Funktionsplänen (für Steuerungen) dargestellt.

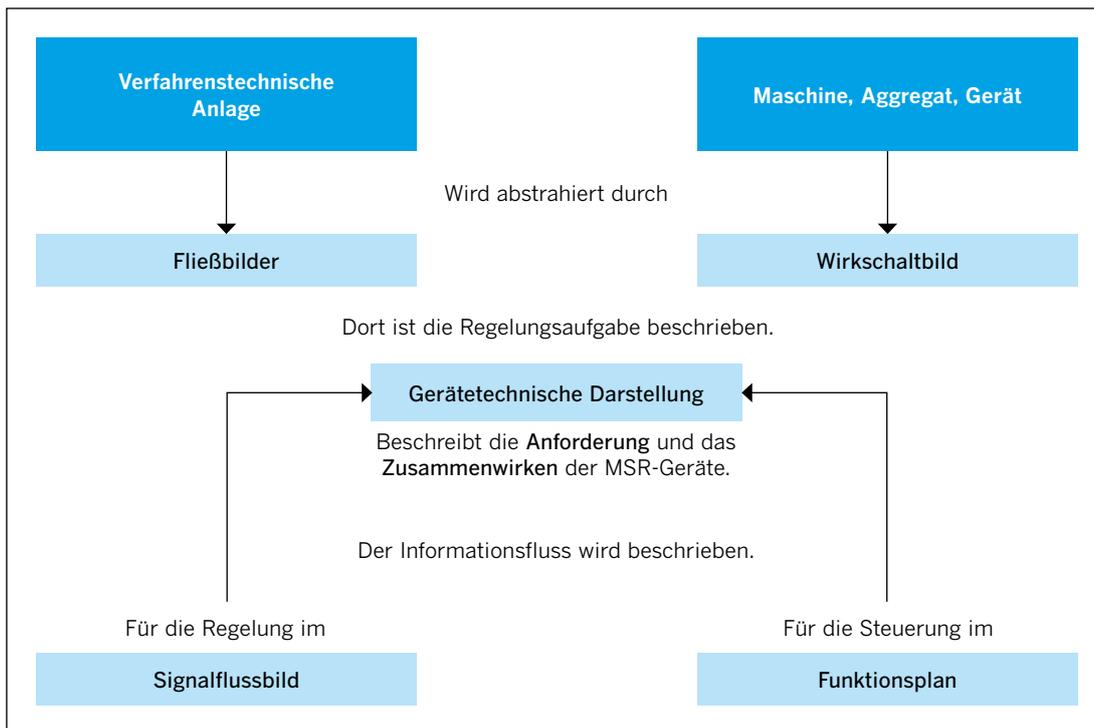


Bild 4-33 Zeichnungen und Pläne der Steuerungs- und Regelungstechnik

Für die Bearbeitung einer konkreten Regelungsaufgabe sind grundlegende Fragen zu klären, aus denen die Verschaltung des Regelkreises, der statische und dynamische Zusammenhang der auftretenden Mess- und Stellgrößen sowie der Störgrößen hervorgehen:

- Was soll geregelt werden (Regelgröße)?
- Welche Größen beeinflussen die Regelung?
- Welches ist die geeignete Stellgröße?
- Wo greifen die Störgrößen an?
- Wie wirken sich die Störgrößen aus?

Im nächsten Schritt dieses sog. Reglerentwurfs wird dann das gewünschte dynamische Verhalten (Vermeidung von Schwingungen und Störungsverhalten) festgelegt. Die passende Reglereinstellung kann entweder theoretisch durch mathematische Berechnung der Parameter oder durch die Einstellung nach empirischen Regeln (Einstellverfahren nach Ziegler/Nichols oder nach Chien, Hrones und Reswick) ermittelt werden [Philippsen, 2015].

Die Einstellregel von Ziegler und Nichols ist in der Praxis bedingt anwendbar, wenn der geschlossene Regelkreis für die Inbetriebnahme zur Verfügung steht und wenn die Stelleinrichtung (Pumpe, Verdichter) und die Regelstrecke (ggf. verfahrenstechnische Beschränkungen) ungedämpfte Schwingungen ausführen dürfen, ohne Schaden zu nehmen. Die Anregung einer Schwingung gelingt in der Regel durch die Auslösung sprungförmiger Änderungen des Sollwertes oder der

Störgröße. Die optimierten Parameter lassen sich dann aus dem Verlauf der Regelgröße, vor allem der Periodendauer einer Schwingung berechnen. Die Durchführung eines solchen Versuches sollte dem Fachpersonal mit ausreichender praktischer Erfahrung vorbehalten bleiben.

Die analytische Bestimmung der Reglerparameter erfordert besonders bei zunehmender Streckenordnung einen erheblichen mathematischen Aufwand bzw. ist unter Umständen überhaupt nicht mehr durchführbar. Daher werden in der Praxis die Regler manuell, ohne mathematisches Modell, in Betrieb genommen.

In der regelungstechnischen Praxis unterscheidet man Regelungsarten, Regelungsstrukturen und Regelungsmethoden (Bild 4-34). Die Regelungsart beschreibt den Zustand oder das Verhalten eines einzelnen Reglers. Bei Regelungsstrukturen handelt es sich um speziell verschaltete Einzelregler oder um standardisierte Kombinationen mehrerer Regler. Als Regelungsmethoden bezeichnet man die Verfahren, die nicht mit den Mitteln der klassischen Regelungstechnik zu beschreiben sind.

Regelungsarten	Regelungsstrukturen	Höhere Regelungsmethoden
<ul style="list-style-type: none"> ■ Selbsttätige Regelung ■ Handregelung ■ Festwertregelung ■ Folgeregelung ■ Zeitgeführte Regelung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mehrpunktregelung ■ Kaskadenregelung ■ Verhältnisregelung ■ Regelung mit Störgrößen-aufschaltung ■ Ablöseregulung (Override) ■ Regelung mit Bereichs-aufspaltung (split range) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fuzzy ■ Neuronale Netze ■ Internal Model Control ■ Prädiktive Verfahren ■ Zustandsregelung

Bild 4-34 Regelungsarten, -strukturen und -methoden

4.6.4 Effizienzsteigerung durch Steuerung und Regelung



Effizienzsteigerung durch Steuerung und Regelung wird in der Automatisierungs- und Prozessleittechnik unter dem Begriff Advanced Process Control (APC) zusammengefasst.

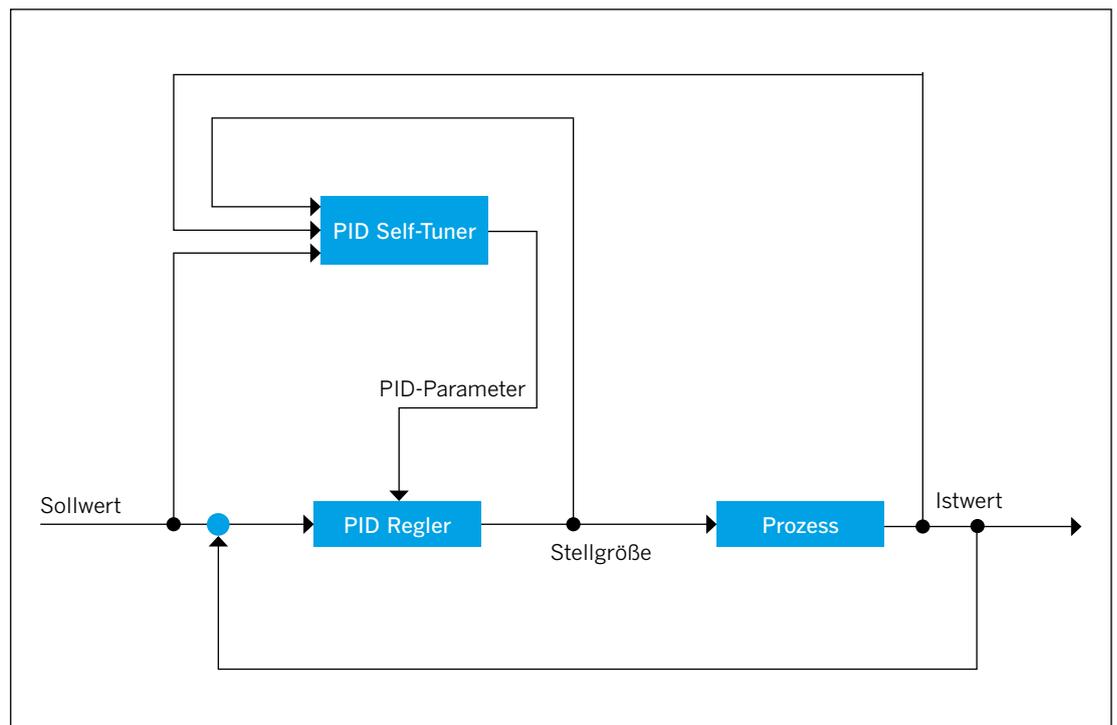


Bild 4-35 Struktur PID-Tuner

APC stammt ursprünglich aus der Chemie- und Pharmaindustrie. Der Begriff steht für den ganzheitlichen Ansatz zur Senkung der Betriebskosten bzw. Erhöhung der Produktivität durch effiziente Prozessführung mittels Einsatz von höheren Regelungsmethoden (Bild 4-35). Für Abwasseranlagen sind Methoden und Umsetzungsvarianten im Merkblatt DWA-M 253 beschrieben [DWA, 2011b].

Sind vor einigen Jahren für den Einsatz der vorher genannten Regelungsmethoden noch weitere Kosten für z. B. zusätzliche Hardware, Software oder Lizenzkosten angefallen, so sind diese heute als standardisierte Funktionsbausteine in vielen Prozessleitsystemen integriert.

Betreibern von Abwasseranlagen stehen somit neue Möglichkeiten zur Verfügung, die vorhandene Prozesssteuerung zu optimieren. Die Schwierigkeiten bei der Bestimmung der Regelparameter für die oft eingesetzten PID-Regler wurden im vorigen Kapitel 4.6.3 aufgezeigt.



Durch den Einsatz eines standardisierten PID-Tuning-Bausteins wird mittels adaptiver Verfahren die Parametrierung des PID-Reglers automatisch angepasst und so die Regelung optimiert.

Daraus folgt nicht nur eine Verbesserung der Regelgüte, sondern auch eine Reduzierung der Energiekosten bzw. ein geringerer Verbrauch von Hilfsstoffen (z. B. Fällmittel).

Der Einsatz von höheren Regelungsmethoden ist in der Praxis mit anlagenbedingten Schwierigkeiten verbunden. Eine sorgfältige Planung sowie ein erhöhter Realisierungs- und Implementierungsaufwand sind zu beachten. Änderungen der Regelungsstrukturen und der Parameter sind, wegen der hohen Komplexität, daher von dem mit dem Entwurf der Regelung vertrauten Personal durchführbar.

Grundlage für die energetische Optimierung durch Verbesserung der Steuerung und Regelung ist die Erstellung einer Funktionsbeschreibung als Bestandteil eines Lastenheftes/Pflichtenheftes nach VDI/VDE 3694 [VDI, 2014b]. Die Beschreibung der Automatisierungsaufgabe sollte auf bewährten Funktionsblöcken aufbauen (PID-Regler, Ablaufsteuerungen etc.). Für einstufige Belebungsanlagen sind die in der Praxis relevanten Regelungen im Arbeitsblatt DWA-A 268 beschrieben [DWA, 2016d].

Für eine nach dem Belebtschlammverfahren betriebene Kläranlage mit getrennter anaerober Stabilisierung werden – dem Abwasser- und Schlammweg folgend – für die Teilprozesse mit hohem energetischem Einsparpotenzial die wichtigsten Steuerungen und Regelungen steckbriefartig beschrieben. Die Beschreibung der Funktionsweisen beschränkt sich dabei auf die Hauptfunktionen.

Sandfang

Bei einem belüfteten Sandfang wird durch tangenciales Einblasen von Druckluft eine walzenförmige Strömung erzeugt und der Sand durch Fliehkräfte abgeschieden. Das Sandfanggebläse läuft meist unregelmäßig im Dauerbetrieb. Der Sandfangräumer wird in einem festen Zeittakt oder manuell nach Bedarf eingeschaltet. Dadurch werden zugleich die Räumung mit der Sandentnahmepumpe und der Betrieb des Sandwäschers oder Sandklassierers angestoßen. Die für den Räumzyklus erforderliche Ansteuerung der Fahrmotoren, der Schilde und Pumpen basiert auf einer Schrittkettensteuerung. Die im Sandwäscher ablaufenden Spül- und Absetzprozesse werden mit einer Ablaufsteuerung mit einstellbaren Zeiten für die Teilprozesse koordiniert.

Bei belüfteten Sandfängen ergeben sich erfahrungsgemäß große Einsparpotenziale durch eine Anpassung der Belüftung an den tatsächlichen Bedarf. Bei zu groß ausgelegten Gebläsen ist die Beschaffung eines an den Bedarf angepassten kleineren Aggregats eine wirtschaftliche Lösung. Darüber hinaus kann durch eine zur Zulaufmenge proportionale Steuerung eine Einsparung erzielt werden. Eine verfahrenstechnische und energetische Verbesserung lässt sich durch eine abschnittsweise Belüftung erreichen. Hierzu sind allerdings motorisch betätigte Schieber erforderlich und das Gebläse muss drehzahlverstellbar sein. Ein weiteres energetisches Einsparpotenzial ergibt sich bei der Sandräumung und der Sandentnahme durch eine an die Belastung angepasste Taktung. Weil der Sandanfall nicht direkt messbar ist, wird die Zulaufmenge als Steuerungsgröße verwendet. Wenn Betriebserfahrungen über die Ursachen eines erhöhten Sandanfalls vorliegen (Wetterlage, typische Verhältnisse im Einzugsgebiet) können diese bei der Steuerung berücksichtigt werden.



Vorreinigung (einschl. Rohschlammabzug)

Der Vorklärbeckenräumer läuft üblicherweise im Dauerbetrieb. Die für den Räumzyklus erforderliche Ansteuerung der Fahrmotoren, der Schilde und Pumpen basiert auf einer Schrittkettensteuerung. Schwimmschlamm- und Fettpumpen werden bedarfsabhängig eingeschaltet. Energetisch relevant ist vor allem der Rohschlammabzug.



Das energetische Einsparpotenzial ist bei der Vorreinigung gering. Durch eine Optimierung des Fahrwegs im Sinne einer häufigeren Räumung des vorderen Beckenbereichs ergibt sich zwar nur eine geringe Verbrauchseinsparung, jedoch lässt sich aus verfahrenstechnischer Sicht die Schlammräumung zur Vergleichmäßigung des Schlammanfalls dadurch optimieren. Bei den Schwimmschlamm- und Fettpumpen kommt es vor allem auf die Auswahl geeigneter Pumpen und die richtige Auslegung an. Das Einsparpotenzial durch eine verbesserte Steuerung und Regelung ist gering. Die energetische Relevanz des Rohschlammabzugs ergibt sich einerseits aus dem Aufwand für die Rohschlammförderung und andererseits aus der Energiezufuhr für die Schlammbehandlung. Für die Auswahl geeigneter Pumpen wird auf Kapitel 4.2.4 verwiesen. Der Rohschlammabzug erfolgt in der Regel zeitgesteuert und kann durch eine von der Konzentration des eingedickten Schlammes abhängige Abschaltung weiter optimiert werden. Durch die höhere Konzentration ergeben sich eine Reduzierung der zu fördernden Schlammmenge und eine entsprechende Einsparung beim Stromverbrauch, übrigens auch bei allen weiteren Fördereinrichtungen auf dem Weg zum Faulbehälter.



Denitrifikation, Nitrifikation

Zur Stickstoffelimination werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt (vorgeschaltete Denitrifikation, Kaskadendenitrifikation, intermittierende N/DN). Die wesentlichen Stellgrößen sind die Sauerstoffzufuhr und die Rezirkulation. Bei der zur Sauerstoffversorgung üblicherweise eingesetzten Druckbelüftung ergeben sich große Einsparpotenziale. Diese lassen sich allerdings nur dann erschließen, wenn das anlagentechnische Konzept und die Auslegung der Komponenten eine flexible Anpassung an den belastungsabhängig schwankenden Luftbedarf zulassen.



Im Rahmen des anlagentechnischen Konzepts wird die Zuordnung der Druckluftherzeuger zu den Becken festgelegt. Bei einer festen Zuordnung von Verdichtern zu einzelnen Becken entfällt eine Luftverteilung, jedoch ist der Verstellbereich stärker eingeschränkt als bei einer zentralen Druckluftversorgung mit mehreren unterschiedlich abgestuften Aggregaten. Hinweise zum Betriebsverhalten eines Belüftungssystems und der einzelnen Komponenten finden sich im Merkblatt DWA-M 229 Teil 2 [DWA, 2016e]. Die Komplexität der Regelung ist bei einer zentralen Druckluftversorgung mit Luftverteilung größer. Im Vergleich zum Einsatz einschleifiger Regelungen bei einer Einzelbeckenzuordnung sind bei einer zentralen Erzeugung mit einer Luftverteilung auf die Becken mehrere vermaschte Regelkreise erforderlich. Die praktische Umsetzung solcher Konzepte mit Automatisierungskomponenten (SPS) wird durch die Bereitstellung standardisierter Funktionsbausteine (PID-Regler, Kaskadenregler) vereinfacht. Eine hohe Flexibilität der Druckluftversorgung ermöglicht eine genaue und sichere Einhaltung der Sauerstoffkonzentration, sodass Aufschläge auf den Sollwert als Sicherheitsreserve entfallen können. Durch die sichere Einhaltung einer Sauerstoffkonzentration von 1,5 mg/l gegenüber einem Wert von 2,5 mg/l können etwa 10 % des Stromverbrauchs der Verdichter eingespart werden. Für die bei der vorgeschalteten Denitrifikation erforderliche Rezirkulation stehen mehrere Steuerungs- und Regelungskonzepte zur Auswahl. Mit einer zulaufproportionalen Steuerung ohne Rückkopplung der Nitratkonzentration lässt sich keine wesentliche Energieeinsparung erzielen. Mit einer Regelung der Nitratkonzentration im Ablauf der Denitrifikationszone wird eine im verfahrenstechnischen Sinne bedarfsgerechte und damit energieeffiziente Rückführung realisiert. Hinweise für die Erstellung von Regelungskonzepten für die unterschiedlichen Verfahren der Stickstoffelimination finden sich im Arbeitsblatt DWA-A 268 [DWA, 2016d] und in der weiterführenden Literatur [Hertlein, 1999], [Seibert-Erling, 2014].

Nachklärung (einschl. Rücklaufschlamm- und Überschussschlammförderung)

Bei einem im Dauerbetrieb laufenden konventionellen Nachklärbeckenräumer mit Schildräumer ergibt sich aufgrund der geringen Antriebsleistung kein energetisches Einsparpotenzial. Beim Rücklaufschlamm ergeben sich Einsparpotenziale einerseits durch einen effizienteren Betrieb der Pumpen und andererseits durch unterschiedliche Strategien der Schlammrückführung.

Beim Einsatz von Saugräumern mit mehreren Abzugsrohren kann es aufgrund unterschiedlicher hydraulischer Widerstände (Länge der Rohrleitungen, unterschiedliche Schlammkonzentration) zu Verstopfungen einzelner Leitungen kommen. Deshalb werden Saugräumer meist mit einem deutlich höheren Durchfluss betrieben als es verfahrenstechnisch erforderlich ist. Durch den Einsatz von Durchflussregelstrecken in den einzelnen Abzugsrohren lässt sich nicht nur eine Verstopfung vermeiden, sondern es kann außerdem die Abzugsmenge aus einzelnen Zonen des Nachklärbeckens gezielt verändert werden. Die dadurch insgesamt reduzierte Rücklaufschlammmenge führt zu einer entsprechenden Energieeinsparung bei den Rücklaufschlammumpen. Durch den Einsatz höhenverstellbarer Zuläufe im Mittelbauwerk und der dazu erforderlichen Mess- und Regelungstechnik lässt sich die Leistungsfähigkeit der Nachklärung in Bezug auf das Absetzverhalten steigern. Durch die verbesserte Eindickung kann die Rücklaufschlammmenge reduziert und somit Energie eingespart werden. Die unterschiedlichen Strategien zur Rücklauf- und Überschusschlammförderung werden im technischen Regelwerk unter dem Begriff Feststoffmanagement zusammengefasst (DWA-A 268), [DWA, 2016d]. Über die dort beschriebenen Betriebsweisen für den Rücklaufschlamm (konstanter Rücklaufschlammstrom, Zufluss proportionaler Rücklaufschlammstrom) hinaus wurden in den letzten Jahren neue, vor allem konzentrationsabhängige Betriebsweisen erfolgreich erprobt [Kainz und Patziger, 2005]. Interessant sind dabei Betriebsweisen mit einer Regelung der Rücklaufschlammkonzentration oder der Rücklaufschlammfracht, weil sich dadurch hydraulische Stoßbelastungen vermeiden lassen. In diesem Zusammenhang wird auch auf die Möglichkeit verwiesen, bei drohender Verlagerung des Schlammes von der Belebung in die Nachklärung die Durchmischung in einem Teil der Belebung für die kritische Zeit des Anstiegs der Wassermenge abzuschalten und dadurch den Schlamm dort zu speichern. Es ist unbestritten, dass sich durch Steuer- und Regelungsstrategien noch weitere Leistungspotenziale der Nachklärbecken erschließen lassen [DWA, 2007a]. Weil damit bisher aber kaum Erfahrungen vorliegen, bietet es sich an, im Rahmen von Planungen über Simulationsberechnungen Hinweise zu erarbeiten, die dann im Betrieb verifiziert werden sollten. Als Strategien kommen in Betracht:

- konstanter Rücklaufschlammstrom ohne gesonderte Steuerung oder Regelung,
- gestaffelter Rücklaufschlammstrom in Abhängigkeit von der hydraulischen Beschickung (möglichst zeitverzögert),
- Rücklaufschlammstrom in Abhängigkeit vom Schlamm Spiegel und vom Zufluss, gegebenenfalls zusätzlich von der Trübung im Ablauf,
- Rücklaufschlammstrom in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt im Rücklaufschlamm,
- Kombination der vorgenannten Strategien.

Der Abzug des Überschusschlammes erfolgt mit dem Ziel, das Schlammalter in der Belebung zu beeinflussen. Für das Absetzverhalten in der Nachklärung ist die Menge gegenüber dem Rücklaufschlamm nicht relevant, es sei denn, dass man den Abzug gezielt in Phasen mit hoher hydraulischer Belastung verlegt.

Schlammbehandlung

Für den Bereich der Schlammbehandlung soll nachfolgend nur die getrennte anaerobe Schlammstabilisierung gesondert betrachtet werden. Für Überschusschlamm Eindickung, Schlamm desintegration, Hygienisierung, Schlamm Lagerung, Prozesswasserbehandlung, Schlamm entwässerung und Trocknung hängt der Energieverbrauch sehr stark von dem gewählten Verfahren ab. Die energetischen Aspekte werden daher vollständig in Kapitel 3.5 gemeinsam mit den einzelnen Verfahren dargestellt. Es bleibt noch zu erwähnen, dass bei fast allen Verfahren der Schlammbehandlung der Stromverbrauch nicht die entscheidende energetische Größe ist, weil unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten andere Einflussfaktoren (Verbrauch an Flockmittel, Entsorgungskosten etc.) ein wesentlich höheres Gewicht haben. Auf der anderen Seite finden sich gerade deshalb oft einfach umzusetzende Optimierungsmaßnahmen wie die zeitweilige Abschaltung von Hilfsaggregaten (Rührwerken etc.), wenn das Hauptaggregat (Entwässerungsmaschine) nicht in Betrieb ist.

Bei der anaeroben Stabilisierung ist zunächst die Art des Systems zur Durchmischung zu unterscheiden. Die bekannten Systeme sind eine außen liegende Umwälzung mit Pumpen und der Einsatz von innen liegenden Mischern. Beide Systeme sind i. d. R. auf das Behältervolumen und die Geometrie ausgelegt und laufen dann im Dauerbetrieb. Es gibt allerdings unterschiedliche



Vorgaben für die umzuwälzende Menge bezogen auf das Behältervolumen. Eine diesbezügliche Anpassung kann über eine Laufzeit-/Pausensteuerung der Pumpen und Mischer vorgenommen werden. Dies sollte allerdings nicht ohne eine verfahrenstechnische Begleitung und Überprüfung der Auswirkungen auf den Abbaugrad, auftretende Temperaturschichtungen oder Konzentrationsprofile geschehen.

4.6.5 Webbasierte Technologieentwicklung, Industrie 4.0

Einer der großen Trends in der Automatisierung geht zur mobilen Technik in Verbindung mit Webanwendungen und ständig an jedem Ort verfügbaren Daten. Die immer noch exponentielle Zunahme der Datenübertragungsraten und der verbreitete Einsatz mobiler Endgeräte (Tablets, Smartphones) machen den Einsatz gerade für Branchen mit dezentralen Anlagen und den Dauerbetrieb mit wechselndem Personal interessant.

In diesem Zuge kommen Prozessleitsysteme als Cloudlösungen immer häufiger zum Einsatz. Bei solch einer Lösung wird der Zugang zum Prozessleitsystem über einen Online-Softwaredienst durch den Hersteller oder den Systemintegrator zur Verfügung gestellt. Der wesentliche Vorteil dieser Systeme ist, dass der Kläranlagenbetreiber keine Server-Hardware anschaffen und betreiben muss.

In Deutschland wurde zur Hannover Messe 2011 das Motto „Industrie 4.0“ eingeführt. Durch eine Bündelung der Aktivitäten sollen die Voraussetzungen für eine strukturierte und aufeinander abgestimmte Entwicklung durch die Industrie geschaffen werden.

Im Wasser- und Abwasserbereich wird die Anwendbarkeit von Industrie 4.0-Konzepten im Rahmen von Pilotprojekten [BMW, 2017] untersucht. Die wesentlichen Ziele sind u. a. die zentrale Erfassung und Strukturierung heterogener Daten sowie die gleichzeitige Analyse lokaler und systemübergreifender Informationen. Aus Anwendersicht ist die Integration von Niederschlagsdaten als Echtzeitwerten für die Steuerung von Kläranlagen und Kanalnetzen eine Perspektive. Aus der energetischen Sicht ist vor allem die Erzeugung von betrieblichen Kennzahlen zur Beurteilung von Aggregaten interessant.

Den neuen Möglichkeiten stehen allerdings die sich durch die Vernetzung der Anlagen und den Einsatz von mobilen Endgeräten ergebenden Risiken für die IT-Sicherheit gegenüber.

4.6.6 Datenschutz und Cybersicherheit

Für Kläranlagenbetreiber ergibt sich hinsichtlich des Themas Cybersicherheit oder IT-Sicherheit eine neue Herausforderung. Seit Juli 2015 ist das IT-Sicherheitsgesetz (Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme) und seit Mai 2016 die dazugehörige Rechtsverordnung in Kraft getreten. In der „Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz“ (BSI-Kritisverordnung – BSI-KritisV) des Bundesministeriums des Innern werden Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als **500.000 Einwohnerwerten** (Einwohnerzahl und Einwohnergleichwerte) sowie Kanalnetze mit mehr als **500.000 angeschlossenen Einwohnern** (Einwohnerzahl) als Kritische Infrastrukturanlagen eingestuft. Diese Anlagen bzw. deren Betreiber unterliegen damit allen Forderungen des BSI-Gesetzes bzw. der BSI-KritisV.



Aber auch Betreiber von kleineren Abwasseranlagen können betroffen sein, wenn zum Beispiel Kanalnetz und Kläranlage oder mehrere Kläranlagen in einer Schaltwarte bzw. Leitzentrale zusammengeschaltet sind und die angegebenen Anwendungsgrenzen überschreiten.

Letztlich muss sich aber jeder Betreiber von Abwasseranlagen mit dieser Thematik auseinandersetzen, da im Falle eines Kompromittierens oder im Worst Case sogar eines Versagens der Anlage durch IT-Ausfall voraussichtlich zumindest ein Grundschutz nachgewiesen werden muss. Vertiefende Informationen können der im Handbuch angegebenen Fachliteratur entnommen werden [BSI, 2017, VDI, 2011a].

Die IT-Sicherheit wird also zukünftig auch bei Überlegungen zur Energieoptimierung eine bedeutende Rolle spielen, da Entscheidungen wie zum Beispiel Messwertaufnahme über WLAN evtl. nicht mehr zugelassen sind. Auch bei der Entwicklung von Lösungen, die auf Verbundkonzepten (Smart Grids, Regelenergie, klärtechnische Verbundsteuerungen, Kanalnetzsteuerungen etc.) basieren, ist zu beachten, dass der erforderliche Datenaustausch mit den Anforderungen der IT-Sicherheit verträglich ist.

C

1

2

3

4

5

Literatur



5 Erneuerbare Energien und Energiebereitstellungssysteme in Abwasseranlagen

5 Energiebereitstellungssysteme in Abwasseranlagen

5.1
Allgemeine
Hinweise

5.2
Faulgas

5.3
Strom

5.4
Wärme und
Kälte

5.5
Speicher

5.6
Energie-
wandler

5.1 Allgemeine Hinweise

Energie kann in verschiedenen Formen vorkommen, beispielsweise als potenzielle Energie, kinetische Energie, chemische Energie oder thermische Energie. Energie lässt sich von einem System zu einem anderen übertragen und von einer Form in eine andere umwandeln.

Nach der Reihenfolge ihres Einsatzes lässt sich die Energie in vier Stufen einteilen:

- **Primärenergieträger** kommen in der Natur direkt vor, wie Stein- und Braunkohle, Uran, Erdöl oder -gas sowie Erneuerbare Energiequellen.
- In den meisten Fällen muss Primärenergie in Kraftwerken, Raffinerien etc. in **Sekundärenergieträger** umgewandelt werden. Sekundärenergie ist Energie, die als Ergebnis eines Umwandlungsprozesses und unter Energieverlust aus Primärenergie gewonnen wird (z. B. Koks, Briketts, Strom, Fernwärme, Heizöl oder Benzin).
- Die Energie am Ort des Letztverbrauchers wird als **Endenergie** bezeichnet.
- Diese wird, wieder unter Verlusten, in **Nutzenergie** umgewandelt (Heiz- und Prozesswärme, Licht sowie mechanische Energie).

Auch in Abwasseranlagen wird Energie in unterschiedlicher Form bereitgestellt. Diese Bereitstellung aus unterschiedlichen Quellen wird in den nachfolgenden Kapiteln näher dargestellt.

5.2 Faulgas

5.2 Faulgas

5.2.1
Faulgas-
produktion

5.2.2
Co-Vergärung
zur Erhöhung der
Faulgasproduktion

5.2.3
Desintegration
zur Erhöhung der
Faulgasproduktion

5.2.4
Faulgasreinigung &
-aufbereitung

5.2.1 Faulgasproduktion

Bei der anaeroben Schlammfäulung (vgl. Kapitel 3.5.4.4) sowie bei der anaeroben Abwasserreinigung fällt als Produkt des anaeroben biologischen Abbaus von organischen Stoffen Faulgas an (Bild 5-1). Qualität und Quantität des erzeugten Faulgases hängen vor allem von der Abwasserzusammensetzung, der Verfahrenstechnik der Abwasserbehandlung, der behandelten Schlammmenge und -zusammensetzung, der Verweilzeit im Faulbehälter, dem Betrieb der Fäulung, der Durchmischung des Faulraums sowie dem Temperaturniveau ab.

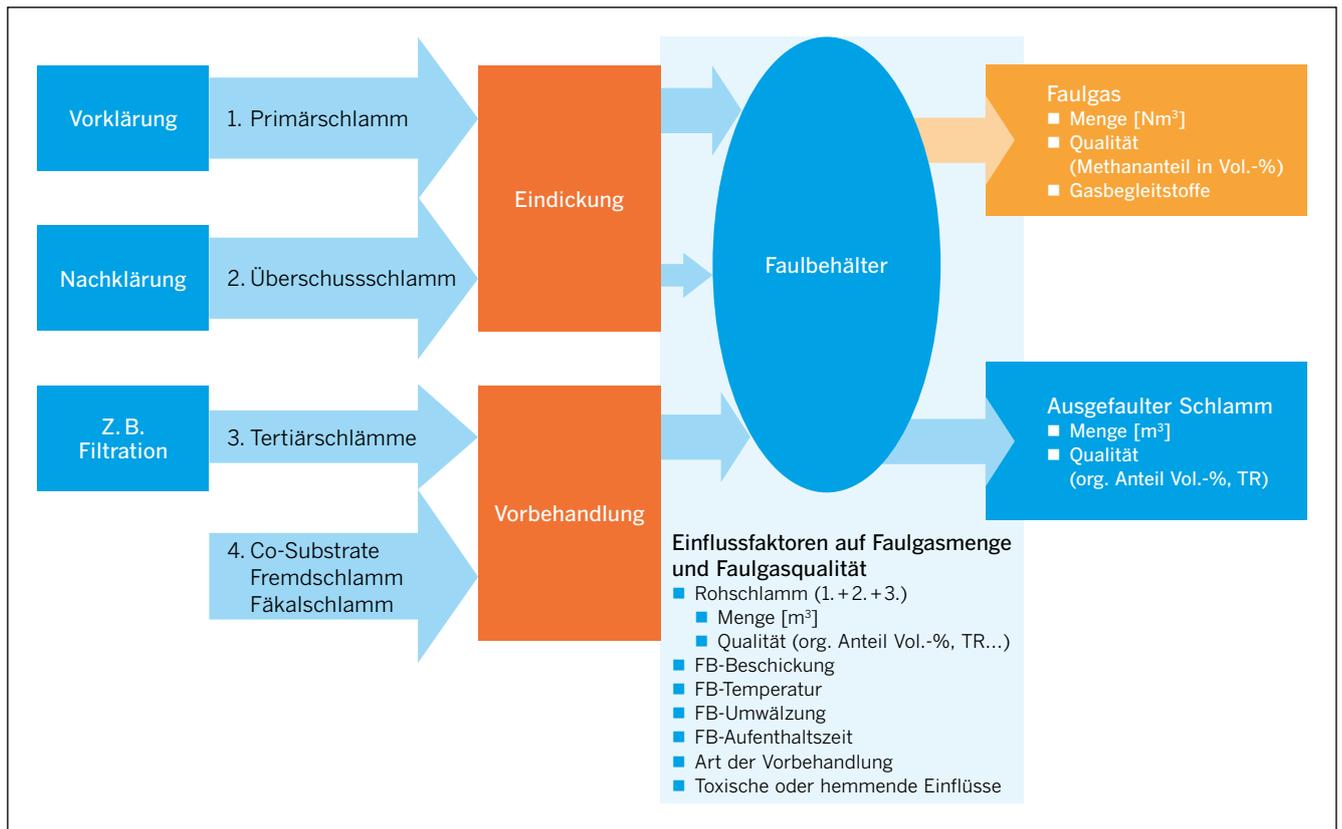


Bild 5-1 Schlämme und Faktoren für die Faulgasproduktion bei der anaeroben Schlammbehandlung

Rohschlammmenge und -qualität

Die Menge (m³) und die Beschaffenheit (GV) der anfallenden Schlämme aus der Vorklärung (Primärschlamm), aus der biologischen Stufe (Überschuss- oder auch Sekundärschlamm), aus der Nachfällung (Tertiärschlamm) sowie aus angelieferten Fremdschlämmen und Co-Substraten sollten durch örtliche Messungen bestimmt werden. Für die Aufstellung von Energiebilanzen sind die in der Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2 dargestellten Werte maßgeblich. Sie enthalten wesentliche Größen für den Anfall und die Beschaffenheit des Rohschlammes (Basis-Schlammmanfall) aus den Tabellen 6 und 7 des Merkblatts DWA-M 368 [DWA, 2014d].

Der Primärschlammmanfall und der über den Primärschlamm dem Faulbehälter zugeführte organische Trockenrückstand erhöhen sich infolge von längeren Aufenthaltszeiten in der Vorklärung, durch eine gezielte Vorfällung, durch zusätzliche Stoßfrachten bei Niederschlagsereignissen und durch die Entleerung von Regenbecken.

Der Überschussschlammmanfall und damit auch der organische Trockenrückstand bei Belebungs- und Festbettverfahren ist im Wesentlichen vom Schlammalter, von der Abwassertemperatur und vom Verhältnis der abfiltrierbaren Stoffe zum Eintrag abhängig. Mit steigendem Schlammalter t_{TS} und steigender Temperatur steigt auch der Anteil des CSB bzw. BSB₅, der im Belebungsbecken zu CO₂ oxidiert wird. Somit sinkt mit steigendem Schlammalter der für die Faulgasbildung zur Verfügung stehende Schlammanteil.

Tabelle 5-1 Schlammfall ($\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$) und Glühverlust (%) bei biologischen Kläranlagen
50-Perzentilen nach [Pinnekamp et al., 2011b, DWA, 2014d]

1. Primärschlamm (50-Perzentilen, Jahresmittelwerte)			
Vorklärzeit t_{VK}	0,5 h	1 h	2 h
1.1 Schlammmenge ($\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$) ¹⁾	24	28	32
1.2 oTR-Anteile ¹⁾	75–80 %	75–80 %	75–80 %
2. Überschussschlamm für $t_{\text{VK}} = 1 \text{ h}$; $T = 15 \text{ °C}$ (50-Perzentilen, Jahresmittelwerte)			
Abhängig von C-, N-Elimination	BSB-Elim. $t_{\text{TS}} = 5 \text{ d}$	N-Elim. $t_{\text{TS}} = 10 \text{ d}$	N-Elim. $t_{\text{TS}} = 15 \text{ d}$
2.1.1 Schlammmenge BB ($\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$) ¹⁾⁺²⁾	36	33	32
2.1.2 Schlammmenge TK ($\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$) ¹⁾		24	
2.1.3 Schlammmenge MBR ($\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$) ¹⁾⁺²⁾		Wie BB	
2.2.1 Glühverlust (GV) BB ¹⁾	74 %	72 %	71 %
2.2.2 Glühverlust (GV) TK ¹⁾		65 %	
3. Tertiärschlämme (50-Perzentilen, Jahresmittelwerte)			
3.1 Schlammmenge FFS ($\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$) ¹⁾		4	
3.2 Glühverlust (GV) ¹⁾		50 %	
4. Co-Substrate (siehe Kapitel 5.2.2)			
2.2.3 Glühverlust (GV) MBR ²⁾		Wie BB	

Anmerkung: Differenzierte Werte nach T (°C) und t_{VK} (h) sind Tab. 6 des DWA-M 368 zu entnehmen

t_{TS} = Schlammalter, VK = Vorklärung, BB = Belebtschlammverfahren, TK = Tropfkörper, MBR = Membran-Bioreaktor Verfahren, FFS = Flockungfiltration mit Fe

Quellen:

¹⁾ Merkblatt DWA-M 368, Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, Juni 2014, 50 % Fraktile [DWA, 2014d]

²⁾ Energieeinsparungen bei Membranbelebungsanlagen – Phase I [Pinnekamp et al., 2011b]

Tabelle 5-2 Basisschlammfall und -zusammensetzung der Schlämme im Jahresmittel
(gewichtete Mittelwerte) [DWA, 2014d]

	einwohner- spezifische Trockenrück- stands-Fracht	mineralischer Trockenrückstand (Glührückstand)	organischer Trocken- rückstand	Glühverlust	abbaubarer organischer Trockenrück- stand ¹⁾
	$b_{\text{TR,E,d}}$ $\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$	$b_{\text{m,TR,E,d}}$ $\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$	$b_{\text{o,TR,E,d}}$ $\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$	GV %	$b_{\text{oTR,abb,E,d}}$ $\text{g}/(\text{E} \cdot \text{d})$
Primärschlamm	28	7	21	75	15
Überschussschlamm	32	9	23	72	18
Rohschlamm	60	16	44	73	22
Faulschlamm	38	16	22	58	3,5

1) Versuchswerte

Spezifische Faulgasproduktion

Die spezifische Faulgasproduktion [$I_{\text{N}}/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$] wird wesentlich bestimmt durch:

- die zugeführte oTR-Fracht und die Art der organischen Trockensubstanz, d. h. von Menge und Qualität des Primär-, Überschuss- und Tertiärschlammes und deren Vorbehandlung (z. B. Desintegration),
- die Auslegung (Aufenthaltszeit, Mehrstufigkeit etc.) sowie Betriebsweise des Faulbehälters (Temperatur, Durchmischung, intermittierende oder kontinuierliche Schlammzugabe, Zugabe von Additiven) und
- die evtl. Hemmung durch Nährstoffungleichgewichte oder „toxische“ Substanzen (z. B. Schwermetalle).



Der Faulgasertrag lässt sich bei einer Messung der zugeführten oTR-Fracht anhand der Tabelle 5-3 abschätzen.



Tabelle 5-3 Faulgasertrag bezogen auf die zugeführte organische Substanz in Abhängigkeit von der Vorklärzeit

Faulgasproduktion bezogen auf zugeführte oTR _{zu} (I _N /kg oTR)				
Aufenthaltszeit Vorklärung VK bei max. Q _t	Ohne VK	ca. 0,5 h	ca. 1,0 h	ca. 2,0 h
Nur C-Elimination		400 bis 460	415 bis 480	435 bis 500
N + DN; t _{TS} ca. 13 d	295 bis 340	380 bis 440	400 bis 465	425 bis 470
N + DN; t _{TS} ca. 25 d	275 bis 320	370 bis 425	395 bis 455	420 bis 460



Bei einer hinreichenden Stabilisierung und einem Verhältnis der Trockenrückstände des Primär- und Überschussschlammes von etwa 1:1 liegt der Gasertrag bei rund **440 I_N/kg oTR_{zu}**. Dies entspricht einer Faulgasproduktion in einer Größenordnung von **18 bis 23 I_N/(E · d)** [DWA, 2014d].

Überlastungen bei der Faulung, z. B. bei zu geringer Faulraumtemperatur und zu kurzen Aufenthaltszeiten, können die spezifische Gasproduktion abmindern. Ursache für eine Hemmung können z. B. Lösemittel oder eine ansteigende Konzentration von Schwermetallen sein. Auch chlorierte Kohlenwasserstoffe, Cyanide, Phenole sowie Herbizide und Insektizide wirken hemmend auf die Methanbildung. Störungen können auch durch Verzapfungen im Faulbehälter oder Versäuerungen infolge von Überlastungen hervorgerufen werden.

Durch den Nachweis einer Akkumulation organischer Säuren im Faulbehälter kann ein Hinweis auf eine Störung im System gegeben werden. Aufgrund der Pufferkapazität ist die Säurezunahme nicht unmittelbar durch die Messung des pH-Werts feststellbar. Erst wenn die Pufferkapazität erschöpft ist, fällt der pH-Wert rasch ab. Um diesem Effekt vorzubeugen, wird in der Analytik der FOS/TAC-Wert ermittelt. Dieser ist das Verhältnis von flüchtigen organischen Säuren (FOS) zur alkalischen Pufferkapazität (TAC). Ein Anstieg des FOS/TAC-Wertes deutet auf eine Versäuerung der Probe hin, welche einen Hinweis gibt, dass es zur Hemmung des Abbauprozesses kommen kann [Nordmann, 1977].



Faulgasqualität

Überschlägig kann man von ca. **60–70 Vol.-% Methan (CH₄)** und ca. **30–40 Vol.-% Kohlenstoffdioxid (CO₂)** im Faulgas ausgehen. Neben den Hauptbestandteilen sind im Faulgas in Abhängigkeit von den Abwasserinhaltsstoffen aber auch für die Faulgasnutzung störende Gasbegleitstoffe wie Schwefelwasserstoff (H₂S), Siloxane, Sauerstoff (O₂), Stickstoff (N₂), Ammoniak (NH₃) und Wasserdampf (H₂O) enthalten. Seltener sind Aromate enthalten. Tabelle 5-4 enthält Anhaltswerte über die übliche Zusammensetzung und Konzentrationen der Gasbestandteile von Faulgasen aus Kläranlagen.



Tabelle 5-4 Übliche Gasbestandteile im Faulgas, angelehnt an [DWA, 2011c].

Hauptkomponenten				Gasbegleitstoffe ²⁾				
CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂	NH ₃	H ₂ S ¹⁾	Aromate	Siloxane
Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	ppm	mg/m _N ³	mg/m _N ³
60–70	30–40	0–1	0–2	0–1,5	< 0,05	500–1.500	< 10	< 40

1) ohne Eisendosierung

2) abhängig von einer evtl. Cofermentation können zusätzlich andere Gasbegleitstoffe auftreten



Methan ist – wie bei Erdgas – auch im Faulgas der Energielieferant. Der Methananteil im Faulgas bestimmt seinen Heizwert. Methan (CH₄) hat einen Heizwert von etwa **10 kWh/m_N³** (36.000 kJ/m_N³), Faulgas bei **60 Vol.-% Methan** somit einen Heizwert von etwa **6 kWh/m_N³**.

Eine Veränderung der Faulgasqualität kann ebenfalls Hinweise auf Hemmungen und Störungen im System geben.

Hinweise zum Betrieb der Schlammfäulung

Die Gasproduktion bzw. der Betrieb der Schlammfäulung wird im Wesentlichen durch folgende Punkte beeinflusst:

- Vorbehandlung der Schlämme,
- erhöhte Fett- und Kohlenstoffanteile,
- leicht abbaubare organische Säuren,
- günstige Nährstoffverhältnisse (Kohlenstoff/Stickstoff/Phosphor),
- die Art der Beschickung und Umwälzung,
- den oTR-Anteil und dessen Schwankung,
- das Temperaturniveau im Faulbehälter,
- die Betriebsweise der Schlammfäulung,
- die Aufenthaltszeit,
- mögliche Störungen.

In den folgenden Unterkapiteln werden Maßnahmen zur Erhöhung der Faulgasproduktion beschrieben. Diese Maßnahmen können durch die in Kapitel 5.2.2 und 5.2.3 erläuterten Technologien ergänzt werden. Zudem sind im Rahmen einer Optimierung der Faulgasproduktion die Hinweise zur anaerob-mesophilen Schlammstabilisierung (vgl. Kapitel 3.5.4.2) zu berücksichtigen.

Vorgeschaltete Verfahrensschritte

Die mechanische Reinigung kann durch den Rückhalt von Störstoffen bereits dazu beitragen, den Betrieb des Faulbehälters zu verbessern. Schwimmschlamm kann vermieden und somit die Ausgasung verbessert werden. Außerdem werden Verzopfungen der Rührwerke und Mischer in Faulbehältern vermieden. Durch einen korrekten Betrieb des Sandfangs werden Sandablagerungen im Faulbehälter und Abrasion in Maschinen und Rohrleitungen vermieden sowie der mineralische Anteil des Schlammes verringert. Bei der Voreindickung der Schlämme ist darauf zu achten, dass eine Feststoffkonzentration von i. d. R. **6% TR** nicht überschritten werden sollte, da anderenfalls ein (energetisch) erhöhter Aufwand bei der Faulbehälterbeschickung und -umwälzung entstehen kann. Zu dünne Schlämme wiederum können die erforderliche Aufenthaltszeit im Faulbehälter unnötig verlängern bzw. zu einem verminderten Gasanfall führen (unzureichende Stabilisierung des Schlammes). Eine Vorbehandlung, z. B. mittels Desintegration der Schlämme, verbessert die Abbaubarkeit der potenziell abbaubaren Stoffe (Kapitel 5.2.3).

Art der Beschickung und Verdrängung

Faulbehälter sollten möglichst kontinuierlich beschickt werden, um ihre Belastung zu ver gleichmäßigen. Bei kleinen Anlagen, in denen dies wegen der geringen täglichen Rohschlamm m engen kaum möglich ist, ist ein quasi-kontinuierlicher Betrieb (z. B. mehrfach stündlich) erforderlich.

Kurzschlussströmungen während der Beschickung sind zu vermeiden, d. h. der Ort, an dem Rohschlamm zugeführt wird, muss ausreichend weit entfernt von dem Ort liegen, von dem Faulschlamm verdrängt wird.

Faulschlamm sollte nicht in offene Schächte überlaufen, weil durch den erfolgenden Druckabfall Faulgas freigesetzt wird. Es gibt geschlossene Überläufe, die zum Druckausgleich und zum Abführen des frei werdenden Faulgases an die Faulgasleitung angeschlossen werden. Der Anschluss der Nacheindicker und Stapelbehälter für Faulschlamm an das Faulgassystem kann aus energetischer Sicht und zur Vermeidung von Klimagasemissionen sinnvoll sein.

Art der Umwälzung

Die Faulraumumwälzung muss das gesamte Reaktorvolumen erfassen. Eine gleichmäßige Durchmischung bringt mehrere Vorteile für die Faulgasproduktion:

- gleichmäßige Temperaturverteilung im Faulbehälter,
- Durchmischung und Abtransport von Stoffwechselprodukten,
- Verhinderung einer Schwimmdecke,
- gleichmäßiger und rascher Abbau der Schlamminhaltsstoffe,
- bessere Entgasung/Entweichung des entstandenen Gases.





Hinweise zur energieeffizienten Gestaltung der Umwälzung sind in den Kapiteln 3.5.4.2 und 4.4.2 enthalten.

Mehrstufiger Betrieb

Wegen einer oftmals großzügigen Bemessung der Faulbehälter kann eine Zweistufigkeit oder alternierende Mehrstufigkeit der Schlammfäulung gegenüber einem üblichen Parallelbetrieb hergestellt werden. In jedem Fall ist auf eine ausreichende Aufenthaltszeit zu achten. Durch eine Reihenschaltung von Faulbehältern kann ein frühzeitiger Austrag von nicht ausgefaultem Schlamm infolge von Kurzschlussströmungen vermindert werden. Außerdem kann die 1. Stufe als Puffer wirken, die die 2. Stufe vor Schwankungen der Schlammzusammensetzung oder des pH-Wertes schützt. Vorteile sind geringere Mengen an Restschlamm, ein möglicher höherer oTR-Abbau und somit ein möglicher höherer Faulgasertrag [DWA, 2014d]. Jedoch müssen der betriebliche Mehraufwand, u. a. wegen möglichen zusätzlichen Heizschlammumpfenkreisläufen, und der bauliche Aufwand berücksichtigt werden.

Eine Rückführung von Schlamm aus der 2. Stufe in die 1. Stufe ist besonders bei hohem oTR im Eintrag sinnvoll, um das spätere Entwässerungsergebnis sowie den Abbau zu verbessern.

Beim zweistufigen Betrieb der Faulbehälter kann bei ausreichender Aufenthaltszeit die 2. Stufe als Nachfäulung unbeheizt bleiben. Durch entsprechende Beheizung über den Schlammzulauf aus der 1. Stufe wird der Temperaturabfall in der 2. Stufe nur durch die Transmissionsverluste dieser Stufe bestimmt und beträgt je nach Wärmedämmung und Aufenthaltszeit wenige Grad.

Temperaturregelung Faulbehälter

Grundsätzlich sollte ein Faulbehälterbetrieb möglichst stetig sein; dies schließt auch eine möglichst konstante Temperatur ein. Eine Veränderung der Faulbehältertemperatur sollte daher in jedem Fall erst nach umfassender Prüfung erfolgen und unter Betrieb getestet und überwacht werden.

Verschiedentlich wird berichtet, dass die Faulbehältertemperatur bei mesophiler Fahrweise in einem Bereich von 32 bis 40 °C variiert wurde. Eine Temperaturabsenkung unter 36 °C erfolgt im Wesentlichen im Winter, um ein Heizen mit externen Primärenergieträgern (Öl, Erdgas) zu vermeiden. Eine Temperaturerhöhung über 36 °C im Sommer soll dazu dienen, überschüssige Wärme, z. B. aus den BHKW, im Faulbehälter zu speichern, statt sie über Notkühler energieaufwendig abzuführen.

Eine Absenkung der Temperatur, z. B. infolge einer höheren Beschickungsmenge nach einem Regenwetterfall, stört den Faulprozess kaum. Es ist aber nicht empfehlenswert, deswegen die Faulbehältertemperatur gezielt und über einen längeren Zeitraum zu senken, um Energiekosten zu sparen. Es fehlen wissenschaftlich gesicherte Erkenntnisse, wie und unter welchen Bemessungsansätzen und Betriebsbedingungen z. B. die Faulgasproduktion negativ beeinflusst wird. Von einer aktiven Temperaturabsenkung wird daher eher abgeraten. Falls diese dennoch gewünscht ist, sind die nachstehenden Hinweise zur Temperaturerhöhung über 36 °C entsprechend zu beachten.

Eine Steigerung der Faulgasproduktion als zusätzlicher Effekt einer Erhöhung der Faulbehältertemperatur neben der Wärmespeicherung wurde in der Praxis in einigen Fällen beobachtet, ist aber keine gesicherte Erkenntnis. Zudem können unerwünschte Nebeneffekte auftreten. Bei voll ausgelasteten Faulbehältern kann beispielsweise eine verstärkte Schaumbildung auftreten. Bei nicht ausreichender Stabilisierung besteht zudem die Gefahr einer deutlichen Erhöhung der Rückbelastung in die biologische Stufe.

Grundsätzlich sollten die Prozessbedingungen sorgfältig beobachtet werden. Beim Betrieb mit höheren Temperaturen als dem Auslegungswert ist die statische Berechnung des Faulbehälters zu prüfen. Zusätzliches Augenmerk ist auf die Beschaffenheit der Prozesswässer zu legen.



Die Faulbehältertemperatur sollte grundsätzlich nicht schneller als um **1–2 °C** pro Woche erhöht oder gesenkt werden, da Methanbakterien auf kurzfristige Änderungen der Temperatur empfindlich reagieren [DWA, 2014d].

5.2.2 Co-Vergärung zur Erhöhung der Faulgasproduktion

Unter der Co-Vergärung wird die zusätzliche Zufuhr von Substraten (feste und teilweise flüssige biogene Stoffe) für die gemeinsame anaerobe Verwertung mit Klärschlämmen in der Klärschlammfäulung verstanden. Diese dient dazu, eine Steigerung des Gasertrags zu erreichen bzw. die Auslastung der Kapazität der Faulbehälter zu gewährleisten. Gründe für die vielfach geringe Auslastung der Faulbehälter liegen in der ursprünglichen Bemessung sowie der Folge des Strukturwandels in Industrie, Gewerbe und des Bevölkerungsrückgangs. Durch zusätzliche maschinelle Voreindickung und neue Techniken in der Schlammvorbehandlung verringerte sich die Rohschlammmenge bei gleicher organischer Trockensubstanz. Damit stieg die Aufenthaltszeit des Klärschlammes in den Faulbehältern.

Prinzipiell eignen sich Abwasserbehandlungsanlagen ab mittlerer und größerer Größenklasse mit einer Faulungsanlage für die Co-Vergärung, da in kleineren Anlagen entweder keine Faulgasproduktion stattfindet oder die Anlagen nicht über die ausreichende Kapazität verfügen, um eine solche Co-Vergärung wirtschaftlich durchzuführen. Der Vorteil großer Kläranlagen liegt in der vorhandenen Anlagentechnik und dem fachkundigen Personal. Mit relativ geringen Investitionskosten für Speicher-, Anlieferungs- und Aufbereitungsmöglichkeiten lässt sich eine Mitbehandlung von Co-Substraten realisieren.

Damit eine Co-Vergärung möglich ist, müssen verschiedene Anforderungen an die Co-Substrate erfüllt werden. Die Substrate müssen pumpfähig, störstofffrei und gut abbaubar sein. Auf den Anhang B „Stoffdaten sowie Biogasausbeuten von relevanten Co-Substraten“ im Merkblatt DWA-M 380 [DWA, 2009c] wird verwiesen. Daneben sollten sie einen hohen Fett- und Kohlenstoffanteil und einen geringen Anteil an Stickstoff und Phosphor besitzen und den Hygienevorschriften entsprechen. Schadstoffe im Prozesswasser, Geruchsbildung, Hemmung des Faulungsprozesses und die Bildung von Schwimmdecken und Schäumen müssen voruntersucht werden, um eine Verschlechterung bei der Stabilisierung zu vermeiden. Insbesondere bei Zugabe von sehr leicht abbaubarem Substrat, das nicht hydrolysiert werden muss, in den ersten Behälter einer zweistufigen Schlammfäulungsanlage kann die Konzentration der organischen Säuren in der 1. Stufe sehr hoch werden.

Weitere Voraussetzungen für die Co-Vergärung ergeben sich bei den Anlieferungsbedingungen, den Annahmeeinrichtungen, dem Speicherplatz, der Entwässerungskapazität und der Faulgasverwertung. Bei der Co-Vergärung von zusätzlichen Substraten ist außerdem eine Genehmigung bei der jeweiligen Behörde einzuholen.

Neben den grundlegenden Gesetzen müssen auch andere rechtliche Vorgaben wie Bundesimmissionsschutzverordnung, Klärschlammverordnung, Düngemittelverordnung, Bodenschutzverordnung u. a. beachtet werden, um eine Genehmigung zu erhalten.

Werden die in der Regel fein zerkleinerten biogenen Abfälle mit einem TS-Gehalt von 10 bis 25 % in den flüssigen Klärschlamm zugegeben, so erhöht sich die hydraulische Belastung der Faulbehälter nur unwesentlich. Dahingegen wird aber die Belastung mit organischem Material erhöht und führt zu einer Steigerung der Gasausbeute. Diese ist abhängig von den jeweiligen Inhaltsstoffen, vgl. Tabelle 5-5.

Hinweise zur Kapazität von Schlammfäulungsanlagen zur Mitbehandlung von Co-Substraten enthält das Merkblatt DWA-M 380 [DWA, 2009c]. Es ist zu berücksichtigen, dass der biologische Prozess ab einer Faulraumbelastung von **3 kg oTS/(m³·d)** (50.000 E – 100.000 E) und **4,5 kg oTS/(m³·d)** (> 100.000 E) negativ beeinflusst wird. Die Menge an Substrat kann dann nicht mehr vollständig bis zur Methanogenese abgebaut werden und es kommt zur Versauerung des Fermenters. Dies wiederum führt zur Hemmung der Stoffwechselforgänge, welche bei einem pH-Wert von 7 bis 8 optimal ablaufen.

Aufgrund der i. d. R. geringen zugegebenen Mengen sollte die Faulzeit durch die Co-Substrate nicht wesentlich beeinflusst werden.




Tabelle 5-5 Abbauspezifische Faulgas- und Methanproduktion [DWA, 2010b]

Substrate	Abbauspezifische Faulgaserzeugung m ³ i. N./kg	Methananteil im Faulgas %	Abbauspezifische Methanerzeugung m ³ i. N./kg	Energiegehalt MJ/kg
Kohlenhydrate	0,83	50	0,42	15,1
Organische Fette	1,43	70	1	36
Proteine	0,72	71	0,51	18,4

Je nach Zusammensetzung der Co-Substrate kann die Rückbelastung durch Prozesswässer aufgrund erhöhter Stickstofffrachten auch zu einem Mehrbedarf an Energie für die Belüftung in der Anlage und zu einer höheren erforderlichen Denitrifikationskapazität führen. Bei bestimmten Substraten, wie z. B. Fetten, ist dies jedoch aufgrund des geringen Stickstoffgehalts vernachlässigbar.

Der Betreiber einer Kläranlage hat in jedem Fall sicherzustellen, dass die Anforderungen der Einleiterlaubnis auch mit der Co-Vergärung eingehalten werden. Eine Verschlechterung der Ablaufwerte aufgrund der Co-Vergärung ist auszuschließen.



Ein wesentlicher Vorteil der Co-Vergärung auf Kläranlagen besteht darin, dass eine geordnete Entsorgung der Prozesswässer und Restabfälle sichergestellt ist.

Wichtig für den Einsatz von Co-Substraten auf Kläranlagen sind weiterhin folgende Aspekte:

- Co-Substrate sollten grundsätzlich gleichmäßig zugegeben werden. Stoßbelastungen sind zu vermeiden.
- Die Biozönose des Faulbehälters sollte langsam an neue Co-Substrate gewöhnt werden. Eine Steigerung der Zugabemenge sollte schrittweise erfolgen.
- Co-Substrate sollten möglichst homogen sein und ggf. schon vor der Zugabe in den Faulbehälter mit dem Grundsubstrat (Rohschlamm) gemischt werden.

Für weitergehende Informationen wird auf die Merkblätter DWA-M 372 [ATV-DVWK, 2003c] und DWA-M 380 [DWA, 2009c] sowie auf „Co-Fermentation von biogenen Abfällen in Faulbehältern von Kläranlagen“ [MUNLV, 2001] verwiesen.

5.2.3 Klärschlammdeintegration zur Erhöhung der Faulgasproduktion



Unter Klärschlammdeintegration versteht man die Zerstörung der Zellstrukturen im Klärschlamm durch physikalische, chemische oder biologische Einwirkungen. Dadurch werden die Flockenstruktur des Schlammes aufgelöst, der im Schlamm enthaltene Zellverband sowie die Zellwände zerstört und Zellinhaltsstoffe freigesetzt. Dabei wird i. d. R. der eingedickte Überschussschlamm behandelt, da der Aufschluss gegenüber dem von Primärschlamm am effektivsten ist [DWA, 2015c]. Ziele einer Klärschlammdeintegration sind:

- Bei der Desintegration soll durch eine erhöhte Bioverfügbarkeit von Kohlenstoff einerseits die Schlammfäulung beschleunigt und andererseits der Abbaugrad und die Faulgasproduktion erhöht werden. Zudem verringert sich durch einen solchen weitergehenden Abbau der organischen Substanz die zu verwertende bzw. zu entsorgende Klärschlammmenge und die Faulgasproduktion steigt.
- Bei der Desintegration von Schwimm- und Blähschlämmen können fadenförmige Strukturen aufgeschlossen werden. Eine Schaumneigung im Faulbehälter kann so vermindert werden.

Als Wechselwirkungen sind zu berücksichtigen:

- Die Desintegration bewirkt eine Auflösung von im Schlamm enthaltenen stark wasserbindenden Biopolymeren (EPS – extrazelluläre polymere Substanzen), dies kann die Schlamm-

wässerung positiv beeinflussen. Jedoch verändert die Desintegration auch die Flockungseigenschaften des Klärschlammes, was einen veränderten pFM-Einsatz zur Folge hat. Bei einer nicht angepassten Konditionierung kann sich somit die Schlammwässerung verschlechtern [DWA, 2015c]. Auf Grundlage von Testergebnissen sollte eine Umstellung der Zudosierung erfolgen.

- Der vermehrte zelluläre Aufschluss der organischen Substanzen führt zu einer erhöhten Stickstoffkonzentration in den Prozesswässern. Diese wirkt sich nachteilig in der Abwasserbehandlung aus. Entsprechende Denitrifikationskapazitäten oder eine ausreichende Prozesswasserbehandlung sollten vorhanden sein, um einen prozessstabilen Anlagenbetrieb gewährleisten zu können.
- Durch die erhöhte Bioverfügbarkeit verringert sich der organische Trockenrückstand des später zu entsorgenden Klärschlammes und damit der Heizwert. Dies ist bei einer Verbrennung des Klärschlammes zu beachten.
- Wird eine Desintegration zur Erhöhung der Faulgasausbeute durchgeführt, vermindert sich der organische Trockenrückstand und damit zwangsläufig der Heizwert.

Von der Vielzahl der möglichen Einsatzorte wird die Desintegration bevorzugt bei der Optimierung der anaeroben Schlammbehandlung zur Erhöhung der Faulgasausbeute und des oTR-Abbaugrads eingesetzt; die resultierende Reduktion der Schlammengen führt zu geringeren Schlamm Entsorgungskosten. Günstige Voraussetzungen für den ökonomischen Einsatz einer Desintegration zur Verbesserung des Abbaugrads werden in [Haber kern et al., 2008] benannt:

- kurze Faulzeiten **< 20 d**,
- oTR-Gehalt im Faulschlamm **> 55 %**,
- geringe spezifische Faulgasausbeute **< 350 l/kg oTR_{zu}**,
- getrennte Führung von Primär- und Überschussschlamm,
- auf ca. **3–6 % TR** eingedickter Überschussschlamm,
- niedriger Anteil an Grob- und Faserstoffen.

In der großtechnischen Anwendung befinden sich die physikalischen Verfahren der Ultraschall-desintegratoren und vereinzelt Lysatzentrifugen. Unter den thermischen Verfahren ist die Injektion mittels Heißdampf häufig in großtechnischer Anwendung [DWA, 2015c].

Die thermischen und chemischen Verfahren wie auch mechanische Methoden haben i. d. R. den wesentlichen Nachteil eines hohen Energiebedarfs.

Der Energieverbrauch der verschiedenen Verfahren der Desintegration hängt stark vom gewünschten Aufschlussgrad (ACSB) des Schlammes ab. Je nach Bearbeitungsintensität und Behandlungsziel schwankt die einzusetzende Energiemenge und ein direkter Vergleich der Verfahren ist schwierig. Üblich sind die Angaben für den Energiebedarf einschließlich der Verluste durch Reibung, Abwärme u. a. Eine Einteilung von Desintegrationsverfahren anhand des angestrebten Aufschlussgrads und der dazugehörigen spezifischen Energieverbräuche kann dem Merkblatt DWA-M 302 [DWA, 2015c] entnommen werden.

Die Desintegration sollte mindestens energieneutral im Bilanzraum der Kläranlage erfolgen, sofern sie zur Erhöhung des Abbaugrads in der Faulung eingesetzt wird. Bei der Betrachtung der Energiebilanz ist die erhöhte Stickstoffrückbelastung des Prozesswassers in der Belebung zu berücksichtigen. In Bild 5-2 sind der Energieverbrauch für die Desintegration bzw. der Energiegewinn aus der Verstromung des zusätzlich anfallenden Faulgases (y -Achse) über der Abbaugradverbesserung, basierend auf einem angenommenen Abbaugrad von 48 % ohne Desintegration, dargestellt. Der Schnittpunkt der Linien für den Energieverbrauch mit der Linie für den Energiegewinn markiert jene Abbaugradsteigerung, bei der sich ein energieneutraler Betrieb der Desintegration ergibt. Der Anstieg mit zunehmendem Abbaugrad resultiert aus dem Energieverbrauch zur Behandlung der mit dem Abbaugrad ansteigenden Stickstoffrückbelastung. Die Rahmenbedingungen dieser Energiebilanz einer Modellkläranlage mit installierter Desintegration des Überschussschlammes können dem Merkblatt DWA-M 302 entnommen werden [DWA, 2015c].



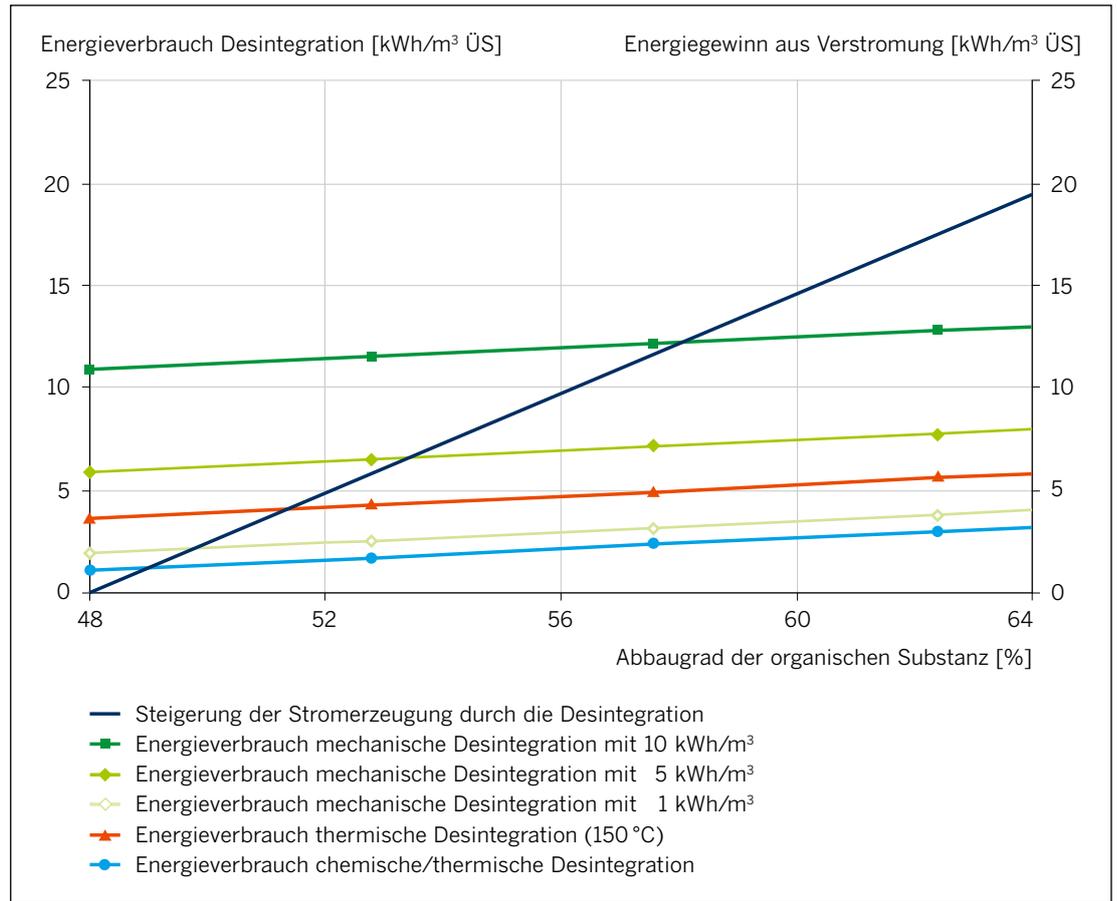


Bild 5-2 Energieverbrauch und Energiegewinn verschiedener Desintegrationsverfahren je m³ behandeltem Überschussschlamm (ÜS). Energiebilanz für die Modellkläranlage nach [DWA, 2015c].

Pauschale Aussagen zu Effizienzmaßnahmen bei der Desintegration können nicht gemacht werden. In jedem Fall sollten vor Installation einer Desintegration Laborversuche und Vor-Ort-Versuche mit einer mobilen Anlage durchgeführt werden, insbesondere um den Einfluss auf die Erhöhung der Faulgasproduktion konkret quantifizieren zu können.



Um die für die thermischen Verfahren benötigte Wärmeenergie für die Schlammaufheizung zu reduzieren, ist es ratsam, den Schlamm vor der Desintegration einzudicken. In Bezug auf die Energie- und Ökobilanz muss gerade bei den thermischen Verfahren geprüft werden, ob Abwärme genutzt und/oder Wärme aus diesen Verfahren zurückgewonnen werden kann.

Die Nutzung von Faul-Enzymen für eine Desintegration muss mit den jeweiligen Schlämmen in einer Versuchsreihe getestet werden, da Enzyme sehr selektiv sind und nur auf bestimmte Proteine wirken. Grundsätzlich müssen Substrat und Enzym aufeinander abgestimmt sein. Ein Problem ist die starke Inhomogenität von Abwasser/Schlamm. Für manche Arten von Schlämmen sind nur bestimmte Enzyme vorteilhaft, die sich ggf. auf anderen Kläranlagen als eher ungeeignet erwiesen haben.

5.2.4 Faulgasreinigung und -aufbereitung

Faulgas besteht hauptsächlich aus Methan (CH₄) und Kohlenstoffdioxid (CO₂). Des Weiteren können Schwefelwasserstoffe (H₂S), Ammoniak (NH₃), Sauerstoff (O₂), Wasserdampf (H₂O), Stickstoff (N₂) und Wasserstoff (H₂), Aromate, Siloxane und Thiole im Gasgemisch vorhanden sein (vgl. Kapitel 5.2.1, Tabelle 5-4). Ziel einer Faulgasreinigung ist es, die Anforderungen an die Faulgasqualität für die Verwertung in BHKW oder Heizkesseln zu erfüllen. Reinigungsschritte sind die Staub- und Partikelabscheidung, Entfeuchtung, Entschwefelung und die Siloxanabtrennung.

Darüber hinaus kann ein weiteres Ziel die Erhöhung der Energiedichte sein, was im Wesentlichen durch Entfernung des CO_2 geschieht. Man spricht von einer Aufbereitung oder Veredelung des Faulgases. Ein solcherart aufbereitetes Faulgas auf Erdgasqualität kann in das Erdgasnetz gemäß weiteren Anforderungen (Odorierung, Wobbe-Index) eingespeist oder als Treibstoff (Compressed Natural Gas (CNG) für Kraftfahrzeuge genutzt werden. Die energetische Umwandlung und Nutzung des Faulgases wird damit räumlich und zeitlich vom Ort der Entstehung entkoppelt.

Die Merkblätter DWA-M 361 [DWA, 2011c] und DWA-M 363 [DWA, 2010b] bieten eine detaillierte Gegenüberstellung der Verfahren der einzelnen Reinigungs- und Aufbereitungsschritte wie auch Qualitätsanforderungen für jegliche Verwertungsart.

Entfeuchtung/Trocknung

Um Verschleiß, Zerstörung und Verstopfungen sowie höhere Druckverluste von nachgeschalteten Anlagenkomponenten zu verhindern bzw. den Anforderungen der nachfolgenden Reinigungsstufen zu genügen, muss Wasserdampf aus dem Faulgas entfernt werden. Ein hoher Wasserdampfanteil im Faulgas ist in Verbindung mit hohen H_2S -Konzentrationen schädlich. Außerdem begünstigt Kohlenstoffdioxid in feuchten Gasen die Korrosion. Gleichzeitig kann mit der Trocknung auch eventuell enthaltenes NH_3 entfernt werden, da dieses wasserlöslich ist. Insgesamt verbessert sich das Brennverhalten des Gases.

Kühlt das Faulgas in den dem Faulbehälter nachgeschalteten Rohrleitungen ab, kondensiert Wasser bis zum Sättigungspunkt (vgl. Kapitel 2.3.4.3.3, Formel 2-5 und Formel 2-6).

Das Gaskondensat sollte durch geeignete Kühleinrichtungen (z. B. erdverlegte Rohrleitung, Kondensatabscheider oder Gastrocknung) aus dem Faulgas weitgehend abgeschieden werden, um negative Einflüsse auf die nachfolgenden Gasbehandlungs- und Gasnutzungseinrichtungen (BHKW, Kompressor, Faulgasbehälter) zu vermeiden.



Entschwefelung

H_2S erhöht die Verschleißerscheinungen bei Blockheizkraftwerken (BHKW) und senkt den pH-Wert, wodurch die Ölwechselintervalle kürzer werden. Schwefelkonzentrationen im Faulgas lassen sich nur schwer vorhersehen, da sie außer von dem eingesetzten Substrat auch von Faktoren wie der Art des eingesetzten Fällmittels, der Luftzufuhr, des Gasaustauschs, der Durchmischung und der Temperatur im Faulbehälter abhängen. Bei der Entschwefelung kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Differenziert werden kann zwischen biologischen, chemischen und physikalischen Entschwefelungsverfahren bzw. je nach Anwendungsfall zwischen Grob- oder Feinent Schwefelung (siehe DWA-M 361 [DWA, 2011c] und DWA-M 363 [DWA, 2010b]).

Entfernung weiterer Gasbegleitstoffe

Faulgas aus der anaeroben Behandlung von Klärschlämmen kann organische Siliziumverbindungen (Siloxane) enthalten. Bei der Verbrennung lagern sich Siliciumdioxide als Glasbeläge auf Ventilen, Kolben und Zylinderköpfen ab. Lösen sich diese siliziumhaltigen Ablagerungen und gelangen in das Motoröl, wirken sie wie ein Schleifmittel, verschleifen den Motor und führen zu Schäden an Lagern, Kolbenringen, Auslassventilen und Ventilsitzen. Eine Gasreinigung zur Entfernung von Siliziumverbindungen ist daher zu empfehlen, um Standzeiten und Wartungsintervalle zu verlängern.

Auch erhöhte Konzentrationen an aromatischen Kohlenwasserstoffen (BTEX) im Faulgas können im weiteren Prozess bei der Methananreicherung zu Störungen führen.

In der Praxis wird hauptsächlich die Aktivkohleabsorption zur Entfernung von BTEX und Siloxanen angewendet. Bei der simultanen Entfernung von H_2S kann es zur schnellen Sättigung der Aktivkohle kommen und somit zu einer verkürzten Standzeit der Adsorber. In diesem Fall bietet sich eine Reinigung mittels Tiefkühlung an. Ein Vorteil der Tiefkühlung ist die gleichzeitige Trocknung des Gases und die Entfernung von NH_3 . Allerdings gilt der Prozess als wartungs- und energieintensiv.

Verfahren zur Methananreicherung im Faulgas

Das Ziel dieses Verfahrensschrittes ist eine möglichst hohe Konzentration des Energieträgers CH_4 durch Abtrennung von CO_2 . Für die Methananreicherung stehen grundsätzlich die Druckwechseladsorption (PSA), das Membrantrennverfahren, die Druckwasserwäsche (DWW), die Polyglykolwäsche sowie die Aminwäsche zur Verfügung.

Die **Druckwechseladsorption** (engl.: Pressure Swing Adsorption, kurz PSA) ist die am längsten in Anwendung befindliche Technologie und beruht auf dem Prinzip der hohen molekularen Adsorptionsfähigkeit von Aktivkohle für Kohlenstoffdioxid. Eine PSA besteht i. d. R. aus mehreren Adsorbentien, die abwechselnd die Phasen der Adsorption unter konstantem Druck, die Desorptionsphase, die Druckentspannung und den Druckaufbau durchlaufen.

Membrantrennverfahren beruhen auf einer Abtrennung von Gasbestandteilen mit Hilfe eines selektiv trennenden Membranwerkstoffs. Entscheidend ist die hohe Durchlässigkeit (Permeabilität) für CO_2 , H_2O , NH_3 und H_2S im Vergleich zu CH_4 . Das Membranmodul wird mit vorgereinigtem Faulgas unter Druck von 10 bis 20 bar beaufschlagt, wobei der Druck notwendig ist, um die Transportvorgänge zu initiieren, sodass H_2S , CO_2 und Wasserdampf abgetrennt werden und CH_4 zurückgehalten wird. Die Standzeit der Membranen kann durch die vorgeschaltete Abscheidung von Stäuben und Aerosolen, eine Gastrocknung sowie eine Feinentschwefelung des Faulgases vor Eintritt in das Membranmodul erhöht werden.

Die **Druckwasserwäsche** (DWW) nutzt das Prinzip der viel höheren Wasserlöslichkeit von Kohlenstoffdioxid gegenüber Methan. Bei 5 bis 20 bar wird das Gas in eine Kolonne eingespeist und mittels des Waschwassers werden CO_2 , H_2S und in geringen Anteilen CH_4 gelöst.

Wie bei der Druckwasserwäsche handelt es sich bei dem Verfahren der **Polyglykolwäsche** um eine physikalische Adsorption. Statt Wasser wird hierbei ein organisches Waschmittel als Adsorptionsmittel verwendet. Die Entspannung zur Regenerierung des Waschmittels erfolgt in zwei Stufen. Die beladene Waschlösung wird in einer „Flash“-Kolonne teilentspannt. Die vollständige Desorption findet durch Wärme- (ca. 50–80 °C) und Strippluftzufuhr in der Desorptionskolonne statt. Es folgt eine Gastrocknung.

Die **Aminwäsche** nutzt bei Umgebungsdruck chemische Lösungsmittel (Laugen, Amine) in einer Gegenstrom-Wäscherkolonne für die Bindung des Kohlenstoffdioxids. Die Bindung des CO_2 an die Waschflüssigkeit ist reversibel und benötigt zur Regenerierung Wärme, am besten Prozessabwärme auf einem Niveau von 120 bis 160 °C (vgl. Kapitel 5.4.1, Bild 5-14). Die Aminwäsche erreicht die höchste Reinigungswirkung gegenüber CO_2 bei geringem Methanverlust (0,1 – 1%) und geringem Stromverbrauch [Urban et al., 2009].

Die Tabelle 5-6 listet die wesentlichen technischen Daten der gängigen Verfahren für eine Methananreicherung auf.

Nach der Faulgasreinigung muss das aufbereitete Gas je nach gefordertem Heizwert noch mit geringen Mengen Propan angereichert werden.

Verfahrensbedingt wird ein Teil des Methans mit abgetrennt und gelangt mit dem CO_2 in den Abgasstrom. Hierbei spricht man von **Methanschluß** oder Methanverlust, da dieses nicht weiter energetisch verwertet wird. Dabei sind auch die Betriebsweise und das Aufbereitungsziel entscheidend.

Der Betrieb einer Aufbereitungsanlage unterliegt vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerten für das Abgas. Eine nachträgliche Abgasbehandlung hinsichtlich CH_4 ist bei allen Verfahren bis auf das der Aminwäsche erforderlich. Bei den Verfahren zur Eliminierung der Methankonzentrationen im Abgas wird zwischen katalytischen und thermischen Oxidationsverfahren unterschieden. Die Anwendung der katalytischen Oxidation muss in der Praxis aufgrund der Anfälligkeit gegenüber Katalysatorengegiften wie Schwefelwasserstoff geprüft werden. Die Wahl des Abluftbehandlungsverfahrens richtet sich danach, ob der Methangehalt im Abgas für einen autothermen Betrieb reicht



oder ob in ungünstigen Fällen sogar kontinuierlich Faulgas oder Erdgas als Stützgas hinzugegeben werden muss. Alle Abgasbehandlungsverfahren bieten die Möglichkeit der Wärmeauskopplung.

Tabelle 5-6 Energiebedarf, Methanverluste und erzielbare Methangehalte im Produktgas für verschiedene Verfahren der Methananreicherung aus Faulgas [Scholz et al., 2012] [Urban et al., 2009]

Typ	Strombedarf	Wärmebedarf	Methanverlust	Methangehalt im Produktgas
	kWh/m ³ (Rohgas)	kWh/m ³ (Rohgas)	%	Vol.-%
PSA	0,23–0,4	–	1–3	96–98
Membran	0,35	–	0,5–5	85–98
DWW	0,24–0,4	–	1–2	96–98
Polyglykol	0,19–0,5	0,1	1–2	96–98
Aminwäsche	0,06–0,2	0,44–0,8	0,1–1	99–99,9

5.3 Strom

5.3 Strom

5.3.1
Strom aus
solarer Energie
(PV)

5.3.2
Strom aus
Windenergie

5.3.3
Strom aus
Wasserkraft

5.3.4
Lastmanagement
und Interaktion
mit dem Stromnetz

5.3.5
Regelenergie

5.3.1 Strom aus solarer Energie (Photovoltaik)

Photovoltaik bedeutet die Umwandlung von Lichtenergie, meist Sonnenenergie, in elektrische Energie durch Einsatz von Solarzellen. Durch den Photoeffekt ist es möglich, Licht in elektrische Energie umzuwandeln.

Grundsätzlich gibt es Photovoltaik-Anlagen, die auf bestehenden Gebäuden installiert, in die Gebäudehülle integriert und auf Freiflächen aufgestellt werden. Die Aufstellung von Photovoltaik-Anlagen auf Freiflächen sowie auf bestehenden Betriebsgebäuden ist hierbei für Kläranlagen oder Pumpwerke besonders interessant, da größere Neubauten von Betriebsgebäuden, in denen Photovoltaik-Anlagen integriert werden können, nicht mehr sehr oft realisiert werden. Neben den Dachflächen der Betriebsgebäude bieten sich aber auch horizontale ungenutzte Flächen wie Beckenabdeckungen für eine Nutzung von Photovoltaik-Anlagen an. Photovoltaik-Anlagen können mit unterschiedlichen Zelltypen ausgeführt werden. Die elektrischen Wirkungsgrade sowie der Flächenbedarf für 1 kWp verschiedener Zelltypen sind in Bild 5-3 aufgelistet.

Polykristalline Solarzellen sind in der Produktion deutlich günstiger als monokristalline, haben jedoch einen größeren Flächenbedarf, um die erforderliche Strommenge zu produzieren. Aufgrund des deutlichen Kostenvorteils gegenüber den monokristallinen Solarzellen werden heutzutage überwiegend polykristalline Solarzellen eingesetzt [Wagner, 2015].

Die Auslegung von Photovoltaik-Anlagen erfolgt in der Regel über die zur Verfügung stehende Freifläche bzw. bei sehr großen Flächen über den Energiebedarf. Da auf Kläranlagen der Bedarf an elektrischer Energie in der Regel höher ist als durch Photovoltaik-Anlagen gedeckt werden kann, ist es sinnvoll, die zu Verfügung stehenden Flächen komplett auszunutzen. Der Ertrag solcher Anlagen hängt von der lokalen Sonneneinstrahlung, den eingesetzten Modulen sowie deren Wirkungsgrad ab. Allgemein lässt sich erfahrungsgemäß sagen, dass in Deutschland rund **1.000 bis 1.500 kWh/(m² · a)** Sonnenlicht einstrahlt und davon **800 bis 1.100 kWh/(kWp · a)** erzeugt werden können. Dies entspricht rund 1.000 Volllast-Betriebsstunden bei den angegebenen kWp der



C

2

3

4

5

Literatur



Anlage und kann somit für eine grobe Ertragsprognose auf Kläranlagen zugrunde gelegt werden. Für 1 kWp sind je nach Anlagenwirkungsgrad 6–10 m² Modulfläche erforderlich. Für eine detaillierte Planung sollten jedoch die lokalen Einstrahlungsverhältnisse sowie die zur Verfügung stehenden Flächen betrachtet werden. Hierzu stehen verschiedene Tools im Internet zur Verfügung, die jedoch nur eine erste Abschätzung geben. Die Planung sollte dennoch durch eine Person mit Fachkenntnissen erfolgen.



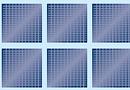
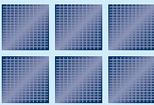
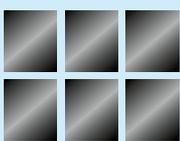
Material	Flächenbedarf für 1 kWp	Wirkungsgrad
Monokristalline Module	6–9 m ² 	11–18%
Polykristalline Module	7–10 m ² 	7–18%
Dünnschicht-Module (CIS)	10–12 m ² 	8–14%
Cadmiumtellurid-Module (CdTe)	13–15 m ² 	8–16%
Amorphe Silizium-Module (ASI)	14–25 m ² 	6–8%

Bild 5-3: Elektrische Wirkungsgrade verschiedener PV-Zelltypen nach [Solarstromerzeugung.de, 2016]

Ob und in welcher Höhe ggf. Energieüberschüsse erzeugt werden, ist jedoch auch stark von der bestehenden Eigenenergieversorgung abhängig. Da die Solarenergie nicht kontinuierlich, sondern zu Spitzen erzeugt wird, besteht die Möglichkeit, dass z. B. bei einer durchschnittlichen Eigenversorgung von ca. 50 % auf einer Anlage (ca. 100.000 EW) die Energie nicht vollständig am Standort genutzt werden kann. In diesem Fall ermöglicht die dynamische Simulation sowohl Unterstützungsmöglichkeiten bei der Dimensionierung als auch bei der gesteuerten Abstimmung unterschiedlicher Energiequellen zur Bedarfsdeckung der Kläranlage [Genzowsky, 2017].

Für die Anordnung der Module auf Flachdächern oder Freiflächen ist die Abschattung zwischen den Modulen zu berücksichtigen. Diese ergibt sich vorwiegend durch den Einfallswinkel im Winter, um über das gesamte Jahr kontinuierliche Erträge zu erhalten und ist beispielhaft in Bild 5-4 dargestellt. Es ist jedoch auch möglich, sich eher am Einstrahlwinkel im Sommer zu orientieren, um pro m² Fläche mehr Module aufstellen zu können. Dadurch wird der Ertrag im Sommer erhöht, vermindert sich jedoch durch die Abschattung im Winter. Der Winkel errechnet sich durch die senkrechte Einstrahlung (90°) minus dem örtlichen Breitengrad vor Ort (Φ) minus/plus dem Breitengrad der Polarkreise (23,5°), da an diesen Stellen die Sonne am weitesten vom Äquator entfernt ist.



Bei feststehenden Anlagen werden die Module meist so ausgerichtet, dass das Ertragsmittel und nicht die Spitzenleistung am höchsten ist (in Deutschland zum Beispiel sind 30° für die höchste Spitzenleistung und 55° für das beste Ertragsmittel nötig). Durch eine Ausrichtung nach Osten oder Westen wird zwar nicht der höchste Ertrag erreicht, jedoch kann die Stromerzeugung über den Tag vergleichmäßigt werden. Daher ist eine Errichtung auf Dachflächen in Ost- oder West-Richtung oft auch möglich. Eine Nord-Ausrichtung ist nicht zu empfehlen.

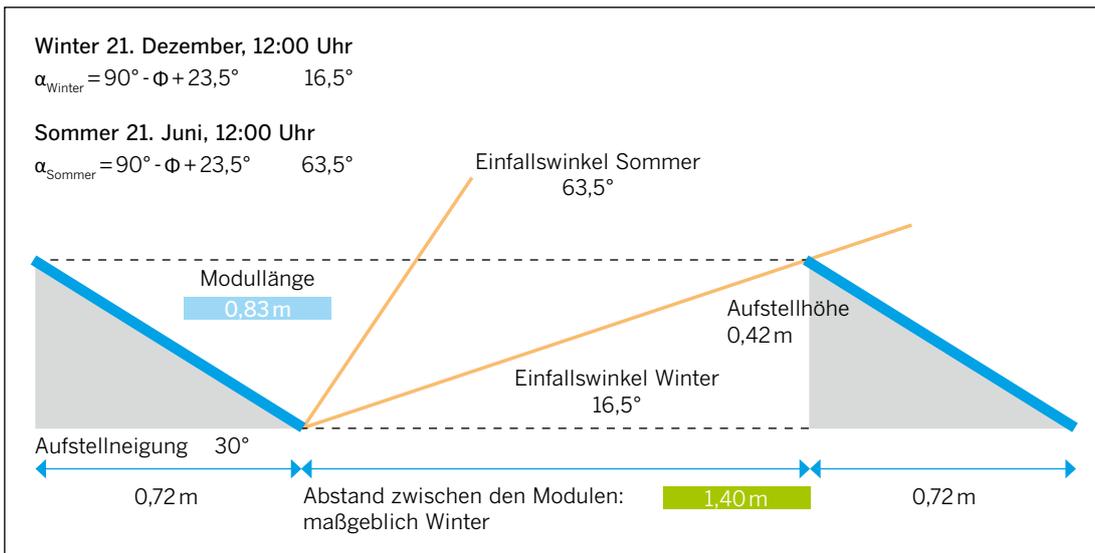


Bild 5-4 Beispiel für Aufstellungsabstände in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, Aufstellort 50° nördliche Breite

Der erzeugte Gleichstrom wird, wenn er in ein (öffentliches) Netz eingespeist wird, in Wechselstrom umgewandelt, wobei durch den benötigten Wechselrichter geringe Umwandlungsverluste auftreten. Für die Gesamtverluste können in der Regel zwischen **24** und **29 %** angenommen werden (Temperatur, Reflexionseffekte, Kabel etc.) [Weller et al., 2009].

Für eine Kläranlage hat der modulare Aufbau den Nutzen, dass je nach Bedarf die Anlagen angepasst und auch einfach erweitert werden können. Grundsätzlich ist der Einsatz auf allen Kläranlagen sinnvoll und kann den Anteil der Eigenstromproduktion erhöhen. Bei der Planung ist jedoch darauf zu achten, dass keine Freiflächen mit Photovoltaik-Anlagen ausgestattet werden, die für spätere abwassertechnische Verfahrensstufen eingesetzt werden könnten bzw. für bauliche Anlagen zur Verfügung stehen müssten. Weiterhin dürfen keine nahe stehenden Objekte, wie Bäume, Faultürme oder Kaminanlagen zu einer dauerhaften oder temporären Beschattung führen. Bei Kläranlagen besteht in der Regel tagsüber ein höherer Strombedarf als nachts. Dies erleichtert die Eigenstromverwendung von Photovoltaikanlagen.

5.3.2 Strom aus Windenergie

Die Erzeugung von Strom aus Windenergie ist neben den großen Offshore-Anlagen und in On-shore-Windparks auch in der Umgebung einer Kläranlage sinnvoll möglich. Die wesentlichen Bestandteile einer Windenergieanlage (WEA) sind der Turm oder Mast, die Gondel, die Rotorblätter, das Getriebe, der Generator, die Messinstrumente und ggf. die Windrichtungsnachführung. Grundsätzlich werden zur Nutzung der Windenergie Widerstands- und Auftriebsläufer eingesetzt, die zum einen horizontal oder zum anderen vertikal zur Windrichtung drehen. Die Umsetzung in elektrische Energie aus mechanischer Bewegung erfolgt durch einen elektrischen Generator. Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse haben sich bei der Erzeugung von elektrischer Energie in der Energiewirtschaft etabliert. Sie erreichen Leistungen bis 8 MW. Ein Nachteil von horizontalen Drehachsen liegt in der ständigen Nachführung zur Windrichtung. Die Errichtung von größeren WEA über 50 Meter Anlagenhöhe im Umfeld von Kläranlagen kann nur unter Beachtung aller genehmigungsrechtlichen Anforderungen erfolgen und muss individuell geprüft werden. Dies gilt auch in bestimmten Bereichen für die Kleinwindenergieanlagen (KWEA).

Eine weitere Möglichkeit der Nutzung von Windenergie bieten Rotoren mit vertikaler Achse, diese können wie folgt bewertet werden:

Vorteile der Vertikalrotoren

- keine Windrichtungsnachführung notwendig,
- wenig Schattenschlag (beim Savonius-Rotor),
- meist geringere Schallemissionen.

Nachteile der Vertikalrotoren

- geringe Wirkungsgrade,
- pulsierendes Drehmoment (Mastresonanzen, können durch Verdrillen des Rotors gemindert werden → Helix-Form),
- kein Selbstanlauf (beim Darrieus-Rotor),
- marktbedingte Größenbeschränkung.

Für Kläranlagenstandorte bietet sich die Möglichkeit, auf Freiflächen, auf denen die Errichtung einer größeren horizontalen Windkraftanlage aus genehmigungsrechtlichen Gründen nicht möglich ist, eine Vertikalwindkraftanlage oder Kleinwindenergieanlage zu errichten.

Die kinetische Energie des Windes wird physikalisch durch die Abbremsung der Windgeschwindigkeit genutzt. Die aus dem Wind entnommene Leistung bei Horizontalwindrädern ist proportional zum Quadrat des Rotordurchmessers und zu der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Da die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt und sich verstetigt [Jarass et al., 2009], werden in der Regel zur Maximierung des Ertrags hohe (über 100 m) Anlagen mit großen Rotorradien eingesetzt. Der Einsatz einer Kleinwindenergieanlage ist nur aufgrund lokaler Restriktionen zu empfehlen. Zur Berechnung der möglichen Erträge aus einer Windenergieanlage kann folgende Formel angesetzt werden:

Formel 5-1 Leistung Windkraftanlage nach [Zahoransky, 2015]

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot \Pi \cdot r^2 \cdot v^3$$

- P = Leistung [kW]
 ρ_L = Dichte Luft (1,29 kg/m³ bei Normbedingungen)
 r = Rotorradius [m]
 v = Windgeschwindigkeit [m/s]

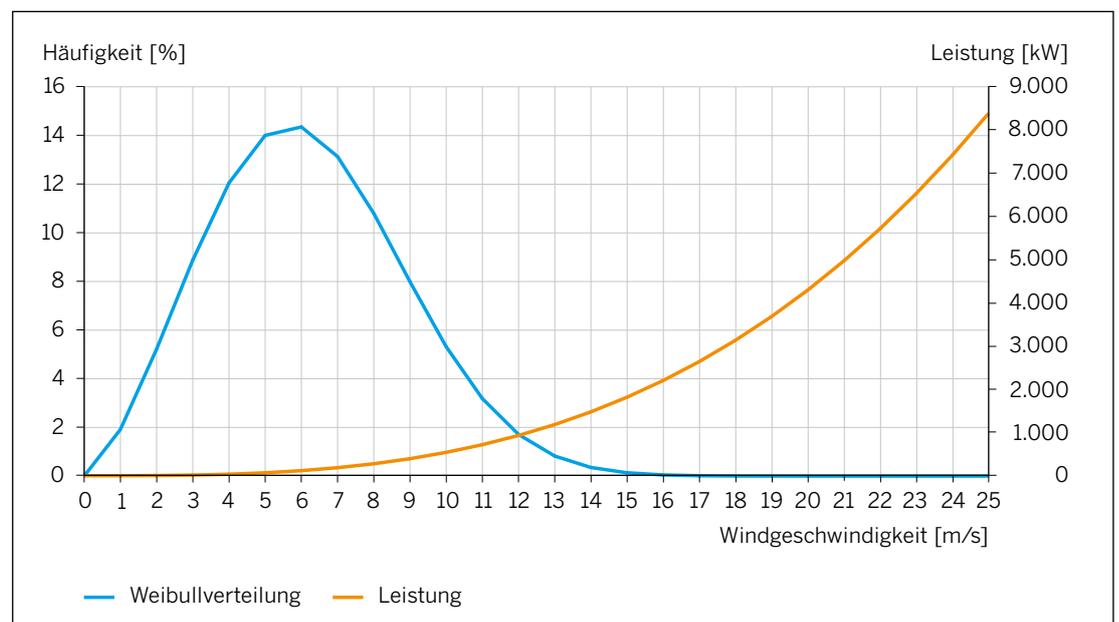


Bild 5-5 Beispielhafte Weibullverteilung für mittlere Windgeschwindigkeit bei 6 m/s und die Leistung einer Windkraftanlage

Mit Kenntnis der Windgeschwindigkeitsverteilung über das Jahr, welche annähernd der Weibull-Verteilung (Bild 5-5) folgt, und der Leistungskurve der WEA kann der Ertrag über das Jahr berechnet werden.

Die Windverhältnisse sind lokal sehr spezifisch und führen an verschiedenen Standorten zu sehr unterschiedlichen Erträgen. Daher sind Windmessungen über einen repräsentativen Zeitraum (z. B. ein Jahr) sowie die genaue Betrachtung des Aufstellungsgebiets empfehlenswert für die Standortentscheidung. Bei niedrigen KWEA sind vor allem die Anströmverhältnisse entscheidend, da durch Abschattung (Gebäude, Bäume) der Umgebung und durch zu starke Turbulenzen solche Anlagen nicht effizient betrieben werden können.

5.3.3 Strom aus Wasserkraft

Für die Nutzung der Wasserkraft stehen verschiedene Techniken, je nach ortsabhängigen Faktoren wie Platzbedarf, Fallhöhe und Volumenstrom, zur Verfügung. Das durch die Wasserkraftmaschine strömende Wasser treibt ein Laufrad, Wasserrad o. Ä. an. Diese Bewegung wird mittels einer Welle über ein Getriebe im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Die elektrische Leistung von Wasserkraftanlagen hängt vom nutzbaren Durchfluss, der Nettofallhöhe und dem Wirkungsgrad des Gesamtsystems ab und kann wie folgt berechnet werden:

Formel 5-2 Elektrische Leistung einer Wasserkraftanlage

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h_N / 1000$$

P = Nutzleistung [kW]

η = Wirkungsgrad des Aggregats [-]

ρ = Dichte des Fördermediums [kg/m³]

g = Erdbeschleunigung 9,81 [m/s²]

Q = nutzbarer Abfluss [m³/s]

Δh_N = Nettofallhöhe als Differenz aus Fallhöhe und Verlusthöhe ($\Delta h - h_v$) [m]

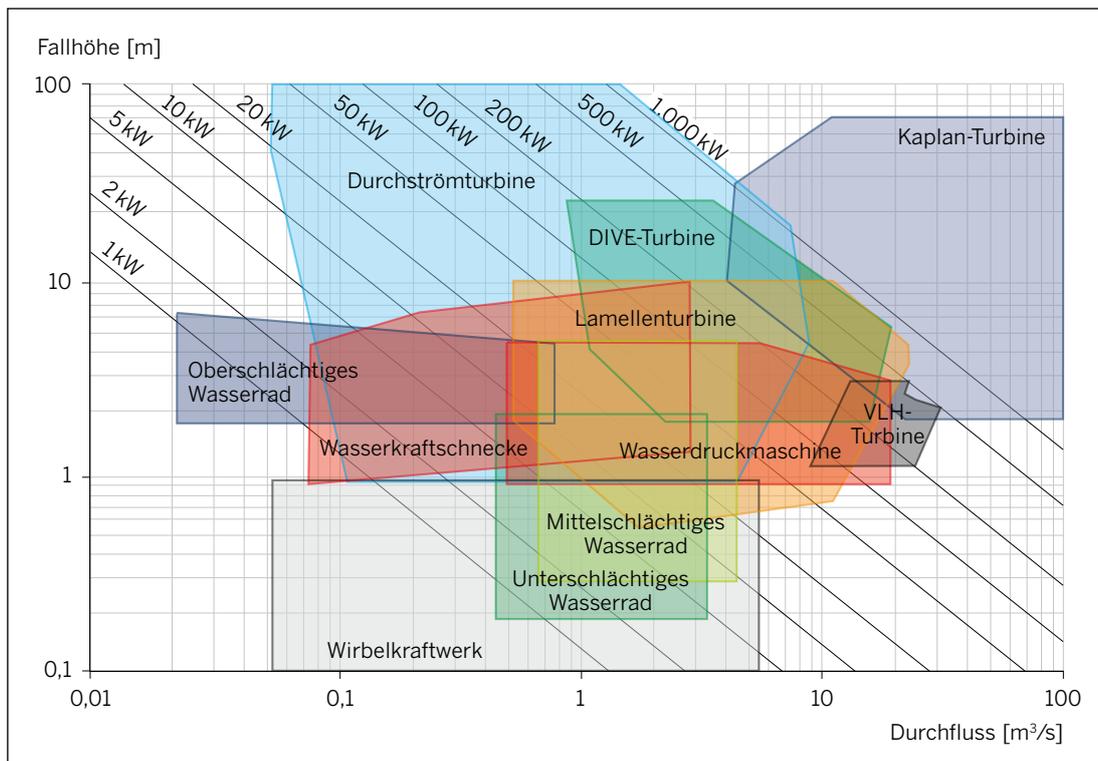


Bild 5-6 Einsatzgebiete Kleinwasserkraft nach [Frehmann et al., 2013]

Der Wirkungsgrad η der Turbine/des Wasserrads wird durch die Verluste unmittelbar am Aggregat beeinflusst, die sich aus den örtlichen hydraulischen Verlusten η_H , den Spaltverlusten η_V und den mechanischen Verlusten η_M zusammensetzen.

Es gilt daher:
$$\eta_T = \eta_H \cdot \eta_V \cdot \eta_M$$

Die potenzielle Energie besitzt im Gegensatz zur kinetischen Energie den größeren Anteil. Daher ist es i. d. R. immer sinnvoll, zur Energiegewinnung möglichst große Fallhöhen in eine Wasserkraftanlage zu leiten. Grundlegend können im Abwasserbereich Wasserkraftturbinen, Wasserkraftschnecken, Wasserräder oder Sonderverfahren (z. B. Wasserwirbelkraftwerke) eingesetzt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass das Abwasser frei von Fest- und Störstoffen sein muss, um Beschädigungen und Verstopfungen zu vermeiden. Zudem wird auf die große Korrosionsproblematik (z. B. SO_4 und Chloride) hingewiesen. Abgesehen von den Sonderverfahren werden diese Verfahren nachfolgend im Einzelnen beschrieben. Der Einsatzbereich der verschiedenen Wasserkraftanlagen ist in Bild 5-6 dargestellt. Üblicherweise sind für Kläranlagen Fallhöhen bis 10 m relevant.

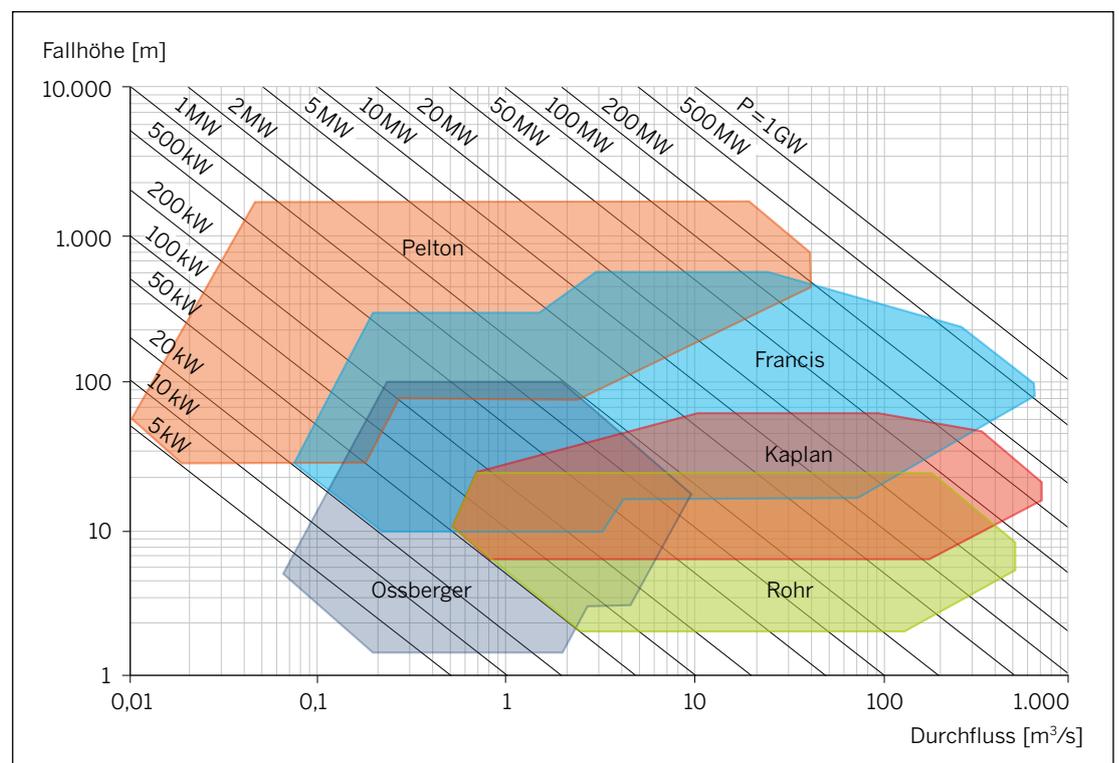


Bild 5-7 Einsatzgebiete Wasserturbinen nach [Quaschnig, 2013]

Wasserkraftturbinen

Je nach Volumenstrom und Fallhöhe können optimierte Turbinen eingesetzt werden, um die beste Leistungsaufnahme zu erreichen. In Bild 5-7 ist die Abhängigkeit der Leistungsaufnahme von der Fallhöhe und dem Volumenstrom dargestellt und die daraus resultierenden Turbinenarten. Prinzipiell lassen sich die Turbinen in Gleichdruckturbinen (Pelton, Ossberger) und Überdruckturbinen (Kaplan, Rohr, Francis) unterteilen. Die Gleichdruckturbinen nutzen dabei nur die Bewegung des Wassers ohne Druckänderung.

Im Funktionsprinzip unterscheiden sich die Turbinen nach Fallhöhe, Schaufelform, Drehzahl und Wirkungsgraden. Kaplan-, Rohr- und Ossbergerturbinen eignen sich vor allem bei geringen Fallhöhen und großen Wassermengen, wobei die Ossbergerturbine relativ unempfindlich für Verschmutzungen ist und daher bei Abwässern keine besondere Reinigung oder direkte Lage am Kläranlagenablauf voraussetzt. Wasserturbinen können zum Beispiel bei oberirdisch gebauten Becken oder starken Gefällen zwischen Reinigungsstufen wie auch in Kanalisationssystemen bei Druckleitungen und Falleitungen eingesetzt werden. In allen Fällen ist jedoch die hydraulische Situation zu berücksichtigen, da durch den Einbau einer solchen Turbine der Querschnitt der

Rohrleitung massiv verjüngt wird. Gegebenenfalls kann dies durch eine temporäre Bypass-Lösung umgangen werden.

Wasserkraftschnecken

Eine andere Variante der Wasserkraftnutzung nach dem Schwerkraftprinzip im geringen Leistungsbereich ist die Wasserkraftschnecke, die als Funktionsprinzip die umgekehrte archimedische Schraube verwendet. Die Wasserkraftschnecke wird überwiegend als Trogschnecke ausgeführt. Dabei sitzt die rotierende Schraube in einem nach oben offenen u-förmigen Trog. Der Vorteil der Wasserkraftschnecken liegt in der Nutzung von kleinen Wasserkraftpotenzialen ab 1 kW Leistung, ihrer robusten Bauweise, dem geringen Wartungsaufwand, vergleichsweise guter Leistung bei geringerem Durchfluss und der Verträglichkeit gegenüber Fest- und Störstoffen. Nachteile ergeben sich nur durch die Grenzen hinsichtlich der Höhenunterschiede bis 10 m. Die Wasserkraftschnecken werden baulich meist als Kompaktanlagen geliefert und können je nach vorgegebenen Platzverhältnissen ohne größere Hoch- und Tiefbaumaßnahmen eingesetzt werden.

Wasserräder

Die älteste bekannte Methode, Energie zu gewinnen, ist die Nutzung der Wasserkraft mittels Wasserrädern. Durch die Art der Anströmung wird in unter-, mittel- und oberflächliche Funktionsweise unterschieden, wobei die oberflächlichen Wasserräder den höchsten Wirkungsgrad besitzen. Deutliche Vorteile gegenüber den anderen Wasserkraftmaschinen besitzt das Wasserrad bei niedrigen Fallhöhen (0,5 bis 7 m) und stark schwankenden Zuflüssen. Wasserräder werden in der Regel am Ablauf einer Abwasserbehandlungsanlage eingebaut.

Effizienz der Wasserkraftnutzung auf Kläranlagen und im Kanal

Aus den in Bild 5-7 ablesbaren Daten wird deutlich, dass für eine Wasserkraftnutzung im Bereich einer Kläranlage ausschließlich Kleinst- und Kleinwasserkraftwerke in Betracht kommen.

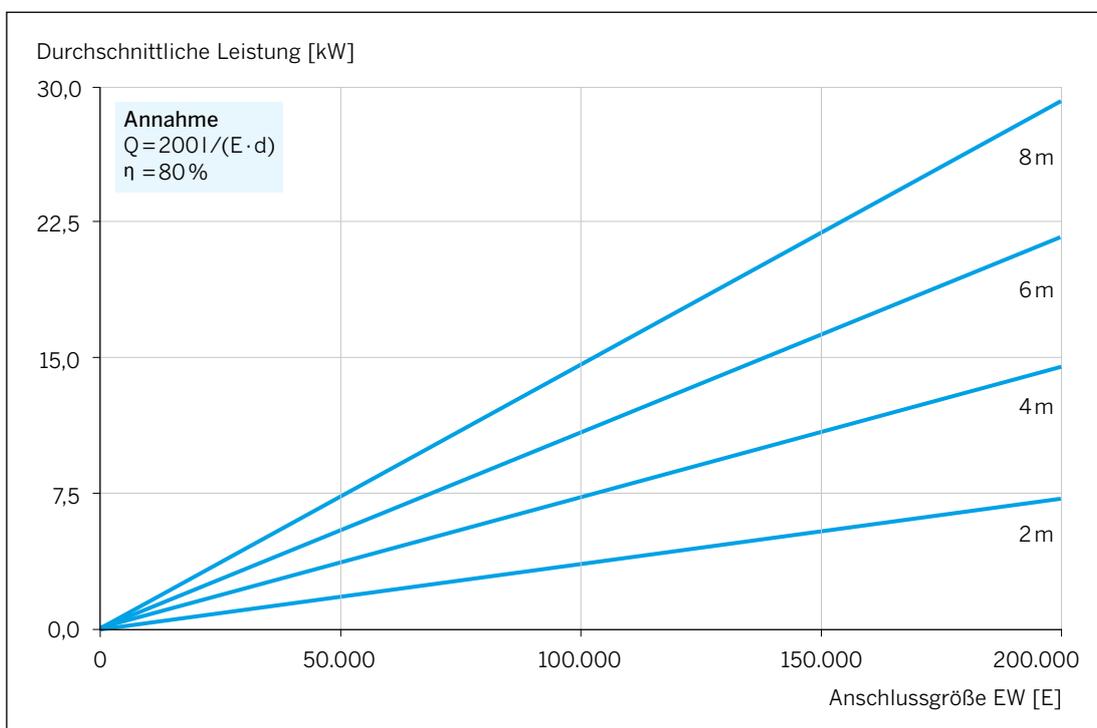


Bild 5-8 Leistungsdaten der Wasserkraftnutzung bei unterschiedlichen Kläranlagenanschlussgrößen und Fallhöhen

Für die Planung einer Wasserkraftanlage sind Basisdaten über die Abflussganglinie notwendig. Zudem sind Kenntnisse des Mindestwasserdurchflusses und des Hochwasserabflusses als maßgebliche Betriebsfälle zur Anpassung und Auslegung der gesamten Anlage erforderlich. Nachdem der Ausbaudurchfluss für die Wasserkraftanlage festgelegt wurde, ist anschließend die Fallhöhe zur Festlegung der Leistung der Wasserkraftanlage zu bestimmen. Um die Energieeinsparpoten-



ziale durch Wasserkraftanlagen optimal nutzen zu können, ist bei der Standortwahl vor allem auf eine große Fallhöhe zu achten. So werden große Fallhöhen innerhalb der Kanalisation durch Fallschächte überwunden, in denen die beim Absturz frei werdende potenzielle Energie des Abwassers ungenutzt bleibt.

Die Energiepotenziale können durch den Einsatz von Wasserkraftanlagen genutzt werden. Häufig bieten sich hier die Abläufe der Kläranlagen an, da diese meist zum Schutz vor Hochwasser deutlich höher liegen als die Wasserspiegellagen der Gewässer. Bei der Fallhöhenberechnung sind jedoch die saisonalen Schwankungen zwischen Ober- und Unterwasserspiegellagen zu berücksichtigen. Je nach Anordnung und Art der Wasserkraftanlagen müssen diese mit einem Notumlauf versehen werden.

5.3.4 Lastmanagement und Interaktion mit dem Stromnetz

Lastmanagement im Stromnetz ist eine Notwendigkeit, da im Stromnetz immer nur so viel Strom vorhanden sein darf, wie auch gerade gebraucht wird. An dieser Stelle können Kläranlagen einen wichtigen Beitrag leisten bzw. Kosten einsparen. Die Stromerzeugung folgt dem Verbrauch, damit Verbrauch und Erzeugung jederzeit übereinstimmen (Lastfolgebetrieb der Kraftwerke). Allerdings steigt die Komplexität mit zunehmender Zahl an Verbrauchern und Produzenten und es wird anspruchsvoller, die Netzfrequenz stabil zu halten. Insbesondere der intensive Ausbau der regenerativen Energien stellt die Energieversorger vor neue Herausforderungen, da diese meteorologischen Fluktuationen unterliegen (Wind- und Sonnenenergie).

Für die Überwachung und Kontrolle des Stromnetzes sind die Großverbraucher von besonderem Interesse. Das deutsche Tarifsystem für Netznutzungsentgelte sieht eine 15-minütige registrierende Leistungsmessung von Verbrauchern über 100.000 kWh pro Jahr vor [DENA, 2015]. Optimal für den Energieversorger ist eine gleichmäßige Anzahl möglichst großer Energieabnehmer. Dieses Optimum wird in der Realität oft nicht erreicht. Insbesondere auf Kläranlagen schwankt der Energieverbrauch aufgrund von Belastungsänderungen durch hydraulische und frachtmäßige Zulaufschwankungen sowie Witterungseinflüsse. Das führt zu Leistungsspitzen und dem Einsatz von teuren Sicherheitsreserven des Energieversorgers. Als Beispiel ist in Bild 5-9 modellhaft ein theoretischer und ein realer Leistungsbezug dargestellt.

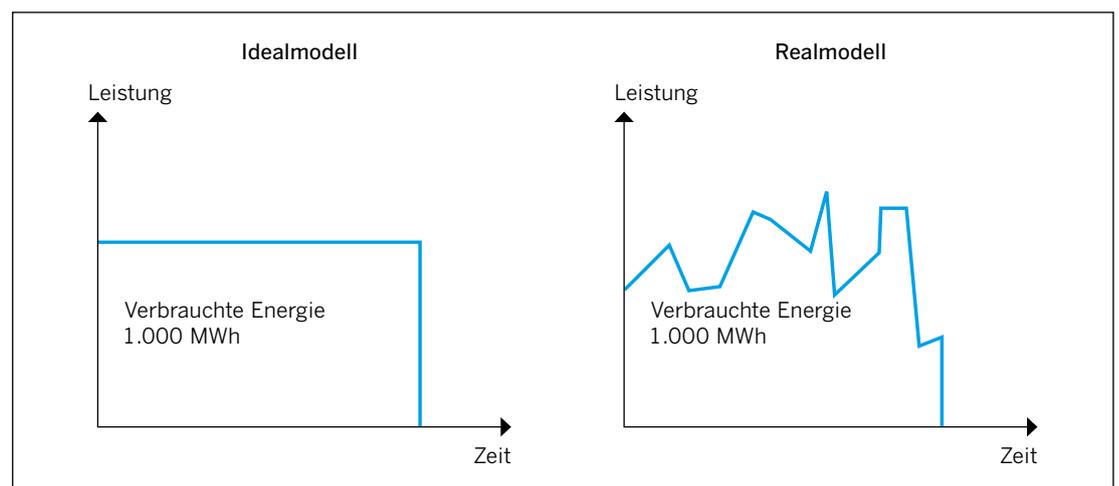


Bild 5-9 Darstellung eines idealisierten und eines realen Leistungsbezugs

Das in Bild 5-9 dargestellte Problem der Leistungsspitzen wird als Kostenfaktor vom Energieversorger an den Verbraucher weitergegeben. Das spiegelt sich in den üblichen Preisregelungen zwischen Großverbrauchern und Energieversorgern wider. Neben der bezogenen elektrischen Arbeit (kWh) wird auch die maximale Leistung (kW) bei der Berechnung der Netznutzungsentgelte und der Stromnutzung berücksichtigt (Leistungspreis).

Der Arbeitspreis bezieht sich auf die Menge der verbrauchten Kilowattstunden und wird üblicherweise mit steigendem Verbrauch günstiger. Der Hintergrund ist, hohe Verbräuche attraktiv zu gestalten, es stellt aber auch die Kostensituation des Energieversorgers dar. Der Leistungspreis erhebt eine Gebühr für die in Anspruch genommene Kraftwerkskapazität. Entscheidend für die Ermittlung des Leistungspreises ist nicht der Höchstwert der Leistung, sondern der 15-minütige maximale Mittelwert.

Auf Kläranlagen können Lastmanagementsysteme sowohl zur Optimierung des Strombezugs bzw. der Eigenenergieerzeugung sinnvoll sein als auch als Voraussetzung für eine ökonomisch wertvolle Interaktion mit den Stromnetzen.

Lastmanagementsysteme

Eine der ersten und simpleren Methoden des Lastmanagements ist die Maximumüberwachung. Ein „Maximum-Wächter“ erhält Trendberechnungen und Prognosen über die Leistungswerte der kommenden Viertelstunde und kann so über ein kurzzeitiges Abschalten von Verbrauchern drohende Leistungsspitzen vermeiden. Der Betrieb darf dadurch nicht negativ beeinflusst werden. Das System muss also entscheiden, welcher Verbraucher geeignet ist und wann eine Freigabe für die Maximumüberwachung nach planerischen und betrieblichen Vorgaben möglich ist. Neben den einfachen Maximum-Wächtern kommen heutzutage computergestützte Leistungsoptimierungssysteme und Systeme zum Energiemanagement zum Einsatz. Diese sind in der Lage, das vorhandene Prozessleitsystem durch aufwendige Visualisierungen zu ergänzen und Prognosen abzugeben.

Grundsätzlich kann zwischen zwei Szenarien unterschieden werden:

1. Betriebliches Lastmanagement
2. Überbetriebliches Lastmanagement

Betriebliches Lastmanagement

Das betriebliche Lastmanagement wird meist als ein betriebsinternes Spitzenlastmanagement umgesetzt, das primär dazu dient, Leistungsspitzen zu reduzieren und so Energiekosten zu sparen. Die Einführung eines Spitzenlastmanagements lohnt sich für Unternehmen ab einer mittleren Leistung von circa **500–1.000 kW** und kann einhergehend mit einem System zum Energiemanagement eingeführt werden. Kleine mittelständische Unternehmen besitzen weniger Stromverbraucher, also weniger Flexibilität für Abschaltungen sowie einen geringen Anteil des Leistungspreises am gesamten Strompreis. Eine grundlegende Voraussetzung ist eine entsprechende Mess- und Regelungstechnik.

Das Lastmanagement ist in der Lage, die Einsatzzeiten energieintensiver Prozesse zu verschieben, um zu vermeiden, dass diese gleichzeitig laufen oder die Einschaltspitzen zusammenfallen. Die Überwachung kann durch optische oder akustische Signale erfolgen. Die Signale zeigen an, wann die Leistung bereits sehr hoch und das zusätzliche manuelle Einschalten von Lasten untersagt ist oder wann Lasten abgeworfen werden müssen. Die Alternative ist ein automatisiertes Lastmanagementsystem, welches, wie zuvor beschrieben, mit Prognosen arbeitet und so die Einhaltung bestimmter maximaler Leistungswerte, die mit dem Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) vereinbart wurden, umsetzen kann. Lastganganalysen können Aufschluss über die Wirtschaftlichkeit des Spitzenlastmanagements geben.

Überbetriebliches Lastmanagement

Ist ein automatisiertes Spitzenlastmanagement installiert, kann eine Erweiterung des innerbetrieblichen Lastmanagements in Betracht gezogen werden. Das Ziel ist dann nicht nur, Energiekosten zu sparen, sondern gegebenenfalls Erlöse auf dem Regelenergiemarkt zu erwirtschaften (siehe Kapitel 5.3.5). Die Einsatzmöglichkeiten der überbetrieblich verschiebbaren Lasten umfassen:

- die Stabilisierung kritischer Netzsituationen,
- den Ausgleich der Differenz zwischen Stromangebot und -nachfrage und
- den Ausgleich von Prognosefehlern.



Umsetzung auf Kläranlagen

Die Einführung eines Lastmanagements sollte strukturiert erfolgen und kann mit der Umsetzung eines Energiemanagementsystems nach DIN-EN-ISO 50.001 [DIN, 2011c] kombiniert werden. Beide Systeme lassen sich aber auch getrennt voneinander umsetzen. Die Vorgehensweise kann nach dem Handbuch Lastmanagement [DENA, 2012] erfolgen, welches folgende Schritte vorsieht (Bild 5-10):

Initiieren	Plan	Do	Check & Act
1. Informieren 2. Relevanz für Unternehmen bewerten	1. Daten zusammentragen 2. Geeignete Prozesse vorauswählen 3. Geeignete Prozesse im Detail analysieren 4. Mess- und Regelungstechnik analysieren 5. Erlösmöglichkeiten bewerten	1. Prozesssteuerung umsetzen 2. Marktzugang herstellen 3. Erproben und justieren	1. Erlöse auswerten 2. Prozessanforderung prüfen
Untersuchung initiieren	Entscheidung herbeiführen	Vermarktung starten	Lastmanagement anpassen und ggf. auswerten Anpassungsbedarf festlegen

Bild 5-10 Phasen und Schritte bei der Einführung eines Lastmanagements nach [DENA, 2012]



Die Frage, ob die Einführung eines Lastmanagementsystems auf einer Kläranlage sinnvoll ist, kann mittels folgender Checkliste beantwortet werden:

1. Führt die Kläranlage ein Energiemanagement durch, in dessen Rahmen wesentliche Energiedaten für die wichtigsten Prozesse und Aggregate im Unternehmen bereits erfasst werden?
2. Ist auf der Kläranlage ein Spitzenlastmanagementsystem im Einsatz?
3. Gibt es auf der Kläranlage stromintensive Prozesse mit mehr als **250 – 500 kW**, deren Lastbezug z. B. unter Nutzung von bestehenden Speicherkapazitäten zeitweilig verschoben werden kann?
4. Könnte unter Berücksichtigung der betrieblichen Abläufe bzw. von Gesundheits- und Arbeitsschutz in die Prozesse grundsätzlich zeitweilig eingegriffen werden?
5. Können die betroffenen Aggregate über ein Prozessleitsystem angesteuert werden?

Eine positive Beantwortung einer möglichst großen Anzahl dieser Fragen befürwortet die Einführung eines Lastmanagementsystems. Eine Aussage, wann ein Lastmanagement sinnvoll ist, bedarf allerdings einer individuellen Prüfung.

Vorauswahl geeigneter Prozesse

Im Sinne der Vorauswahl werden Stromverbraucher der Kläranlage ausgeschlossen, die energetisch nicht relevant und zeitlich aus verfahrenstechnischer Sicht nicht variabel sind oder nur unter unverhältnismäßig großem Investitionsaufwand variabel wären (bspw. Speicherbedarf). Die Aggregate werden nach verschiedenen Kriterien beurteilt und so eine Auswahl an potenziellen Verbrauchern getroffen. Kriterien sind:

- Wirkleistung > 2 kW,
- Zeitliche Variabilität bzw. Abschaltung,
- Abschalt- und Zuschaltzeit,
- Eignung Lastmanagement,
- Eignung Regelleistung.

Detailanalyse geeigneter Prozesse

Die nach den vorstehenden Kriterien individuell ausgewählten Stromverbraucher kommen in die engere Auswahl für den Einsatz in einem Lastmanagementsystem. In der Auswahl werden



die wesentlichen Verbraucher, die **70–80 %** des Energieverbrauchs ausmachen, fokussiert. Die Leistungsüberwachung des Lastmanagementsystems soll, soweit möglich, automatisch erfolgen. Dies erfordert gewisse Voraussetzungen und Einschränkungen der Verbraucher nach den nachfolgenden Kriterien:

- Leistung,
- Priorität,
- Zulässige Ab- und Zuschaltzeiten,
- Schalthäufigkeit,
- Sperrzeiten,
- Betriebliche Sperr- und Freigabekriterien.

Lastmanagement durch Stromerzeugung

Neben den Großstromverbrauchern der Kläranlage, die besonders interessant für ein Lastmanagementsystem sind, gibt es auf vielen Kläranlagen Aggregate zur Stromerzeugung, die ein großes Potenzial aufweisen, wie z. B. BHKW. Das Potenzial ergibt sich aus der Flexibilität von BHKW, die durch einen entsprechenden Faulgasspeicher gewährleistet werden kann. Faulgasspeicher und Größe des BHKW werden meist nach dem Faulgasertrag der Kläranlage ausgelegt. Es gibt dabei drei Modelle, die zum Lastmanagement beitragen könnten:

1. faulgasgeführtes BHKW,
2. BHKW für das Spitzenlastmanagement,
3. BHKW zum Netzausgleich.

Neben dem üblichen faulgasgeführten BHKW mit einer möglichst langen Jahreslaufzeit (**> 8.000 h/a**) kann durch Erweiterung des Faulgasspeichers und der BHKW-Kapazität auch ein Spitzenlastmanagement betrieben werden. Der Einsatz für den Netzausgleich erweist sich als schwierig umsetzbar, da die kontinuierliche Faulgasproduktion den diskontinuierlichen Bedingungen des Stromnetzes, respektive den strengen Auflagen für die Bereitstellung von Regelenergie, gegenübersteht.

5.3.5 Regelenergie

Die Verteilung von elektrischer Energie ist ohne die Vorhaltung von Regelleistung heutzutage kaum möglich. Der Grund ist, dass Strom, anders als beispielsweise Erdgas, nicht im Netz zwischengespeichert werden kann und deswegen immer genau so viel produziert werden muss, wie verbraucht wird. Die Stromspeicherung in größerem Umfang ist aufgrund von Umwandlungs- und Speicherverlusten meist ökonomisch nicht sinnvoll. Deswegen ist es notwendig, Reserven in Form von Regelleistung vorzuhalten.

Technischer Aufbau

Eine konstante Netzfrequenz ist die Grundlage für eine gesicherte Energieversorgung. Verschiedene aufeinander abgestimmte Mechanismen sorgen für die Erhaltung der Netzfrequenz, da Abweichungen das Gleichgewicht von Stromangebot und Stromabnahme stören und zu Ausfällen führen könnten.

Die Aufgabe der Frequenzhaltung im kontinentaleuropäischen Netz wird in vier wesentliche Regelstufen eingeteilt:

- Primärregelung (primary control)
- Sekundärregelung (secondary control)
- Minutenreserve (tertiary control)
- (Stundenreserve)

Die Primärregelung dient dem Ausgleich zwischen Leistungsangebot und -nachfrage im europäischen Netzverbund. Die Aufgabe der Sekundärregelung entspricht der Aufgabe der Primärregelung, mit dem Unterschied, dass der Frequenzausgleich nur in der jeweiligen Regelzone stattfindet.



det. Die Minutenreserve dient als Ablösung und Unterstützung der Sekundärregelung. Sie wird durch Kraftwerke oder regelbare Lasten sowie kleinere Energieerzeuger bereitgestellt. Der Abruf durch den Übertragungsnetzbetreiber (= ÜNB) erfolgt noch telefonisch. Als vierter Punkt wird zudem die Stundenreserve zum langfristigen Ausgleich eingesetzt. Diese gilt jedoch als Reserve, nicht als Regelleistung und wird innerhalb der Bilanzkreise organisiert, die sich am Intraday-Handel der europäischen Strombörse EPEX (European Power Exchange) orientieren. Die Zusammenhänge der Regelstufen werden in Bild 5-11 dargestellt.

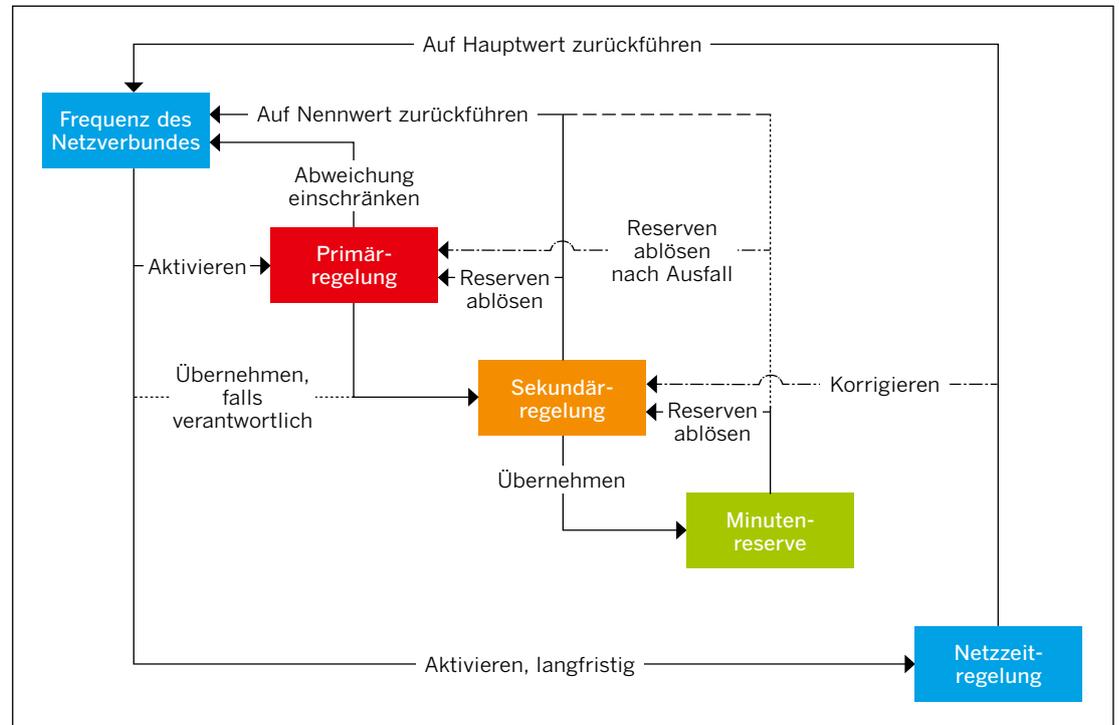


Bild 5-11 Schema der Netzfrequenzregelung im UCTE-Verbundnetz nach [FfE, 2013]

Der Regelleistungsmarkt

Die Voraussetzung zur Teilnahme am deutschen Regelleistungsmarkt ist die Qualifizierung des Unternehmens durch ein Präqualifikationsverfahren. Ein präqualifiziertes Unternehmen erlangt Zugang zu den Ausschreibungsverfahren am Regelleistungsmarkt. Die Präqualifikation wird vom jeweiligen Übertragungsnetzbetreiber vorgenommen und dient der Gewährleistung einer versorgungssicheren Bereitstellung von einer oder mehreren Arten der Regelleistung. Es werden technische Kompetenz, ordnungsgemäße Erbringung unter betrieblichen Bedingungen und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit geprüft. Die genauen Präqualifikationsvoraussetzungen sind detailliert auf der gemeinsamen Internetplattform der ÜNB zu finden. Die Bedingungen unterscheiden sich je nach Regelleistungsart, wie in Bild 5-12 dargestellt. Sobald die präqualifizierte Leistung die jeweilige Mindestangebotsgröße überschreitet, schließt der Anschluss-ÜNB mit dem Anbieter über jede Regelleistungsart einen Rahmenvertrag, der wiederum Voraussetzung für die Teilnahme an den Ausschreibungsverfahren für die Regelleistung ist.

Neben den in Bild 5-12 aufgeführten technischen Anforderungen sind für die Präqualifikation auch noch informationstechnische und organisatorische Bedingungen zu erfüllen. Diese betreffen insbesondere die erforderliche Kommunikation und Infrastruktur zwischen Anbieter und ÜNB, wie z. B. Ansteuerung der Aggregate, personelle Besetzung, Prozessleitsystem und Kommunikationswege, die dazu dienen, die vertraglich vereinbarte Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Für Anlagen, die beispielsweise aufgrund ihrer Größe die Präqualifikationsbedingungen nicht erfüllen können, sind die sogenannten Poolmodelle interessant, welche auch unter dem Begriff „virtuelles Kraftwerk“ bekannt sind. Das Poolmodell ist ein präqualifizierter Zusammenschluss dezentraler technischer Einheiten innerhalb einer Regelzone, aus denen der Anbieter Regelleistung für einen bestimmten ÜNB vorhalten und erbringen kann.

	Primärregelung	Sekundärregelung	Minutenreserve	Stundenreserve
Minimaler Regelbereich	Min. $\pm 2\%$ der Nennleistung der EE, jedoch min. ± 2 MW	Min. 5 MW an (positiver und/oder negativer) verfügbarer Leistung ¹⁾		0,1 MW (positiv und/oder negativ)
Frequenzabweichung/Einsatzbereich	< 10 MHz	< 10 MHz/ Entlastung der PRL	Entlastung der SRL	Entlastung der MRL
Aktivierungsgeschwindigkeit/minimale Verfügbarkeitsdauer	Innerhalb 30 sek bis min. 15 min	Innerhalb 5 min bis min. 4 h	Innerhalb 15 min bis min. 4 h	Entsprechend Vertrag
Lastveränderungsgeschwindigkeit	Linear	Min. 2 % der Nennleistung pro min		Keine Vorgaben
Zeitverfügbarkeit	100 %	95 %	100 %	Entsprechend Vertrag
Reaktionszeit	Sofort	10 – 40 sek	15 min	30 min – 8 h
Verantwortlich	Alle ÜNB	ÜBN in Regelzone		Bilanzkreis
Beschaffung	Öffentliches Ausschreibungsverfahren			Bilaterale Verträge oder Intraday-Handel

1) Änderung der Mindestangebotsgrenze für Minutenreserve auf 5 MW
(Bundesnetzagentur BK6-10-099 2011.10.18)

Bild 5-12 Technische Anforderungen zum Bereitstellen von Regelleistung nach [VDN, 2007]

Dabei wird zwischen zwei verschiedenen Einsatzprinzipien unterschieden:

- Die ÜNB-Poolansteuerung: Eine gesamte Gruppe technischer Einheiten wird über das Soll-Signal des ÜNB gesteuert. Die Einsatzkoordination der technischen Einheiten liegt damit beim Anbieter. Dieser muss die technischen und organisatorischen Voraussetzungen für diese Einsatzkoordination schaffen und zusätzlich zu den Messwerten der einzelnen technischen Einheiten auch die notwendigen Werte für den Pool online berechnen und an den ÜNB übertragen.
- Die ÜNB-seitige Einzelansteuerung: Die technischen Einheiten innerhalb des Pools werden einzeln vom ÜNB angesteuert. Der Anbieter gibt vor, welche technischen Einheiten angesteuert werden können. Eine zusätzliche Online-Berechnung von Pool-Werten für Sekundärregelung durch den Anbieter ist in diesem Fall nicht notwendig.

Die Einbindung einer Kläranlage in ein Netzregelkonzept erweist sich zurzeit als schwierig umsetzbar. Hintergrund sind die strengen Vorgaben für die Teilnahme respektive die Erfüllung der Präqualifikationsbedingungen. Eine Alternative könnte die gemeinsame Vermarktung von Regelenergie in Poolmodellen bieten. Für jede Kläranlage muss eine individuelle Prüfung der Eignung für die Bereitstellung von Regelenergie erfolgen, was nach den vorstehend beschriebenen Kriterien erfolgen kann.



5.4 Wärme und Kälte

5.4 Wärme und Kälte (W&K)

5.4.1
Allgemeine
Hinweise

5.4.2
Integrale
Wärme-
konzepte

5.4.3
W&K
aus
Ab-
wasser

5.4.4
W&K
aus
Strom

5.4.5
W&K
aus Gas,
Heizöl,
Holz-
pellets

5.4.6
W&K
aus
solarer
Energie

5.4.7
W&K
aus
der
Erde

5.4.8
W aus
Druck-
luft

5.4.9
W aus
Hochtem-
peratur-
pro-
zessen

5.4.10
W aus
Raum-
luft

5.4.11
W aus
Faul-
schlamm

5.4.1 Allgemeine Hinweise

Wärme wird im technischen Sinne auch als thermische Energie bezeichnet. Diese Energieform wird vorwiegend bei der Verbrennung von Kraftstoffen und Brennstoffen erzeugt. Sie entsteht ebenfalls durch Reibung und Kompression bei mechanischen Systemen oder beim Fließen von elektrischer Energie durch einen widerstandsbehafteten Leiter. Weiterhin wird Wärme bei der Absorption von Licht oder Strahlung erzeugt.

Wird einem Körper oder einem geschlossenen thermodynamischen System Wärme zugeführt, steigt üblicherweise die Temperatur. Wärmezufuhr kann jedoch auch ohne Temperaturänderung zur Phasenumwandlung (fest/flüssig/gasförmig) genutzt werden, beispielsweise zum Schmelzen von Eis oder zur Verdampfung von Wasser.

Für die Wärmemenge wird nach DIN 1304 [DIN, 1994] als Formelzeichen „Q“ verwendet. Um dies von dem in der Wasserwirtschaft für Wassermengen gebräuchlichen gleichen Formelzeichen Q unterscheiden zu können, wird in diesem Handbuch für Wärmemengen der Index th (Q_{th}) angefügt. Die Grundeinheit der Wärmemenge ist Joule, eine Umrechnung in kWh ist möglich ($1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Ws} = 3600 \text{ J} = 3,6 \text{ Kilojoule (kJ)}$).

Wärme fließt in einem Körper selbsttätig von einem Ort mit höherer zu einem Ort mit niedrigerer Temperatur (Wärmeleitung, 2. Hauptsatz der Thermodynamik). Die Effektivität dieses Vorgangs wird durch die für jedes Material typische Wärmeleitfähigkeit beschrieben. Für die Wärmeversorgung bei technischen Prozessen kommt es entsprechend nicht allein auf die zur Verfügung stehende oder erzeugte Wärmemenge an. Ein wichtiger Faktor ist auch die gewissermaßen als „Antriebskraft“ wirkende Temperaturdifferenz zwischen dem Ort der Erzeugung/Speicherung und dem Ort des Verbrauchers/Abnehmers. Daher sind im Vergleich zur elektrischen Energie konzeptionelle Betrachtungen wesentlich komplexer.

Die Fähigkeit eines Stoffes oder Materials zur Speicherung von Wärme wird durch seine Wärmekapazität bestimmt. Sie wird in der Einheit $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ angegeben.

Bei der konventionellen Wärmeversorgung eines Gebäudes liegt die sog. Vorlauftemperatur des Heizsystems üblicherweise bei $60\text{--}90\text{ }^\circ\text{C}$, um über den Wasserkreislauf die Heizkörper zu versorgen. Diese geben wiederum selbstständig die Wärme über Strahlung und Konvektion an die Raumluft ab, wodurch die gewünschte Temperatur von ca. $20\text{ }^\circ\text{C}$ erreicht werden kann.

Bei den verfahrenstechnischen Prozessen der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung wird Wärme in unterschiedlichen Temperaturniveaus bereitgestellt. Gleichzeitig herrscht ein Bedarf an Wärme in unterschiedlichen Temperaturniveaus.

Bisher gibt es keine einheitliche Nomenklatur für diese Temperaturniveaus. Daher werden in diesem Handbuch nach folgenden Kriterien neue Temperaturniveaus für Abwasseranlagen definiert:

- Zur besseren Übersichtlichkeit des Wärmesystems werden 5 nutzbare Temperaturniveaus definiert.

- Die Temperaturniveaus werden mit einfach zu merkenden Bezeichnungen versehen.
- Die definierten Temperaturniveaus orientieren sich an häufig auftretenden Temperaturverhältnissen, wie sie üblicherweise auf Abwasseranlagen vorherrschen:
 - $< 30\text{ °C}$ für Luft- und Wassertemperaturen, die für Wärmepumpen nutzbar sind
 - $30\text{--}60\text{ °C}$ für Niedertemperaturprozesse (z. B. Faulung) und Niedertemperaturheizungen
 - $60\text{--}95\text{ °C}$ für Standardheizungen (Vorlauf-/Rücklauftemperaturen) und Kühlwasserabwärme aus BHKW
 - Der Bereich zwischen 95 °C und 100 °C wurde bewusst ausgespart, da in diesem Bereich der Phasenübergang von Wasser von der flüssigen zur dampfförmigen Phase erfolgt und er daher wenig genutzt wird.
 - $100\text{--}200\text{ °C}$ für Prozessabwärme und Prozesswärme oberhalb des Siedepunktes von Wasser unter Normaldruck und geringem Druck
 - $> 200\text{ °C}$ für Verbrennungsprozessabwärme (Abgas der Verbrennungsöfen, BHKW o. Ä.) sowie für das Temperaturniveau der üblichen Gasturbinenkraftwerkswärme

Entsprechend werden in diesem Handbuch die nachfolgenden Temperaturniveaus unterschieden:

- $\text{NNT}_{<30}$ = Niedrigsttemperatur: $< 30\text{ °C}$,
- NT_{30-60} = Niedertemperatur: $30\text{--}60\text{ °C}$,
- MT_{60-95} = Mitteltemperatur: $60\text{--}95\text{ °C}$,
- $\text{HT}_{100-200}$ = Hochtemperatur: $100\text{--}200\text{ °C}$,
- $\text{HHT}_{>200}$ = Höchsttemperatur: $> 200\text{ °C}$.

Die wichtigsten Wärmeverbraucher und -bereitsteller für Abwasseranlagen sind in Bild 5-13 und Bild 5-14 nach diesen standardisierten Niveaus zusammengestellt. Zur Orientierung sind weiterhin die Temperaturniveaus der bisher üblicherweise verwendeten Kreisläufe (Heizung Vor- und Rücklauf, Kühlung) angegeben. Durch den Einsatz neuer Systemtechniken, vor allem im Bereich

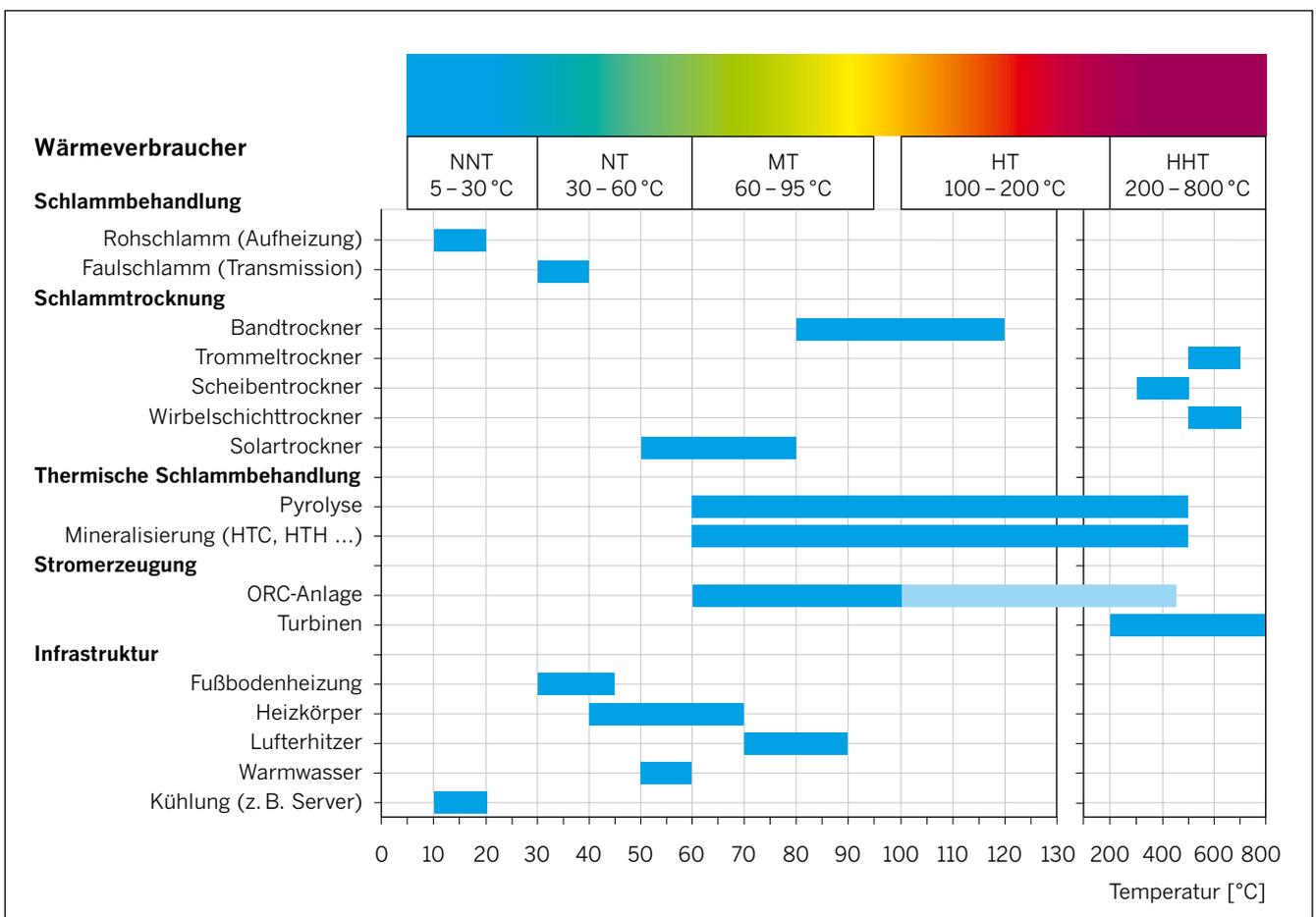


Bild 5-13 Temperaturniveaus typischer Wärmeverbraucher auf Abwasseranlagen

der Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung, werden zukünftig auch weitere Temperaturniveaus interessant. Dies betrifft vor allem den Bereich zwischen 20 und 60 °C. Weitere Entwicklungen zeichnen sich im Bereich über 100 °C für den Einsatz bei Hochtemperaturprozessen zur Schlammbehandlung ab.

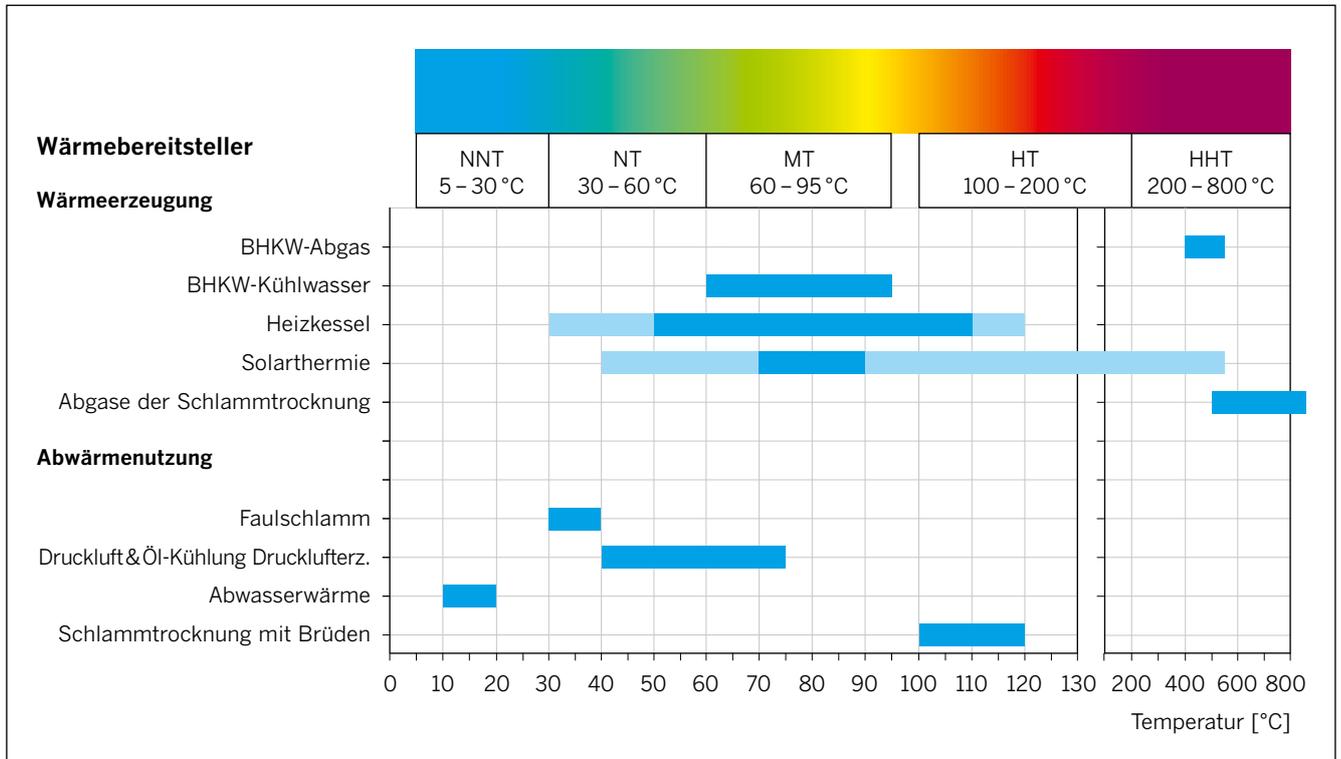


Bild 5-14 Temperaturniveaus typischer Wärmebereitsteller auf Abwasseranlagen

Oftmals wird zur Deckung des eher niedergradigen Wärmebedarfs für die Gebäude- und Faulbehälterheizung (NNT_{<30}, NT_{30–60}, MT_{60–95}) thermische Energie des höchsten Temperaturniveaus (HHT_{>200}) aus der Verfeuerung von Faul- und Erdgas sowie Heizöl genutzt. Zudem findet ein meist sehr statischer Betrieb einiger großer Wärmeverbraucher wie der Faulbehälterheizung statt. In den Sommermonaten bleibt daher oftmals Wärme ungenutzt und wird unter Aufwand elektrischer Energie an die Atmosphäre abgeführt. In den Wintermonaten hingegen muss oft Wärme mittels zugekaufter Fremdenergie erzeugt werden.

Bei der Optimierung dieser energetisch ungünstigen Situation können integrale Wärmekonzepte für Abwasseranlagen helfen.

5.4.2 Integrale Wärmekonzepte

5.4.2 Integrale Wärmekonzepte

5.4.2.1

Allgemeine Hinweise

5.4.2.2

Variante 1: KA mit Schlamm-faulung, 500.000 E

5.4.2.3

Variante 2: KA mit Schlamm-faulung und -trocknung

5.4.2.4

Variante 3: KA mit Schlamm-faulung, -trocknung, -Monoverbrennung

5.4.2.5

Wärme-verbund

5.4.2.1 Allgemeine Hinweise

Neben der Verwendung möglichst effizienter Maschinenteknik liegt im Bereich der Wärme- und Kältenutzung in der optimierten Abstimmung von Wärmeverbrauch und -bereitstellung ein bisher wenig beachtetes energetisches Optimierungspotenzial auf Kläranlagen [DWA, 2016g].

Dieses Potenzial kann durch den **ganzheitlichen Ansatz eines planerischen und betrieblichen Wärmemanagements im Rahmen eines sogenannten „integralen Wärmekonzepts“** genutzt werden.

Planerisches Wärmekonzept

Die in Bild 5-13 und Bild 5-14 dargestellte Vielzahl von Wärmebereitstellern und -verbrauchern sollte in einem planerischen Konzept unter Berücksichtigung der jeweiligen Temperaturniveaus und Energiemengen möglichst optimal aufeinander abgestimmt werden. Dies beinhaltet eine Minimierung der ungenutzten thermischen Energie sowie die Vermeidung eines Bezugs von externer Wärmeenergie. Hierbei sollte die Wärme stufenweise von einem höheren hin zu einem niedrigeren Temperaturniveau genutzt werden. So kann beispielsweise der abgekühlte Rücklauf eines endothermen Prozesses noch für die Wärmebereitstellung in Verfahrensstufen mit niedrigeren Temperaturanforderungen genutzt werden. Ein Wärmeverbraucher kann z. B. durch Nutzung eines Teils der thermischen Energie zu einem Wärmebereitsteller in einem niedrigeren Temperaturniveau werden (Kältenutzung entsprechend invertiert).

Dieser Prozess der stufenweisen Wärmenutzung wird auch als „kaskadierte Wärmenutzung“ [DWA, 2016g] bezeichnet.

Grundsätzlich gilt, dass Wärmeströme eines hohen Temperaturniveaus bevorzugt für die Verwendung in Wärmekraftmaschinen (wie Dampfturbinen oder ORC-Anlagen) genutzt werden sollten. Ebenso ist die Nutzung für Prozesse mit hoher Wärmeleistung (z. B. bei der Klärschlamm-trocknung zur Überwindung der Verdampfungsenthalpie) in Betracht zu ziehen.

Wärmeströme eines niedrigeren Temperaturniveaus eignen sich entsprechend eher für (Auf-)Heiz- oder Kühlprozesse.

Weiterhin können im Rahmen des planerischen Wärmemanagements die in den Kapiteln 5.4 und 5.5 beschriebenen Technologien dazu verwendet werden, bisher nicht oder kaum genutzte Temperaturniveaus auf Basis einer divergenteren Bereitstellung zu erschließen.



Betriebliches Wärmemanagement

Durch die in den Einzelkapiteln dieses Handbuchs beschriebenen betrieblichen Maßnahmen, wie beispielsweise eine zusätzliche regenerative Heizquelle oder die Zugabe von Co-Substraten (vgl. Kapitel 5.2.2), kann – vergleichbar mit dem Lastmanagement beim Strom – (vgl. Kapitel 5.3.4), der Wärmebedarf der Wärmebereitstellung zeitlich und mengenmäßig angenähert bzw. angeglichen werden. Zu beachten ist hierbei jedoch das träge Anfahrverhalten einiger Bereitsteller von (thermischer) Energie.



Vorgehen zur Erstellung eines integralen Wärmekonzepts

Zur Erstellung eines integralen Wärmekonzepts sind folgende Schritte durchzuführen:

1. Definition von Zielen, die mit dem integralen Wärmekonzept erreicht werden sollen
2. Erfassung des vorherrschenden Wärmebedarfs und des Wärmebereitstellungsangebots durch
 - Identifikation der bestehenden Wärmebereitstellung und des Wärmebedarfs in den jeweiligen Temperaturniveaus (Vor- und Rücklauftemperatur) und der jeweils bereitgestellten oder benötigten Wärmeleistung. Zu berücksichtigen sind dabei die zeitliche Verfügbarkeit und der zeitliche Bedarf.
 - Identifikation und Beseitigung von Wärmeverlusten sowie Reduzierung des Wärmebedarfs.
3. Analyse des bestehenden Wärmeversorgungskonzepts: rein fremdenergiebasiert (Erdgas, Heizöl, etc.); rein faulgasbasiert, Kombination aus Faulgasnutzung und Fremdenergienutzung etc.).
4. Identifikation möglicher bisher nicht genutzter Temperaturniveaus inklusive potenzieller neuer Wärmebereitsteller und -verbraucher im Bilanzraum der Kläranlage sowie in deren unmittelbarem Umfeld.
5. Ermittlung möglicher verfahrenstechnischer, betrieblicher, wirtschaftlicher oder thermodynamischer Restriktionen.



6. Erarbeitung eines Konzepts zur kaskadierten Wärmenutzung unter Berücksichtigung einer dauerhaften Erreichung der definierten Ziele, des vorherrschenden Status quo sowie möglicher Restriktionen.

Das zu erarbeitende integrale Wärmekonzept ist immer individuell an die vorherrschende Situation anzupassen. Anhand einer „typischen“ Kläranlage mit einer Anschlussgröße von 500.000 E_{Abwasser&Schlamm} (keine Annahme von Fremdschlämmen: $EW_{Abwasser} = EW_{Schlamm}$) mit Schlammfäulung (Variante 1) sollen die zu hebenden Potenziale exemplarisch dargestellt werden. Der Einwohnerwert $E_{Abwasser&Schlamm}$ soll sowohl beim Schmutzfrachtenfall als auch beim Schlamm-anfall 500.000 Einwohneräquivalenten entsprechen. Bei einigen Kläranlagen sind Schlamm- und Abwassereinwohnerwerte infolge externer Abwasser- oder Schlammanlieferungen unterschiedlich.

Diese Beispielkläranlage wird anschließend sukzessive um eine Klärschlamm-trocknung (Variante 2) sowie eine Klärschlammverbrennung (Variante 3) erweitert, um die sich dadurch ergebenden Änderungen eines möglichen Wärmekonzepts zu verdeutlichen. Es muss darauf hingewiesen werden, dass in diesen beispielhaften Darstellungen keine Effekte aus Schwankungen beim Schlamm-anfall und der Faulgasproduktion (rd. $\pm 10\%$) berücksichtigt wurden. Ebenso wurden Schwankungen der tatsächlichen Temperaturverläufe (Schlamm- und Lufttemperatur) je nach Region und Klimabe-dingungen (kalter Winter, heißer Sommer, $\pm 10\%$) nicht mit einbezogen.

Die möglichen, im Rahmen eines integralen Wärmekonzepts umzusetzenden Bestandteile sind ge-trennt für die drei abgestuften Varianten in übersichtlicher Form in Tabelle 5-7 zusammengefasst.

Dabei sind in Variante 1 (reine Klärschlammfäulung) bedarfsseitig nur die Positionen 1a bis 1d und bereitstellungsseitig nur 2a) oder 2b) der Tabelle 5-7 relevant.



In Variante 2 (Kapitel 5.4.2.3) werden Wärmebereitstellungsmöglichkeiten (2a bis 2h außer 2d der Ta-belle 5-7) für den Wärmebedarf einer zusätzlichen Schlamm-trocknung (1e der Tabelle 5-7) diskutiert.



Variante 3 (Kapitel 5.4.2.4) umfasst alle Wärmebereitstellungsmöglichkeiten (inkl. 2d der Tabelle 57) und den kompletten Bedarf für Schlammfäulung, -trocknung und -monoverbrennung.



Für (kleine) Kläranlagen kann ebenfalls ein integrales Wärmekonzept entwickelt werden. Im Rah-men einer ersten Näherung kann davon ausgegangen werden, dass eine Kläranlage mit rd. 1/10 der Anschlussgröße im Vergleich zu der hier exemplarisch dargestellten 500.000 E-Kläranlage auch nur etwa ein 1/10 der Energie benötigt bzw. bereitstellt. Bei diesen oftmals nicht mit einer anaeroben Klärschlammstabilisierung ausgerüsteten Anlagen entfällt einerseits der wesentliche Wärmebedarf (Schlammaufheizung und Deckung der Transmissionsverluste des Faulbehälters). Andererseits steht aber auch der wesentliche Wärmebereitsteller (Faulgas) nicht für eine ener-gische Nutzung zu Verfügung. Einzig die Wärme für die Gebäudebeheizung, Frostsicherung sowie Warmwasserbereitstellung (bei einer 50.000 E-Kläranlage rd. 1/10 des unter 1c) und 1d) in Bild 5-15 dargestellten Bedarfs in Höhe von rd. $139 \text{ MW}_{th}/a$) ist durch eine geeignete Wärmequelle wie eine Wärmepumpe oder eine konventionelle Heizung (Erdgas, Öl, Pellets) bereitzustellen.

Für alle Wärmeverteilungsmaßnahmen sind die hydraulische Optimierung der/des Wärmever-teilungsnetze(s) sowie die Effizienz der Wärmetauscher sehr wichtig, damit die erzeugte Wärme auch bei den Verbrauchern ankommt. Ferner ist eine Prüfung der Laufzeiten von Notkühlungen an BHKW-Anlagen sowie ein effizientes Messkonzept für die Wärmequellen (vgl. Kapitel 2.3.4.3.2) und -senken zur Reduzierung der Wärmeverluste sinnvoll.



Zur Veranschaulichung dieser groben Jahresbilanzen eignen sich grafische Darstellungen, wie das in Kapitel 2.3.4.3 dargestellte Energiebilanzschema (Bild 2-10) oder das Sankey-Diagramm (Bild 2-11).



Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die in den Varianten zur groben Orien-tierung geeignete Jahresbilanzierung der Temperaturniveaus unbedingt bei der Erarbeitung eines konkreten Wärmekonzepts um die detaillierteren Monats- und ggf. Tages- sowie Stundenbedarfs- und Wärmedargebotsanalysen ergänzt werden muss.

Tabelle 5-7 Strom- und Wärmebedarf sowie -bereitstellung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus für eine Beispielfläranlage mit 500.000 E

1 Strom- und Wärmebedarf	Strom	Wärme NNT _{<30} und NT ₃₀₋₆₀	Wärme MT ₆₀₋₉₅	Wärme HT ₁₀₀₋₂₀₀ und HHT _{>200}	Wärme, NNT, NT, MT, HT, HHT
Temperaturniveaus für Wärme	MWh/a	< 60 °C	60 – 95 °C	> 100 °C	5°C – > 200 °C
Einheiten	MWh/a	MWh/a	MWh/a	MWh/a	MWh/a
1a) Transmissionsbedarf FB	650		620		620
1b) Schlammaufheizung FB			7.660		7.660
1c) Wärmebedarf Betriebsgebäude	20		750		750
1d) Wärmebedarf Warmwasser	20		640		640
1e) Wärmebedarf Schammtrocknung	850			11.600	11.600
1f) Kühl„wärme“bedarf (Adsorptionskühler)	10		80		80
1g) „Rest“-Wärme Nutzung zur Stromerzeugung ORC	-4.020		26.450		
Summe Strom- und Wärmebedarf ohne 1g)	1.550	0	9.380	11.600	20.980
Summe Strom- und Wärmebedarf nur 1a), 1b), 1c) und 1d)	690	0	9.300	0	9.300

2 Strom- und Wärmebereitstellung	Strom	Wärme NNT _{<30} und NT ₃₀₋₆₀	Wärme MT ₆₀₋₉₅	Wärme HT ₁₀₀₋₂₀₀ und HHT _{>200}	Wärme, NNT, NT, MT, HT, HHT
Temperaturniveaus für Wärme	MWh/a	< 60 °C	60 – 95 °C	> 100 °C	5°C – > 200 °C
Einheiten	MWh/a	MWh/a	MWh/a	MWh/a	MWh/a
2a) Heizung aus Faulgas bzw. Erdgas oder Heizöl ¹⁾	-50		22.300		22.300
2b) BHKW-Abwärme Kühlwasser und Abgas ¹⁾	9.900		5.700	5.500	11.200
2c) Brüdenkondensation Trocknung	-20		2.800		2.800
2d) Abgas der Klärschlamm-Monoverbrennung	4.400			27.200	27.200
2e) Rekuperationswärme Schlammablauf FB	-20	3.300			3.300
2f) Wärme Druckluft der BB (Luft-/Wasser-WT)	-10	1.300			1.300
2g) Solare Wärme ²⁾	-20		1.000		1.000
2h) Erd-, Abwasser-, oder Luftwasserwärmepumpen ²⁾	-300	1.000			1.000
Summe Strom-/Wärmebereitstellung ohne a)	13.930	5.600	9.500	32.700	47.800
Summe Strom-/Wärmebereitst. nur b), BHKW	9.900	0	5.700	5.500	11.200

1) In den Zeilen 2a und 2b wurde jeweils die gesamte Faulgasmenge zu Grunde gelegt, das Faulgas kann natürlich nur einmal verwertet werden.

2) In den Zeilen 2g und 2h wurde exemplarisch die Bereitstellung von 1.000 MWh/a Wärme dargestellt – hier kann eine Anpassung nach Bedarf erfolgen

5.4.2.2 Variante 1: Kläranlage mit Schlammfäulung, 500.000 E

Eine Kläranlage mit Schlammfäulung und einer Anschlussgröße von rund 500.000 E weist einen üblichen Gesamtwärmebedarf von rd. 9.300 MWh_{th}/a auf.

Dieser Bedarf teilt sich bei einer Kläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung entsprechend auf die folgenden Wärmeverbraucher (Bild 5-15) bei dem jeweils angegebenen Temperaturniveau auf:

C

2

3

4

5

Literatur

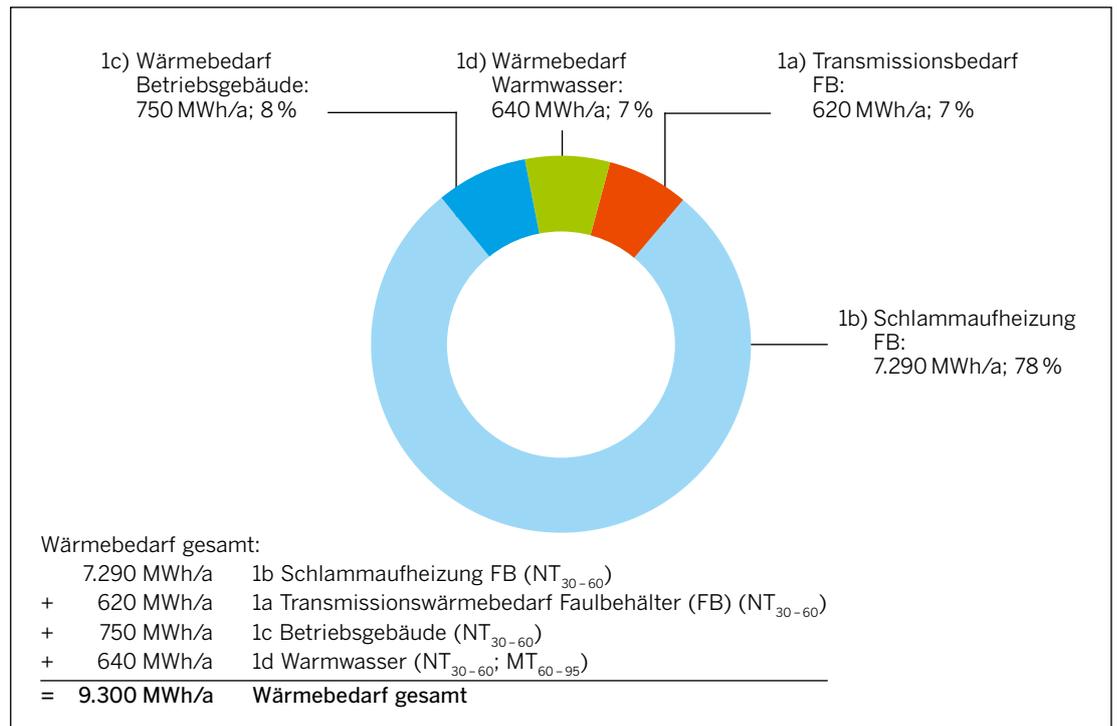


Bild 5-15 Wärmebedarfsanteile bei einer konventionellen Kläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung und einer Anschlussgröße von 500.000 E_{Abwasser&Schlamm}

Der Wärmebedarf wird in dieser Variante zu 85 % (Bild 5-15) für die Aufrechterhaltung der Faulbehältertemperatur (im Beispiel 35 °C; Rohschlamm-aufheizung und Deckung der Transmissionswärmeverluste) benötigt. Mit rd. 80 % verursacht die Schlamm-aufheizung den größten Anteil des Jahreswärmeverbrauchs der betrachteten Kläranlage. Dieser Anteil kann in Abhängigkeit von der Abwasser- und damit Rohschlammtemperatur (im Beispiel 20 °C Temperaturerhöhung von 15 °C i. M. auf 35 °C) und der gewählten Faulbehältertemperatur (im Beispiel 35 °C) mehr oder weniger stark vom Beispiel abweichen.



Eine praktikable Methode zur Bestimmung der über die Faulbehälteroberflächen an die Umgebung abgegebenen Wärme (Transmissionswärmeverbrauch) ist in Kapitel 2.3.4.3.2 erläutert. Als Vergleichsgröße sollte der so bestimmte Transmissionswärmeverbrauch bei einer üblichen Faulbehälterwärmeeisolation von 8–10 cm Dämmstoff weniger als rd. 10 % der Wärme für die Schlamm-aufheizung betragen.

Üblicherweise wird der Wärmeverbrauch auf einer Kläranlage durch die folgenden Bereitsteller gedeckt:

- 2a) Heizkessel; Nutzung des gesamten Faulgases für die Heizung (bzw. Erdgas oder Heizöl) (NT₃₀₋₆₀, MT₆₀₋₉₅ oder HHT_{>200}) 22.300 MWh_{th}/a
- 2b) BHKW-Abwärme; Nutzung der Wärme aus Kühlwasser (MT₆₀₋₉₅) und Abgas (HHT_{>200}) 11.200 MWh_{th}/a



Bei ausschließlicher Nutzung des anfallenden Faulgases in einem Heizkessel (vgl. Kapitel 5.4.5) kann mit der bereitgestellten Wärmemenge von 22.300 MWh_{th}/a der Gesamtwärmeverbrauch der Kläranlage in Höhe von 9.300 MWh_{th}/a gesichert gedeckt werden.



Bei der BHKW-Nutzung mit Abwärme aus Motorkühlung und Abgaswärmeeisolation (vgl. Kapitel 5.6.1) ist die anfallende Abwärme von hier 11.200 MWh_{th}/a in der Jahressumme ebenfalls höher als der jährliche Wärmeverbrauch. Der Wärmeverbrauch ist allerdings durch den Heizwärmeverbrauch für die Schlamm- und Gebäudeheizung im Jahresverlauf ungleich verteilt (siehe Bild 5-16 rote Linie). Demgegenüber verläuft die Faulgasproduktion und damit die Wärmeeisolation (siehe Bild 5-16 grüne Linie) im Jahresverlauf mehr oder weniger gleichmäßig.

Durch diese zeitweilige Divergenz von Bereitstellung und Bedarf kann sich trotz der in der Jahressumme bilanziellen Wärmedeckung ein temporäres Defizit (im Beispiel Jan., Feb., März und Dez.) ergeben (Bild 5-16).

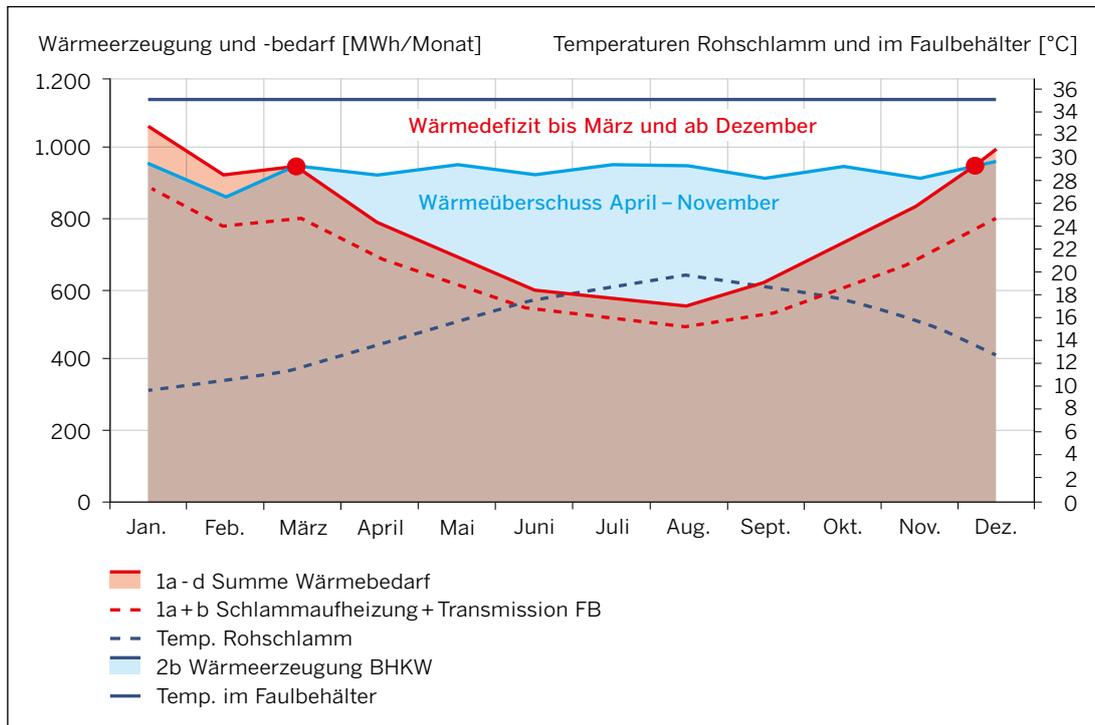


Bild 5-16 Monatlicher Wärmebedarf und Wärmebedarfsdeckung durch ein BHKW bei einer konventionellen Kläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung und einer Anschlussgröße von 500.000 E_{Abwasser&Schlamm}

Dieses Wärmedefizit kann durch Heizung mit Erd- oder Propangas bzw. Heizöl (vgl. Kapitel 5.4.5), Wärmepumpen (vgl. Kapitel 5.4.4), Schlammrekuperatoren (vgl. Kapitel 5.4.11) oder Wärme aus der Druckluft der Belebungsbecken (vgl. Kapitel 5.4.8) gedeckt werden. Solarwärmekollektoren (vgl. Kapitel 5.4.6) sind für diesen Anwendungsfall weniger geeignet, da das Wärmedefizit immer im Winter auftritt – zu dieser Zeit ist die solar gewinnbare Wärme jedoch gering.

Eine Speicherung der potenziellen sommerlichen Wärmeüberschüsse in Form von Schlamm, Faulgas, Strom oder Wärme (vgl. Kapitel 5.5) ist zumeist nicht möglich, da diese Speicher nur für kurzzeitige (meist < 1 d) Schwankungen Ausgleichsmöglichkeiten bieten. Eine Langzeitspeicherung lässt sich üblicherweise nicht wirtschaftlich darstellen.

Die im Sommer auftretenden Wärmeüberschüsse können zur Kühlung von Schalträumen, Büros oder Wartenräumen mittels Adsorptionskühlanlagen genutzt werden (vgl. Tabelle 5-7 Maßnahme 1f): Aus beispielsweise 80 MWh_{th} Wärme werden in einem Adsorptionskühler rd. 15 MWh Kälte im 10 °C-Bereich bereitgestellt).

Höhere spezifische Faulgaserträge (im Beispiel 450 m³_N/t_{oTR}) durch Desintegration oder Co-Substratzugabe (vgl. Kapitel 5.2.2 und 5.2.3) erhöhen das Wärmeangebot. Bessere Faulbehälterdämmung (im Beispiel 8 cm) und Gebäudedämmung (im Beispiel 150 kWh_{th}/(m²_{Nutzfläche} · a), ein geringerer Warmwasserverbrauch (im Beispiel 10.000 m³/a), besser voreingedickter Schlamm (im Beispiel 5 % TS-Gehalt) und höhere Abwasser- und damit Schlammzugabetemperaturen zum Faulbehälter (im Beispiel 10–20 °C, i. M. 15 °C) verringern den Wärmebedarf.

Auch die Zugabe von Klärschlamm aus anderen nahe gelegenen Kläranlagen ohne eigene Schlammfaulung kann eine wirksame Maßnahme zur Wärmebereitstellung sein. Dabei sollte die Wärme aus dem zusätzlich anfallenden Faulgas des externen Schlamms möglichst größer sein als für die Aufheizung dieses Schlamms erforderlich.

247
246
250

248
247

251



215
216

1

2

3

4

5

Literatur

5.4.2.3 Variante 2: Kläranlage mit Schlammfäulung und Schlamm Trocknung

1. Soll auf der in Variante 1 beschriebenen Kläranlage zusätzlich eine Schlamm Trocknung (siehe Kap. 3.5.5) betrieben werden, so vergrößert sich der Wärmebedarf je nach Trocknungsart deutlich. Der zusätzliche Wärmebedarf beträgt im Beispielfall bei einer Schlammvolltrocknung (vgl. Kapitel 3.5.5) rd. 11.600 MWh_{th}/a für das Temperaturniveau HT₁₀₀₋₂₀₀ (siehe 1e) in Tabelle 5-7). Dieser zusätzliche Wärmebedarf kann selbst bei vollständiger Nutzung der Brüdenkondensationsabwärme (2c) MT₆₀₋₉₅: 2.800 MWh_{th}/a) aus der Trocknung nicht annähernd mit der bisher ungenutzten BHKW-Abwärme (2b) HHT_{>200}: 5.500 MWh_{th}/a) gedeckt werden. Bei diesem Defizit an Wärmeenergie kann eine kaskadierte Wärmenutzung helfen. So wird die Hochtemperaturwärme des BHKW aus dem Abgaswärmetauscher (2b) in Höhe von 5.500 MWh_{th}/a komplett für die Trocknung genutzt. Zur Substitution des so entstehenden Wärmedefizits für die Schlamm aufheizung können folgende Potenziale im NT- und NNT-Bereich ausgeschöpft werden: Die NT-Wärme aus dem Schlammablauf kann durch einen Schlammrekuperator den „kalten“ Rohschlamm vor dem Wärmetauscher des Faulbehälters vorheizen (im Beispiel auf i. M. 25 °C) und dadurch den effektiven Wärmebedarf für die Schlamm aufheizung von 7.290 MWh_{th}/a um 3.300 MWh_{th}/a auf rd. 4.000 MWh_{th}/a reduzieren. Wird der Schlamm zusätzlich mit der Druckluftabwärme (2f) von rd. 1.300 MWh_{th}/a vorgeheizt, bleibt für die Schlamm aufheizung nur ein Restbedarf von 2.700 MWh_{th}/a, der durch die MT- BHKW-Kühlwasserabwärme (2b) in Höhe von 5.700 MWh_{th}/a oder durch die Brüdenabwärme (2c) in Höhe von 2.800 MWh_{th}/a gedeckt werden kann. Das Vorheizen des Rohschlamm erfordert einen separaten Wärmekreislauf, da es auf dem niedrigsten Temperaturniveau NNT erfolgt. Zudem sind die Auswirkungen auf die Entwässerbarkeit des Faulschlamm zu prüfen. Es besteht die Möglichkeit, dass mehr Flockungshilfsmittel verbraucht werden, wenn der Faulschlamm kälter ist.
2. Für die Bereitstellung solarer Wärme (2g) (vgl. Kapitel 5.4.6) in Höhe von beispielsweise 1.000 MWh_{th}/a auf Niedertemperaturniveau wären rd. 2.500 m² Thermosolarflächen erforderlich. Nachteilig ist der Anfallzeitpunkt im Wesentlichen im Sommer, wo meist keine Bedarfs-lücke bei der Wärmeversorgung der Kläranlage besteht.
3. Wärme des NT₃₀₋₆₀-Bereichs für die Schlamm aufheizung kann ebenfalls durch Wärmepumpen (Wärmequelle Luft, Abwasser oder Erdwärme (vgl. Kapitel 5.4.3, 5.4.4, 5.4.7, 5.4.8 und 5.4.10)) bereitgestellt werden (2h).

5.4.2.4 Variante 3: Kläranlage mit Schlammfäulung, Schlamm Trocknung und Klärschlamm-Monoverbrennung

Erweitert man die in Variante 2 analysierte Kläranlage nochmals um eine Klärschlamm-Monoverbrennung, würde mit rund 27.200 MWh_{th}/a (2d) (Tabelle 5-7) genug Abwärme HT_{>200} aus dem Abgas für die Deckung des Wärmebedarfs von 11.600 MWh_{th}/a für die vorangestellte Schlammvolltrocknung bereitgestellt werden.

Die Schlamm Trocknung vor einer Verbrennung dient nur zur Erhöhung des Schlammheizwertes, damit der Schlamm zur eigenständigen Verbrennung geeignet ist und muss nicht unbedingt eine Volltrocknung sein (siehe Kapitel 3.5.5). Alternativ kann der Heizwert des entwässerten Schlamm auch durch Zugabe von Kohle oder anderen Reststoffen mit gutem Heizwert auf den zur eigenständigen Verbrennung notwendigen Wert gebracht werden.

Bei genügend HHT_{>200}-Wärme kann die Nutzung einer Dampfturbine wirtschaftlich sein, weshalb diese gegenüber anderen Nutzungsalternativen (Fernwärmenetz, ORC etc.) technisch und wirtschaftlich zu prüfen ist.

Alternativ könnte auch die „Rest“-Wärme der MT₆₀₋₉₅-, HT₁₀₀₋₂₀₀- oder HHT_{>200}-Bereiche für folgende Prozesse genutzt werden:

- zur Stromerzeugung (ORC vgl. Kapitel 5.6.3),
- zur Desintegration (vgl. Kapitel 5.2.3),
- zur Unterstützung von Sonderverfahren, die Wärme benötigen, wie bei der Deammonifikation (vgl. Kapitel 3.6.1),
- zur Unterstützung einer solaren Klärschlamm Trocknung (vgl. Kapitel 3.5.5).

Es bleibt jedoch immer zu beachten, dass die Wärmeübertragung mit sinkendem Temperaturgradient ebenfalls stark abnimmt (es ist auf einen Mindesttemperaturgradienten zu achten, welcher im Einzelfall geprüft werden muss).

5.4.2.5 Wärmeverbund

Bei dauerndem bzw. länger anhaltendem Wärmeüberschuss ist es – abhängig vom Temperaturniveau – möglich, diesen in ein Kläranlagenexternes Wärmeverbundnetz einzuspeisen. Alternativ kann ein Wärmeüberschuss direkt von vorhandenen oder neu anzusiedelnden Wärmesenken wie Unternehmen oder öffentlichen Einrichtungen (z. B. Freibad, Hallenbad) im Umfeld der Kläranlage genutzt werden.

Die interne und externe Nutzung der Wärme darf nicht getrennt voneinander gesehen werden, sondern muss in einem ganzheitlichen Konzept zusammengeführt werden.

Das Prinzip eines Wärmeverbundes beruht dabei auf einem geschickten Ausgleich der auf unterschiedlichen Temperaturniveaus und unterschiedlichem zeitlichen Verlauf (Tages-, Wochen- oder Jahresgang) anfallenden und benötigten thermischen Energie der Verbundpartner und kann so bei diesen zu Brennstoffeinsparungen führen.

Nachfolgend sind einige Prüfkriterien für die Etablierung eines Wärmeverbundes genannt. Diese sind entsprechend der vorherrschenden Situation zu ergänzen und anzupassen:

- Bestimmung des zeitlichen Verlaufs, der Menge und des Temperaturniveaus der überschüssigen Wärme auf der Kläranlage,
- Identifikation potenziell geeigneter externer Wärmeverbraucher,
- Klärung der Nutzungsmöglichkeiten der Überschusswärme auf dem Temperaturniveau der Wärmesenke,
- Prüfung der zeitlichen Deckung des Wärmebedarfs durch den anfallenden Wärmeüberschuss,
- Berücksichtigung von Transportverlusten aufgrund der räumlichen Entfernung zwischen dem Ort des Wärmeüberschusses und dem Ort des Wärmebedarfs.

Bei der Erarbeitung dieser Lösungen ist stets zu hinterfragen, ob der Transport von thermischer Energie unter wirtschaftlichen und energetischen Gesichtspunkten das effizienteste Konzept darstellt. Evtl. kann man den Ort der Wärmebereitstellung und den Ort des größten Wärmeverbrauchs zusammenlegen. Bei Wärmetransporten ist zu hinterfragen, ob statt der Wärme aufgrund geringerer Transportverluste nicht besser Gas oder Strom innerhalb des Verbundes transportiert werden können.

5.4.3 Wärme und Kälte aus Abwasser

Abwasser enthält Wärme, die mit Hilfe von Wärmeübertragern und Wärmepumpen zu Heiz- und Kühlzwecken genutzt werden kann. Für die Gewinnung der im Abwasser gespeicherten und vorher eingetragenen Wärmeenergie wird zusätzliche Energie benötigt. Für eine Umsetzung ist letztlich entscheidend, ob geeignete Wärme- und Kälteabnehmer gefunden werden, die die Energie auf dem zur Verfügung gestellten Temperaturniveau (vgl. Kapitel 5.4.1, Bild 5-13 und Bild 5-14) nutzen können oder ob sich durch veränderte Nutzungskonzepte neue Senken erschließen lassen.

Standortspezifisch erreicht das Abwasser auch im Winter, wenn der Heizbedarf am größten ist, Temperaturen von **10 – 14 °C**. Die Wärme kann dem Abwasser an drei grundsätzlich unterschiedlichen Standorten entnommen und zur Beheizung genutzt werden: Energierückgewinnung im Gebäude, aus Rohabwasser (Kanalisation) und aus gereinigtem Abwasser im Kläranlagenablauf.

Hinweise zur Abwasserwärmenutzung können dem Merkblatt DWA-M 114 [DWA, 2009a] entnommen werden.

Abwasserwärmepotenzial

Das Wärmeangebot der Abwasserwärme kann über die mittlere Tagesabwassermenge und -temperatur berechnet werden. Dabei genügt es, zunächst die Monate der Heizperiode Oktober



C

1

2

3

4

5



bis März heranzuziehen. Pro **1 m³/h** Abwasser kann diesem bei einer Abkühlung um **1 K** eine Wärmemenge von **1,163 kWh** entzogen werden (siehe Formel 5-3).

Formel 5-3 Übertragene Wärmeleistung vom Wärmeübertrager

$$\dot{Q}_{ABW} = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T$$

\dot{Q}_{ABW} = übertragene Wärmeleistung vom Wärmeübertrager [kW]

c = spezifische Wärmekapazität des Abwassers (kann bei Temperaturen von 0 bis 20 °C als konstant 4,19 kJ/(kg·K) angenommen werden)

ρ = Dichte des Abwassers (kann bei Temperaturen von 0 bis 20 °C als konstant 1 kg/l angenommen werden)

Q = Durchfluss des Abwassers (Volumenstrom) [l/s]

ΔT = Temperaturdifferenz des Abwasserstroms infolge Wärmeentzug bzw. -eintrag [K]

Wärmeübertrager

Wärmeübertrager sind Installationen, welche die thermische Energie von einem Medium in ein anderes überführen. Um diese übertragene thermische Energie zu beschreiben, wird die übertragene Wärmeleistung benutzt (Formel 5-4).

Formel 5-4 Übertragene Wärmeleistung vom Wärmeübertrager

$$\dot{Q}_{WÜ} = k \cdot A_{WÜ} \cdot \Delta T$$

$\dot{Q}_{WÜ}$ = Vom Wärmeübertrager abgegebene Wärmeleistung [kW]

k = Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²K)]

$A_{WÜ}$ = Wirksame Wärmeübertragungs-Oberfläche [m²]

ΔT = Temperaturdifferenz [K]



Der Wärmedurchgangskoeffizient ist abhängig vom Wärmeübertragermaterial, dem Heizmedium, dem Kühlmedium und der Strömung im Wärmeübertrager. Bei Edelstahl kann von Wärmedurchgangswerten von ungefähr **0,6 – 0,8 W/(m²·K)** ausgegangen werden. Das Temperaturgefälle ist der Temperaturunterschied zwischen dem Heiz- und dem Kühlmedium [Buri und Kobel, 2005]. Eine Veränderung der Oberfläche der Wärmeübertrager in Folge von Ablagerung verschiedenster Materialien reduziert die Wärmeübertragung und steigert den Druckverlust. Zum einen kann es durch eine Übersättigung des Wassers mit Salzen zur Kristallisation auf der Oberfläche kommen, zum anderen setzen sich im Wasser transportierte Partikel auf der Oberfläche ab. Kratzer auf der Oberfläche der Wärmeübertrager erleichtern diesen Vorgang. Des Weiteren kann ein durch biologische Ablagerungen gebildeter Biofilm (Sielhaut), der aus sessilen Bakterien und Pilzen besteht, die Leistung mindern. Der Zusammenhang zwischen Wärmeübertragungsleistung und Biofilmbildung kann über den sogenannten Fouling-Faktor f [m²·K/W] ausgedrückt werden. Der Kehrwert des Fouling-Faktors ist ein Widerstand, der den Wärmedurchgangskoeffizienten k [W/(m²·K)] verschlechtert.

Typische Bauformen von indirekten Wärmeübertragern in der Fluid-Fluid-Anwendung sind Plattenwärme-, Rohrwärme- und Rohrbündelwärmeübertrager. Ein Plattenwärmeübertrager bezeichnet eine Form eines indirekten Wärmeübertragers, bei dem mehrere Platten ganz eng aneinander anliegen und parallele Zwischenräume haben, durch die das Heizmedium und das Kühlmedium abwechselnd fließen. Ein Rohrbündelwärmeübertrager besteht aus vielen schmalen Rohren, die in einem Bündel durch ein großes Rohr geführt werden, dem sogenannten Rohrraum. In den kleinen Rohren fließt die zu erwärmende Flüssigkeit und wird von der zu kühlenden Flüssigkeit, die im sogenannten Mantelraum fließt, quer zur Fließrichtung umströmt.

Wärmepumpe

Die Wärmepumpe ist ein Aggregat, das unter Zufuhr von Fremdenergie Wärme von einem niedrigeren zu einem höheren Temperaturniveau fördert, um sie für Heizzwecke nutzbar zu machen. Umgekehrt kann eine Wärmepumpe Wärme aus Räumen an die Umgebung bzw. an Abwasser abführen und damit Gebäude kühlen. Der Kühlbetrieb erfolgt durch Umschalten des Kältekreislaufs. Eine Wärmepumpe besteht aus einem Verdampfer, einem Kompressor, einem Kondensator und einem Expansionsventil. Es kann zwischen Sorptionswärmepumpen und Kompressionswärmepumpen sowie zwischen der Nutzung von Elektrizität oder Gas als Quellen für die Antriebsenergie unterschieden werden [Buri und Kobel, 2005].

Als Arbeitsmittel für den Kreisprozess in Wärmepumpe bzw. Kältemaschine sind verschiedene Stoffe und Stoffgemische in Gebrauch. Bei Einhaltung der Sicherheitsvorschriften sind natürliche Kältemittel eine klimaschonende und sichere Alternative zu Fluorchlorkohlenwasserstoff und fluorchlorkohlenwasserstoffhaltigen Kältemitteln. Natürliche Kältemittel sind u. a. Kohlenstoffdioxid, Ammoniak und Propan. Der Vorteil des Einsatzes von Kohlenstoffdioxid liegt in der hohen Kälteleistung pro Volumeneinheit, also dem Transport eines hohen Wärmestroms je Volumen des Kältemittels. Dadurch sind kleinere Rohrdurchmesser möglich, die eine kompaktere Konstruktion der Wärmepumpe erlauben. Kohlenstoffdioxid hat die Besonderheit, dass es im transkritischen Prozess eingesetzt werden kann, sodass bei der Verdichtung höhere Endtemperaturen erreicht werden und bei der Verflüssigung das Kohlenstoffdioxid eine gleitende Temperatursenkung erfährt [Maaß und Feddeck, 2003].

In der Betriebsweise erfolgt die Unterscheidung in monovalente, bivalente und multivalente Anlagen. Bei der alleinigen Wärmeversorgung durch eine Wärmepumpe handelt es sich um eine monovalente Anlage. Eine bivalente beziehungsweise multivalente Anlage besteht aus einer Wärmepumpe, welche die Grundlast an Wärmebedarf deckt, und einem anderen Wärmeerzeuger, der bei Spitzenlast anspringt und die fehlende Wärme erzeugt. Im bivalenten Betrieb wird die Wärmepumpe üblicherweise auf ein Drittel des gesamten Wärmeleistungsbedarfs ausgelegt. Damit werden drei Viertel des gesamten jährlichen Raumwärmebedarfs abgedeckt; der Spitzenkessel muss lediglich das restliche Viertel abdecken [Buri und Kobel, 2005]. Pufferspeicher stellen die Mindestlauf- und Mindeststillstandszeiten der Wärmepumpen sicher, die erforderlich sind, um den Verschleiß zu verringern und eine wirtschaftliche Nutzungsdauer der Wärmepumpen zu gewährleisten. Sie können die von der Wärmepumpe erzeugte Wärme bzw. Kälte i. d. R. über einen Zeitraum von **15 bis 60 Minuten** aufnehmen [Buri und Kobel, 2005].

Der effiziente Einsatz einer Wärmepumpe ist maßgeblich vom Betriebspunkt und damit von der Temperatur der Wärmequelle und den Heiztemperaturen der Wärmepumpe abhängig. Für eine effiziente Betriebsweise sollte die Vorlauftemperatur nach der Wärmepumpe **40 bis 55 °C** nicht überschreiten [Buri und Kobel, 2005]. Die Leistungszahl COP (Coefficient of Performance) bezeichnet den thermischen Wirkungsgrad von Wärmepumpen in einem bestimmten Betriebspunkt. Sie gibt das Verhältnis der von der Wärmepumpe abgegebenen Wärmeleistung zur aufgenommenen Antriebsleistung (meist elektrisch) an ($\text{COP} = \dot{Q}_{\text{WP}} / \text{PEI}$) und ist gewöhnlich größer als eins. Je höher die Leistungszahl, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe.

Beispiel COP-Wert = 4; Betriebspunkt W 10 °C/W 35 °C

Der erste Wert gibt das Temperaturniveau der Wärmequelle an (W = Wasser), der zweite Wert die Vorlauftemperatur für die Raumheizung. In diesem Beispiel benötigt die Wärmepumpe bei einer Heizleistung von 15 kW 3,75 kW elektrische Energie (also 1/4), um 11,25 kW Umweltenergie auf das benötigte Niveau von 15 kW zu „pumpen“ und damit zum Heizen bereitzustellen.

Der COP (Coefficient of Performance) betrachtet die Leistungen im Auslegungsfall – ohne Berücksichtigung der Leistungen für Hilfspumpen etc. Die verfügbare Wärmemenge ergibt sich anhand der Formel 5-5:

Formel 5-5 COP (Coefficient of Performance)

$$\dot{Q}_{\text{WP}} = \dot{Q}_{\text{WÜ}} \cdot \left(\frac{\text{COP}}{\text{COP} - 1} \right)$$

COP = Leistungszahl der Wärmepumpe bei Auslegungstemperaturen [-]

\dot{Q}_{WP} = Von der Wärmepumpe abgegebene Wärmeleistung [kW]

$\dot{Q}_{\text{WÜ}}$ = Vom Wärmeübertrager abgegebene Wärmeleistung [kW]

Eine weitere wichtige Kennzahl ist die Jahresarbeitszahl (JAZ) beim Betrieb einer Wärmepumpe. Die Jahresarbeitszahl gibt das Verhältnis des Jahresertrags an Energiemengen (= Arbeit) zur aufgewendeten Antriebs- und Hilfsenergie an (siehe Formel 5-6). Es wird somit die Effizienz der Gesamtanlage, inklusive der Hilfsenergie z. B. für Abwasser- oder Zwischenkreispumpen, erfasst.



C

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

Literatur

Dabei gilt die Faustregel: Je geringer der Temperaturunterschied zwischen Wärmequelle und Wärmeverbraucher (Fußbodenheizung etc.), desto wirtschaftlicher arbeitet die Wärmepumpe [Müller et al., 2013a].

Formel 5-6 Verfügbare Wärmemenge der Wärmepumpe anhand der Jahresarbeitszahl JAZ

$$\dot{Q}_{WP} = \dot{Q}_{WÜ} \cdot \left(\frac{JAZ}{JAZ - 1} \right)$$

JAZ = Jahresarbeitszahl [-]

\dot{Q}_{WP} = Von der Wärmepumpe gelieferte Nutzwärme [kWh/a]

$\dot{Q}_{WÜ}$ = Vom Wärmeübertrager gelieferte Wärme [kWh/a]

Wärmeentzug aus Abwasser im Kanal

Ein Wärmeentzug aus Abwasser im Kanal kann sinnvoll sein, wenn mögliche Abnehmer mit einem ganzjährigen NT-Wärmebedarf in der Nähe von Sammelkanälen liegen.

Die Wärmemenge, die insgesamt aus einem Kanalnetz gewonnen werden kann, berechnet sich aus

- der permanent verfügbaren Abwassermenge (Minimalabfluss) und
- der nutzbaren Temperaturdifferenz des Abwassers.



Die Erfahrung zeigt, dass aufgrund wirtschaftlicher und technischer Gründe die Wärmegewinnung aus Abwasser üblicherweise eine Wassermenge von mindestens **10 – 15 l/s** (Tagesmittelwert bei Trockenwetter) erfordert [DWA, 2009a].

Die Kenntnis der permanent verfügbaren Abwassermenge ergibt sich aus der Tagesabflussganglinie bzw. durch die Aufsummierung aus der Abflussdauerkurve. Hierin lässt sich die zeitgleich gemessene Abwassertemperatur integrieren. Insbesondere sind hier die Minimalabflüsse bei Trockenwetter und in den Nachtstunden (Mittelwert der Nachtstunden von 24 Uhr bis 5 Uhr) (Q_{min}) sowie die Abwassertemperaturen und die Bemessungstemperatur der nachfolgenden Kläranlage als einzuhaltende Minimaltemperatur zu beachten [Müller et al., 2013a].



Eine Voraussetzung für die Wärmegewinnung aus dem Kanal ist, dass die Abwasserreinigung (Nitrifikation) durch die Abkühlung nicht beeinträchtigt wird. Als erste Größenordnung können die Empfehlungen der DWA verwendet werden, die eine Abkühlung um **0,5 K**, die sogenannte Bagatellgrenze, als unproblematisch betrachtet. Hinweise zur Berechnung der zulässigen Temperaturabkühlung werden im Merkblatt DWA-M 114 [DWA, 2009a] gegeben.

5.4.4 Wärme und Kälte aus Strom

Für die Beheizung der Faulbehälter und der Gebäude, die Warmwasserbereitung auf Kläranlagen und die Beheizung von Pumpwerken im Kanalnetz kann bei speziellen Randbedingungen die Nutzung von Strom zur Wärmeerzeugung sinnvoll sein. Die Wärmeerzeugung aus Strom kann dabei

- a. direkt z. B. mit Heizpatronen in Warmwasserbehältern oder Wärmespeichern bzw. mit Heizradiatoren (bei Laborgebäuden und Pumpwerken), oder
- b. indirekt über Wärmepumpen mit Umgebungsluft, Abwasser (vgl. Kapitel 5.4.3) oder bodennahe Erdwärme (vgl. Kapitel 5.4.7)



erfolgen.



Für die Bereitstellung von Kälte aus Strom wird auf das Kapitel 3.7.5 verwiesen.

Spezielle Randbedingungen, die für die elektrische Wärme- und Kältebereitstellung sprechen, sind folgende:

1. Zeitlich auftretende regenerative Stromüberschüsse aus Windkraft im Winter oder Photovoltaik in den Mittagsstunden können effizienter durch den direkten sinnvollen Einsatz und ggf. die Speicherung in Wärme als über Prozessketten (Power to Gas, Power to Liquid, vgl. Kapitel 5.6.3) mit entsprechenden Verlusten genutzt werden.
2. Weiter von einem evtl. auf einer Kläranlage existierenden Nahwärmenetz entfernt liegende Gebäude sowie Pumpwerke im Kanalnetz erfordern hohe Investitionen für den Wärmeanschluss – hier kann eine elektrische Beheizung bzw. Kühlung eine wirtschaftliche Alternative sein.
3. Bei einem nur kurzzeitig auftretenden Wärme- oder Kältebedarf (Frostschuttsicherung) sind elektrische Heizungen/Kühlungen marktverfügbar, effizient und meist wirtschaftlicher als andere Alternativen.



Insbesondere bei Räumen ohne ständigen Aufenthalt von Betriebspersonal sollte unter Beachtung arbeitsrechtlicher Regelungen aus Effizienzgründen eine Elektroheizung nur zur Gewährleistung der Frostsicherheit betrieben werden.

5.4.5 Wärme und Kälte aus Gas, Heizöl oder Holzpellets

Auf vielen Kläranlagen dienen Heizkessel zur Wärmeerzeugung mit kombinierten Faulgas-/Erd- oder Propangasbrennern oder Faulgas-/Heizölbrennern. Auch werden auf einigen Kläranlagen (ohne Faulungsanlage) Holzhackschnitzel- oder Pelletöfen für die Beheizung der Gebäude und die Warmwasserbereitstellung betrieben.

Entsprechend den Marktpreisen von Erd-, Propan- oder Faulgas bzw. Heizöl oder Holzpellets, die starken Schwankungen unterliegen, und den für die Kessel und Brenner entstehenden Kapitalkosten, kann diese Wärmeerzeugung zur Deckung zeitweiliger Wärmedefizite wirtschaftlich sein (siehe Kap. 2.3.1.1). Als Reserveerzeugungseinheit (z. B. zum Wiederanfahren eines unterbrochenen Faulungsprozesses oder bei Ausfall der Faulgasproduktion) ist eine Reservewärmequelle zudem nützlich.



Kälte kann grundsätzlich nicht aus Gas, Heizöl oder Holzpellets gewonnen werden. Dies kann lediglich über den Weg Kälte aus Wärme (vgl. Kapitel 5.6.2) ermöglicht werden.



5.4.6 Wärme und Kälte aus solarer Energie (Solarthermie)

Neben der Nutzung der Sonnenenergie in Photovoltaik-Anlagen kann auf Kläranlagen und Gebäuden im Kanalnetz die Sonnenenergie zur Bereitstellung von Wärme oder durch das Prinzip der Wärme-Kälte-Kopplung durch solarthermische Anlagen eingesetzt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Faulbehälter als größter Wärmeverbraucher Vorlauftemperaturen im Bereich von 60 bis 90 °C benötigt. Diese können mit solarthermischen Kollektorsystemen bis zu 60 °C bereitgestellt werden. Werden höhere Temperaturen für Prozesse benötigt, so können diese nur mit einem hohen technischen Aufwand bei Kollektorsystemen oder durch konzentrierende Solarthermie-Anlagen bereitgestellt werden. In der Regel ist es aufgrund der ausreichenden Wärmebereitstellung auf Kläranlagen nur in Ausnahmefällen sinnvoll, die Flächen anstatt mit Photovoltaik mit solarthermischen Anlagen auszurüsten. Dies könnte beispielsweise bei Kläranlagen ohne anaerobe Schlammstabilisierung zur Beheizung der Gebäude mit Niedertemperaturheizung oder bei Betrieb von solarthermischen Trocknungsanlagen eine Möglichkeit sein, wenn die Wärme ansonsten komplett extern bezogen werden müsste. Ein weiterer Nachteil der Solarthermie ist, dass gerade in den Sommermonaten der höchste Wärmeertrag erzielt wird, welcher dann selten auf Kläranlagen genutzt werden kann. Vielmehr kann es als Alternative sinnvoll sein, die Wärme umzuwandeln und zur Kühlung der Betriebsgebäude zu verwenden. Die zugehörige Technologie wird in Kapitel 5.6.2 ausführlich beschrieben.



5.4.7 Wärme und Kälte aus der Erde (Geothermie)

Zur Bereitstellung von Wärme gibt es auf Kläranlagen evtl. auch die Möglichkeit der technischen Nutzung von oberflächennaher und Tiefengeothermie. Diese ist jedoch sehr stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig und oftmals nicht wirtschaftlich. Sie bietet daher nur ein geringes Potenzial.

Aus geologischer Sicht ist jedes Grundstück für eine Erdwärmennutzung geeignet. Die wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Aspekte müssen aber sehr genau berücksichtigt werden. Eine geothermische Anlage ist bei der Wasserbehörde anzuzeigen. Bei Bohrtiefen über **100 m** muss das Berg- und Lagerstättenrecht beachtet werden. Der Vorteil gegenüber der Solarthermie ist die durchgängige mittlere Temperatur des Bodens von circa **5 bis 15 °C** in einer Tiefe von bis zu 100 Metern und die dadurch auch in den Wintermonaten nutzbare Wärme. Vorab ist genau zu betrachten, welche Gebäude und welche Wärmeabnehmer dauerhaft an die geothermische Anlage angeschlossen werden sollen. Die Dimensionierung hängt von dem benötigten Bedarf an Wärmemenge, Wärmeleitfähigkeit und Grundwasserführung des Untergrunds ab. Mittels Kollektoren, Erdwärmesonden, Energiepfählen oder Wärmebrunnenanlagen wird die Wärme an die Oberfläche transportiert und über das Wärmepumpen-Prinzip auf das entsprechende Temperaturniveau gebracht. Wie auch bei der Solarthermie könnten sich beispielsweise Kläranlagen ohne anaerobe Schlammstabilisierung zur Beheizung der Gebäude dieser Möglichkeit bedienen, wenn die Wärme ansonsten komplett extern bezogen werden müsste.

Geothermieanlagen können auch zur Kühlung von Betriebsgebäuden eingesetzt werden. Da hier jedoch die Investitionskosten im Verhältnis zur Solarthermie wesentlich höher sind, sollte der Einsatz von solarthermischen Anlagen bevorzugt werden.

5.4.8 Wärme aus Druckluft

Die bei der Druckluftherzeugung für die Belüftung der Belebungsbecken anfallende Wärme kann auf der Druckseite der Verdichter zurückgewonnen und für Heizzwecke genutzt werden.

Die bei der Verdichtung von Luft entstehende Wärme ist unter thermodynamischen Gesichtspunkten nicht vermeidbar. Es muss allerdings das vordringliche Ziel des Verdichtungsprozesses sein, den Anteil der (Verlust-)Wärme möglichst gering zu halten. Insofern ergibt sich eine konkurrierende Situation, bei der im Einzelfall abzuwägen ist, ob sich der Aufwand für die Wärmerückgewinnung lohnt.

Auf der Erzeugerseite geht der Trend zu hocheffizienten Verdichtern, die nicht nur weniger Wärme abgeben, sondern bei denen auch die Verdichtungsendtemperatur deutlich niedriger ist als bei älteren Aggregaten. Durch Optimierungsmaßnahmen bei der Aufstellung der Aggregate, z. B. durch eine Rohransaugung von kühler Außenluft anstelle einer Ansaugung warmer Luft aus dem Raum, wird angestrebt, die Verdichtungsendtemperatur zu senken und dadurch die Effizienz der Druckluftherzeuger zu verbessern. Während diese Temperatur bei älteren Aggregaten im Bereich von **60–90 °C** lag, erreichen moderne Verdichter nur noch Temperaturen im Bereich von **45–75 °C**.

Für die Verbraucherseite hat das zur Folge, dass die bisher bevorzugte Abgabe an den konventionellen Heizkreis oder eine Verwendung zur Brauchwassererwärmung nur noch eingeschränkt möglich sind. Mit dem Einsatz neuer Verfahren, die auf niedrigen Temperaturniveaus bei **10–40 °C** arbeiten, ergeben sich allerdings alternative Anwendungsmöglichkeiten. Bevorzugte Verbraucher sind beispielsweise sog. Schlammrekuperatoren zur Aufheizung des kalten Rohschlammes oder Flächenheizungen in Gebäuden.

Nach Erfahrungswerten aus unterschiedlichen Projekten lässt sich abschätzen, dass etwa **15–30 %** der aufgenommenen elektrischen Leistung mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand als Wärmeleistung aus der Druckluft zurückgewonnen werden können. Für den Nachweis der

Wirtschaftlichkeit ist es wichtig, dabei die stark voneinander abweichenden Preise für Strom und Wärme zu berücksichtigen. Keinesfalls darf davon ausgegangen werden, dass durch eine Rückgewinnung der Wärme 15–30% der Stromkosten eingespart werden. Zudem darf nur der Anteil der Wärme bewertet werden, der auch tatsächlich abgenommen und unter Berücksichtigung jahreszeitlicher Schwankungen für Heizzwecke eingesetzt werden kann.

Zukünftige Wärmekonzepte sollten folglich das Temperaturniveau NT 30–60 °C (Bild 5-14) als zusätzliche neue Quelle oder „Wärmesammelschiene“ berücksichtigen. Aus dieser wird wiederum der Wärmebedarf im Bereich 10–20 °C bedient. Vorzugsweise ist das die zur Aufheizung des kalten Rohschlammes benötigte Wärme.

Die Frage, ob sich durch die Zufuhr warmer Druckluft die Temperatur im Belebungsbecken erhöhen kann oder ob umgekehrt durch eine Wärmerückgewinnung eine Abkühlung eintreten kann, lässt sich nur durch eine komplexe thermodynamische Betrachtung exakt beantworten. Anhand empirischer Untersuchungen [Cakir und Agdemir, 2009], [Strunkheide, 2009] ist belegt, dass der Anteil der nutzbaren Wärme in der Druckluft bei **60–80%** liegt. Geht man im Sinne einer Grenzwertbetrachtung davon aus, dass ohne Wärmerückgewinnung die gesamte Belüftungsenergie in Wärme umgesetzt würde, ergibt sich in der Regel eine Temperaturerhöhung von 0,1–0,2 °C.

5.4.9 Wärme aus Hochtemperaturprozessen

Als Hochtemperaturprozesse sollen hier solche Verfahren verstanden werden, die auf einem Temperaturniveau von ca. 100–500 °C und darüber arbeiten und auf diesem Niveau überschüssige Wärme abgeben. Dazu gehören u. a. die Kraft-Wärme-Kopplung mit einer Abgaswärme im Bereich von 500 °C, die Schlammverbrennung mit einer Spitztemperatur von rd. 800 °C und eine Hochtemperatur-Schlamm-trocknung, bei der Abwärme im Bereich deutlich über 100 °C anfällt.

Die Nutzung der Hochtemperaturwärme ist auf Kläranlagen schwierig, weil der größte Teil des Wärmebedarfs auf einem Temperaturniveau unter 100 °C liegt und folglich eine Infrastruktur zum Transport (Dampfnetze o. Ä.) nicht verfügbar ist. Für die Nutzung gibt es somit zwei Alternativen:

- Zum einen die direkte Nutzung in unmittelbarer Nähe des Produktionsprozesses mit kurzen Transportwegen, sodass auf den Einsatz eines speziellen Energieträgers (Dampf, Thermoöl etc.) verzichtet werden kann. Beispielsweise kann die Abgaswärme einer BHKW-Anlage zur Schlamm-trocknung verwendet oder zur zusätzlichen Stromerzeugung mittels einer ORC-Anlage (vgl. Kapitel 5.6.3) genutzt werden. Heiße Abgase von Verbrennungsanlagen eignen sich für die Nutzung in Dampfturbinen, mit denen dann wiederum Strom und Wärme auf einem niedrigeren Temperaturniveau erzeugt wird.
- Zum anderen die indirekte Nutzung durch Übertragung der Wärme auf ein niedrigeres Temperaturniveau und Einspeisung in einen konventionellen Kreislauf. Beispielsweise wird bei BHKW-Anlagen als Standardverfahren die Abgaswärme mit einem sog. Abgaswärmetauscher auf ein Temperaturniveau von etwa 90 °C übertragen und dann in den Heizkreislauf abgegeben.

5.4.10 Wärme aus Raumluft

Die Nutzung von Wärme aus Raumluft ist dort sinnvoll, wo Wärmequellen im Raum (Personen, Apparate, Licht, Rechner etc.) zu einer unerwünschten Temperaturerhöhung führen. Üblicherweise wird der Raum dann durch ein Zu- und Abluftsystem temperiert. Alternativ dazu kann die Raumwärme mit einer Wärmepumpe entzogen werden, die dann beispielsweise zur Warmwasserbereitung genutzt wird (vgl. Kapitel 5.4 und Bild 5-14).

Bevorzugte Anwendungen ergeben sich überall dort, wo bisher elektrisch betriebene Kühlanlagen im Einsatz sind. Auf Kläranlagen sind dies beispielsweise Leitwarten, Serverräume, Schaltschrankräume, Laborräume und Vorratsräume für kühl zu lagernde Materialien.



5.4.11 Wärme aus Faulschlamm

Die Nutzung der Wärme aus Faulschlamm kann über einen Wärmeübertrager erfolgen, der als Rekuperator ausgeführt ist. Dabei werden Medien mit unterschiedlichen Temperaturen durch Kammern geführt, die durch eine wärmeleitende Wand getrennt sind. Der Wärmeübergang ist hierbei abhängig von der Geometrie, d. h. von der verfügbaren Oberfläche der Trennwand und deren Wärmeleitfähigkeit. Je größer die Oberfläche der mit den Medien in Kontakt stehenden Trennwand ist, desto mehr Wärme kann übertragen werden. Außerdem sind die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit der geführten Medien entscheidend.

Weitere Faktoren für den Wärmeübergang sind die Verweilzeit und damit die vorherrschende Fließgeschwindigkeit sowie bei gegebener Geometrie auch der Volumenstrom. Hierbei ist zu beachten, dass bei einer längeren Verweilzeit des Mediums im Wärmeübertrager mehr Wärme übertragen werden kann. Bei sehr langsamen Fließgeschwindigkeiten stellt sich dabei eine laminare Strömung ein. Für Wärmeübertrager ist jedoch eine turbulente Strömung erstrebenswert, da sowohl konvektiver als auch diffusiver Wärmetransport maßgebend sind. Bild 5-17 zeigt das grundsätzliche Wirkprinzip der Wärmeübertragung in einem Rekuperator.

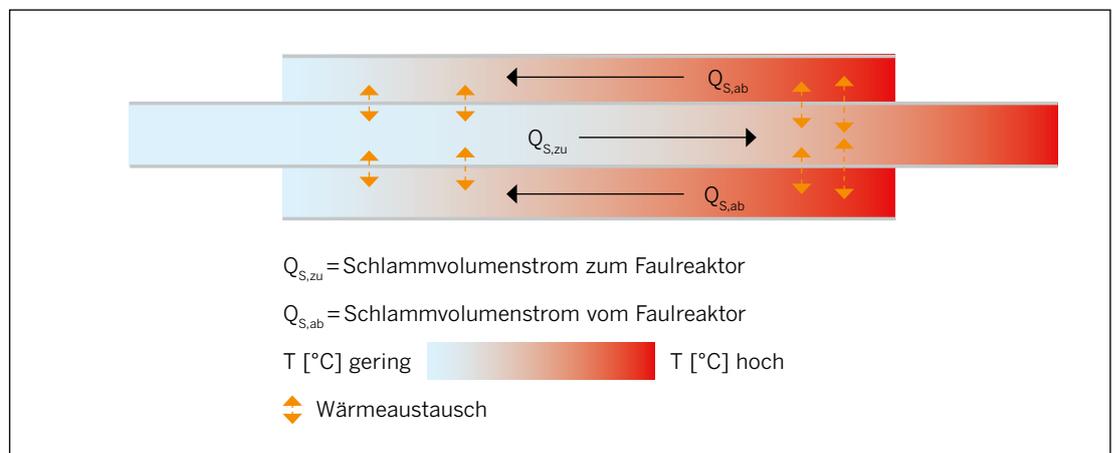


Bild 5-17 Schema Rekuperator

Umsetzung auf Kläranlagen

Auf Kläranlagen kann zum Erwärmen des Rohschlammes mit Faulschlamm vor Eintritt in den Faulbehälter ein Rekuperator eingesetzt werden. Häufig werden dazu Doppelrohrwärmeübertrager im Gegenstrom eingesetzt. Die Kammern bilden hierbei die Rohrleitungen, die den Schlamm führen.

Der Einsatz von Rekuperatoren ist nicht immer unproblematisch. Ein Problem kann das vorhandene Platzangebot darstellen, da für einen optimalen Temperaturübergang lange Verweilzeiten und somit lange Fließstrecken sinnvoll sind. Ein längerer Fließweg kann durch wiederholtes Übereinanderführen der Rohre erreicht werden. Jede zusätzliche Rohrumlenkung führt jedoch zu Druckverlusten und zu zusätzlich zu überwindenden Höhenunterschieden. Die Geometrie eines Rekuperators ist nicht nur von der Verweilzeit, sondern auch von dem geförderten Schlammvolumen abhängig. Bei hohem Schlammanfall kann es sinnvoll sein, nur einen Teilstrom des gesamten Faulschlammes zum Rekuperator und den restlichen Schlamm direkt zum Faulbehälter zu leiten. Dadurch kann, wenn auch auf Kosten des Wirkungsgrads, der Platzbedarf verringert werden. Je nach Zusammensetzung des Klärschlammes kann es zu Ablagerungen im Rekuperator kommen. Reinigung und regelmäßige Wartung sind erforderlich, wofür eine entsprechende Zugänglichkeit gegeben sein muss.

5.5 Energiespeicher

5.5 Energiespeicher

5.5.1
Schlamm-speicher

5.5.2
Faulgasspeicher

5.5.3
Stromspeicher

5.5.4
Wärmespeicher

5.5.1 Schlamm-speicher

Da Faulgas aus dem Schlammfäulungsprozess proportional zur in den Faulbehälter zugegebenen organischen Schlammfracht anfällt, ist es naheliegend, z. B. bei Faulgasüberschüssen bzw. kurzfristigen Engpässen bei der Faulgasnutzung (BHKW-Wartung) die Schlammzugabe zum Faulbehälter zu reduzieren oder zu unterbrechen. Diese Betriebsweise wird bei kurzfristigen Gasüberschüssen zur Minimierung der Fackelverluste bereits angewendet.

Eine derartige Betriebsweise führt zur Schlamm-speicherung in den Voreindicker, das Vorklärbecken und/oder auch in das Belebungsbecken-/Nachklärbeckensystem. Nachteile dieser Schlamm-speicherung können sein:

- Zu hohe TR-Gehalte (> **6 %**) im Primärschlamm, sodass der Schlamm schlechter pumpfähig wird. Gegen diese zu hohen TR-Gehalte kann eine geringfügige (bis **5 -10 %**) Sekundärschlammrückführung in den Vorklärbeckenzulauf wirken.
- Zu hohe TS-Gehalte im Belebungsbecken, die zu höherem Sauerstoffbedarf und ggfs. bei sehr hohen TS-Gehalten im Belebungsbecken zu Schlammabtrieb im Nachklärbecken führen können.

Daher ist es wichtig, die Bemessungsbedingungen der Belebung und Nachklärung genau zu kennen. Bei richtiger Anwendung der temporären Schlamm-speicherung (z. B. Reduzierung des Schlammabzugs im Bereich von maximal 50 % über maximal 2 Tage) ist eine solche Maßnahme geeignet, die Faulgasproduktion bedarfsgerechter zu steuern und die Abfackelung von Faulgas zu vermeiden.

Die Kapazität der „Energiespeicherung“ durch Schlammrückhaltung/-speicherung ist meist größer als die von sparsam bemessenen Faulgasbehältern.

Diese Hypothese soll an folgendem Beispiel für eine 100.000 E-Kläranlage veranschaulicht werden.

Energiespeicherkapazität im Faulgasbehälter:

In einer 100.000 E-Kläranlage fallen bei einem spezifischen Gasanfall von $20I_N / (E \cdot d)$ durchschnittlich ca. $2.000 m_N^3/d$ Faulgas an. Die Speicherkapazität im Faulgasbehälter beträgt **30 - 50 %** des Tagesanfalls, d. h. $600 - 1.000 m_N^3$ (vgl. Kapitel 5.5.2):

Energiespeicherkapazität im zurückgehaltenen Schlamm:

In den Belebungsbecken ($15.000 m^3$) befinden sich bei $3 \text{ kg TR}/m^3$ 45 t TR . Bei einem Schlammalter von 20 d steigt bei einem Tag ohne Überschussschlammabzug aus dem Belebungsbecken der TS-Gehalt um 5 % auf $3,15 \text{ kg TR}/m^3$ an. Dies entspricht einer Schlamm-speicherung von 5 % von $45 = 2,25 \text{ t TR}$ bzw. $1,50 \text{ t oTR}$. Bei einer Faulgasproduktion von $450 m_N^3/t \text{ oTR}_{zu}$ entspricht dies einer Faulgasrückhaltung von $1,5 \cdot 450 = 675 m_N^3$.

Rechnet man noch eine entsprechende oTR-Frachtrückhaltung aus Vorklärbecken und Voreindicker hinzu ($1,5 \text{ t oTR}$), so beträgt die Summe der durch Schlamm-speicherung rückhaltbaren Faulgasproduktion = $(1,5 + 1,5) \cdot 450 m_N^3/t \text{ oTR}_{zu} = 1.350 m_N^3$.

Die „Energiespeicherung“ durch Schlammrückhaltung/-speicherung ist mit $1.380 m_N^3$ also größer als die von sparsam bemessenen Faulgasbehältern mit $1.000 m_N^3$ (s. o.)



Des Weiteren wird der ausgefaulte Schlamm vor der Entwässerung gespeichert. Dies hat jedoch nur betriebliche, aber keine energetische Relevanz.

5.5.2 Faulgasspeicher

Bei Kläranlagen mit Faulgasproduktion werden üblicherweise Gasspeicher (Nass- oder Trockengasometer) eingesetzt. Diese Behälter werden zum Ausgleich von tagesszeitlichen Schwankungen zwischen Gasproduktion und Energiebedarf sowie als technische Speicher eingepplant.

Die Speicherung von Faulgas findet i. d. R. in folgenden Überdruckbereichen Anwendung:



- Drucklos: **0 kPa** bis **0,1 kPa** (1 mbar)
- Niederdruck: **1 kPa** bis **5 kPa** (10 mbar bis 50 mbar)
- Hochdruck: **0,1 MPa** bis **1 MPa** (1 bar bis 10 bar)

Gasbehälter in niederen Druckbereichen erfordern aufgrund der geringen Kompression ein veränderliches Speichervolumen. Bei Hochdruckbehältern ist das Volumen fest und der Druck variabel. Diese werden allerdings erst bei Großanlagen rentabel.

Die langjährig in der Abwasserwirtschaft eingesetzten Nassgasbehälter wurden fast vollständig durch Trockengasbehälter ersetzt. Ein Nassgasbehälter nutzt das veränderliche Volumen einer in ein Wasserbecken eingetauchten Gasglocke, während beim Trockengasbehälter eine bewegliche Membrandichtung verwendet wird. Dabei gibt es eine Vielzahl an technischen Varianten der Membrandichtung:

- Niederdruckgasbehälter: gewichtsbelastete Membran, Folienkissenspeicher mit Ballastgewicht, druckluftbeaufschlagte Membran als Gegendruckbehälter,
- Drucklose Gasbehälter: Folienballon, Folienkissenspeicher ohne Ballastgewicht.

Hinweise zur Sicherheitstechnik und zur technischen Ausrüstung finden sich im [DWA, 2008a] „Technische Ausrüstung von Faulgasanlagen“ und im [DWA, 2006c] „Sicherheitsregeln für Biogasbehälter mit Membrandichtung“.

Bemessung

Die Dimensionierung der Speichervolumina ist abhängig vom Betrieb der Klärschlammfaulungsanlage und der Faulgasverwertung. Größere Faulräume werden heute kontinuierlich beschickt. Unter diesen Verhältnissen entsprechen sich Faulgasproduktion und -verbrauch ungefähr. Bei kleineren Anlagen wird häufig der Rohschlamm nur einmal am Tag kurzzeitig in den Faulraum gefördert. Bei einer derartigen Betriebsweise werden in wenigen Stunden 70–80 % der gesamten täglichen Faulgasproduktion erzeugt.

Um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten, muss das im Überschuss produzierte Faulgas gespeichert werden. Ist der Faulgasbehälter zu klein bemessen, kann das Gas nicht gespeichert werden und wird abgefackelt. Im Verlauf des Tages fehlt es und muss durch andere Brennstoffe substituiert werden.



Bei einer kontinuierlichen Beschickung reduziert sich der Speicherbedarf deutlich. Das Speichervolumen sollte aber auch dann etwa **30 %** bis **50 %** des täglich produzierten Faulgases betragen, um Schwankungen in der Faulgasproduktion ausgleichen zu können.

Die Schwankungen der Faulgasproduktion können folgende Ursachen haben:

- unterschiedliche Schlammengen,
- unterschiedliche TR- und oTR-Gehalte,
- unterschiedliche Substrate mit verschiedenen Abbaueiten.

Auch in der qualitativen Beschaffenheit bzw. den CH₄- und CO₂- Anteilen muss mit Schwankungen gerechnet werden. Sowohl die quantitativen als auch die qualitativen Schwankungen können in einem ausreichend groß bemessenen Faulgasspeicher ausgeglichen werden.

Wird das Faulgas in Gasmotoren oder Gasturbinen verwertet, wird die Auslegung des Speichers durch den Betrieb der Gaskraftanlage bestimmt. Durch die sehr unterschiedlichen Gasverwertungsverfahren und die Verknüpfung zur Schlammbehandlung mit variierendem Wärmebedarf sollte das notwendige Speichervolumen individuell berechnet werden. Weiterhin sind auch Möglichkeiten der größeren Dimensionierung der Faulgasspeicher mit BHKW-Anlagen geringerer Leistung (längere Laufzeiten) für einen Ausgleich von Lastspitzen bzw. Teilnahme am Regelenergiemarkt zu prüfen. In der nachfolgenden Tabelle 5-8 ist der Einfluss der Betriebsweise von Anlagen zur Faulgasverwertung auf die Bemessung von Gasspeichern dargestellt.



Tabelle 5-8 Einfluss der Betriebsweise von Anlagen zur Faulgasverwertung auf die Bemessung von Gasspeichern [DWA, 2010b]

Verwertungsart	Betriebsweise	Einfluss auf Bemessung
Stromerzeugung	Grundlast	kein Einfluss/mittlere Aggregatgröße Speicherung nur als Schwankungsausgleich
	Spitzenstrom	deutlicher Einfluss/größere oder mehrere Aggregate Speicherung für kurzzeitigen größeren Bedarf
	Notstrom	deutlicher Einfluss ¹⁾ /Aggregate nach Notstrombedarf Speicherung für Notstrombedarf
Wärmeerzeugung	Grundlast	kein Einfluss/mittlere Aggregatgröße Speicherung nur als Schwankungsausgleich
	Spitzenlast	deutlicher Einfluss ²⁾ /Zuschalten weiterer Aggregate Speicherung des temporären Bedarfs
Druckluftherzeugung	Grundlast	kein Einfluss/mittlere Aggregatgröße Speicherung nur als Schwankungsausgleich
Pumpen	Tagesgang	deutlicher Einfluss/größere oder mehrere Aggregate Speicherung für kurzzeitigen größeren Bedarf
	Hochwasserpumpbetrieb	deutlicher Einfluss/Sonderfall

1) Das Biogasspeichervolumen zur Notstromerzeugung muss zu dem Volumen für andere Nutzungen addiert werden

2) Kann durch Kombination von Gaskraft- und Heizkesselanlagen bei der Verwendung von Zweitbrennstoffen ausgeglichen werden.

Weitere Hinweise zur Bemessung von Faulgasspeichern sind dem DWA-M 363 „Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen“ [DWA, 2010b] zu entnehmen.

5.5.3 Stromspeicher

Die Stromerzeugung mit Hilfe von Photovoltaik- oder Windkraftanlagen ist witterungsabhängig und damit fluktuierend. Deshalb ist für eine konstante Stromversorgung die Stromspeicherung von großer Bedeutung. In der Regel ist die technische Stromspeicherung direkt auf dem Standort Kläranlage genauestens zu prüfen, da eine direkte Einspeisung in das Stromnetz und Bezug bei Bedarf je nach den Randbedingungen oft wirtschaftlicher ist. Für Kläranlagen sind überwiegend die elektro-chemischen Speicher von Interesse. Die anderen Varianten werden an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt.

Stromspeicher können in Kurzzeitspeicher, Langzeitspeicher und elektro-chemische Speicher eingeteilt werden. Kurzzeitspeicher zeichnen sich durch eine Entladezeit von unter einer Sekunde bis zu wenigen Minuten aus. Sie werden häufig zur Netzstabilisierung und Netzaufrechterhaltung

eingesetzt. Ein Beispiel für Kurzzeitspeicher sind Schwunghmassenspeicher. Dabei handelt es sich um ein Schwungrad, das bei Stromüberproduktion angetrieben wird. So wird elektrische Energie in Rotationsenergie umgewandelt. Bei Bedarf kann ein Generator diese wieder in Strom umwandeln und ins Netz einspeisen.

Hohe Drehzahlen sind dabei effektiver als eine Steigerung der Masse. Für das Schwungrad sollte deshalb leichtes Material verwendet werden, um schnell auf hohe Drehzahlen zu gelangen. Zusätzlich sollte es eine hohe Zugfestigkeit aufweisen. Es bieten sich beispielsweise Schwungräder auf CFK-Basis an. Ein weiterer wichtiger Punkt bei Schwunghmassenspeichern ist die Lagerung. Aktiv magnetische, supraleitende Lager ermöglichen eine berührungslose Lagerung und somit eine nahezu verlust- und verschleißfreie Rotation. Besonders supraleitende Lager benötigen dabei jedoch eine ausgiebige Kühlung. Schwunghmassenspeicher weisen maximale Speicherkapazitäten von bis zu **5 MWh** auf.



Die Entladezeiten von Langzeitspeichern betragen 2 bis 24 Stunden. Sie werden zur Spitzenbedarfsdeckung eingesetzt. Beispiele für Langzeitspeicher sind Pump- und Druckluftspeicher. In Pumpspeicherwerken wird Wasser in energetisch günstigen Zeitspannen von einem tiefer gelegenen in ein höher gelegenes Becken gepumpt. Wird nun Strom benötigt, fließt das Wasser durch eine Turbine zurück in das untere Becken. Hierbei sollten Fallhöhen von mindestens 50 Metern sichergestellt werden. Für flache Standorte können im Einzelfall auch Becken auf alten Halden gebaut werden. Dabei stellen sich bei einer maximalen Speicherkapazität von **8,5 GWh** Wirkungsgrade von 70 bis 80 % ein [Rundel et al., 2013].



Im Falle eines Druckluftspeichers wird die überschüssige Energie verwendet, um Luft in unterirdische Kavernen zu verpressen, um sie bei Bedarf zusammen mit Erdgas zum Betreiben einer Turbine zu nutzen. Dabei werden maximale Speicherkapazitäten von bis zu **2,86 GWh** erreicht. Durch die unterirdischen Kavernen kann dieses Verfahren nur an wenigen Standorten realisiert werden. Die starke Erwärmung der Luft auf bis zu 600 °C im Verdichter macht einen Einsatz von Stahlbehältern schwierig. Ein alternatives und standortunabhängiges Verfahren bietet die Luftverpressung mit hydraulischen Druckkolben. Hierbei sind die Wärmeverluste bei einem guten Wirkungsgrad deutlich geringer.



Eine andere Art, Strom zu speichern, ist die elektro-chemische Speicherung. Die Entladezeit dieser Speicher beträgt einen bis mehrere Tage. Sie werden häufig als Reservespeicher eingesetzt. Die bekanntesten elektro-chemischen Stromspeicher sind wohl Blei-Säure- bzw. Lithium-Ionen-Akkus. Lithium-Ionen-Akkus können Kapazitäten von **8 kWh** als Einzelmodule und bis zu **1 MWh** als Container-Module aufweisen. Blei-Säure-Akkus haben zwar mit bis zu **40 MWh** eine deutlich höhere Kapazität, jedoch eine geringere Energiedichte, Nutzungstiefe und Lebensdauer [Hofmann et al., 2014]. Dafür sind Blei-Säure-Akkus jedoch wesentlich günstiger als Lithium-Ionen-Akkus. Ein weiteres elektro-chemisches Speicherverfahren ist die Redox-Flow-Batterie. Im Gegensatz zu den Bleisäure- und Lithium-Ionen-Akkus sind hierbei positiv und negativ geladene Elektrolyte in zwei getrennten Tanks gespeichert. Wird Strom benötigt, werden die Elektrolyte, durch eine semipermeable Membran getrennt, aneinander vorbeigeleitet. Dabei findet ein Austausch von Ionen statt. Bei Stromüberschuss kann eine Spannung angelegt werden, um die Elektrolyte wieder positiv beziehungsweise negativ zu laden. So können maximale Speicherkapazitäten von bis zu **12 MWh** erreicht werden. Das Besondere an diesem Verfahren ist, dass der Energieinhalt durch das Volumen der Elektrolytspeicher und die Leistung durch die Größe der elektro-chemischen Wandlermodule unabhängig voneinander skalierbar sind. Hinzu kommt, dass durch die räumliche Trennung nahezu keine Selbstentladung im Ruhezustand erfolgt. Jedoch ist das Verfahren – trotz Langlebigkeit und Robustheit – relativ aufwendig, da Pumpen, Sensoren, Tanks und Steuerungstechnik benötigt werden.



Ein weiterer potenzieller Abnehmer für überschüssige Energie sind Elektrofahrzeuge. In Frage kommt zum Beispiel das Aufladen von Einsatzfahrzeugen des Kläranlagenbetreibers. Befindet sich mehr Strom im Netz als gebraucht wird, können die Fahrzeuge aufgeladen werden, um die Schwankungen auszugleichen. Dieser Vorgang ist durch die Kapazität der Fahrzeugbatterie begrenzt. Außerdem können sich Fahrzeuge im Einsatz befinden oder bereits voll aufgeladen sein,

wenn Energieschwankungen auftreten. In diesem Fall stehen sie nicht zur Energieabnahme zur Verfügung.

5.5.4 Wärmespeicher

Anhand des Einsatzes von Wärmespeichern ist es möglich, die Wärmeerzeugung und -nutzung zu entkoppeln und thermische Energie zu speichern. Dieser Prozess geht einher mit energetischen Verlusten [Wawer et al., 2012].

Wärmespeicher werden in Kurzzeit- und Langzeitwärmespeicher unterteilt. Anhand ihres Arbeitsprinzips lassen sie sich zudem jeweils in kapazitive (sensible), latente und thermochemische Wärmespeicher untergliedern (Bild 5-18). Der jeweilige Einsatz der einzelnen Speichertypen hängt von den örtlichen Gegebenheiten, dem Speichervolumen sowie den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standorts ab [Schmidt et al., 2001].

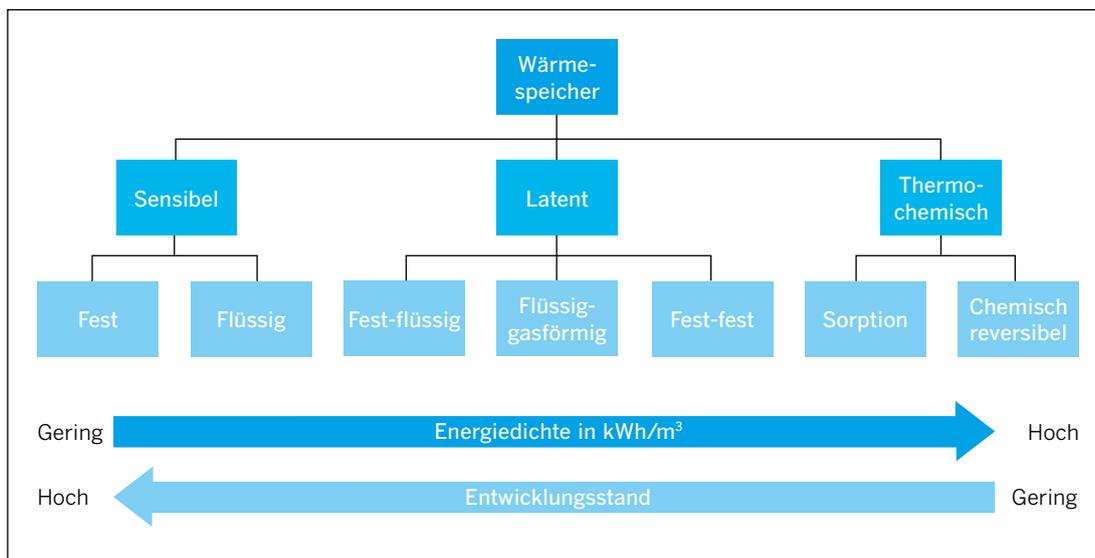


Bild 5-18 Schematische Darstellung der Arten von Wärmespeichern nach [Sternner und Stadler, 2014]

Kapazitive (sensible) Wärmespeicherung

Kapazitive oder sogenannte sensible Wärmespeicher lassen sich in Wärmespeicher mit festen Speichermedien (z. B. Erdreich) und flüssigen Speichermedien (z. B. Wasser) unterteilen [Rummich, 2009] in [Wawer et al., 2012]. Wasser ist das häufigste dafür eingesetzte Speichermedium. Ein Grund ist seine hohe Wärmekapazität. Generell erfolgt beim Laden bzw. Entladen eine Temperaturänderung des Speichermediums. Eine Isolierung ist, bedingt durch die Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebungstemperatur und dem damit einhergehenden Wärmeverlust notwendig. Diese kontinuierlichen Wärmeverluste entstehen proportional zur Oberfläche, weshalb Bauformen mit einem möglichst kleinen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen angestrebt werden. Die Wärmespeicherkapazität verhält sich generell proportional zur Masse des Speichermediums [Oertel, 2008].

Latente Wärmespeicherung

Bei der latenten Wärmespeicherung erfolgt ein Phasenübergang des Speichermaterials. Das Speichermedium nimmt hierzu Wärme auf, ändert seinen Phasenzustand und anschließend gibt es diese Wärme durch die Rückführung in den ursprünglichen Phasenzustand wieder ab. Aus volumen- und drucktechnischen Gründen basieren die meisten latenten thermischen Speicher auf den Schmelz- und Erstarrungsvorgängen zwischen Feststoff und Flüssigkeit, wobei nach außen hin die Temperatur konstant gehalten wird. Durch die Phasenumwandlung können relativ große Wärmemengen pro Speichervolumen bei weitgehend konstanten Ladungs-, Speicherungs- und Entladungs-Temperatur aufgenommen werden [Rummich, 2009], [Wawer et al., 2012], [Brüggemann



und Rösler, o. J., Oertel, 2008]. Man unterscheidet die verschiedenen Speicherarten anhand ihrer Wärmeübertragung zwischen Wärmeträger- und Wärmespeichermaterial. Je nach Bedarf müssen Materialien mit passenden Phasenwechseltemperaturen gewählt werden. Dabei handelt es sich sowohl um organische als auch um anorganische Speichermedien. Die Wärmespeicherung im Temperaturniveau von **5–130 °C** erfolgt mit Salzhydraten oder Paraffinen. Für Temperaturen oberhalb von **130 °C** werden Salze (z. B. Nitrate, Chloride, Carbonate, Fluoride) bzw. Mischungen aus diesen Stoffen verwendet. In der Praxis kommen mobile Latentwärmespeicher in Form von Tankcontainern zum Einsatz. Diese können nicht benötigte Abwärme von z. B. Müllverbrennungs-, Biogas- oder Deponiegasanlagen aufnehmen und ortsunabhängig nutzbar machen. Dabei wird der Speicher durch wasserbasierte Wärmetauscher mit Wärme befüllt. Als Speichermedium wird Natriumacetat verwendet.

Thermochemische Wärmespeicherung

Bei der thermochemischen Speicherung von Wärme wird die Reaktionsenergie von reversiblen chemischen Reaktionen ausgenutzt. Beim Laden des Speichers wird einem Material (Silikagel, Zeolithe) Wärme zugeführt, wodurch eine chemische Verbindung in die Basisverbindungen zerlegt wird. Entladen wird der Speicher, indem die Basisverbindungen wieder zusammengebracht werden. Bei dieser Umkehrreaktion wird die gespeicherte Wärme frei. Ein Vorteil der thermochemischen Speicher ist, dass sie eine viel höhere Energiedichte gegenüber latenten Wärmespeichern erlauben. Des Weiteren treten auch bei langer Speicherdauer keine thermischen Verluste auf [Rummich, 2009], [Wawer et al., 2012], [Oertel, 2008], [Van Helden, 2008].

5.6 Energiewandler

5.6 Energiewandler

5.6.1
Kraft-Wärme-
Kopplung

5.6.2
Kraft-Wärme-
Kälte-Kopplung

5.6.3
Organic Rankine
Cycle

5.6.4
Wandlung in Energieträger/
Power to X

5.6.1 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Die Faulgasnutzung erfolgt heute überwiegend mittels Kraft-Wärme-Kopplung. Kläranlagen sind durch die besonderen Voraussetzungen mit dem bei der Schlammfäulung ohnehin anfallenden Faulgas in Verbindung mit einem hohen Strom- und Wärmebedarf für den Einsatz dieser Technologie prädestiniert. Die früher übliche Verwendung des Faulgases allein zu Heizzwecken und ein Abfackeln der überschüssigen Menge kommen nur noch selten vor.

Von den unterschiedlichen Technologien der KWK-Technik (Bild 5-19) ist auf Kläranlagen das BHKW mit Verbrennungsmotoren am meisten verbreitet. Die am Markt verfügbaren Verbrennungsverfahren und Motorentypen sind in Bild 5-20 dargestellt. Mit heutigen BHKW-Modulen wird im kleinen Leistungsbereich von 50 kW ein elektrischer Wirkungsgrad von **30–33 %** erreicht. In der Leistungsklasse ab 500 kW liegt der elektrische Wirkungsgrad über **40 %**.



Gasturbinen erreichen im Vergleich nur geringere elektrische Wirkungsgrade unter 30 %. Deshalb setzen sich Mikrogasturbinen trotz ihrer sonstigen technischen Vorteile nicht auf breiter Front durch.

In der Vergangenheit wurden vor allem in Deutschland immer wieder unterschiedliche Brennstoffzellenbauarten erprobt. Die Anzahl beschränkt sich jedoch bis heute auf ca. 15–20 Anlagen, die gleichzeitig in Betrieb sind. Es handelt sich dabei fast ausschließlich um finanziell geförderte Projekte, weil der wirtschaftliche Einsatz aufgrund der hohen Investitionskosten und geringer Standzeiten der Brennstoffzellen immer noch nicht gegeben ist [DWA, 2006b].

Weitere Hinweise sind dem Merkblatt DWA-M 299 [DWA, 2006b] zu entnehmen.

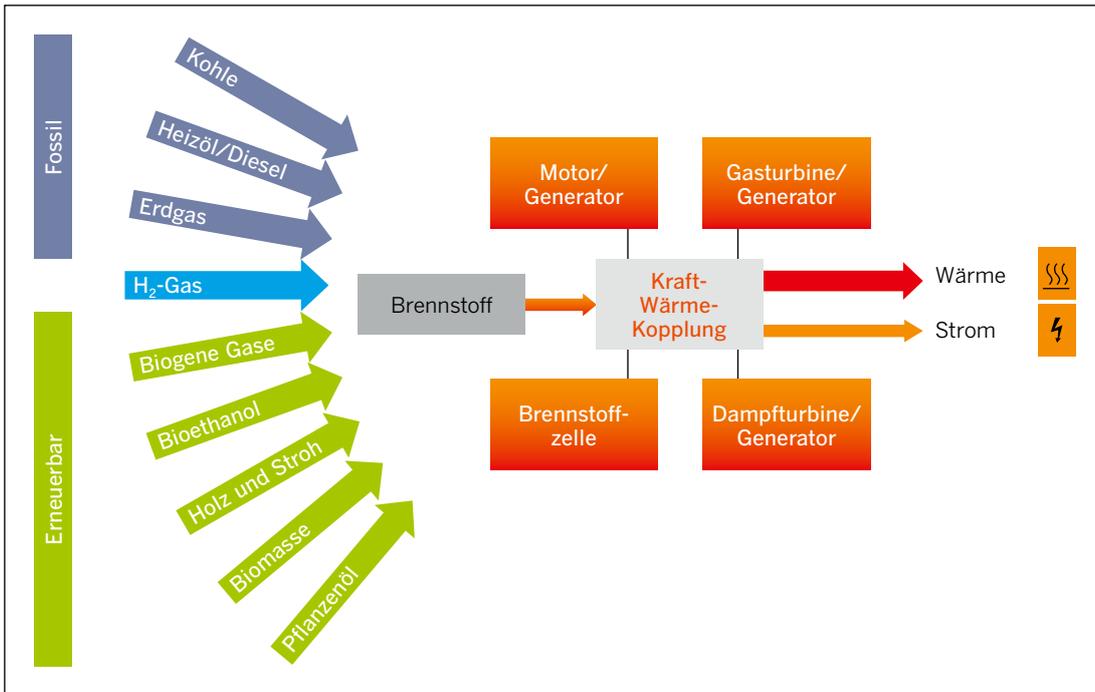


Bild 5-19 KWK-Prinzip, verfügbare Brennstoffe und Umwandlungsarten abgewandelt nach [Seibert-Erling, 2008]

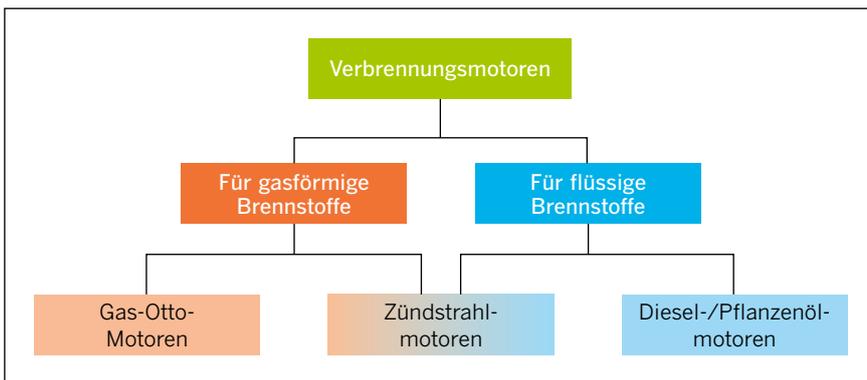


Bild 5-20 Arten von Verbrennungsmotoren nach [Seibert-Erling, 2008]

Standardisierte BHKW-Anlagen mit Gas-Otto-Motor

In der Praxis hat sich für den Einsatz auf Kläranlagen der Gas-Otto-Motor im Magerbetrieb durchgesetzt. Mit dieser Technik lassen sich die teilweise konkurrierenden Forderungen nach langen Standzeiten, niedrigen Emissionswerten und hohen mechanischen bzw. elektrischen Wirkungsgraden für Faulgas am besten vereinigen. In der Konzeption als Saugmotor mit Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung werden besonders hohe mechanische bzw. elektrische Wirkungsgrade erzielt. Zwar ist gegenüber einer nicht aufgeladenen Maschine der thermische Wirkungsgrad etwas geringer. Wegen der deutlich höheren Wertigkeit der elektrischen Energie fällt dieser Nachteil allerdings nicht ins Gewicht.

Mit anderen Motorentypen, wie dem nach dem Dieselpinzip arbeitenden Zündstrahlmotor, lassen sich zwar theoretisch geringfügig bessere Wirkungsgrade erzielen, jedoch ist die Einhaltung der Emissionswerte problematisch und die Standzeiten des Motors und der peripheren Aggregate (Wärmetauscher, Schalldämpfer etc.) sind deutlich geringer. Aufgrund von Erfahrungsberichten ist die Einhaltung der Emissionswerte vor allem bei wechselnden Lastzuständen schwierig. Deshalb haben Zündstrahlmotoren durchaus ihre Berechtigung im Biogasbereich, wo nahezu ganzjährig das Gas gleichmäßig anfällt und auch ansonsten kein Teillastbetrieb gefahren werden muss. Dann lässt sich die Maschine genau auf diesen Betriebspunkt einstellen und optimieren. Auf Kläranlagen sind diese günstigen Voraussetzungen i. d. R. nicht gegeben.

Die Emissionswerte von Gas-Otto-Motoren sind in der TA Luft festgelegt. Zu beachten ist, dass für Erdgas und Faulgas unterschiedliche Anforderungen gelten, die bei zeitweiligem Betrieb mit Erdgas relevant sein können. Es ist davon auszugehen, dass die TA Luft angepasst wird. In der Diskussion stehen vor allem deutlich niedrigere Werte für Formaldehyd. Eine Einhaltung dieser Werte erfordert nach heutigem Kenntnisstand eine aufwendige Abgasnachbehandlung und wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad aus.

Die technische Entwicklung im BHKW-Bereich hat in den letzten 20 Jahren große Fortschritte gemacht. Durch den konsequenten Einsatz von Elektronikkomponenten im Bereich der Motorsteuerung sowie durch konstruktive und thermodynamische Maßnahmen wurde der Verbrennungsprozess optimiert. Durch eine Optimierung der Fertigung und Maßnahmen zur Standardisierung steht heute ein breites Spektrum kompakter und leistungsfähiger Aggregate am Markt zur Verfügung.

BHKW-Anlagen werden fast ausschließlich in Modulbauweise nach einem einheitlichen Funktionsschema (vgl. Bild 29) hergestellt. Alle wesentlichen Komponenten sind auf einem Stahlträgerrahmen vormontiert. Die Komponenten dieser Kompaktmodule sind aufeinander abgestimmt und daher unmittelbar nach dem Anschluss der peripheren Anlagenteile (Gasversorgung, Kühler, Stromeinspeisung) einsatzfähig.

Die Aufstellung in Gebäuden ist nach wie vor üblich, sofern die Platzverhältnisse die Einbringung und Aufstellung zulassen und ausreichend Platz für die Durchführung von Wartungsarbeiten vorhanden ist. Alternativ ist die Aufstellung in einem Container möglich. Durch die werkseitige Montage im Container kann die Zeit für Bau und Inbetriebnahme am Standort deutlich reduziert werden. Es besteht eine Wahlmöglichkeit zwischen Stahl- und Betoncontainern. Als Stahlcontainer kommen vorzugsweise 20- oder 40-Fuß-ISO-Container (Standard-Seefrachtcontainer mit Abmessungen nach ISO 668 [ISO, 1999]) zum Einsatz. Der unbestreitbare Vorteil der Stahlcontainer ist ihre große Flexibilität beim Transport und das geringe Leergewicht. Betoncontainer zeichnen sich dagegen durch bessere Schalldämmeigenschaften aus; zudem lassen sie sich optisch etwas ansprechender gestalten.

Für die anlagenseitige Einbindung sind folgende Schnittstellen festzulegen:

- **Elektrische Leistungseinspeisung**

Zur Einspeisung in das Stromnetz bzw. die örtliche Schaltanlage ist ein synchronisierfähiger Generatorleistungsschalter erforderlich.

- **Umsetzung der Anforderungen aus den TAB**

Beim Anschluss an das Netz sind die Technischen Anschlussbestimmungen (TAB) des jeweiligen Netzbetreibers zu beachten.

- **Schutztechnik**

Durch die vermehrte dezentrale Stromerzeugung werden durch die Netzbetreiber zusätzliche Anforderungen an die Schutztechnik gestellt. Mindestens muss heute zur Vermeidung unbeabsichtigten Einschaltens ein Netz- und Anlagenschutz (N/A-Schutz) vorhanden sein. Darüber hinaus können Schutzmaßnahmen zur Stabilisierung des Stromnetzes gefordert werden. Abhängig von der Gesamtleistung der KWK-Anlage kann der Netzbetreiber einen direkten Fernzugriff zur Leistungsabregelung fordern.

- **Hydraulische Einbindung/Wärmeeinbindung**

Für die wärmeseitige Einbindung gibt es unterschiedliche Konzepte. Wenn im einfachsten Fall ein einziger Heizkessel vorhanden ist und nur ein BHKW-Modul ergänzt wird, ist die Einbindung als sogenannte Rücklaufanhebung üblich. Bei Anlagen mit mehreren parallelen Heizkesseln und BHKW-Modulen kommt der Einsatz einer hydraulischen Weiche in Betracht, um die unterschiedlichen Volumen- und Wärmeströme zu entkoppeln.

- **Automatisierungs- und Leittechnik**

BHKW-Kompaktmodule verfügen über eine eigene Steuerung, mit der ein autarker Betrieb der BHKW-Anlage möglich ist. Damit werden sämtliche Haupt- und Nebenaggregate (Motor,

Generator, Faulgasverdichter, Kühler, Schaltanlage etc.) überwacht. Diese Steuerungen sind in der Lage, über eine Kommunikationsverbindung mit einem Prozess-Leitsystem Daten auszutauschen.

■ Gasbereitstellung

BHKW-Anlagen können wahlweise mit Faulgas, Propangas oder Erdgas betrieben werden. Für jede Gasart ist eine eigene Regelstrecke mit den erforderlichen Sicherheits- und Druckregelungsarmaturen erforderlich.

■ Gasreinigung (siehe Kapitel 5.2.4)



BHKW als Netzersatzaggregat

Für die Bereitstellung der Netzersatzleistung kommt entweder ein konventionelles Dieselaggregat oder der Einsatz eines mit Faulgas (oder Erdgas) betriebenen BHKW in Betracht. Für den Einsatz eines Dieselaggregats spricht die Robustheit und Langlebigkeit dieser Aggregate. Die verwendeten Komponenten (Motor, Generator, Steuerung, Elektronik) sind meist genau auf diesen Einsatzzweck abgestimmt und auf hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit optimiert. Weiterhin wird bei der Konzeption von Netzersatzaggregaten Wert auf lange Wartungszyklen mit kurzen Ausfallzeiten gelegt. Daher ist es i. d. R. auch nicht erforderlich, die benötigte Leistung aus Verfügbarkeitsgründen auf mehrere Aggregate aufzuteilen. Die Lebensdauer liegt üblicherweise bei mindestens **20 Jahren**. Als Abschreibungsdauer wird von der LAWA ein Zeitraum von 25–40 Jahren angegeben.



Ein BHKW ist im Vergleich dazu auf einen Betrieb mit hohem mechanischem bzw. elektrischem Wirkungsgrad optimiert. Dieses Verhalten konkurriert mit der Forderung nach einem robusten Lastverhalten. Deshalb ist es erfahrungsgemäß problematisch, im Inselbetrieb mit einem BHKW Antriebe mit höherer Leistung anzufahren. Die Leistungsoptimierung der BHKW erfordert darüber hinaus heute eine wesentlich aufwendigere Steuerung und Motorelektronik, die aufgrund der technischen Innovationszyklen oft nach der üblichen Einsatzdauer von BHKW-Modulen von 8–10 Jahren überholt ist. Als weiterer gravierender Nachteil gegenüber einem Dieselaggregat ist zu sehen, dass zur Herstellung der Startbedingungen für ein BHKW bereits eine elektrische Leistungsversorgung erforderlich ist, die üblicherweise nicht mit der als „Bordversorgung“ vorhandenen Batterieanlage des BHKW abgedeckt ist. Das betrifft insbesondere die Faulgasverdichter und die Faulgasaufbereitung.

Als Konsequenz aus diesen Einschränkungen bleibt zu empfehlen, dass BHKW bei einem Netzersatzbetrieb durchaus zur Unterstützung oder Erhöhung der Leistung beitragen können. Als erstrangiges Aggregat sind sie jedoch weniger geeignet. Die Empfehlung geht folglich dahin, die für die Herstellung der Betriebssicherheit der Anlage geforderte Mindestleistung mit einem Dieselaggregat bereitzustellen und die Eigenerzeugung mit den BHKW als Ergänzung anzusehen, mit der zusätzliche Aggregate versorgt werden können.



Mikrogasturbine

Mikrogasturbinen gehören zu den Verbrennungskraftmaschinen. Das Funktionsprinzip (Bild 5-21) basiert auf der Turbotechnologie (Abgasturbolader), bei der die Energie aus dem Restdruck der Abgase genutzt wird. Die eingesaugte Luft (Verbrennungsluft) wird verdichtet und durch die heißen Abgase vorgewärmt. Die Verbrennungsluft und der ebenfalls verdichtete Brennstoff gelangen in die Brennkammer. Durch die dort stattfindende Expansion der Gase entsteht unmittelbar eine Drehbewegung bei sehr hohen Drehzahlen (50.000–100.000 min⁻¹). Das Laufrad der Turbine und ein elektrischer Generator sind auf der gleichen Welle montiert, sodass die mechanische Leistung direkt auf den Generator übertragen wird. Der so erzeugte hochfrequente Strom wird elektronisch umgewandelt und kann dann in konventioneller Weise in das Stromnetz eingespeist werden. Aus den etwa 300–450 °C heißen Rauchgasen kann mit einem Wärmeübertrager Nutzwärme ausgekoppelt werden.

Mikrogasturbinen stehen in einem Leistungsbereich von **30–200 kW** (elektrisch) zur Verfügung. Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei **20–30 %**. Bei vergleichenden Betrachtungen ist der nicht unwesentliche Energieaufwand für die Verdichtung des Brenngases einzubeziehen.





Durch den Einsatz einer berührungslosen Lagerung der Welle (Luftlagerung) und der getriebelosen Kraftübertragung ergeben sich im Normalbetrieb große Wartungsintervalle. Gleichwohl sind die Aggregate nicht wartungsfrei, sondern müssen nach einer Laufzeit von ca. **20.000–40.000 Stunden** komplett überholt werden.

Die Verbreitung auf Kläranlagen ist im Vergleich mit Gasmotoren gering, weil bei etwa gleichen Investitions- und Wartungskosten der elektrische Wirkungsgrad deutlich kleiner ist. Ein Systemvergleich aufgrund der Wirtschaftlichkeit fällt insbesondere bei hohen Strompreisen zuungunsten einer Mikrogasturbine aus.

Bei der Wahl der Aufstellmöglichkeiten ergibt sich ein deutlicher Vorteil für die Mikrogasturbine. Durch die Kapselung des Aggregats, die schmierstofffreie Lagerung und die Luftkühlung der Turbine (ohne Kühlwasser) können die Aggregate im Freien aufgestellt werden. Eine Aufstellung mit einer einfachen Überdachung als Wetterschutz erspart zudem eine sonst teils aufwendigere Wärmeabfuhr aus geschlossenen Aufstellungsräumen [Suttor, 2006].

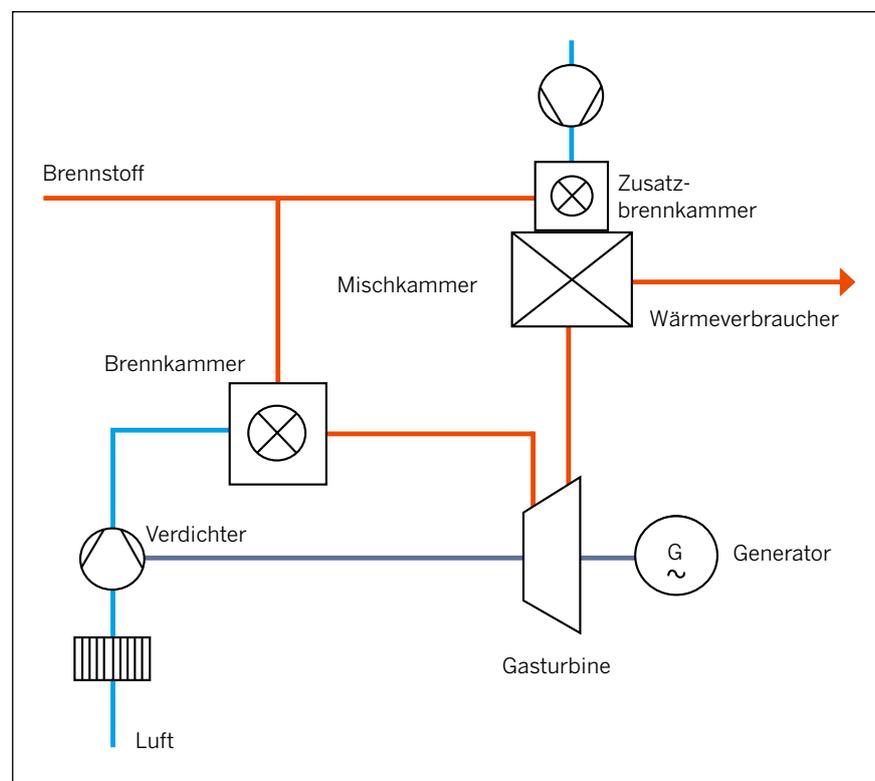


Bild 5-21 Funktionsprinzip einer Mikrogasturbine nach [Suttor, 2006]

5.6.2 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

Anlagen zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung nutzen Abwärme aus einem Prozess, einer Solarthermie-Anlage, einer Abwasserwärmeanlage, einer Geothermie-Anlage oder einer KWK-Anlage, um dadurch einen Kälteprozess nach dem Verdunstungsprinzip umzusetzen.

Die Funktionsweise einer Absorptionskältemaschine ist in Bild 5-22 dargestellt, das der Adsorptionskältemaschine in Bild 5-23. Bei dem Prinzip wird die physikalische Löslichkeit von bestimmten Stoffen (Kältemittel) genutzt. Das Kältemittel wird dabei verdunstet und lagert sich am Sorptionsmittel an oder löst sich im Sorptionsmittel und entzieht diesem Wärme. Die entstehende Kälte wird zur Kühlung verwendet.

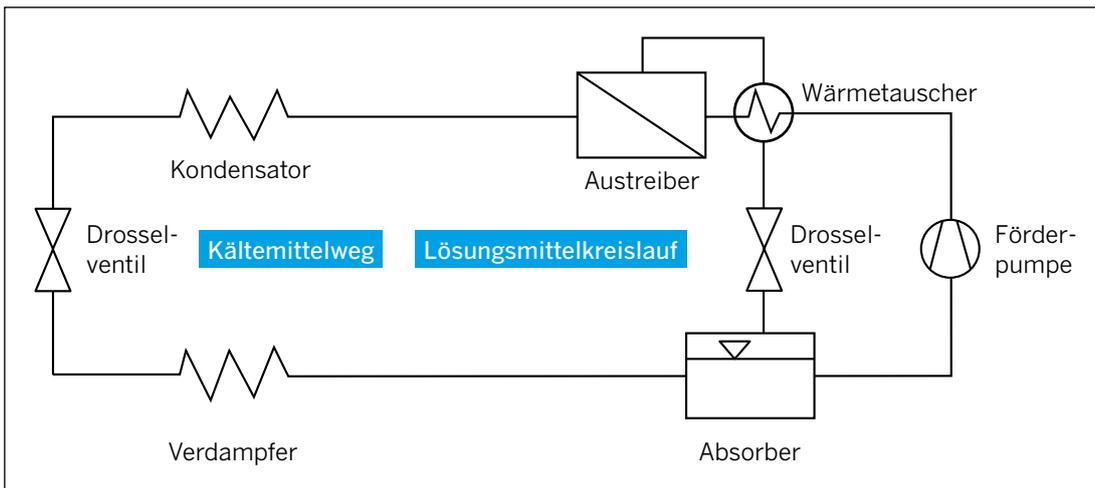


Bild 5-22 Funktionsprinzip der Absorptionskältemaschine

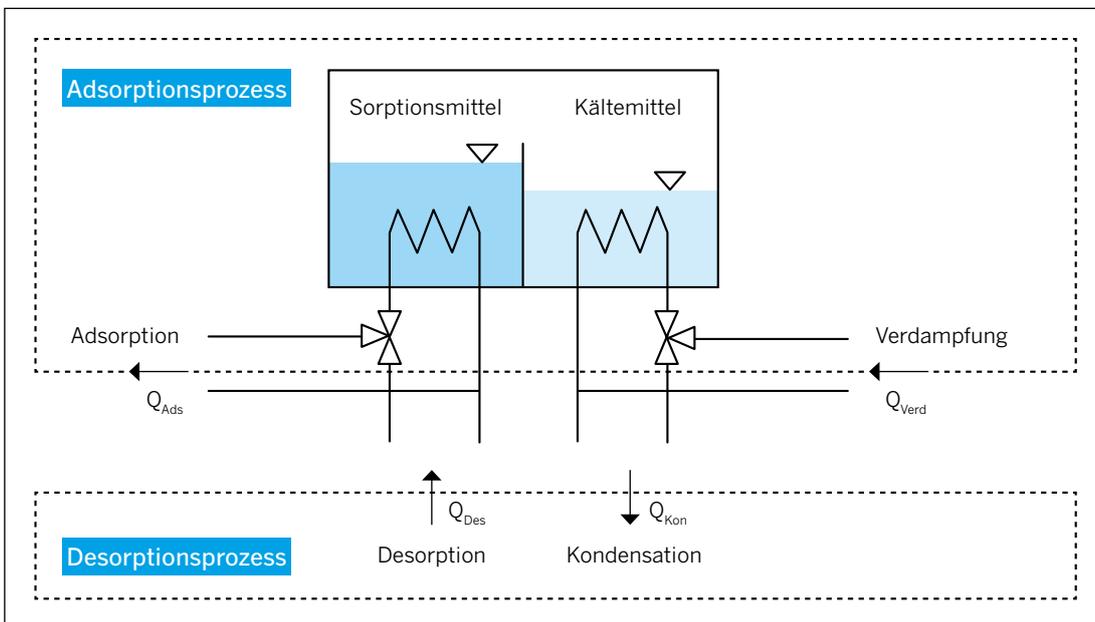


Bild 5-23 Funktionsprinzip der Adsorptionskältemaschine

Wesentliche Unterschiede sind der diskontinuierliche Betrieb der Adsorptionskältemaschine mit Nutzung eines festen Adsorbers, im Gegensatz zur kontinuierlich betriebenen Absorptionskältemaschine mit einem flüssigen Absorber.

In Tabelle 5-9 wird eine Übersicht über verschiedene Kältemaschinen dargestellt.

Grundsätzlich verursachen die Ad- bzw. Absorptionskältemaschinen höhere Investitionskosten und sind anlagentechnisch komplexer als die Kompressionskältemaschinen. Sie weisen aber Vorteile auf, wenn überschüssige Wärme, besonders in den Sommermonaten, vorhanden ist und gleichzeitig Kälte benötigt wird. Außerdem wird der Einsatz von klimaschädlichen Kohlenwasserstoffen vermieden und der Wartungsaufwand aufgrund fehlender beweglicher Mechanik minimalisiert.

Beim Einsatz auf Kläranlagen kann überschüssige Wärme der BHKW-Anlagen mittels Kältemaschine unter anderem wie folgt genutzt werden:

- Reinigung des Faulgases vor der Nutzung im BHKW,
- Kühlung von Räumen des Betriebsgebäudes.


Tabelle 5-9 Vergleich verschiedener Kältemaschinen [BHKW-Infozentrum, 2016]

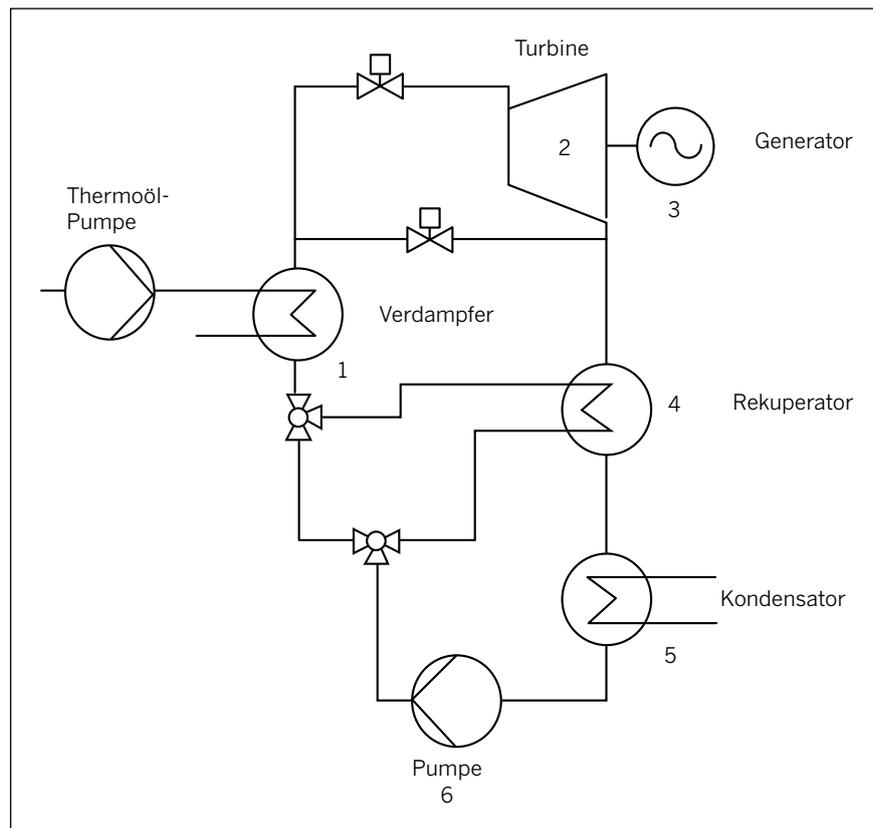
	Kompressionskälteanlage	Absorptionskälteanlage	Adsorptionskälteanlage	DEC-Anlage ¹⁾
Physikalischer Kühlungs-Effekt	Verdampfen des Kältemittels (Kaltdampfprozess)			Verdunstung des Kältemittels
Verdichtungsprinzip	Mechanische Verdichtung	Thermisch, Absorptionslösungs-kreislauf	Thermisch, Adsorption von Wasserdampf	Sorptive Entfeuchtung
Antriebsenergie	Elektroenergie	Wärmeenergie 85–180 °C	Wärmeenergie 66–95 °C	Wärmeenergie 66–95 °C
Kältemittel	Chlorierte oder chlorfreie Kohlenwasserstoffe	Wasser mit LiBr oder NH ₃ als Absorptionsmittel	Wasser mit Feststoff als Adsorptionsmittel (SILICA-Gel)	Wasser
Spezifischer Primärenergieverbrauch ²⁾	1,3–1,65	0,6–1,0	0,4–0,6	0,3

1) Kühlung durch Trocknung und Verdunstung

2) Der spezifische Primärenergieverbrauch errechnet sich aus dem Verhältnis der erhaltenen Kältemenge zur eingesetzten elektrischen bzw. thermischen Energie. Eine Zahl von 0,6–1,0 (Absorptionskälteanlage) bedeutet, dass je eingesetzter Kilowattstunde Wärme 0,6–1,0 Kilowattstunde Kälte bereitgestellt werden.

5.6.3 Organic Rankine Cycle (ORC)

Das Prinzip des ORC-Prozesses (Organic Rankine Cycle) basiert auf dem klassischen Clausius-Rankine-Kreisprozess mit den Hauptunterschieden bezüglich des Drucks und der Temperatur, die durch den Einsatz eines organischen Arbeitsmediums geringer sind als in konventionellen Dampfkraftprozessen. Dieser Aspekt bietet den Vorteil der Nutzung von ORC-Anlagen in Bereichen, in denen nur geringe Temperaturgefälle zwischen Energiequelle und Energiesenke vorherrschen, wie beispielsweise der Abwärmenutzung (z. B. Kopplung BHKW-Anlage) und Mitteltemperaturwärme MT zur Stromerzeugung. Das Funktionsschema ist in Bild 5-24 dargestellt.


Bild 5-24 Funktionsschema einer ORC-Anlage

1. Das Arbeitsmedium wird im Verdampfer über einen Thermalölkreislauf verdampft und erwärmt sich.
2. Der Dampf des Arbeitsmediums tritt in die Turbine der ORC-Anlage ein.
3. Die Turbine treibt einen Generator an und erzeugt elektrische Energie.
4. Der Dampf tritt aus der Turbine aus und durchströmt zuerst einen Rekuperator. Dort gibt der warme Dampf einen Teil seiner Energie an das flüssige Arbeitsmedium ab.
5. Dem Rekuperator ist ein Kondensator nachgeschaltet. Das dampfförmige Arbeitsmedium gelangt in den Kondensator und wird hier verflüssigt, indem der warme Dampf gekühlt wird.
6. Das verflüssigte Arbeitsmedium verlässt den Kondensator wieder, wird von einer Speisepumpe angesaugt und der Druck wird erhöht. Ein Teil des Arbeitsmediums fließt durch den Rekuperator und wird vorgewärmt. Ein anderer Teil fließt direkt zum Verdampfer. Der Kreislauf startet erneut.

Die Auswahl des Arbeitsmediums ist abhängig von der Temperatur und der Abkühlungskurve der Wärmequelle. Durch den Einsatz des organischen Arbeitsmediums müssen jedoch Sonderturbinen eingesetzt werden, deren Oberflächen gegen Korrosion geschützt sind. Des Weiteren erfordert die gesamte Abdichtung der Anlage einen höheren Aufwand als bei Kreisprozessen mit Wasser. Durch die starken thermodynamischen Verluste bei den niedrigen Prozesstemperaturen wird der Gesamtwirkungsgrad stark beeinflusst. Der elektrische Wirkungsgrad liegt in der Regel unter 15 % [Althaus, 2012].

Umsetzung auf Kläranlagen

Auf Kläranlagen bietet sich das Verfahren vor allem in Kombination mit BHKW an. Die ORC-Anlagen bieten die Möglichkeit, bestehende BHKW relativ einfach energetisch zu ertüchtigen bzw. zu erweitern. Viele auf dem Markt erhältliche Systeme werden mittlerweile als Komplettmodule angeboten und müssen nur noch an die Abgasleitungen der BHKW angeschlossen werden. Während das Kühlwasser der BHKW mittels Wärmetauscher zur Beheizung der Faulbehälter benutzt wird, kann die ungenutzte Wärme der heißen Abgase, vor allem in den Sommermonaten, mittels eines Abgaswärmetauschers einer ORC-Anlage zugeführt werden. Weitere Wärmequellen auf Kläranlagen, die für den ORC-Prozess nutzbar sind und ansonsten ungenutzt bleiben, können Abwärmeströme von Gebläsestationen sowie solarthermische Anlagen, Anlagen zur Nutzung von Abwasserwärme oder Geothermie-Anlagen sein, die im Sommer zu viel Wärme produzieren würden.

Die spezifischen Investitionskosten (EUR/kW) sind im Vergleich zu BHKW-Anlagen bezogen auf die kW noch sehr hoch; diese lassen sich aber im Rahmen technologischer Erweiterungen beim ORC-Prozess sowie der Serienfertigung zukünftig deutlich senken.

5.6.4 Wandlung in Energieträger/Power to X

5.6.4 Wandlung in Energieträger/Power to X

5.6.4.1
Power to Gas

5.6.4.2
Power to Liquid

5.6.4.3
Power to Heat

Eine Möglichkeit, das schwankende Energieangebot aus Erneuerbaren Ressourcen zu regeln und in das Versorgungsnetz zu integrieren, ist die Umwandlung von elektrischer Energie in besser speicherbare Energieformen – in der Fachwelt mit dem Begriff „Power to X“ oder „Power to Product“ umschrieben. Dadurch lässt sich die Energienutzung von der Energieerzeugung zeitlich und örtlich entkoppeln. Zu nennen ist hierbei die Speicherung von elektrischer Energie in gasförmigen und flüssigen Energieträgern, in Wärme oder in Basischemikalien (z. B. Ammoniak). Im Allgemeinen wird diese Unterscheidung durch die Begriffe Power to Gas (elektrische Energie zu Gas), Power to Liquid (elektrische Energie zu Flüssigkeit) und Power to Heat (elektrische Energie in Wärme) dargestellt. Tabelle 5-10 gibt einen Überblick über die Technologien der beiden Speicherprinzipien Power to Gas und Power to Liquid.



Tabelle 5-10 Übersicht Power to Gas- und Power to Liquid-Technologien und ihre Verbreitung

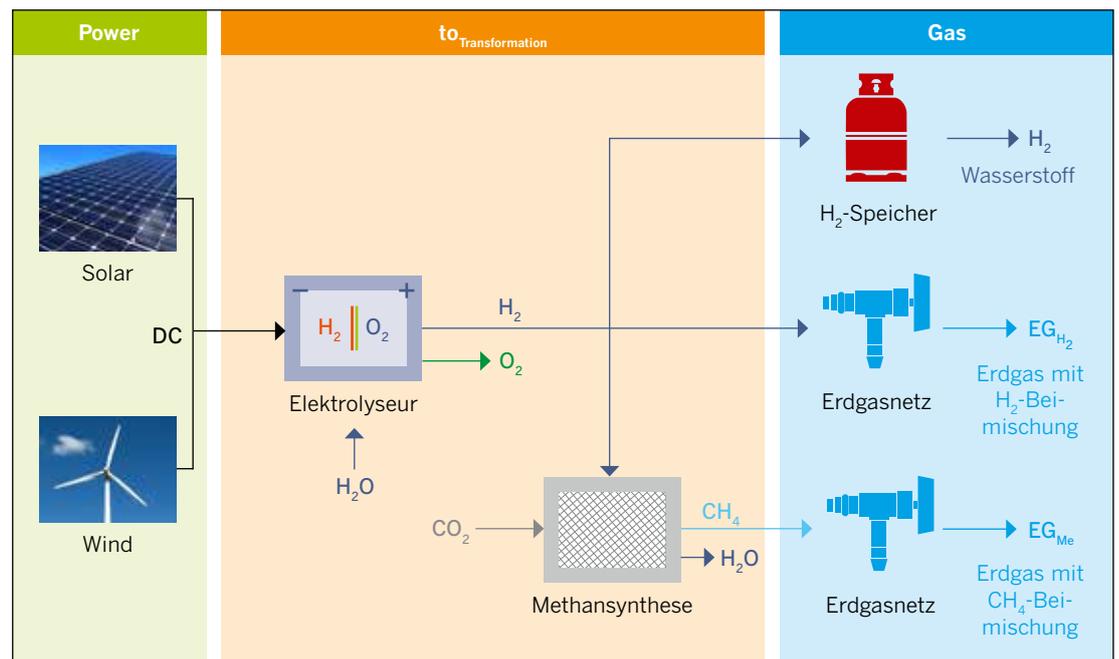
	Power to Gas	Power to Liquid
Technologien	Wasserstoffelektrolyse, Methanisierung	Methanolsynthese, Syntheseprozesse
Produkt	Wasserstoff, Methan	Methanol, Dimethylether (DME) und andere Kohlenwasserstoffe
Anwendungsbereiche	Langzeitspeicher in Gasinfrastruktur, Brennstoff, bei Wiederverstromung – Kurzzeitspeicher, alternativer Kraftstoff, industrielle Nutzung	Synthetischer Kraftstoff, Brennstoffe, Kurz- oder Langzeitspeicher, industrielle Nutzung

5.6.4.1 Power to Gas

Power to Gas beschreibt einen chemischen Prozess, bei dem mittels Wasserelektrolyse Wasserstoff hergestellt wird. Einen weiteren Schritt in diesem Prozess kann die Methanisierung darstellen, die Umwandlung von Wasserstoff (H_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) in Methan (CH_4).

In Deutschland werden drei Alternativen der Power to Gas-Nutzung (siehe Bild 5-25) diskutiert [Schiebahn et al., 2013]:

- die Nutzung von H_2 aus Erneuerbarer Energie in Infrastrukturen, die H_2 -basiert sind, wie z. B. brennstoffzellenbasierte Transportsysteme oder industrielle Prozesse,
- die direkte Einspeisung des H_2 aus Erneuerbarer Energie in das Gasnetz, bis das erlaubte Maximum erreicht ist (siehe dazu die Verordnung über den Zugang zu Gasversorgungsnetzen),
- Methanisierung des produzierten H_2 mit verfügbarem CO_2 und die Einspeisung des produzierten CH_4 ins Gasnetz.

**Bild 5-25** Prinzipien von Power to Gas-Konzepten nach [Schiebahn et al., 2013]

Für die Elektrolyse eignen sich verschiedene Arten von Elektrolyseuren. Sie können anhand der eingesetzten Elektrolyte unterschieden werden [Schiebahn et al., 2015]. Einsetzbar sind die alkalische Wasserelektrolyse, Elektrolyse mittels Proton Exchange Membranen (PEM) und die Hochtemperatur-Elektrolyse. Bei der alkalischen Elektrolyse wird ein flüssiger alkalischer Elektrolyt verwendet und die Elektrolyse wird bei einem Betriebsdruck von 30 bar gefahren. Mittels einer protonenleitenden Polymermembran wird bei der PEM-Elektrolyse mit einem Betriebsdruck von bis zu 100 bar H_2 produziert. Die Hochtemperatur-Wasserelektrolyse benötigt ein festes Oxid (bestehend aus O_2 und mit Yttriumoxid stabilisiertem Zirkoniumoxid) und Betriebstemperaturen von 700 bis 1.000 °C.



Der Prozess der Methanisierung (auch Sabatier-Prozess) läuft als katalytische Hydrierung ab, die Addition von H_2 an andere chemische Verbindungen. Aus CO_2 und $2H_2$ entsteht in diesem Prozess CH_4 . Die Betriebstemperaturen liegen zwischen **250** und **400 °C** bei Drücken von **1** bis **80 bar** [Hoekman et al., 2010]. Die verwendeten Katalysatoren sind nickel- oder rutheniumbasiert ([Wang und Gong, 2011], [Yaccato et al., 2005]). Für die Methanisierung des produzierten Wasserstoffs wird Kohlenstoffdioxid benötigt. Dieses kann aus unterschiedlichen Quellen bezogen werden, wie z. B. in [Schiebahn et al., 2015]:

- aus Kraftwerken mit fossilen Energieträgern,
- aus Biomasse,
- aus industriellen Prozessen,
- aus der Luft.

An die Elektrolyse für Power to Gas-Konzepte werden spezielle Anforderungen gestellt [Beck et al., 2013, Mergel et al., 2013]:

- Hoher Wirkungsgrad des Gesamtprozesses, um Energieverluste zu minimieren,
- Dynamische Fahrweise (An- und Abfahren) der Elektrolyse, um auf die fluktuierende Produktion der Erneuerbaren Energiequellen reagieren zu können,
- Produktionsdynamik – Teillastverhalten und Leistungsbereich – Hohe Bandbreite der Beschickung des Elektrolyseurs, um auch im Stand-by-Modus einsatzbereit zu sein und den Energieverbrauch zu minimieren,
- Hoher Produktionsdruck, um den Energieverbrauch und die Investitionskosten für Kompressoren zu minimieren, d. h. der Betriebsdruck während der Produktion muss durch den Elektrolyseur in einem hohen Druckbereich gehalten werden, wodurch die Kompressionsleistung der Kompressoren sinkt,
- Lange Lebensdauer und geringe Investitionskosten.

Bei der Elektrolyse fällt Sauerstoff mit einem hohen Reinheitsgrad (99 Vol.-%) an, welcher auf Kläranlagen genutzt werden kann. Für den Sauerstoffeintrag ist bei konventionellen Belüftungssystemen ein hoher Energieaufwand erforderlich, der durch den Einsatz des unter hohem Druck anfallenden Elektrolysesauerstoffs reduziert bzw. gänzlich kompensiert werden kann. Allerdings würde dies mit einem Systemwechsel in Aufbau und Technologie der Belebungsbecken einhergehen. Es gelten strengere Anforderungen an die Reinsauerstoff-Eintragssysteme (z. B. ölfreie Gebläse, Abluftbehandlung und -rückführung). Aufgrund des geringen Gasvolumeneintrags ist eine zusätzliche Umwälzung und Entgasung des Belebtschlammes sicherzustellen [DWA, 2016g]. Durch die Nutzung von Reinsauerstoff erfolgt ein verbesserter O_2 -Übergang, eine erhöhte Konzentration des belebten Schlammes sowie ein geringerer Schlammindex, was somit zu einer erhöhten Stabilität des Abwasserreinigungsprozesses führen kann [Hegemann, 1974].

Zudem kann der Reinsauerstoff zur Ozonerzeugung verwendet und anschließend in einer Ozonierungsanlage für die Spurenstoffelimination eingesetzt werden.

5.6.4.2 Power to Liquid

Unter dem Begriff Power to Liquid werden unterschiedliche technische Prozesse zusammengefasst, die in den meisten Fällen das Ziel der Herstellung eines flüssigen Kraftstoffs haben. Die vier Hauptkomponenten eines Power to Liquid-Prozesses sind folgende:

- Kohlenstoffdioxidquelle,
- H_2 und/oder Synthesegas-Produktion,
- Kraftstoffsynthese,
- Kraftstoff-Aufreinigung (bei Bedarf).

Als Kohlenstoffquelle können Carbon Capture and Storage-Systeme (CCS), Biomasse und andere Abfälle verwendet werden.

Ein aktueller Vorteil von Produkten aus Power to Liquid-Prozessen gegenüber Produkten aus Power to Gas-Prozessen ist die Integration der erzeugten flüssigen Produkte in vorhandene Infrastrukturen, wie z. B. den Verkehrs- und Transportsektor und die chemische Industrie.

Als Beispiele für Power to Liquid-Konzepte werden in nachfolgender Tabelle die Stoffe Methanol und Dimethylether herangezogen und beispielhaft deren synthetische Herstellung charakterisiert.



Tabelle 5-11 Charakterisierung der synthetischen Herstellung von Methanol und Dimethylether nach [Bolle et al., 2012]

Syntheseprodukt	Ausgangsstoffe	Syntheseprozess	Betriebsparameter
Methanol	Wasserstoff, Kohlenstoff, Kohlenstoffmonoxid	Katalytischer Prozess mit festen Katalysatoren oder Katalysatoren in der flüssigen Phase	20 bis 300 bar 230 bis 400 °C
Dimethylether	Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid	Katalytischer Prozess mit festen Katalysatoren oder flüssigen Katalysatoren	70 bar 250 °C

Für die Synthese von Methanol sind zwei Prozessschritte notwendig. Im ersten Schritt müssen die Ausgangsstoffe (vgl. Tabelle 5-11) bereitgestellt werden. Zur Erzeugung des H_2 bietet sich die Wasserstoffherstellung über die Wasserelektrolyse an. Zusätzlich wird in diesem Fall jeweils eine Quelle für CO_2 und CO notwendig. Eine andere Möglichkeit zur Bereitstellung der Ausgangsstoffe ist die Nutzung oder Erzeugung von Synthesegas, welches alle drei Komponenten enthält. Die Erzeugung von Synthesegas kann z. B. durch die Dampfreformierung, die autotherme Reformierung oder die CO_2 -Reformierung erfolgen. Am Markt verfügbar ist insbesondere die Wasserdampfreformierung. Die eigentliche Methanolsynthese erfolgt mittels der jeweiligen Reaktion von H_2 mit CO und CO_2 zu Methanol [Reinders et al., 2015].

Dimethylether (DME) kann auf dem gleichen Weg erzeugt werden wie Methanol, z. B. mittels des Einsatzes von Katalysatoren in flüssiger Phase in der Synthese. Die Ausgangsstoffe sind dieselben wie für die Methanolsynthese. Bei der DME-Synthese kommt bei der Verwendung von Katalysatoren ein weiterer Syntheseschritt im Vergleich zur Methanolsynthese hinzu, die Methanol-Dehydrierung. Mittels einer katalytischen Reaktion wird Wasser von Methanol abgespalten und es entsteht DME.



Methanol kann z. B. auf Kläranlagenstandorten produziert werden, insbesondere auf Standorten mit Klärschlammfäulung und BHKW-Nutzung [Bolle et al., 2012]. Mit H_2 aus einer Elektrolyse und dem CO_2 aus den Abgasen der BHKW, nach einer Reinigung des Abgases und der Abspaltung des CO_2 , lässt sich Methanol sowohl als Energiespeicher als auch, je nach Kläranlagensystem, als Zusatzstoff für die Denitrifikation in der Belebungsstufe verwenden. Die vorhandenen Industriezweige der Energieerzeugung, der chemischen Industrie, der verarbeitenden Industrie und andere bieten die Quellen für Power to Liquid-Konzepte. Auf der einen Seite gibt es elektrischen Strom aus Erneuerbaren Energien und auf der anderen Seite die für die notwendigen Syntheseprozesse erforderlichen verschiedenen CO_2 - und Kohlenstoffmonoxidquellen oder direkte Synthesegasquellen, die alle drei Ausgangsstoffe enthalten. Alle Standorte, an denen die genannten Ausgangsstoffe verfügbar sind, können Potenziale für ein Power to Liquid-Konzept ausweisen.

5.6.4.3 Power to Heat

Zeitweilig auftretende regenerative Stromüberschüsse können bei gleichzeitig auftretendem Wärmebedarf ohne größere Verluste direkt in Wärme (= Power to Heat) umgewandelt und damit genutzt werden.

Wärmespeicher sind zudem meist spezifisch kostengünstiger als Stromspeicher, sodass regenerative Stromüberschüsse als Wärme im Winter meist effizienter als durch die Power to Gas/Liquid-Konzepte genutzt werden können.

Hierzu wird auf die Kapitel 5.4.4 und 5.5.4 verwiesen, in denen die Wärme- und Kälteerzeugung aus Strom sowie die Speicherung der Wärme näher beschrieben werden.

Literatur

- Adam, C., Eicher, N., Hermann, L., Herzel, H., Mallon, J., Schaaf, M., Stemann, J. (2015): *P-Rex Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency – Comparative review of ash processes*; European Commission (EC EU)
- Adam, C. und Simon, F.-G. (2010): *Phosphorrückgewinnung im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung*; PROCESSNET – Sitzung des Fachausschusses Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Hrsg.); Fichtenau-Neustädtlein
- AISE (1997): *Technical Task Force HYPOCHLORITE*; Association Internationale de la Savonnerie, de la Détergence et des Produits d'Entretien; Brüssel
- Alt, K., Beier, S., Biebersdorf, N., Haber, K., Knaub, J. M., Knollmann, J., Krüger, M., Maus, C., Rocktäschel, T., Schäpers, D., Schlösser, F., Urueta, F., Voigt, A., Waermer, F., Antakyali, D., Bloser, M., Harff, K., Herbst, H., Kolisch, G., Mentfewitz, G., Taudien, Y., Sasse, R., Türk, J., Wolter, S. (2015): *Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination*; ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (Hrsg.)
- Althaus, W. (2011): *ORC-Prozesse zur Abwärmenutzung an BHKW-Motoren*; Statusseminar Dezentrale Energiesysteme: Elektroenergie aus Biomasse Fraunhofer UMSICHT (Hrsg.); Zittau
- ASTA (2014): *Technische Regeln für Arbeitsstätten – ASR*; Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.)
- ASUE (2006): *Spezifischer Heizenergiebedarf*; Abrufbar unter: http://www.asue.de/umwelt-klimaschutz/grafiken/spezifischer_heizenergiebedarf_in_kilowattstunden_pro_nutzflaeche_im_jahr; Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) e. V. (Hrsg.); Stand: 11.01.2017
- ATV (1996): *ATV-M 204 Stand und Anwendung der Emissionsminderungstechnik bei Kläranlagen – Gerüche, Aerosole –*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- ATV-DVWK (2000a): *ATV-DVWK-A 134 Planung und Bau von Abwasserpumpenanlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- ATV-DVWK (2000b): *ATV-DVWK-A 157 Bauwerke der Kanalisation*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- ATV-DVWK (2001): *ATV-DVWK-A 281 Bemessung von Tropfkörpern und Rotationstauchkörpern*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- ATV-DVWK (2003a): *ATV-DVWK-A 198 Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- ATV-DVWK (2003b): *ATV-DVWK-M 154 Geruchsemissionen aus Entwässerungssystemen – Vermeidung oder Verminderung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- ATV-DVWK (2003c): *ATV-DVWK-M 372 Technische Rahmenbedingungen für die Vergärung von Abfällen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- ATV-DVWK (2004): *ATV-DVWK-M 379 Klärschlamm-trocknung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef

- Bahr, C., Ernst, M., Jekel, M. (2007): *Pilotuntersuchungen zur kombinierten oxidativbiologischen Behandlung von Kläranlagenabläufen für die Entfernung von organischen Spuren- und Wirkstoffen und zur Desinfektion*; In: Schriftenreihe Kompetenzzentrum Wasser Berlin; Vol. 5; Dr.-Ing. B. Weigert (Hrsg.); Berlin; S. 79–83
- Bauerfeld, K. (2015): *Innovative Verfahren der thermischen Klärschlammbehandlung*; 9. Klärschlammstage; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); Braunschweig
- Baumann, P., Maurer, P., Roth, M. (2014): *Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen: Systematisches Vorgehen zur Steigerung der Energieeffizienz durch Nutzung des Einsparpotenzials*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); ISBN: 978-3-940173-47-8; Stuttgart
- Beck, H.-P., Bengler, R., Beyer, K., Brenner, S., Engel, B., Funck, F., Güttel, R., zum Hingst, J., Hofmann, L., Lietz, F., Lipinski, L.-W., Mbuy, A., Menges, R., Minke, C., Neumann, C., Runge, S.-A., Schöß, M.-A., Springmann, J.-P., Turek, T., Unger, D., Weger, H., Weyer, H. (2013): *Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit*; Abschlussbericht; Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn) (Hrsg.)
- Beier, M., Sander, M., Schneider, Y., Rosenwinkel, K.-H. (2008): *Energieeffiziente Stickstoffelimination – Verfahrensüberblick zur Nitrifikation/Deammonifikation und Auswirkungen auf den Energiebedarf von Kläranlagen*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 55 (6); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 671–678
- BHKW-Infozentrum (2016): *Grundlagen der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung*; Abrufbar unter: <https://www.bhkw-infozentrum.de/allgemeine-erlaeuterungen-bhkw-kwk/kwkk-grundlagen.html>; BHKW-Infozentrum (Hrsg.); Stand: 16.12.2016
- Bischoff, A. (2013): *Desinfektion von behandeltem Abwasser – Vergleich verschiedener Desinfektionsverfahren*; Dissertation; Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie; Technische Universität Darmstadt; ISBN: 978-3-940897-23-7; Darmstadt
- BMVBS (2016): *ÖKOBAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen*; Abrufbar unter: <http://www.oekobaudat.de/>; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.); Stand: 16.12.2016
- BMWi (2017): *Kommunal 4.0*; Abrufbar unter: <https://www.kommunal4null.de/>; Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.); Stand: 04.05.2017
- Böhm, W. (2009): *Elektrische Antriebe*; Vogel Business Media (Hrsg.); ISBN: 978-3-8343-3145-8
- Böhnke, B., Bili, V., Brautlecht, P. (1998): *Leistungs- und Kostenvergleich für ein- und zweistufige Belebungsverfahren*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 45 (9); S. 17
- Bolle, F.-W., Genzowsky, K., Gredigk-Hoffmann, S., Reinders, M., Riße, H., Schröder, M., Steinke, M., Wöffen, B., Illing, F., Jagemann, P., Schmelz, K.-G., Schulte, P. (2012): *WaStrak NRW „Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung“ – Phase I*; Forschungsbericht; Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V., TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft für Wasser-, Abwasser- und Energiewirtschaft mbH, Ingenieurbüro Redlich und Partner GmbH, Emschergenossenschaft; Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.); Aachen
- Bongards, M. (2000): *Der Energieverbrauch kommunaler Kläranlagen in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt in der biologischen Stufe*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 47 (5); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- Botsch, B. (2010): *Sandfang und Fettfang: Hydraulik und Verfahrenstechnik – Neue Bemessungsansätze*; Vulkan-Verlag (Hrsg.); ISBN: 978-3-8027-2559-3; Essen
- Botsch, B. (2013a): *Der Sandwäscher als limitierende Größe von Sandfanganlagen – Die vernachlässigte Wechselwirkung von Sandfang und Sandwäscher*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 60 (4); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 299–309

- Botsch, B. (2013b): *Sandfang – Leitfaden für Betreiber und Planer: Effizienz-Steigerung, erweiterte Anwendungen und Prüfmethode Hydrosandfang*; Vulkan-Verlag (Hrsg.); ISBN: 978-3-8027-2565-4; Essen
- Bridger Scientific (2005): *Heat transfer performance monitoring*; Abrufbar unter: <http://www.bridgersci.com/tutorial.htm>; Bridger Scientific Inc. (Hrsg.); Stand: 16.12.2016
- Broll, J. und Mannel, R. (2013): *Optimierung und Automatisierung von Kreiselpumpen im Parallelbetrieb*; DWA Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Fulda
- Brüggemann, D. und Rösler, F. (o. J.): *Latentwärmespeicher – Speicherung thermischer Energie durch Phasenwechsel*; Lehrstuhl für technische Thermodynamik und Transportprozesse; Universität Bayreuth (Hrsg.); Bayreuth
- BSI (2017): *Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)*; Abrufbar unter: https://www.bsi.bund.de/DE/Publikationen/Broschueren/broschueren_node.html; Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (Hrsg.); Stand: 15.02.2017
- Bumiller, H. B., M., Eichler, W., Feustel, B., Käppel, T., Klee, W., Manderla, J., Reichmann, O. S., J., Tkotz, K., Winter, U., Ziegler, K. (2014): *Fachkunde Elektrotechnik*; Europa-Lehrmittel (Hrsg.); ISBN: 978-3-8085-3190-7
- Bundestag (2016): *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung)*; Deutscher Bundestag (Hrsg.); Berlin
- Buri, R. und Kobel, B. (2005): *Energie aus Kanalwasser – Leitfaden für Ingenieure und Planer*; Ryser Ingenieure AG, Institut Energie in Infrastrukturanlagen Zürich, ECO.S Energieconsulting Stadtmeister; Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) (Hrsg.); Osnabrück/Bern
- Cakir, U. und Agdemir, N. (2009): *Gebläse-Druckluft trocknet Klärschlamm. Wärmerückgewinnung auf Kläranlagen*; In: wwt Wasserwirtschaft Wassertechnik, Praxismagazin Spezial (10); S. 13–18
- DENA (2012): *Handbuch Lastmanagement*; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hrsg.); Berlin
- DENA (2015): *Spitzenlastreduktion – Effiziente Energiesysteme*; Abrufbar unter: <http://www.effiziente-energiesysteme.de/themen/lastmanagement/spitzenlastreduktion.html>; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), (Hrsg.); Stand: 11.01.2017
- Denkert, R. (2015): *„Sommer-/Winter-Schlammproblematik“ – Auswirkungen und Strategien*; 9. Klärschlammstage; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Potsdam
- DIN (1980): *DIN 1945-1 Verdrängerkompressoren*; Thermodynamische Abnahme- und Leistungsversuche; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (1994): *DIN 1304: Formelzeichen – Allgemeine Formelzeichen*; (DIN), Deutsches Institut für Normung e. V.; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2002): *DIN 19551-3 Kläranlagen – Rechteckbecken – Teil 3: Sandfänge mit Saug- und Schildräumer Bauformen, Hauptmaße, Ausrüstungen*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2003): *DIN 4108 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2008a): *DIN 276 Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2008b): *DIN EN ISO 6946:2008-04 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007)*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2009): *DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006)*; Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006; DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin

- DIN (2011a): *DIN EN 12464 Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2011b): *DIN EN 50160 – Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2011c): *DIN EN ISO 50001 – Energiemanagementsysteme-Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2012): *DIN ISO 14067 Carbon footprint of products – Requirements and guidelines Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin*
- DIN (2015a): *DIN EN 50598 Ökodesign für Antriebssysteme, Motorstarter, Leistungselektronik und deren angetriebene Einrichtungen*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2015b): *DIN EN ISO 10628 Schemata für die chemische und petrochemische Industrie – Teil 1: Spezifikation der Schemata*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2016a): *DIN 18205 Bedarfsplanung im Bauwesen*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- DIN (2016b): *DIN 19569-2 Entwurf Kläranlagen – Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen – Teil 2. Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen*; Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN) (Hrsg.); Berlin
- Dorias, B. (1996): *Stickstoffelimination mit Tropfkörpern*; Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e. V. Stuttgart, (Hrsg.); ISBN: 978-3-486-26349-7; München
- DVGW (1999): *Merkblatt W 625 – Anlagen zur Erzeugung und Dosierung von Ozon*; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (Hrsg.); Bonn
- DWA (2005): *DWA-A 116-1 Besondere Entwässerungsverfahren – Teil 1: Unterdruckentwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2006a): *DWA-M 268 Steuerung und Regelung der Stickstoffelimination beim Belebungsverfahren*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2006b): *DWA-M 299 Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2006c): *DWA-M 376 Sicherheitsregeln für Biogasbehälter mit Membrandichtung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2007a): *Betriebsempfehlungen bei Problemen mit Nachklärbecken von Belebungsanlagen – Teil 1: Problembedeutung und Betriebsbeobachtungen*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 54 (9); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 896–901
- DWA (2007b): *DWA-A 116-2 Besondere Entwässerungsverfahren – Teil 2: Druckentwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2007c): *DWA-M 209 Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2007d): *DWA-M 381 Eindickung von Klärschlamm*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2008a): *DWA-M 212 Technische Ausrüstung von Faulgasanlagen auf Kläranlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef

- DWA (2008b): *DWA-M 383 Kennwerte der Klärschlammmentwässerung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2009a): *DWA-M 114 Energie aus Abwasser Wärme- und Lageenergie*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2009b): *DWA-M 210 Belebungsanlagen mit Aufstaubetrieb (SBR)*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2009c): *DWA-M 380 Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2009d): *Erfahrungen zum Betrieb von Abwasserfilteranlagen – Kurzfassung des Arbeitsberichts der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.3 „Abwasserfiltration“*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 56 (6); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 600–603
- DWA (2010a): *DWA-A 111 Hydraulische Dimensionierung und betrieblicher Leistungsnachweis von Anlagen zur Abfluss- und Wasserstandsbegrenzung in Entwässerungssystemen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2010b): *DWA-M 363 Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2010c): *Leitfaden zur Klärschlammmentsorgung – Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe AK-13.4 „Klärschlammmentsorgungskonzepte“*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.)
- DWA (2011a): *DWA-A 202 Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2011b): *DWA-M 253 Leit- und Automatisierungstechnik auf Abwasseranlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2011c): *DWA-M 361 Aufbereitung von Biogas*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2011d): *DWA-M 386 Thermische Behandlung von Klärschlämmen – Monoverbrennung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2012a): *DWA-A 110 Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Abwasserleitungen und -kanälen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2012b): *DWA-M 387 Thermische Behandlung von Klärschlämmen – Mitverbrennung in Kraftwerken*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2012c): *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); ISBN: 978-3-941897-55-7; Hennef
- DWA (2013a): *DWA-A 166 Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung – Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2013b): *DWA-M 176 Hinweise zur konstruktiven Gestaltung und Ausrüstung von Bauwerken der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2013c): *DWA-M 205 Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef

- DWA (2013d): *DWA-M 229-1 Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen – Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2013e): *DWA-M 366 Maschinelle Schlammwässerung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2013f): *Stand und Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Teil 1 – Zweiter Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.1 „Wertstoffrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm“*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 60 (10); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 837 – 844
- DWA (2014a): *DWA-A 117 Bemessung von Regenrückhalteräumen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2014b): *DWA-M 227 Membran-Bioreaktor-Verfahren (MBR-Verfahren)*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2014c): *DWA-M 350 Aufbereitung von synthetischen polymeren Flockungsmitteln zur Klärschlammkonditionierung*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2014d): *DWA-M 368 Biologische Stabilisierung von Klärschlamm*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2015a): *DWA-A 216 Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2015b): *DWA-M 264 Gasdurchflussmessungen auf Abwasserbehandlungsanlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2015c): *DWA-M 302 Klärschlammintegration (Entwurf)*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2015d): *Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen*; In: DWA-Themen; Vol. T3; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2015e): *Sachbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK 1.3 zum Bearbeitungsstand des Merkblatts „Biologische Stickstoffelimination von Schlammwässern der anaeroben Schlammstabilisierung“*; 9. Aachener Tagung zur Behandlung der Stickstoffrückbelastung aus der Schlammwässerung; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Leipzig
- DWA (2015f): *Schlammfäulung oder gemeinsame aerobe Stabilisierung bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe*; In: DWA-Themen; Vol. T1; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2016a): *DWA-A 102 Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer (Entwurf)*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2016b): *DWA-A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2016c): *DWA-A 203 Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung (Entwurf)*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2016d): *DWA-A 268 Automatisierung von einstufigen Belebungsanlagen*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef

- DWA (2016e): *DWA-M 229-2 Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen – Teil 2 (Entwurf)*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2016f): *DWA-M 820 Qualität von Ingenieurleistungen optimieren – Teil 1: Vorbereitung und Vergabeverfahren*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- DWA (2016g): *Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen – Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-10.4 „Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen“*; In: KA: Korrespondenz Abwasser; Vol. 63; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 704–713
- DWA (2016h): *Wasserstoffbasierte Energiekonzepte – Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-10.1 „Wasserstoffbasierte Energiekonzepte“*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 63 (8); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 679–683
- DWA (o.J.): *DWA-M 349 Biologische Stickstoffelimination der anaeroben Schlammstabilisierung (Anmerkung: Zum Zeitpunkt der Erstellung des Handbuchs noch in Bearbeitung)*; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- Egle, L., Rechberger, H., Zessner, M. (2013): *Technische, ökologische und ökonomische Bewertung von Phosphorrecyclingverfahren 46. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft „Ressourcenschutz als interdisziplinäre Aufgabe“*; Gewässerschutz-Wasser-Abwasser; Vol. 232; Professor Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.); ISBN: 978-3-938996-38-6; Aachen; S. 1–19
- Eitner, D. (1992): *Möglichkeiten der Emissionminderung in Klärwerken*; Wuppertal energie.ch (2015): Antriebsvergleich; Abrufbar unter: <http://www.energie.ch/antriebsvergleich>; energie.ch ag (Hrsg.); Stand: 16.12.2016
- Eyerer, P. und Reinhardt, H.-W. (2000): *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden – Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung*; 1. Auflage; Birkhäuser Verlag (Hrsg.); Basel, Boston, Berlin
- FfE (2013): *Technischer Aufbau der Frequenzregelung*; Abrufbar unter: <http://www.ffe.de/publikationen/fachartikel/167-technischer-aufbau-der-frequenzregelung-im-ucte>; Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE) (Hrsg.); Stand: 28.12.2016
- Frechen, F.-B. (2014): *Gerüche in der Außenluft – Messen, Bewerten, Mindern*; VDI-Technikforum; VDI-Verlag (Hrsg.); Frankfurt
- Frehmann, T., Viktoria, B., Niemann, A. (2013): *Application of advanced hydro power based energy recovery strategies in combined sewer systems*; 8th International Conference on sustainable techniques and strategies in urban water management (NOVATECH 2013); Graie (Hrsg.); Lyon
- Friedrich, M., Kolisch, G., Osthoff, T. (2013): *Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern*; Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz MV, Ministerium für Wirtschaft, Bau und Tourismus MV; Schwerin
- GEMIS (2016): *Globales Emissions-Modell integrierter Systeme*; Abrufbar unter: <http://www.iinas.org/gemis-de.html>; Öko-Institut (Hrsg.); Stand: 16.12.2016
- Genzowsky, K. (2017): *Mathematische Simulationen zur Einbindung von regenerativen Energiequellen und Speichertechnologien zur Optimierung des Energiemanagements auf kommunalen Kläranlagen*; Dissertation; Fakultät für Bauingenieurwesen; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; ISBN: 978-3-938996-50-8; Aachen
- Gnirß, R. (2001): *Membranfiltration als nachgeschaltete Stufe in der kommunalen Abwasserreinigung*; ATV Seminar „Weitergehende Abwasserreinigung“; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (ATV-DVWK) (Hrsg.); Fürth
- Gnirß, R. (2016): *persönliche Mitteilung: Anmerkung im Rahmen einer externen Qualitätssicherung des Kapitels „Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser“*

- Gnirß, R., Miehe, U., Stapf, M. (2016): *Ozonung für die Abwasserdesinfektion und Spurenstoffentfernung*; In: Wasser und Abfall; Vol. 5; S. 15–20
- Gödecke, D. (o. J.): *Natürliche Verfahren der Schlammwässerung – Konventionelle und neue Verfahren*; Ingenieurbüro Gödecke (Hrsg.); Magdeburg
- Grömping, M., Schäpers, D., Alt, K. (2014): *Ausgeführte Anlagen zur Prozesswasserbehandlung mittels Deammonifikation*; 47. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft; Gewässerschutz-Wasser-Abfall (GWA); Vol. 234; Professor Dr.-Ing. Pinnekamp (Hrsg.); ISBN: 978-3-938996-40-9; Essen; S. 1–10
- Grotehusmann, D., Uhl, M., Fuchs, S., Lambert, B. (2015): *Retentionsbodenfilter Handbuch für Planung, Bau und Betrieb*; Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.); Düsseldorf
- Günkel-Lange, T. (2013): *Optimierung von Druckbelüftungssystemen*; 6. Kitzbüheler Wassersymposium (Hrsg.); Kitzbühel
- Haberkern, B., Maier, W., Schneider, U. (2008): *Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen*; Forschungsbericht; Arbeitsgemeinschaft iat – Ingenieurberatung für Abwassertechnik in Zusammenarbeit mit Universität Stuttgart und TU Kaiserslautern sowie Ryser Ingenieure Bern; Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.); Dessau-Roßlau
- Hansen, J., Greger, M., Kimmerle, K., Uckschies, T. (2014): *Auslegung von Feinrechen auf kommunalen Kläranlagen*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 61 (7); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 613–620
- Hasenjäger, E. (2015): *Regelungstechnik für Dummies*; Wiley VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Hrsg.); ISBN: 978-3-527708-93-2
- Hegemann, W. (1974): *Beitrag zur Anwendung von reinem Sauerstoff beim Belebungsverfahren*; In: Technisch-wissenschaftliche Schriftenreihe der ATV, Berichte zur Abwasser- und Abfalltechnik; Vol. 3; Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik (GFA) (Hrsg.); Bonn
- Henkel, J. (2010): *Oxygen transfer phenomena in activated sludge*; Dissertation; Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie; Technische Universität Darmstadt; ISBN: 978-3-940897-06-0; Darmstadt
- Hertlein, K. (1999): *Alles ganz einfach – oder doch nicht? Zur Umsetzung von Regelungskonzepten für den Sauerstoffeintrag*; In: VDI Berichte (1516); S. 13–28
- Höck, G. (o. J.): *„Dirty Power“ – Oberschwingungen durch nichtlineare Verbraucher*; GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH (Hrsg.); Nürnberg
- Hodgson, J. (2004): *Predicting maintenance costs accurately*; In: Pumps & Systems; Vol. 4; Du Pont (Hrsg.)
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Purcell, R. (2010): *CO₂ recycling by reaction with renewably-generated hydrogen*; In: International Journal of Greenhouse Gas Control; Vol. 4 (1); S. 44–50
- Hofmann, J., Pettinger, K., Nachtmann, K. (2014): *Kläranlagen als Energiespeicher*; In: wwt Modernisierungsreport; Vol. 13/14; Huss-Medien (Hrsg.); Berlin; S. 36–40
- Horn, H., Rapp-Fiegle, S., Günthert, F.-W., Holtorf, M.-S., Bischof, F., Chwistek, M. (2009): *Forschungsvorhaben „Kläranlage der Zukunft“ – Themenbereiche Faulgasproduktion, Anaerobtechnik und Deammonifikation*; Schlussbericht; Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft TU München, Professur für Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft Universität der Bundeswehr München, Labor angepasste Wassertechnologien Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik Hochschule Amberg-Weiden; Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.)
- Hunze, M. (2005): *Simulation in der kommunalen Abwasserreinigung. Grundlagen, Hintergründe und Anwendungsfälle*; ein Lehrbuch für Anfänger und Fortgeschrittene; C.H.BECK oHG (Hrsg.); ISBN: 978-3-8356-3073-4

- IEC (2013): *IEC 60034 – Rotating electrical machinery*; International Electrotechnical Commission (IEC)
- IER (o.J.): *Grundlagen der rationellen Energieanwendung – Skript*; Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) (Hrsg.); Stuttgart
- Ingerle, K. (2006): *Berechnung und Optimierung von Drucklufthebern*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 53 (1); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 42–47
- IPCC (2013): *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis – Working Group/Contribution To The Fifth Assessment Report Of The IPCC*; (IPCC), Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.); Genf
- ISO (1999): *ISO 668 Container der Reihe 1 – Klassifikation, Maße, Gesamtgewichte*; ISO Internationale Organisation für Normung, ISO International Organization for Standardization, ISO Organisation Internationale de Normalisation
- ISO (2005): *ISO 5389 Turbocompressors – Performance test code*; ISO Internationale Organisation für Normung, ISO International Organization for Standardization, ISO Organisation Internationale de Normalisation
- ISO (2009): *ISO 1217 Displacement compressors – Acceptance tests*; ISO Internationale Organisation für Normung, ISO International Organization for Standardization, ISO Organisation Internationale de Normalisation
- Janse, T. und Wiers, P. (2006): *Broeikasgasemissie vanuit de Amsterdamse Waterketen*; In: H₂O; Vol. 39 (18); S. 87–91
- Jarass, L., Obermair, G. M., Voigt, W. (2009): *Windenergie: zuverlässige Integration in die Energieversorgung*; Springer-Verlag (Hrsg.); ISBN: 978-3-5408-5253-7
- Jardin, N., Arnold, E., Beier, M., Grömping, M., Kolisch, G., Kühn, V., Meyer, S., Rolfs, T., Schmidt, F., Wett, B., Otte-Witte, R. (2005): *Rückbelastung aus der Schlammbehandlung – Verfahren zur Schlammwasserbehandlung*; 4. Klärschlammstage; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Würzburg
- Jardin, N., Hennerkes, J., Wett, B. (2008): *Stickstoffelimination aus Zentratwasser auf der Kläranlage Plettenberg durch anaerobe Ammoniumoxidation mit dem DEMON-Verfahren*; 9. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium (KKKK); Aachener Schriften zur Stadtentwässerung; Vol. 12; Professor Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.); ISBN: 978-3-938996-06-8; Aachen
- Kainz, H. und Patziger, M. (2005): *Strategien zur Förderung von Rücklaufschlamm*; In: Der Laubfrosch; Vol. 31; S. 16–17
- Kantert, P.-J. (2008): *Praxishandbuch Schneckenpumpen – Ratgeber und Entscheidungshilfe für Planer, Bauherren und Betreiber*; F. Hirthammer Verlag (Hrsg.); ISBN: 978-3-88721-202-5
- Kapp, H., Metzger, S., Meckes, J. (2014): *Untersuchungen zum Spurenstoffbindungsverhalten von Pulveraktivkohle unter anaeroben Bedingungen*; Abschlussbericht; Kompetenzzentrum Spurenstoffe BW (Hrsg.)
- Klargester (2015): *Angabe auf EWBSB40 nach Vorklärung umgerechnet*; Abrufbar unter: <https://www.klaeranlagen-vergleich.de/biodisc-biosafe-klargester.html>; Klargester Prospekt (Hrsg.); Stand: 27.12.2016
- Kolisch, G., Mergelmeyer, M., Menninger, U., Steinmetz, H., Locher, C., Helmreich, J., Brüggemann, J., Taudien, Y., Osthoff, T. (2014): *Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen – Zusatzbericht*; john becker ingenieure, Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbh, Aggerverband, Universität Stuttgart; Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein- Westfalen (MKULNV) (Hrsg.)

- Krebber, K. (2014): *Optimierung der Energiebilanz von Membranbioreaktoren*; Dissertation; Fakultät für Bauingenieurwesen; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; ISBN: 978-3-938996-41-6; Aachen
- Lackner, S., Gilbert, E. M., Vlaeminck, S. E., Joss, A., Horn, H., van Loosdrecht, M. C. M. (2014): *Full-scale partial nitrification/anammox experiences – An application survey*; In: water research; Vol. 55; S. 292–303
- Lange, M., Baumgarten, S., Bolle, F.-W., Buer, T., Schunicht, J., Voßenkaul, K., Mertsch, V., Dierschke, I., Drensla, K., Kaste, A., Schmidt, A., Schmidt, W., Tenkamp, S., Tschesche, J. R., Wiedenhöft, C., Wozniak, T. (2003): *Membrantechnik für die Abwasserreinigungsverfahren Band 1*; Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA), Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV) (Hrsg.); ISBN: 978-3-939377-00-9
- LANUV (2016): *Unveröffentlichter Bericht des LANUV an MKULNV vom 31.08.2016 S7-TP2-EA2, Auswertetool Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH*
- Lehrmann, F. (2013): *Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen – technische und strategische Voraussetzungen*; 14. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium (K4K4); Aachener Schriften zur Stadtentwässerung; Vol. 17; Professor Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.); Köln; S. 1–14
- LfUG (2006): *Langfriststrategie zur Klärschlamm Entsorgung aus kommunalen Abwasserreinigungsanlagen im Freistaat Sachsen*; GWK Ingenieure GmbH; (LfUG), Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.); Dresden
- Lindtner, S. (2008): *Leitfaden für die Erstellung eines Energiekonzeptes kommunaler Kläranlagen*; Ingenieurbüro kaltesklareswasser; Lebensministerium Österreich (Hrsg.); Wien
- Londong, J., Englert, R., Hartmann, M. (2006): *Abwasserbehandlung – Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt*; Bauhaus-Universität Weimar in fachlicher Kooperation mit der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); ISBN: 978-3-86068-272-2; Weimar, Hennef
- Maaß J. und Feddeck P. (2003): *CO₂ als Kältemittel für Wärmepumpen und Kältemaschinen*; Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Informationen mbH (Hrsg.)
- Melin, T. und Rautenbach, R. (2007): *Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*; Springer-Verlag (Hrsg.); ISBN: 978-3540343288
- Mergel, J., Carmo, M., Fritz, D. (2013): *Status on technologies for hydrogen production by water electrolysis*; In: Transition to renewable energy systems; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Hrsg.); ISBN: 978-3527673872; S. 423–450
- Meyer, H. (1979a): *Einfluss der Schlammbelastung einer Belebungsanlage auf die nachgeschaltete Abwasserfiltration*; In: Wissenschaft und Umwelt Vol. 79 (3); S. 113–123
- Meyer, H. (1979b): *Untersuchungen zur weitergehenden Reinigung biologisch gereinigten Abwassers – Die praktische Anwendung der Abwasserfiltration und ihre Bedeutung in der Abwassertechnologie*; Dissertation; Fakultät für Bauingenieurwesen; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Aachen
- Montag, D. (2013): *Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm – Stand der Forschung und Technik*; 14. Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium (K4K4); Aachener Schriften zur Stadtentwässerung; Vol. 17; Professor Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.); Köln; S. 1–15
- Montag, D., Everding, W., Pinnekamp, J. (2014): *Phosphor – nachhaltiger Umgang mit einem kritischen Rohstoff – Technische Rahmenbedingungen und Szenarien der zukünftigen Klärschlamm Entsorgung und Phosphorrückgewinnung*; 27. Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft; ARA – Abfall, Recycling und Altlasten; Vol. 40; Professor Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.); Aachen; S. 1–13

- Müller, E.-A., Kobel, B., Künti, T., Pinnekamp, J., Seibert-Erling, G., Böcker, K. (1999): *Handbuch Energie in Kläranlagen*; Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MURL) (Hrsg.); Düsseldorf
- Müller, E.-A., Kobel, B., Schmid, F., Levy, G. A., Moser, R., Brügger, R., Roth, Y., Graf, E. (2010): *Energie in ARA – Leitfaden zur Energieoptimierung auf Abwasserreinigungsanlagen*; Bundesamt für Energie (BFE), Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA) (Hrsg.); Zürich
- Müller, K. (2003): *Pilotvorhaben zur Brauchwasserdesinfektion*; In: Mitgliederrundbrief ATV-DVWK-Landesverband Bayern; Vol. 2; ATV-DVWK-Landesverband Bayern (Hrsg.)
- Müller, K., Billmaier, K., Müller, E.-A., Graf, E., Roth, Y., Beyert, J., Vosen, G., Weilandt, M., Treis, A., Lorenz, U. (2013a): *Potenziale und technische Optimierung der Abwasserwärmenutzung*; Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V., EnergieSchweiz für Infrastrukturanlagen, Ryser Ingenieure AG, RWTH Aachen Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement, Emschergenossenschaft, STAWAG Stadtwerke Aachen AG; Forschungsbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt, gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.)
- Müller, K., Billmaier, K., Siekmann, M., Koenen, S., Boudewins, T., Schrader, D., Weilandt, M., Brockmann, H. (2013b): *Entwicklung von Sparmaßnahmen, Optimierungsmöglichkeiten oder neuen energiesparenden Techniken bzw. Konzeptionen der bzw. in der Kanalisation*; Forschungsbericht; Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V., TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft für Wasser-, Abwasser- und Energiewirtschaft mbH, IBR Ingenieurbüro Redlich und Partner GmbH, Emschergenossenschaft, EnergieSchweiz für Infrastrukturanlagen, Ryser Ingenieure AG, ; Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.)
- MUNLV (2001): *Co-Fermentation von biogenen Abfällen in Faulbehältern von Kläranlagen*; In: Berichte zur Umwelt, Bereich Abwasser Vol. 22; Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (MUNLV) (Hrsg.); Düsseldorf
- Neifer, H., Baumann, P., Hansen, J., Kolisch, G., Hobus, I., Pressinotti, F. C., Hilsdorf, J., Lackner, S., Gilbert, E. M., Agrawal, S., Horn, H., Hölle, J., Wunderlin, P., Siegrist, H., Kipf, M., Gruber, W., Joss, A., Maurer, P., Maier, W., Haberkern, B. (2014): *Energiepotentiale kommunaler Kläranlagen erkennen, nutzen und kritisch bewerten*; 89. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium; Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft; Vol. 221; DIV Deutscher Industrieverlag (Hrsg.); Stuttgart
- Nelle, T. (1994): *Abwasserdesinfektion mit UV-Licht und Ozon unter Einbeziehung der vorgeschalteten Reinigungsstufen*; In: Schriftenreihe Umwelttechnik und Umweltmanagement der Uni Witten/Herdecke
- Nordmann, W. (1977): *Die Überwachung der Schlammfäulung. KA-Information für das Betriebspersonal*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 77 (3); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef
- Nowak, J. (2014): *Motorschutz im Zeitalter von IE3 – Auswirkungen der ErP-Richtlinie 2009/125/EC auf die Schalt- und Schutzsysteme für Elektromotoren*; GmbH, EATON Electric (Hrsg.); Bonn
- Oertel, D. (2008): *Energiespeicher – Stand und Perspektiven – Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“*; Büro für Technikfolgen- Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Hrsg.); Berlin
- Philippson, H.-W. (2015): *Einstieg in die Regelungstechnik: Vorgehensmodell für den praktischen Reglerentwurf*, 2. Auflage; Carl Hanser Verlag (Hrsg.); ISBN: 978-3446432611; München
- Pinnekamp, J., Palmowski, L., Veltmann, K., Mousel, D., Bolle, F.-W., Riße, H., Gredigk-Hoffmann, S., Mauer, C., Simsheuser, C., Schmitz, U., Eckers, S., Jagemann, P., Thöle, D. (2011a): *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase I*; Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V., Institut für

- Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen (ISA), Pöyry Deutschland GmbH, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Ruhrverband,; gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.); Aachen
- Pinnekamp, J., Veltmann, K., Palmowski, L., Bolle, F.-W., Riße, H., Gredigk-Hoffmann, S., Mauer, C., Simsheuser, C., Schmitz, U., Eckers, S. (2011b): *Energieeinsparung bei Membranbelebungsanlagen, Phase I (EnReMem)*; Abschlussbericht; Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V., Institut für Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen (ISA), Pöyry Deutschland GmbH,; Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein- Westfalen (Hrsg.); Aachen
- Pinnekamp, J., Mousel, D., Krebber, K., Palmowski, L., Bolle, F.-W., Gredigk-Hoffmann, S., Genzowsky, K., Miethig, S., Krüger, M., Eckers, S., Simsheuser, C., Lyko, S., Thöle, D. (2015): *Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen – Phase II*; Abschlussbericht; Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW) e.V. an der RWTH Aachen, Pöyry Deutschland GmbH, Emschergenossenschaft /Lippeverband, Ruhrverband; gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (Hrsg.)
- Plath, M., Wichmann, K., Ludwig, G. (2010): *Handbuch Energieeffizienz, Energieeinsparung in der Wasserversorgung*; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) (Hrsg.); Bonn
- Quaschnig, V. (2013): *Regenerative Energiesysteme: Technologie-Berechnung-Simulation*; 7. Auflage; Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG (Hrsg.); ISBN: 978-3-446-43526-1
- Reinders, M., Beckhaus, P., Illing, F., Misz, U., Riße, H., Schröder, M., Schulte, P., Teichgräber, B. (2015): *Biogas as a source for producing hydrogen at wastewater treatment plants–EuWaK–A pilot project*; In: International Journal of Hydrogen Energy; Vol. 40 (28); S. 8601-8606
- Riße, H. und Koch, T. (2011): *Tropfkörper – eine ausgediente Technologie?*; In: Abwassertechnik. Infrastruktur und Abwasserbehandlung; S. 67 – 71
- Rother, E. und Cornel, P. (2003): *Optimierung von Betriebsstrategien und Energieverbrauch von Biofilteranlagen*; 70. Darmstädter Seminar Abwassertechnik; Vol. 153; Schriftenreihe des Instituts WAR der TU-Darmstadt (Hrsg.); Darmstadt
- Rudolph, K.-U. (1981): *Geruchsemissionen aus Belebungsanlagen*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 28 (3); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 129–133
- Rummich, E. (2009): *Energiespeicher – Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen*; expert-Verlag (Hrsg.); ISBN: 978-3816927365; Renningen
- Rundel, P., Meyer, B., Meiller, M., Meyer, I., Daschner, R., Jakuttis, M., Franke, M., Binder, S., Hornung, A. (2013): *Speicher für die Energiewende*; In: Fraunhofer UMSICHT; Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg (Hrsg.)
- Sander, M., Glocker, A., Beier, M., Rosenwinkel, K.-H. (2010): *Energieeffiziente Stickstoffelimination im Verfahren der einstufigen Deammonifikation auf dem Klärwerk Fulda-Gläserzell*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 57 (9); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 890–901
- Schiebahn, S., Grube, T., Robinius, M., Tietze, V., Kumar, B., Stolten, D. (2015): *Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany*; In: International Journal of Hydrogen Energy; Vol. 40 (12); S. 4285–4294
- Schiebahn, S., Grube, T., Robinius, M., Zhao, L., Otto, A., Kumar, B., Weber, M., Stolten, D. (2013): *Power to gas*; In: Transition to renewable energy systems; S. 813–848
- Schmid, F. und Müller, A. (2010): *Klärschlamm-trocknung mit regenerativer Energie*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 57 (1); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 61–66

- Schmidt, T., Mangold, D., Benner, M., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H. (2001): *Langzeit-Wärmespeicher für solare Nahwärme*; Workshop Wärmespeicherung; Bernhard Milow, Gerd Stadermann (Hrsg.); Köln; S. 14–31
- Schmitt, T.-G., Gretschel, O., Hansen, J., Siekmann, K. (2014): *Umstellung von Kläranlagen mit Schlammfaulung – Energetisches und ökonomisches Optimierungspotenzial*; tectraa-Zentrum für innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern, Universität Luxemburg – Campus Kirchberg Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau, Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner GmbH; Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz (MULEWF) (Hrsg.); Mainz
- Scholz, M., Melin, T., Wesseling, M. (2013): *Transforming biogas into biomethane using membrane technology*; In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Vol. 17; Elsevier Ltd. (Hrsg.); Aachen; S. 199–212
- Schröder, M. (1998): *Bewertung der Abwasserfiltration als Verfahrensschritt der kommunalen Abwasserbehandlung*; Dissertation; Fakultät für Bauingenieurwesen; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; ISBN: 3-932590-46-5; Aachen
- Schröder, M. (2007): *Klärschlamm als Energieträger*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 54 (10); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 1035–1040
- Schröder, M. (2011): *Getrennte anaerobe Schlammstabilisierung und Klärgasverwertung auf kleinen und mittleren Kläranlagen*; Gewässerschutz-Wasser-Abfall (GWA); Vol. 223; Professor Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.); ISBN: 978-3-938996-29-4; Aachen
- Schröder, M., Müller, J., Schmelz, K.-G. (2009): *Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Klärschlammbehandlung und -entsorgung*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 56 (10); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 1027–1035
- Schweizer, C. (o. J.): *Automatisierter Primärschlammabzug mit Schlammspiegelmessung*; Abrufbar unter: <http://www.klaerwerk.info/Schlammbehandlung/Automatisierter-Primaerschlammabzug-mit-Schlammspiegelmessung>; klaerwerk.info (Hrsg.); Stand: 16.12.2016
- Seibert-Erling, G. (2008): *Strategien bei der Erneuerung von BHKW-Anlagen*; 9. Kölner Kanal- und Kläranlagenkolloquium (KKKK); Aachener Schriften zur Stadtentwässerung; Professor Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.); Köln; S. 30/31–30/13
- Seibert-Erling, G. (2014): *Die richtige Auslegung und Dimensionierung der Maschinenteknik als Voraussetzung für die regelungstechnische Optimierung*; 15. Kanal- und Kläranlagenkolloquium (KKKK); Aachener Schriften zur Stadtentwässerung; Professor Dr.-Ing. J. Pinnekamp (Hrsg.); Köln; S. 17/11–17/10
- Seibert-Erling, G. und Uecker, F. (2005): *Einsatz mobiler Endgeräte in wassertechnischen Anlagen – Anforderungen, Konzepte, Anwendungsnutzen*; VDI Berichte 1890; VDI-Verlag (Hrsg.)
- Solarstromerzeugung.de (2016): *Wirkungsgrade und benötigte Fläche für Photovoltaik-Module*; Abrufbar unter: <http://www.solarstromerzeugung.de/photovoltaikanlage/komponenten-einer-photovoltaikanlage/solarmodule/>; solarstromerzeugung.de (Hrsg.); Stand: 28.12.2016
- Stein, A., Günthert, F.-W., Patt, H., Roos, H.-J., Kalbskopf, K.-H., Ostermann, G. (1998): *Sandabscheideanlagen (Sandfänge und Sandfanggutaufbereitungsanlagen) – Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe 2.5.1 „Sandfänge“*; In: KA: Korrespondenz Abwasser, Abfall; Vol. 45 (9); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 535–549
- Sterner, M. und Stadler, I. (2014): *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*; Springer Vieweg (Hrsg.); Berlin, Heidelberg
- Stier, G. (2016): *Geruchsproblematik – Wenn Bürger sich beschweren*; In: KA-Betriebs- Info; Vol. 10 (4); Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (Hrsg.); Hennef; S. 2534–2535

- Strunkheide, J. (1999): *Wärmerückgewinnung aus der Druckluft von Belebungsanlagen*; 10. Siegener Fachkolloquium Siedlungswasserwirtschaft – Mit innovativer Abwassertechnik kostenbewusst in das nächste Jahrtausend; Universität Siegen, Gemeinnütziges Institut Wasser und Boden e. V. (IWB) (Hrsg.); Siegen
- Sümer, E., Benckiser, G., Ottow, J. (1996): *Lachgas (N_2O)-Freisetzung aus Belebungsbecken von Kläranlagen in Abhängigkeit von den Abwassereigenschaften*; In: *Ökologie der Abwasserorganismen*; Springer Verlag (Hrsg.); S. 193–204
- Surek, D. (2014): *Pumpen für Abwasser- und Kläranlagen – Auslegung und Praxisbeispiele*; Springer Vieweg (Hrsg.); ISBN: 978-3658029593
- Suttor, W. (2006): *Blockheizkraftwerke: Ein Leitfaden für den Anwender*; Solarpraxis AG (Hrsg.); ISBN: 3-934595-47-2; Karlsruhe
- Teigelkoetter, J. (2013): *Energieeffiziente elektrische Antriebe*; Vieweg + Teubner (Hrsg.); ISBN: 978-3-8348-1938-3
- Thamsen, P.-U., Berlin, T., Hennecke, F.-W., Jaberg, H., Graz, T., Schicke-Tanz, W. (2011): *Thema Weiterbildung – Der Pumpenfachingenieur – Eine Ausbildung zum Spezialisten für Pumpen und Systeme*; In: CIT Plus; Vol. 6
- Urban, W., Lohmann, H., Girod, K., Dachs, G., Zach, C. (2009): *BMBFVerbundprojekt „Biogaseinspeisung – Markterhebung 2007–2008“ Version 4.17*; Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT BASE Technologies GmbH; Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.)
- Van Helden, W. (2008): *Thermische Speicher mit hoher Energiedichte* In: *ee*; Vol. 3-08; Energy Research Center of Netherlands (ECN) (Hrsg.); S. 15–18
- Van Leuven, G., Henneberger, S., Latham, C. (2010): *Theoretical and Experimental Study on Energy Efficiency of Twin Screw Blowers Compared to Rotary Lobe Blowers* In: *Chemical Industry Digest*; Vol. 23; Blockdale (Hrsg.); S. 86–91
- VDI (2004): *VDI 3985 – Grundsätze für Planung, Ausführung und Abnahme von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen*; Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.); Düsseldorf
- VDI (2005): *VDI 4060 – Integrierte Managementsysteme (IMS) – Handlungsanleitung zur praxisorientierten Einführung – Allgemeine Aussagen*; Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.); Düsseldorf
- VDI (2011a): *VDI 2182 – Informationssicherheit in der industriellen Automatisierung*; Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.); Düsseldorf
- VDI (2011b): *VDI 4002 – Zuverlässigkeitsingenieur/Zuverlässigkeitsingenieurin – Anforderungen an die Qualifizierung*; Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.); Düsseldorf
- VDI (2014a): *VDI 4661 – Energiekenngrößen – Grundlagen – Methodik*; Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.); Düsseldorf
- VDI (2014b): *VDI/VDMA 3694 Lastenheft/Pflichtenheft für den Einsatz von Automatisierungssystemen*; Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA); Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMI) (Hrsg.); Düsseldorf
- VDI (2015): *VDI 2078 – Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*; Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.); Düsseldorf
- VDN (2007): *Transmissionscode 2007 „Netz und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber“*; Verband der Netzbetreiber (VDN) (Hrsg.)
- Volz, G. (2010): *Ratgeber Elektrische Motoren in Industrie und Gewerbe: Energieeffizienz und Ökodesign-Richtlinie*; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hrsg.)
- Wagner, A. (2015): *Photovoltaik Engineering: Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung*; Springer Verlag (Hrsg.); ISBN: 3662486393; Dortmund

- Wang, W. und Gong, J. (2011): *Methanation of carbon dioxide: an overview*; In: *Frontiers of Chemical Science and Engineering*; Vol. 5 (1); S. 2–10
- Wawer, T., Hohmeier, S., Seidl, H. (2012): *Steigerung der Flexibilität und Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen durch die Kombination mit Wärmespeichern*; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Berlin
- Weismann, D. und Gutzeit, T. (1998): *Kommunale Abwasserpumpwerke*; Vulkan-Verlag (Hrsg.); ISBN: 3-8027-2834-3; Essen
- Weller, B., Hemmerle, C., Jakubetz, S., Unnewehr, S. (2009): *Photovoltaik – Technik, Gestaltung, Konstruktion*; Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG (Hrsg.); ISBN: 978-3-920034-25-6; München
- Westnetz (2016): *Die Messkonzepte der Westnetz GmbH*; Abrufbar unter: <http://www.westnetz.de/web/cms/de/3202272/westnetz/netz-strom/messstellenbetrieb/informationen-zum-zaehlerwesen-umessstellenbetrieb/messkonzepte/>; Westnetz (Hrsg.); Stand: 27.12.2016
- Yaccato, K., Carhart, R., Hagemeyer, A., Lesik, A., Strasser, P., Volpe, A. F., Turner, H., Weinberg, H., Grasselli, R. K., Brooks, C. (2005): *Competitive CO and CO₂ methanation over supported noble metal catalysts in high throughput scanning mass spectrometer*, In: *Applied Catalysis A: General*; Vol. 296 (1); S. 30–48
- Zahoransky, R. (2015): *Windenergie*; In: *Energietechnik*; Springer – Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf (Hrsg.); ISBN: 978-3-658-07453-1; S. 401–431
- ZVEI (2016): *Energieeffizienz mit elektrischen Antrieben*; Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) (Hrsg.)

Impressum

Herausgeber

Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
40190 Düsseldorf
www.mulnv.nrw.de

Inhaltliche Bearbeitung

Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen (FiW) e.V.
(Johannes Pinnekamp, Friedrich-Wilhelm Bolle, Sylvia Gredigk-Hoffmann, Maximilian Loderhose, Stefan Miethig, Kristoffer Ooms, Henry Riße, Bernhard Wöffen)



TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft für Wasser-, Abwasser- und Energiewirtschaft mbH
(Markus Schröder, Eric Gramlich, Stefan Koenen, Martin Schmitz)



setacon GmbH

(Gerhard Seibert-Erling)



Begleitende Beratergruppe

Heinz Brandenburg (StEB Köln), Günther Behnke (BR Münster), Torsten Frehmann (Emschergenossenschaft), Kurt Harff (LANUV NRW), Andrea Kaste (MULNV NRW), Timo Kaup (BR Münster), Cornelia Knorr (BR Arnberg), Jaqueline Rombach (BR Düsseldorf), Arnold Schmidt (MULNV NRW), Tobias Strodtmann (BR Detmold), Dieter Thöle (Ruhrverband), Heike Wübbeler (EnergieAgentur.NRW)

Textliche und fachliche Unterstützung in ausgewählten Kapiteln

Gerhard Spatzierer (Eisenstadt), Holger von Tils (Co-Autor Kapitel 4) (Worpswede)

Fachliche Beratung in ausgewählten Kapiteln

Remo Biegert (Lahr), Stefan Bleisteiner (Augsburg), Bertram Botsch (Karlsruhe), Udo Enste (Herzogenrath), Dominik Gierse (Meschede), Regina Gnirß (Berlin), Herbert Hirsiger (Wendlingen am Neckar), Laurenz Hüer (Lingen), Horst Junge (Köln), Peter Kantert (Höpfingen), Florian Lehnert (Lengede), Norbert Meyer (Nattenheim), David Montag (Aachen), Jörg Oppermann (Bremen), Hubert Schauerte (Gummersbach), Arnold Schäfer (Hamburg), Ludger Schild (Essen), Karl-Hermann Söhngen (Siegen), Manfred Tomalla (Siegen), Niklas Trautmann (Hannover), Ingo Urban (Essen)

Unterstützung des Entwicklungsprozesses

Erik Akkersdijk, Anett Baum, Gunnar Beermann, Bernd Bieniek, Peter Birken, Simone Brandt, Ludwig Braun, Christoph Brepols, Thomas Breuer, Dirk Brönstrup, Johannes Bürger, Kinga Drensla, Tanja Etges, Norbert Evermann, Manja Gelhaus geb. Steinke, Wolfgang Glathe, Kristina Haber, Jennifer Hammerich, Holger Hanss, Christoph Heidenreich, Daniel Hillebrandt, Nina Hüffmeyer, Jürgen Jakob, Wolfgang John, Bernhard Kames, Thomas Klein, Peter Kloidt, Dirk Koepke, Alexandra Köhler, Elisabeth Lass, Patric Meyer zu Berstenhorst, Hanstheo Nümm, Nina Radtke, Ernst Riegauf, Dirk Salomon, Michael Schäfer, Jennifer Schäfer-Sack, Christian Schaum, Gitta Schirmer, Christina Schmitt, Norbert Schoppmeier, Patrick Schulte, Oliver Seidel, Klaus Siekmann, Karl-Hermann Söhngen, Arne Steinkamp, Hermann Stepkes, Yannick Taudien, Wolfgang Tschöpe, Kai-Uwe Utecht, Kai Wapenhans, Marc Wichern, Thomas Znanewitz

Gestaltung

Naumilkat – Agentur für Kommunikation und Design, Düsseldorf – Berlin

Druck

Silber Druck oHG, Niestetal

Stand

Januar 2018

Bildnachweis

Titel: Emschergenossenschaft, Sven Breszyk | S. 22: Jörg Vollmer/Fotolia | S. 30: Friedhelm Naumilkat | S. 70: Fotoarchiv Ruhrverband | S. 158: FiW/Wasserverband Eifel-Rur | S. 208: Michael Kemper/Emschergenossenschaft | Rückseite: STEB Stadtentwässerungsbetrieb Paderborn

Zitierweise

Pinnekamp, J.; Schröder, M.; Bolle, F.-W.; Gramlich, E.; Gredigk-Hoffmann, S.; Koenen, S.; Loderhose, M.; Miethig, S.; Ooms, K.; Riße, H.; Seibert-Erling, G.; Schmitz, M.; Wöffen, B. (2017): Energie und Abwasser Handbuch NRW; Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen (Hrsg.), Düsseldorf

Vorgeschlagene Kurzzitierweise

Pinnekamp, Schröder et. al., 2017



**Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft,
Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**

40190 Düsseldorf

Telefon 0211 4566 0

Telefax 0211 4566 388

www.umwelt.nrw.de

