

**Auswertung der vom Land NRW geförderten
Energieanalysen kommunaler Kläranlagen**

**Zusatzbericht
zum Forschungsvorhaben
Energie und Klimaschutz**

**Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung,
Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen
Kläranlagen**

AZ IV-7-042 600 003B

Vergabenummer 08/058.3

Projektbezeichnung:

**„Optimierung des Energieertrages kommunaler Kläranlagen durch
prozess- und standortbezogene Verbundstrategie“**

gerichtet an das

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**



Wuppertal, den 28.4.2014

Projektleiter:

i.V. G. Kolisch

Dr.-Ing. G. Kolisch

Inhaltsverzeichnis

Impressum	I
Inhaltsverzeichnis	II
Verzeichnis der Abkürzungen	III
1 Einleitung	1
1.1 Datengrundlage	2
1.2 Vorgehensweise	4
2 Energieverbrauch	5
2.1 Stromverbrauch nach Anschlussgröße	6
2.2 Stromverbrauch nach Verfahrensgruppen	7
2.2.1 Verbrauch der biologischen Reinigungsstufe	10
2.2.2 Verbrauch der mechanischen Reinigungsstufe	11
2.2.3 Verbrauch der Schlammbehandlung	12
2.2.4 Verbrauch der Infrastruktur	13
2.3 Stromverbrauch nach Art der Schlammstabilisierung	14
2.4 Wärmebezug	16
3 Energieproduktion	17
3.1 Faulgaserzeugung	18
3.2 Faulgasnutzung	20
4 Einsparpotentiale und Maßnahmen zur Optimierung	23
4.1 Einsparpotentiale	24
4.2 Maßnahmenauswertung	27
4.2.1 Optimierung der biologischen Reinigungsstufe	27
4.2.2 Optimierung der Schlammbehandlung	29
4.2.3 Optimierung der Faulgasnutzung	31
5 Fazit	34
Verzeichnis der Bilder	36
Verzeichnis der Tabellen	38
Literaturverzeichnis	39
Anhang	40

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
AbwV	Abwasserverordnung	-
ATV	Abwassertechnische Vereinigung (jetzt DWA)	-
$B_{d,x}$	Tägliche Fracht des Parameters x	[kg/d]
BHKW	Blockheizkraftwerk	-
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	[mg/l]
C	Kohlenstoff	-
c_x	Konzentration des Parameters x	[mg/l], [kg/m ³], [g/l]
CH ₄	Methan	-
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	-
CSB	Sauerstoffbedarf für eine vollständige chemische Oxidation	[mg/l]
EW _x	Einwohnerwert; EW = EZ+EGW; bezogen auf den Parameter x	[E]
FG	Faulgas	-
GK	Größenklasse	-
kWh	Kilowatt pro Stunde	[kWh]
kWh _{PE}	Primärenergiepotential in Kilowatt pro Stunde	[kWh]
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	-
l _N	Normliter	[l]
MKULNV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	-
NRW	Nordrhein-Westfalen	-
oTR	Organischer Trockenrückstand	[g/l]
Q _x	Volumenstrom bezogen auf den Parameter x	[m ³ /h]; [l/s]
T	Temperatur	[°C]
TKN	Kjeldahl-Stickstoff	[mg/l]
y _{EP}	Spezifische Energieausbeute	[kWh/(E*a)]
y _G	Spezifische Gasausbeute	[l _N /kg oTR _{zu}]
η_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad	[%]
η_{th}	Thermischer Wirkungsgrad	[%]

1 Einleitung

In Nordrhein-Westfalen werden 634 kommunale Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von insgesamt 35,0 Mio. EW betrieben (LANUV-NRW, 2013). Zur systematischen Optimierung des Energieverbrauchs dieser Anlagen wurde Ende der 1990er-Jahre das Werkzeug der Energieanalyse mit dem Handbuch „Energie in Kläranlagen“ (MURL, 1999) eingeführt. Diese Analysen haben sich seitdem in der Praxis dazu bewährt, einerseits den energetischen IST-Zustand der Kläranlagen aufzuzeigen und andererseits den Betreibern unter betrieblichen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten Handlungsempfehlungen für die Optimierung des Energieverbrauchs bzw. der Energieerzeugung zu geben.

Das Land NRW hat die Durchführung von Energieanalysen über verschiedene Förderprogramme bereits seit 1999 unterstützt. Zuletzt wurde das von 2007 bis 2011 laufende *Investitionsprogramm Abwasser NRW* (IPA) durch die neue Förderrichtlinie *Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW* (ResA) ersetzt. Energieanalysen bilden in der neuen ResA-Richtlinie nach wie vor einen wichtigen Bestandteil (Förderbereich 2.1 „*Gutachterliche Untersuchungen zu Energiesparmaßnahmen öffentlicher Abwasseranlagen* (...)“). In den Jahren von 1999 bis 2012 wurden über diese Förderinitiativen ca. 280 Energieanalysen in NRW unterstützt. Die Abschlussberichte liegen dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) vor, allerdings wurden bis dato keine ausführlichen Auswertungen der Ergebnisse vorgenommen.

Das Thema Energie im Bereich Abwasser wird aktuell neben der Förderung von Energieanalysen zudem in einem speziellen Förderschwerpunkt mit insgesamt 10 Einzelvorhaben durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen (MKULNV) NRW unterstützt. Das Teilprojekt 2 *Verbesserung der Klärgasnutzung und Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen* wurde u.a. von der WiW mbH bearbeitet. Die Ergebnisse der vom Land NRW geförderten Energieanalysen konnten in dieses Teilprojekt für die Themenbereiche Klärgasnutzung und Energieausbeute mit einbezogen werden. Da die Auswertung der Energieanalysen jedoch sehr umfassende Ergebnisse zu weiteren Fragestellungen liefert, werden diese in dem vorliegenden Bericht gesondert zusammengestellt.

Zunächst liefert diese Studie eine Zusammenfassung der Datengrundlage und eine Beschreibung zur methodischen Vorgehensweise bei der Auswertung. Im Anschluss folgt als Kernthema die detaillierte Darstellung der Energieverbrauchsdaten. Nach der Analyse der auf Faulgas basierenden Energieerzeugung werden das Einsparpotential und die Maßnahmen zur Realisierung dieses Potentials erläutert.

1.1 Datengrundlage

Insgesamt wurden im Rahmen des IPA-Förderprogramms 110 Energieanalysen durch das Land NRW gefördert. Zum Zeitpunkt der Auswertung standen hiervon 91 in Berichtsform zur Verfügung, die ausschließlich als Feinanalyse gemäß Energiehandbuch-NRW erstellt wurden. Die in den Energiestudien untersuchten Kläranlagen haben in Summe eine Ausbaugröße in Höhe von 8,8 Mio. EW, was 25 % der gesamten Reinigungskapazität in NRW entspricht. Weitere Kenndaten können Tabelle 1.1 entnommen werden.

Tabelle 1.1: Grundlegende Daten der ausgewerteten Energieanalysen

	Einheit	Wert
Ausgewertete Energieanalysen	-	91
Bezugsjahre der Energieanalysen	-	2006 bis 2011
Ausbaugröße in Summe	EW	8.837.266
Ausbaugröße (Median)	EW	44.600
Anschlussgröße (Median)	EW	37.022

Alle relevanten energetischen Kennwerte und sonstigen Kläranlagendaten wurden mit dem Ziel einer möglichst umfassenden Auswertung der Energieanalysen aus den vorliegenden Berichten entnommen und in die folgenden Kategorien unterteilt:

- **Objektdaten** Baujahr, Betreiber, Erstellungsjahr der Analyse, etc.
- **Anlagendaten** Untersuchungszeitraum, Belastungsdaten, Ausrüstung, Förderhöhen, Faulgasverteilung, Strom- und Wärmebilanz, etc.
- **Energiematrix** Stromverbrauch der Verfahrensgruppen, anlagenspezifische Idealwerte
- **Energienachweis** spezifischer Gesamtstromverbrauch, Grad der Faulgasnutzung, Eigenversorgungsgrad, etc.
- **Maßnahmen** Maßnahmenkategorie, Verfahrensgruppe, Kurzbeschreibung, Energiereduktion bzw. zusätzliche Produktion, Kosten

Eine genaue Auflistung aller abgefragten Kennwerte und Daten kann dem Anhang (Bild 5.1, Bild 5.2 und Bild 5.3) entnommen werden. Der Umfang und die Qualität der Daten variieren dabei je nach Studie, so dass die Datensätze in ihrer Vollständigkeit zum Teil erheblich voneinander abweichen. Hierdurch ergeben sich in den folgenden Auswertungen Unterschiede bei der Anzahl der dargestellten Datenpunkte.

Die **Bezugsgröße der einwohnerspezifischen Kennwerte** wurde den einzelnen Energieanalysen entnommen. Hierbei ist zu beachten, dass die zugrundeliegenden Berechnungen der mittleren Anlagenbelastung nicht einheitlich sind (Bild 1.1).

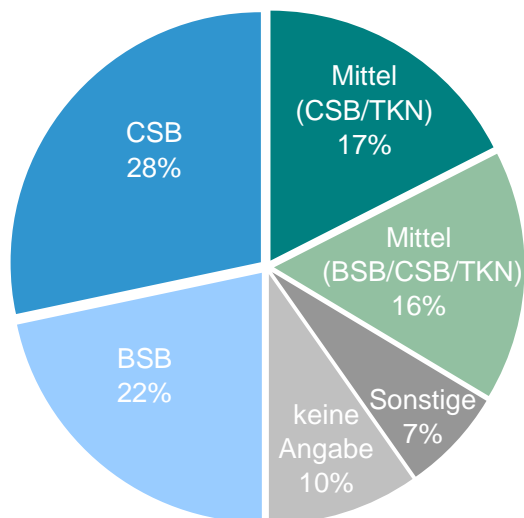


Bild 1.1: Verteilung der in den untersuchten Energieanalysen verwendeten Bezugsgrößen zur Ermittlung der mittleren Anlagenbelastung bzw. der Anschlussgröße

Unter Verwendung der genannten Bezugsgrößen für die mittlere Anlagenbelastung ergibt sich die in Bild 1.2 dargestellte **Verteilung der Einwohnerwerte**. Die Mediananlage weist demzufolge eine mittlere Anschlussgröße von rund 37.000 EW auf.

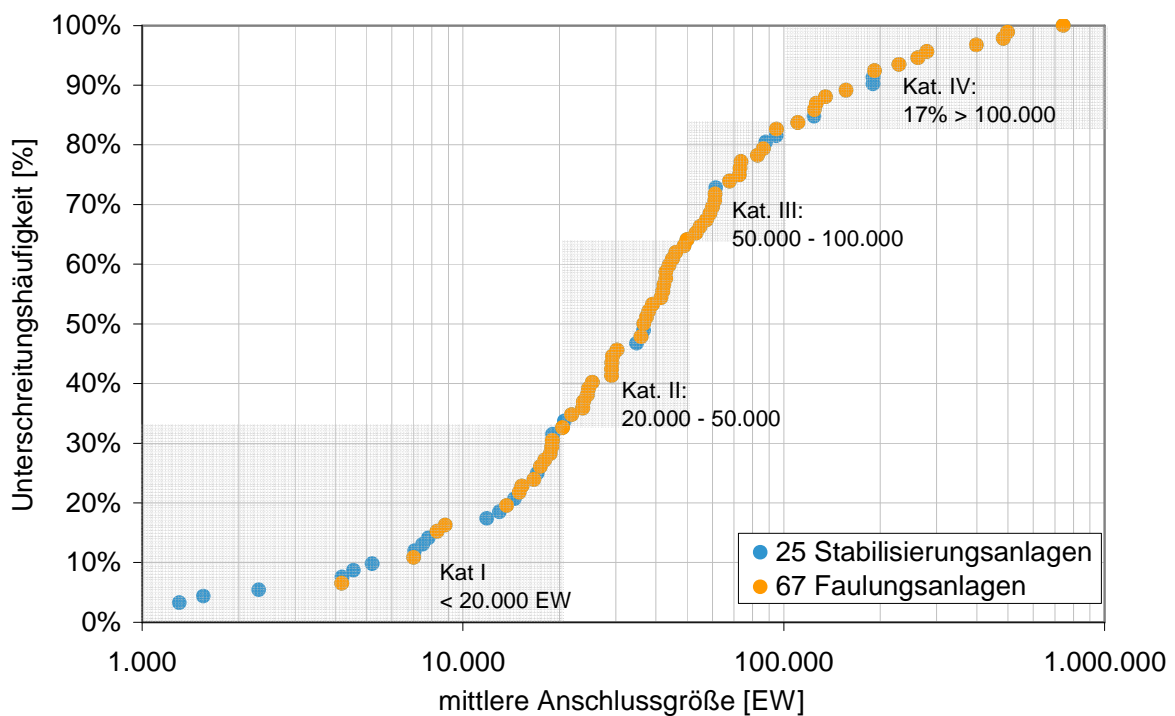


Bild 1.2: Verteilung der Anschlussgrößen gemäß Angaben der Energieanalysen

1.2 Vorgehensweise

Die **energetischen Kennwerte der Energieanalysen** werden umfassend statistisch ausgewertet. Die Häufigkeitsverteilungen der Daten werden dabei einerseits über Summenlinien direkt abgebildet und zum anderen als 25-, 50- und 75-Perzentilwerte angegeben. Diese statistischen Maßzahlen bilden zusammen den sogenannten Interquartilsabstand ($IQR = x_{0,75} - x_{0,25}$) sowie den zugehörigen Zentralwert (Median; $x_{0,5}$). Generell haben Perzentile den Vorteil, dass sie keine Normalverteilung der Datenkollektive voraussetzen. Zudem sind sie nicht so anfällig gegenüber Ausreißern. Neben den Summenlinien werden für die Auswertungen der Daten aus den Perzentilwerten Boxplot-Diagramme gebildet, die für die unterschiedlichen Fragestellungen die statistische Verteilung grafisch aufzeigen.

Die **Kategorisierung der Kläranlagengrößen** erfolgt nicht nach den Größenklassen gemäß Anhang 1 der Abwasserverordnung, da die Größenklasse 4 zu stark dominiert. Stattdessen erfolgt eine Aufteilung in EW-Kategorien nach mittlerer Anschlussgröße (siehe Bild 1.2). Es werden dabei die vier EW-Kategorien „< 20.000 EW“, „20.000 – 50.000 EW“, „50.000 – 100.000 EW“ und „> 100.000 EW“ unterschieden.

Für die **Datenzusammenstellung und -auswertung** wurde ein Excel-Tool entwickelt, welches dem LANUV auch für zukünftige Energieanalysen eine kontinuierliche Datenerfassung ermöglicht und die wichtigsten Auswertungen automatisch erzeugt. Hierzu wurde eine Datenstruktur entwickelt, bei der die relevanten Daten, welche nur in Berichtsform vorliegen, über eine Eingabemaske einheitlich digitalisiert werden. Dies ermöglicht eine übergeordnete Zusammenführung einzelner Daten für tabellarisch-grafische Auswertungen nach Einzelkriterien, wie z.B. Verfahrensgruppe, Maßnahmenart und Maßnahmendaten, ebenso wie das kontinuierliche Hinzufügen weiterer Datensätze aus zukünftigen Energieanalysen. Standardmäßige Auswertografiken (Summenhäufigkeiten, Verteilungen, spezifische Kenngrößen etc.) werden bereitgestellt und kontinuierlich nachgeführt. Die Einzelkläranlage kann in der übergeordneten Auswertografik als Punkt farblich hervorgehoben werden. Über eine Ausgabemaske können die überführten Daten über die Nummer der Energieanalyse oder den Namen der Kläranlage jederzeit wieder für separate Auswertungen in die ursprüngliche Eingabeform ausgelesen werden. Die beschriebene Konzeptstruktur ermöglicht es zudem, zunächst mit einem abgegrenzten Datensatz zu beginnen und diesen nachfolgend zu erweitern.

2 Energieverbrauch

Die Auswertung der Energieanalysen ergibt einen mittleren einwohnerspezifischen Gesamtstromverbrauch (e_{ges}) in Höhe von $42 \text{ kWh}/(\text{E}^*\text{a})$. Bei einer summierten Anschlussgröße aller Abwasserbehandlungsanlagen in NRW von 27,9 Mio. EW (LANUV, 2013) entspricht dies einem absoluten jährlichen Gesamtverbrauch in Höhe von 1,14 Mrd. kWh/a.

Die folgende Summenlinie (Bild 2.1) zeigt die Verteilung der aus den Energieanalysen entnommenen Einzelwerte des spezifischen Stromverbrauchs. Es wird deutlich, dass der Stromverbrauch sehr ungleich verteilt ist, daher ist eine differenzierte Auswertung erforderlich, welche die verschiedenen Einflüsse auf den Stromverbrauch berücksichtigt.

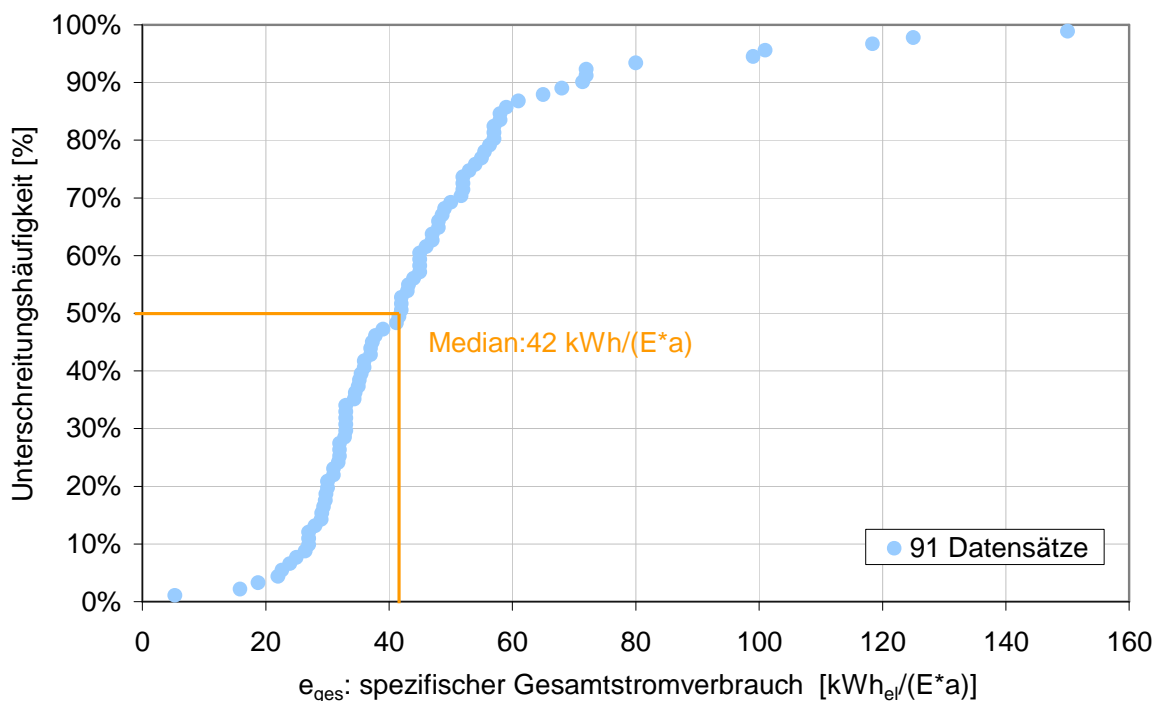


Bild 2.1: Summenlinie des spezifischen Gesamtstromverbrauchs der Kläranlagen

Neben dem Gesamtverbrauch beinhalten Energieanalysen weitere detaillierte Energiedaten der jeweiligen Kläranlagen. In Verbindung mit der gezielten Überprüfung einzelner Aggregate, wie Pumpen, Gebläse oder Blockheizkraftwerke, wird der Energieverbrauch der Kläranlage in den Energieanalysen weiter aufgeschlüsselt. Auf Basis dieser Daten kann der Energieverbrauch der Abwasserreinigung nach verschiedenen Kriterien mit unterschiedlichen Fragestellungen differenziert ausgewertet werden. Im Folgenden wird aus diesem Grund nicht nur der Stromverbrauch der Gesamtanlage, sondern insbesondere auch der Verbrauch der einzelnen verfahrenstechnischen Verbrauchergruppen und der Einfluss der Verfahrensart der Schlammstabilisierung ausgewertet.

2.1 Stromverbrauch nach Anschlussgröße

Die Größe der Kläranlage hat einen Einfluss auf den spezifischen Stromverbrauch. Hierbei spielen nicht nur der Auslastungsgrad, die höheren Wirkungsgrade größerer Aggregate und die anteilige Fremdwassermenge eine Rolle, sondern insbesondere auch die Art der Schlammstabilisierung.

Die einwohnerspezifischen Stromverbräuche der untersuchten Kläranlagen sind in Bild 2.2 differenziert nach den zuvor definierten Kategorien der Anschlussgröße zusammengefasst. Es zeigt sich, dass der spezifische Verbrauchswert, wie zu erwarten, mit steigender Anlagengröße abnimmt, wobei die Differenz von Anlagen der Kategorie III (50.000 – 100.000 EW) zu Anlagen größer 100.000 EW nur noch gering ausfällt.

Die kleineren Kläranlagen mit Anschlussgrößen unter 20.000 EW weisen zudem die größte Streubreite auf. Dies zeigt, dass besonders bei kleineren Kläranlagen großes Optimierungspotenzial für einzelne Anlagen besteht.

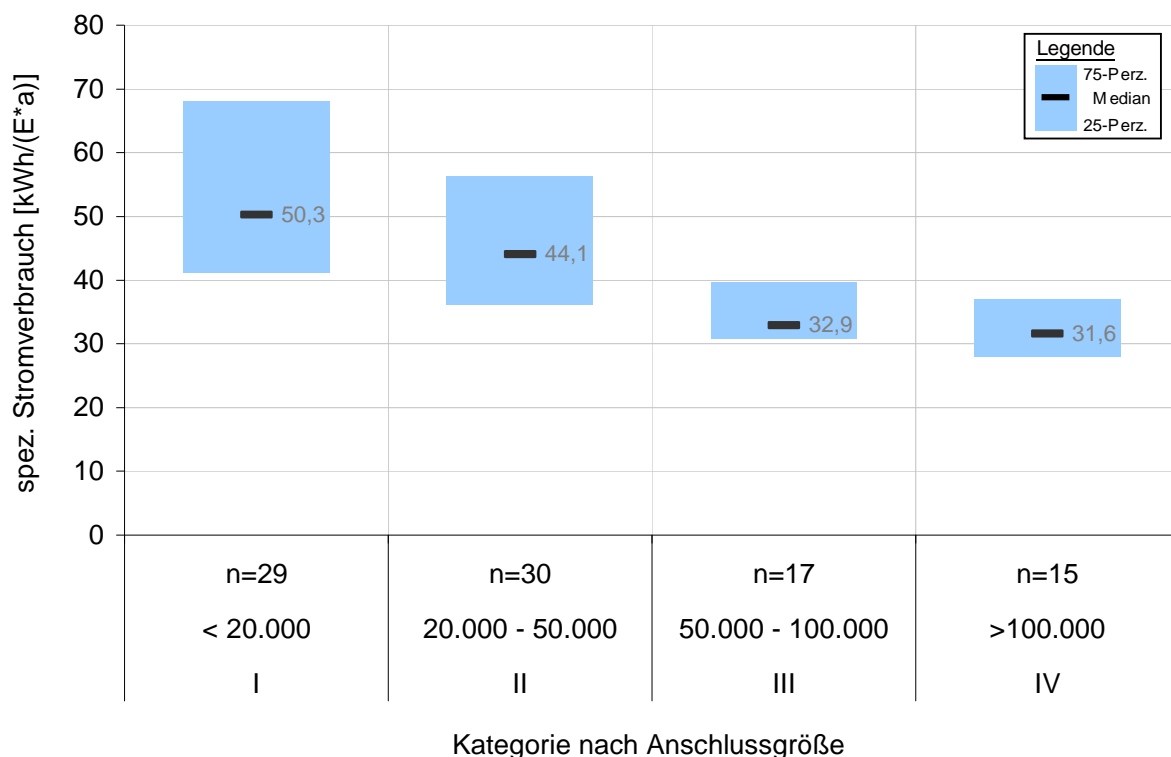


Bild 2.2: Spezifischer Stromverbrauch getrennt nach EW-Kategorien

2.2 Stromverbrauch nach Verfahrensgruppen

Die Abwasserbehandlung erfordert den Einsatz einer Vielzahl von elektrisch angetriebenen Aggregaten, die jedoch bis auf die Gebläse der biologischen Stufe, als Einzelverbraucher nur einen geringen Teil des Gesamtverbrauchs ausmachen. Aus diesem Grund werden die Aggregate gemäß den wichtigsten Verfahrensschritten einer kommunalen Kläranlage in Verbrauchergruppen zusammengefasst.

Zu den maßgebenden Verbrauchergruppen gehören neben der biologischen und der mechanischen Reinigungsstufe, die Schlammbehandlung und die Infrastruktur. Zudem sind Verbraucher zu berücksichtigen, die je nach Anforderungen und Randbedingungen zusätzlich eingesetzt werden. Hierzu zählen im Wesentlichen die Flockungsfiltrationsanlagen und Abwasserhebewerke, welche je nach topographischen Randbedingungen (Förderhöhen) erhebliche Zusatzverbräuche bewirken.

In Bild 2.3 sind die spezifischen Stromverbräuche der zuvor genannten Verfahrensgruppen dem Gesamtstromverbrauch gegenübergestellt. Bei dem Vergleich der gezeigten Medianwerte ist zu beachten, dass die Verteilung je nach Verfahrensgruppe anders ausgeprägt ist und auf unterschiedliche vielen Datensätzen basiert. Aus diesem Grund entspricht die Summe der einzelnen Medianwerte nicht dem Median des Gesamtverbrauchs.

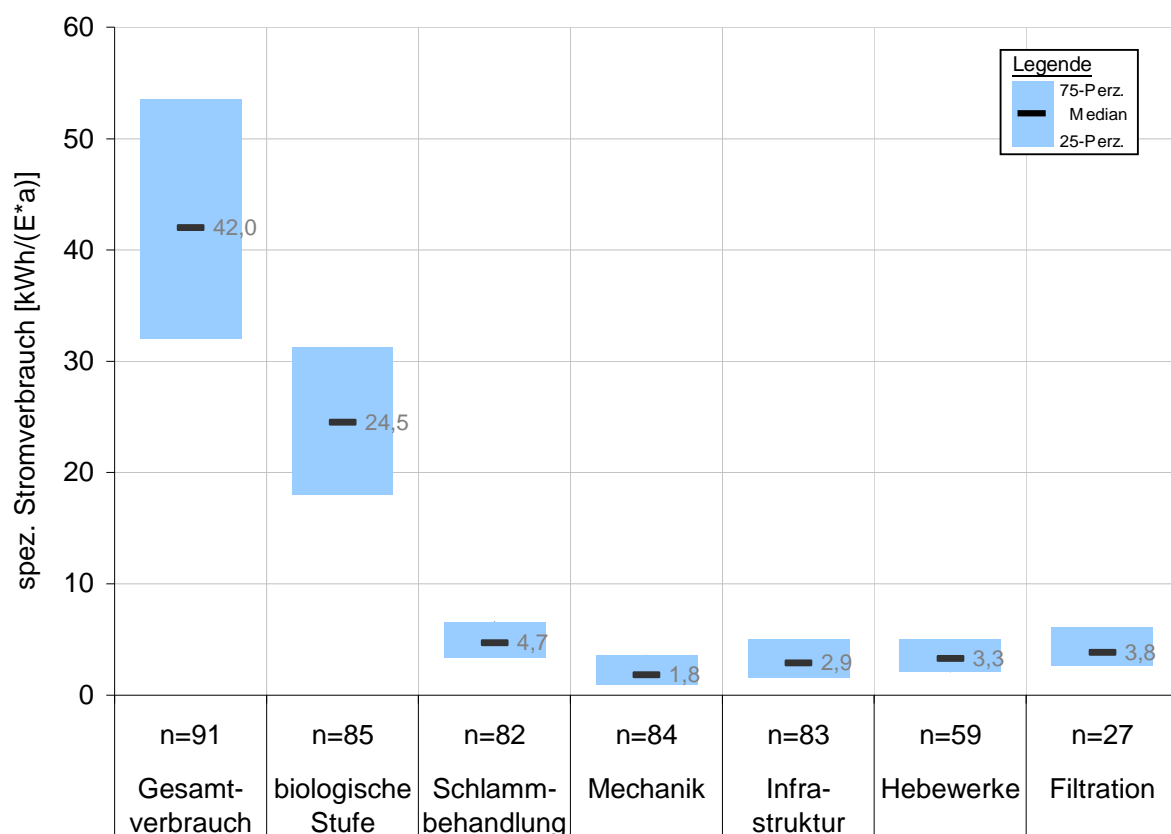


Bild 2.3: Spezifischer Stromverbrauch nach Verfahrensgruppen

Die biologische Stufe weist mit einem mittleren spezifischen Verbrauch von 24,5 kWh/(E*a) den mit Abstand höchsten Strombedarf auf. Die Schlammbehandlung folgt der Biologie mit 4,7 kWh/(E*a) als nächst größter Stromverbraucher. Die übrigen Gruppen liegen in einem Bereich von 1,8 bis 3,8 kWh/(E*a).

Damit entfällt 57 % des gesamten Strombedarfs der Abwasserreinigung auf die biologische Stufe. Da Filtrationsanlagen nur bei etwa 30% der untersuchten Anlagen vorhanden sind und auch Hebewerke nicht überall eingesetzt werden, haben diese einen großen Einfluss auf die Verteilung in Bezug auf den Gesamtverbrauch. Die Verteilung der mittleren spezifischen Stromverbräuche ist in Bild 2.4 dargestellt

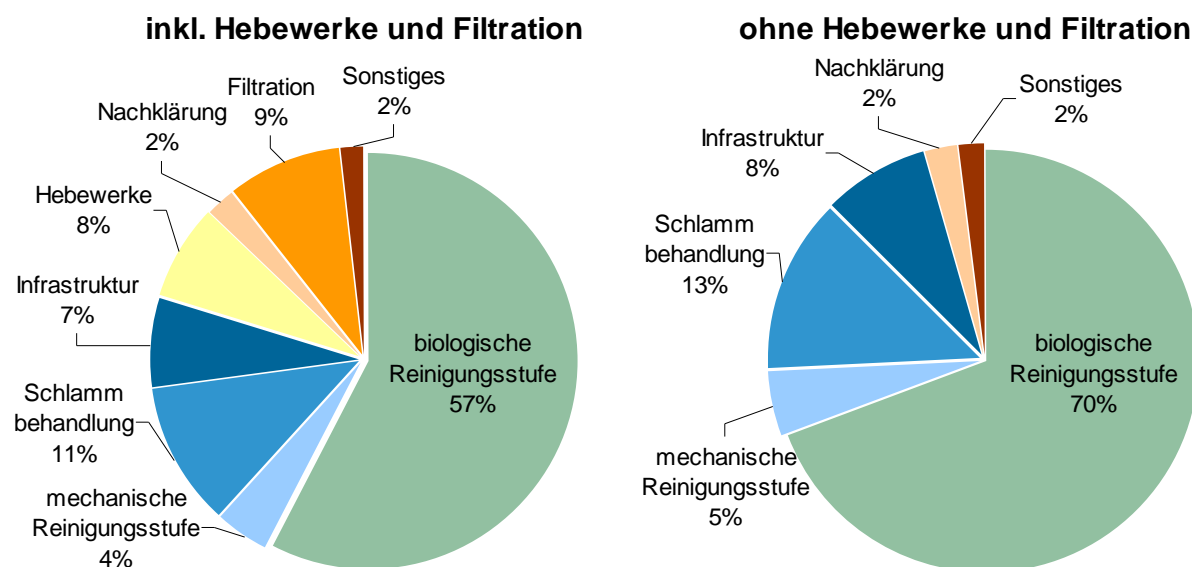


Bild 2.4: Verteilung des Stromverbrauchs der einzelnen Verfahrensgruppen

Tabelle 2.1: Statistische Auswertung (Perzentilwerte) des einwohnerspezifischen Stromverbrauchs getrennt nach Verfahrensgruppen der Abwasserreinigung

Verfahrensgruppe	spezifischer Stromverbrauch [kWh/(E*a)]			
	Anzahl	Häufigkeitsverteilung		
		25%	50%	75%
Gesamtverbrauch	n=91	32,0	42,0	53,5
Mechanik, gesamt	n=84	1,0	1,8	3,6
Rechen	n=80	0,1	0,1	0,3
Sandfang	n=81	0,5	0,9	2,1
Vorklärung	n=61	0,1	0,3	0,5
biologische Stufe, gesamt	n=85	18,0	24,5	31,3
Belüftung	n=70	11,4	15,1	19,9
Umwälzung	n=66	2,3	3,7	6,3
Rezirkulation	n=38	0,9	1,8	2,7
Rücklaufschlammförderung	n=60	1,7	2,6	5,5
Abwasserhebewerke	n=59	2,0	3,3	5,0
Filtration	n=27	2,7	3,8	6,1
Schlammbehandlung, gesamt	n=82	3,4	4,7	6,6
Voreindickung	n=53	0,1	0,6	1,1
Stabilisierung / Faulung	n=58	1,9	2,7	4,5
Nacheindickung	n=19	0,0	0,1	0,2
Entwässerung	n=62	1,1	1,6	2,4
Sonstiges	n=22	0,4	1,0	1,8
Infrastruktur, gesamt	n=83	1,6	2,9	5,0
Lüftung	n=18	0,2	0,7	1,4
Elektroheizung	n=23	0,3	0,7	1,9
Allgemein (Licht, o.ä.)	n=61	0,4	0,7	2,0
Brauchwasser	n=24	0,2	0,4	0,8
Sonstiges	n=49	0,4	1,3	2,8

2.2.1 Verbrauch der biologischen Reinigungsstufe

Mit einem spezifischen Verbrauch von 24,5 kWh/(E*a), entfällt im Mittel 57 % des Gesamtverbrauchs der Kläranlage auf die biologische Stufe. Ohne Berücksichtigung von Abwasserhebewerken oder Filtrationsanlagen liegt der Anteil sogar bei 70 %. Dies übersteigt den Verbrauch der Modellanlage des Energiehandbuchs-NRW, bei der die Biologie 66,4 % des Gesamtstromverbrauchs repräsentiert.

Zwei Drittel (67 %) des Stromverbrauchs der Biologie wird durch die Belüftung verursacht. Der spezifische Stromverbrauch zur Bereitstellung der Druckluft liegt dabei im Mittel bei 15,1 kWh/(EW*a). Der spezifische Strombedarf der weiteren Teilbereiche der biologischen Stufe ist als Häufigkeitsverteilung in Bild 2.5 dargestellt. Demnach bildet die Umwälzung der Belebungsbecken mit einem Median von 3,7 kWh/(EW*a) den zweitgrößten Verbraucher.

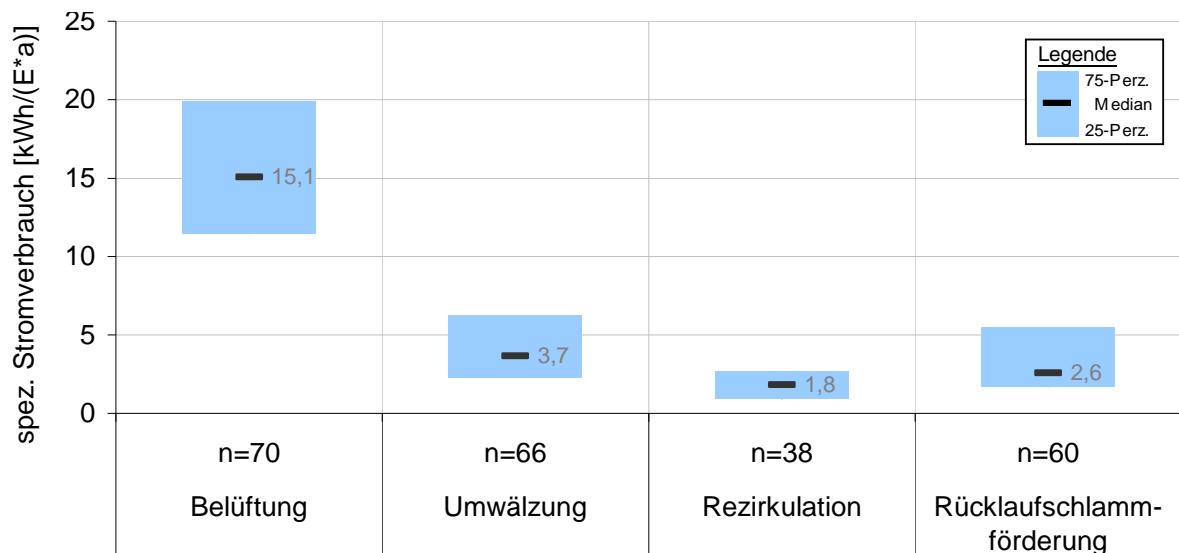


Bild 2.5: Spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche der biologischen Stufe

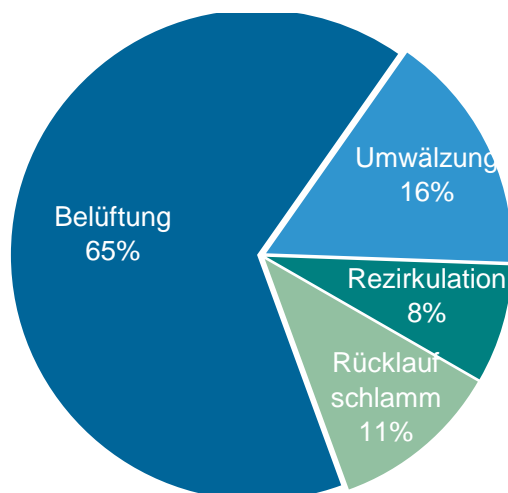


Bild 2.6: Verteilung des mittleren Stromverbrauchs auf die Teilbereiche der Biologie

2.2.2 Verbrauch der mechanischen Reinigungsstufe

Die gesamte mechanische Reinigungsstufe macht mit einem spezifischen Stromverbrauch in Höhe von 1,8 kWh/(EW*a) nur etwa 4 % des Gesamtverbrauchs der Abwasserreinigung aus. Die Teilschritte der Mechanik bestehen dabei aus der Rechenanlage (inklusive Rechengutwäsche), dem Sandfang und der Vorklärung (inklusive Primärschlammabzug).

Als größter Verbraucher ist der Sandfang anzusehen. Auf Basis der vorliegenden Daten ist allerdings nicht zwischen belüfteten und unbelüfteten Sandfängen zu unterscheiden. Gerade die Intensität der Belüftung hat jedoch einen hohen Einfluss auf den Stromverbrauch.

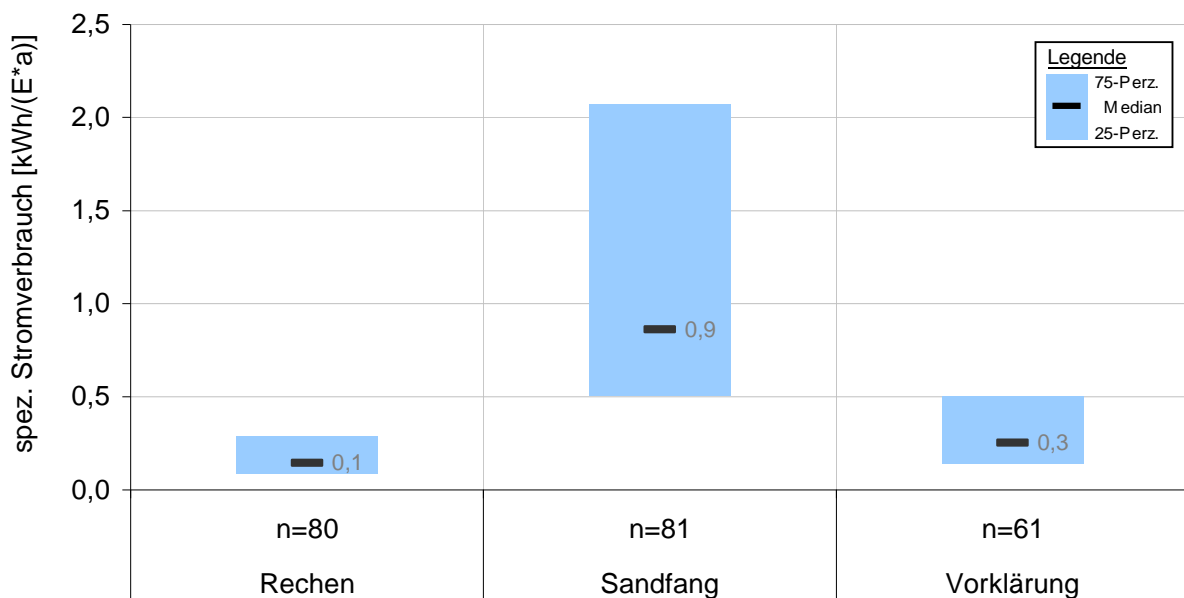


Bild 2.7: Spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche der Mechanik

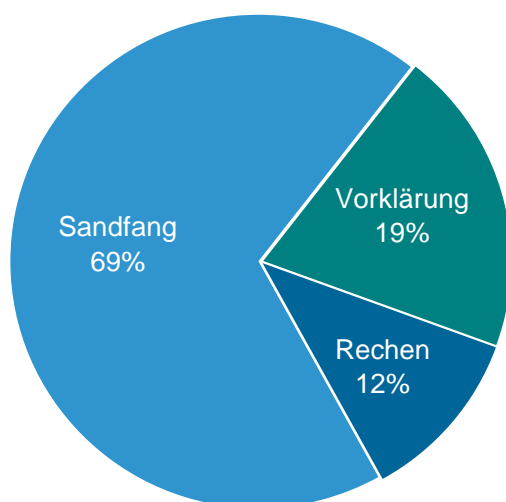


Bild 2.8: Verteilung des mittleren Stromverbrauchs auf die Teilbereiche der Mechanik

2.2.3 Verbrauch der Schlammbehandlung

Der einwohnerspezifische Stromverbrauch der Schlammbehandlung liegt bei 3-7 kWh/(E*a), mit einem Medianwert in Höhe von 4,6 kWh/(E*a). Damit entspricht der Verbrauch der Schlammbehandlung im Mittel etwa 11 % des Gesamtverbrauchs einer kommunalen Kläranlage. Die Behandlung der anfallenden Klärschlämme erfordert die verfahrenstechnischen Teilschritte: Voreindickung, Schlammstabilisierung, Nacheindickung und Entwässerung. Etwa die Hälfte des Strombedarfs entfällt dabei auf die Faulstufe und etwa ein Drittel auf die Schlammentwässerung. Bei näherer Betrachtung der Verbrauchsanteile innerhalb der Schlammbehandlung weist insbesondere die Faulstufe eine ungleiche Verteilung mit hoher Streuung auf (siehe Bild 2.9). Auch die Daten zum Stromverbrauch der Schlammentwässerung variieren deutlich. Dies ist in erster Linie auf die unterschiedlichen verfahrenstechnischen Gegebenheiten und Variationen zurückzuführen.

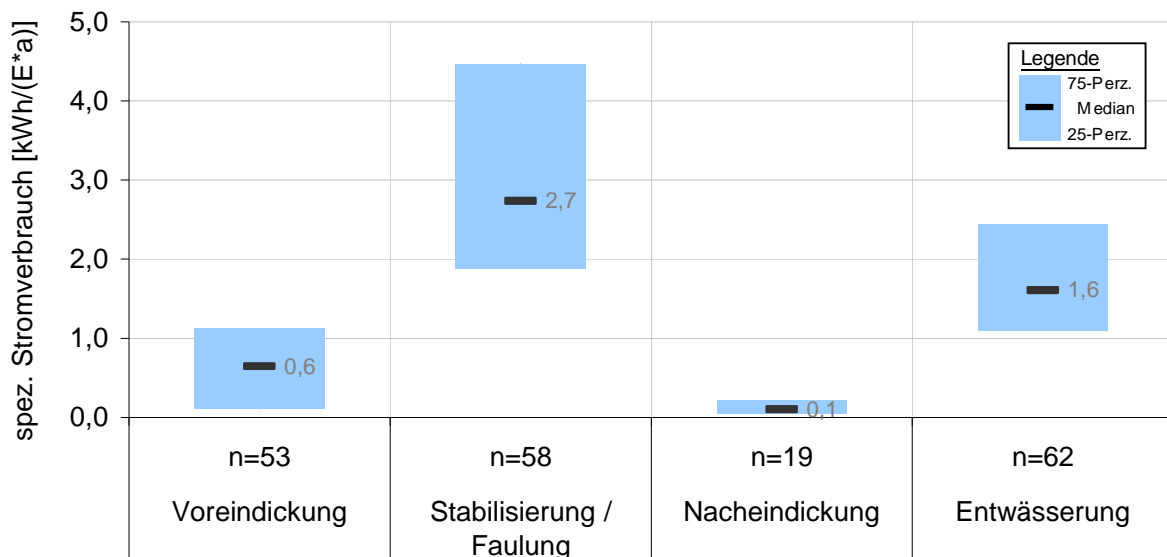


Bild 2.9: Spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche der Schlammbehandlung

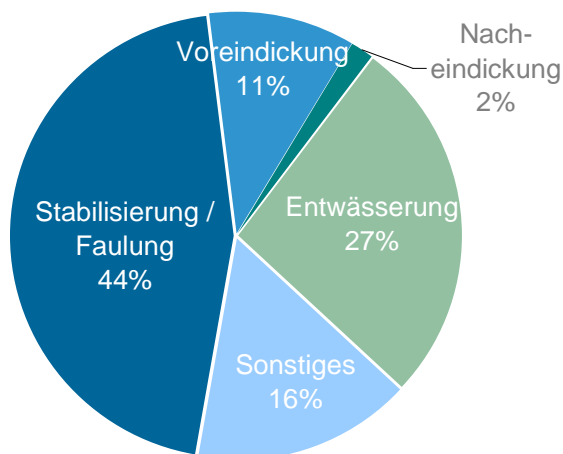


Bild 2.10: Verteilung des Stromverbrauchs auf die Teilbereiche der Schlammbehandlung

2.2.4 Verbrauch der Infrastruktur

Die Infrastruktur besteht naturgemäß aus vielen kleineren Einzelverbrauchern, die sich zum Teil nur schwer zusammenfassen bzw. differenzieren lassen. In Anlehnung an das Energiehandbuch-NRW kann eine Grobeinteilung in die Hauptverbraucher (Elektro-) Heizung, Licht, Lüftung und Brauchwasserversorgung vorgenommen werden. Neben diesen Verbrauchern werden je nach Kläranlage und Energieanalyse aber noch viele sonstige Verbraucher genannt.

Die spezifischen Stromverbräuche des Teilbereichs Infrastruktur sind für die einzelnen Verbraucher in Bild 2.11 dargestellt.

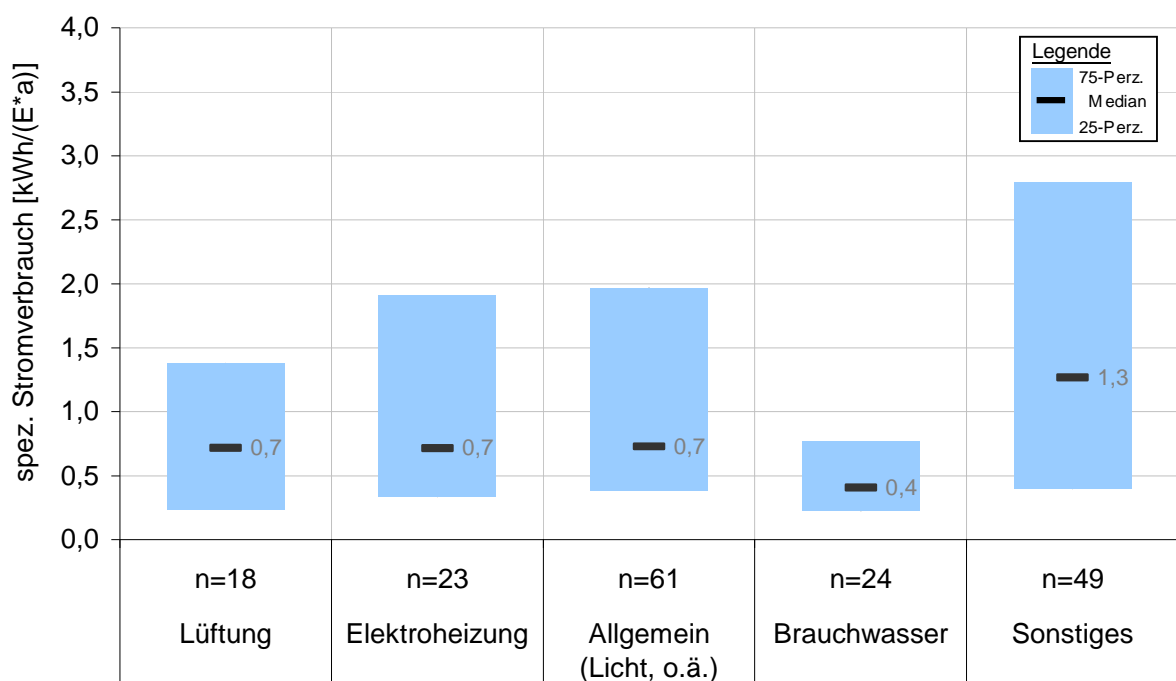


Bild 2.11: Spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche der Infrastruktur

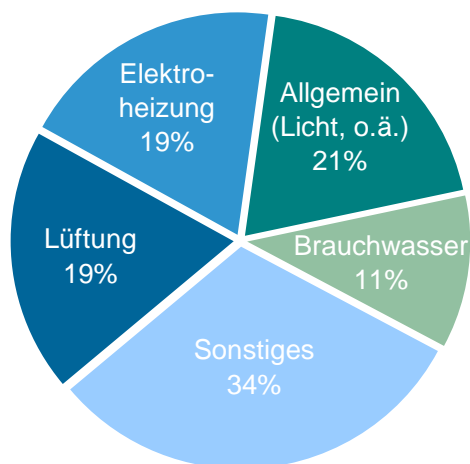


Bild 2.12: Verteilung des Stromverbrauchs auf die Teilbereiche der Infrastruktur

2.3 Stromverbrauch nach Art der Schlammstabilisierung

Die Art der Schlammstabilisierung hat einen erheblichen Einfluss auf den Energiehaushalt der Abwasserreinigung. Mit der Verkürzung des Schlammalters von einer simultan aerob stabilisierenden Anlage zu einer Anlage mit reiner Nährstoffelimination steigt der Anteil des mit dem Überschussschlamm aus der biologischen Stufe abgezogenen biologisch abbaubaren CSB. Bei Einsatz einer Vorklärung wird der Anteil des über den Schlamm (hier Primärschlamm) entnommenen CSB nochmals vergrößert. Der Anteil des CSB, der in der biologischen Stufe veratmet wird, geht proportional dazu zurück. Der im Rohschlamm enthaltene abbaubare CSB wird bei der Schlammfäulung anaerob aufgeschlossen und in Methan überführt, welches energetisch für die Strom und Wärmeproduktion eingesetzt werden kann. Der mittlere spezifische Stromverbrauch der Gesamtanlage sowie der wichtigsten Verfahrensgruppen sind zum einen für die Anlagen mit anaerober Stabilisierung (Faulungsanlagen) und mit aerober Stabilisierung (Stabilisierungsanlagen) in Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Stromverbrauchsdaten von Faulungs- und Stabilisierungsanlagen

	spezifischer Stromverbrauch [kWh/(EW*a)]	
	Faulungsanlagen	Stabilisierungsanlagen
	n=68	n=25
Gesamtanlage (inkl. Hebewerke, Filtration u.ä.)	41,0	44,7
Mechanische Stufe	1,4	2,7
Biologie	24,2	32,6
Schlammbehandlung	5,7	2,7
Infrastruktur	2,9	2,8

Für die Stabilisierungsanlagen zeigt sich, wie zu erwarten, insbesondere bei der biologischen Reinigungsstufe ein im Vergleich zu Faulungsanlagen deutlich erhöhter Stromverbrauch. Im Mittel verbraucht die Biologie bei aerober Schlammstabilisierung 32,6 kWh/(EW*a), wohingegen bei anaerober Stabilisierung nur 24,2 kWh/(EW*a) für die biologische Abwasserreinigung entfallen. Bei der Schlammfäulung sind neben der Stromeigenproduktion aus Faulgas und der eingesparten Belüftungsenergie allerdings auch die zusätzlichen Verbraucher zu berücksichtigen. Dazu zählen die Faulraumbeschickung, Heizschlamm-pumpen sowie Aggregate zur Umwälzung des Faulraums. Die Differenz des mittleren Stromverbrauchs der Schlammbehandlung übersteigt jedoch nicht die eingesparte Belüftungsenergie.

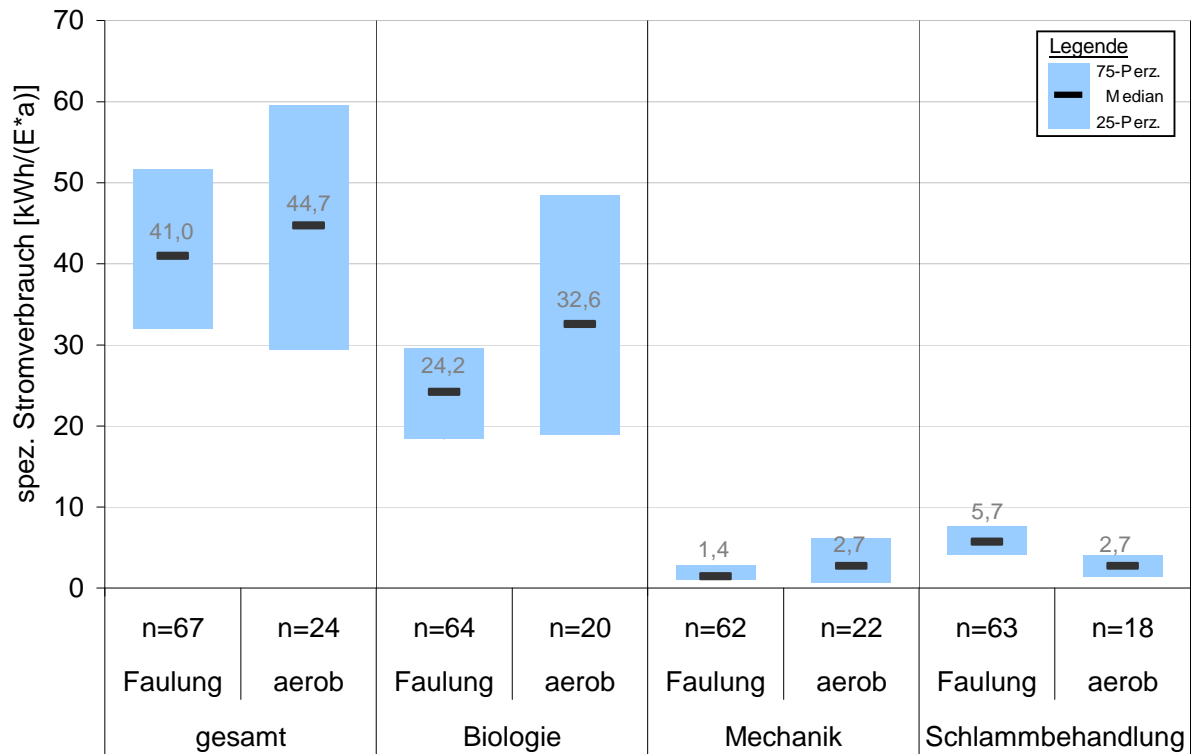


Bild 2.13: Stromverbrauch der Verfahrensgruppen nach Stabilisierungsverfahren

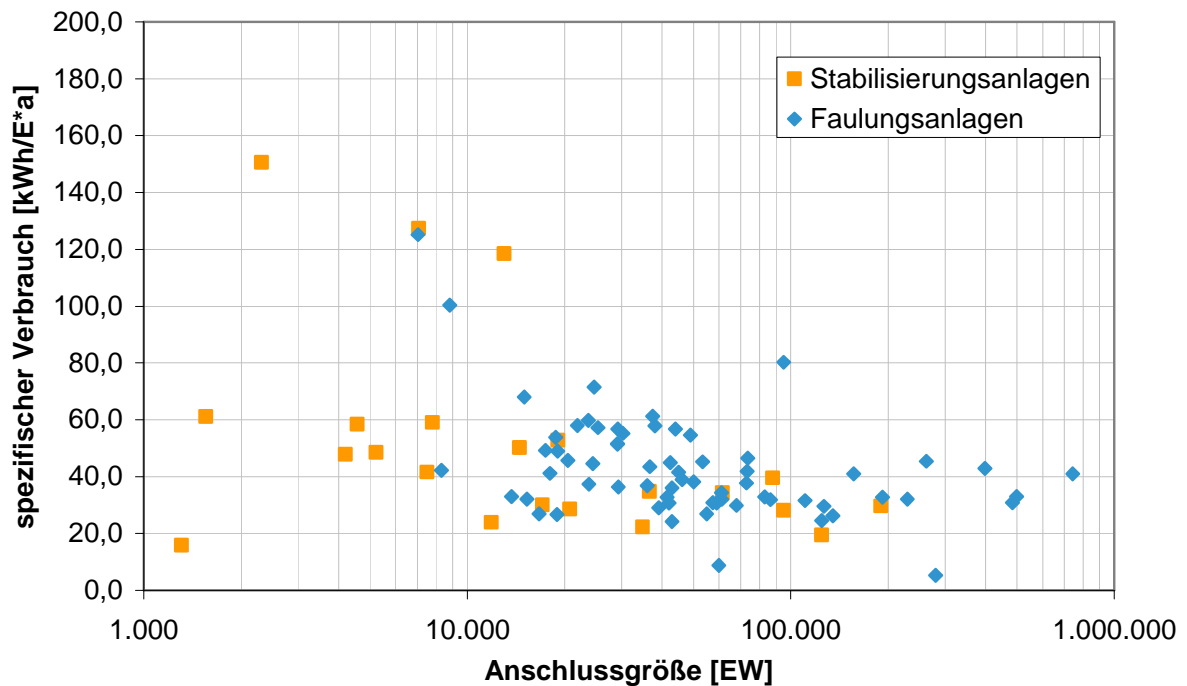


Bild 2.14: Stromverbrauch nach mittlerer Anschlussgröße getrennt nach Stabilisierungsart

2.4 Wärmebezug

Neben dem Stromverbrauch ist ebenso der Wärmebedarf einer Kläranlage von Bedeutung. Dies gilt insbesondere für Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung, da hier selbst in der kalten Jahreszeit eine möglichst gleichbleibende Faulraumtemperatur von etwa 37 °C angestrebt wird. Der spezifische externe Wärmebezug gibt dabei Auskunft über den Einkauf von Primärenergieträgern wie Heizöl und Erdgas, die zur Bereitstellung der Wärmeenergie bezogen werden. Die Summenlinie in Bild 2.15 zeigt den spezifischen externen Wärmebezug der ausgewerteten Kläranlagen. Im Mittel wird eine thermische Energie in Höhe von 2,6 kWh_{th}/(E*a) extern bezogen. Allerdings handelt es sich um eine sehr ungleiche Verteilung, bei der nur etwa 25 % der Anlagen ohne externen Wärmebezug auskommen.

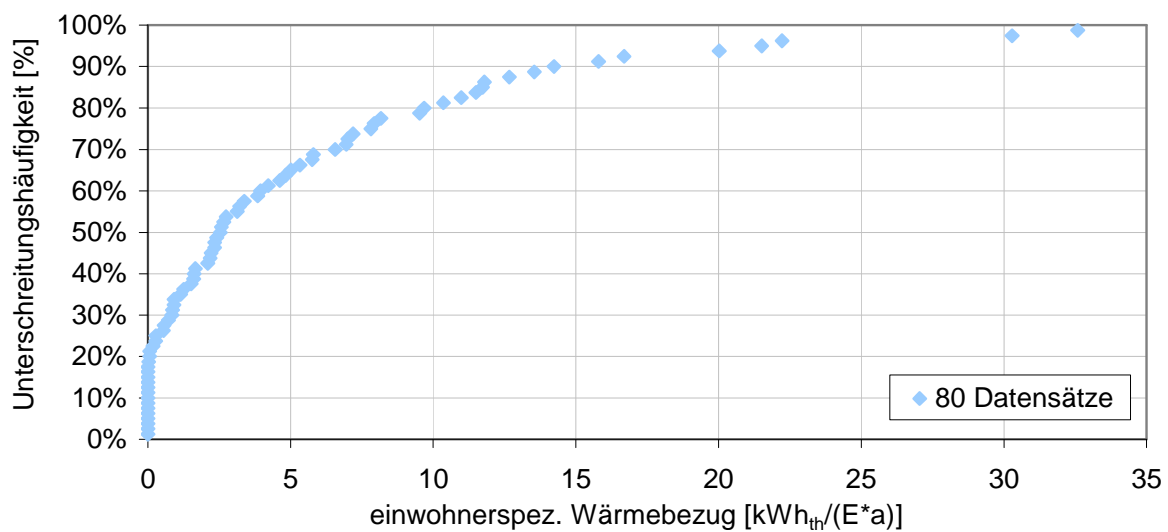


Bild 2.15: Verteilung des spezifischen Wärmebezugs über externe Energieträger

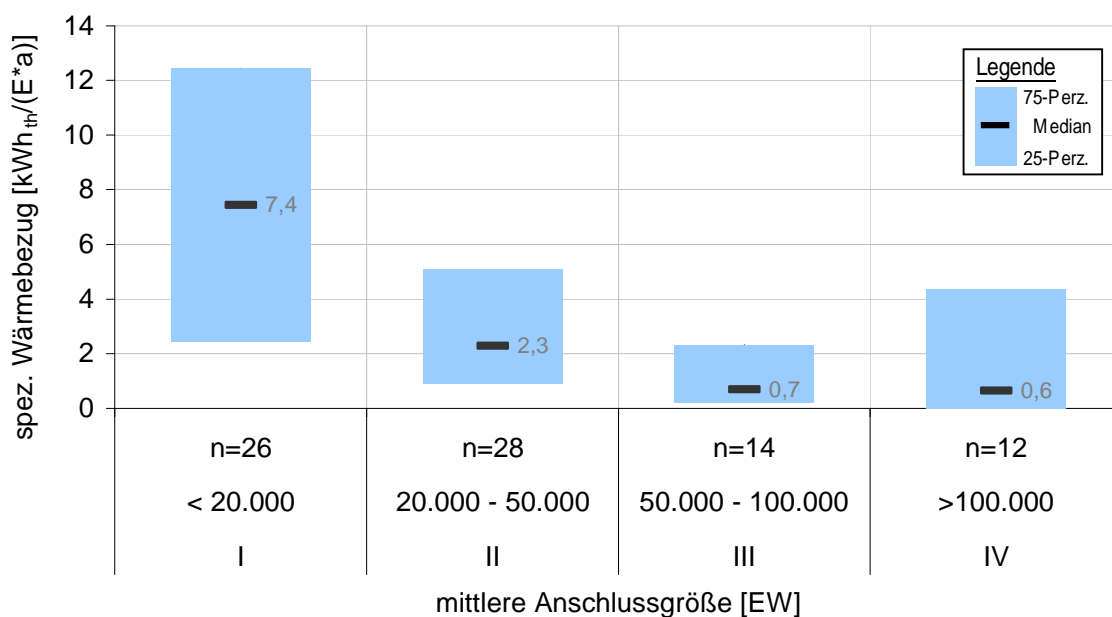


Bild 2.16: Wärmebezug nach Anschlussgröße

3 Energieproduktion

Auf 67 von 91 Kläranlagen, deren Energieanalysen ausgewertet wurden, findet eine Stabilisierung der anfallenden Klärschlämme in einer separaten Faulstufe unter anaeroben Bedingungen statt (vgl. dazu Bild 1.2). Für diese Kläranlagen werden in den nachfolgenden Unterkapiteln die Faulgaserzeugung und –nutzung sowie die Eigenversorgungsgrade an Strom und Wärme ausgewertet. Bei der Schlammfaulung wird dabei die in der organischen Fracht des Rohschlammes gebundene Energie anaerob aufgeschlossen und in Methan überführt, welches energetisch genutzt werden kann.

Zur Verwertung des Energieträgers „Faulgas“ gibt es mehrere Nutzungswege. Die Energieausbeute bei der Erzeugung von elektrischer Energie und Heiz- bzw. Prozesswärme ist dabei maßgeblich von dem Wirkungsgrad der eingesetzten Aggregate abhängig. Die Nutzungsmöglichkeiten sind zusammenfassend in Bild 3.1 dargestellt.

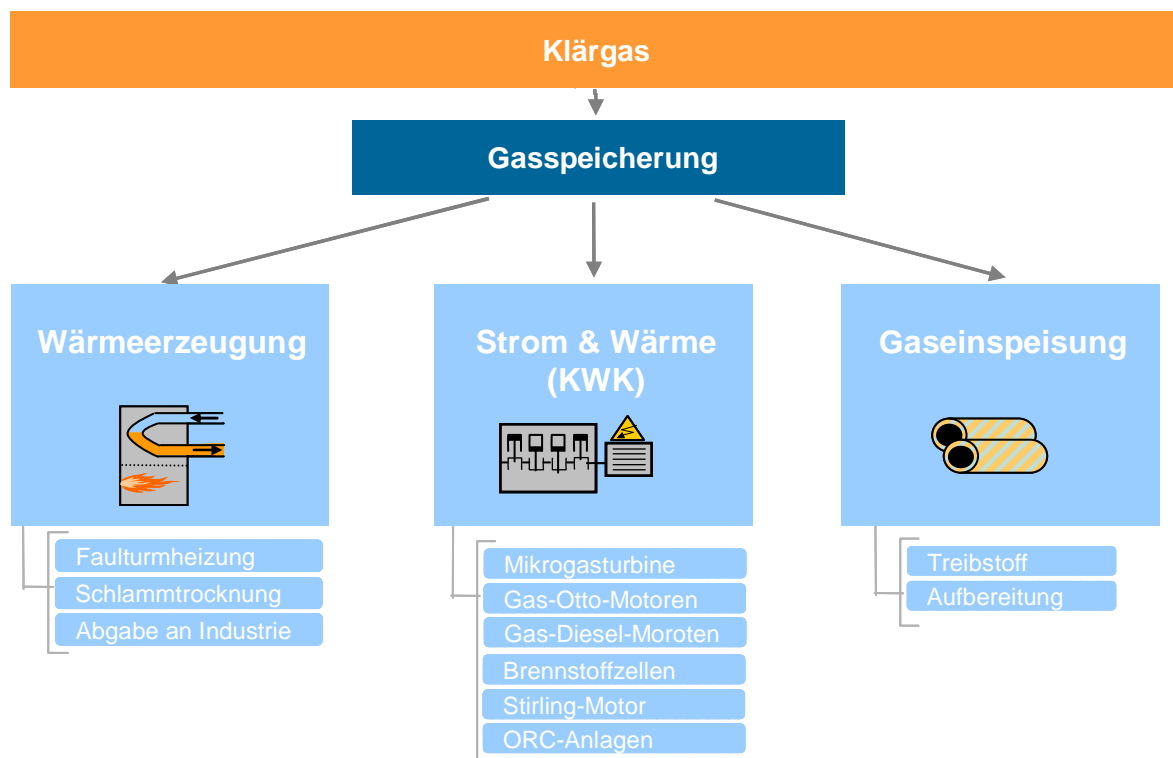


Bild 3.1: Nutzungsmöglichkeiten des anfallenden Klärgases

Die weitestgehende Deckung des Energiebedarfs der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung durch Eigenproduktion stellt neben der Reduktion des einwohnerspezifischen Energieverbrauchs die zweite wesentliche Säule zur Steigerung der Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen dar. Sie ist aus Gründen der Nachhaltigkeit mit einer Reduktion des standortbezogenen CO₂-Ausstoßes wie auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufgrund der weiter steigenden Kosten für fremdbezogene Energie von großer Bedeutung.

3.1 Faulgaserzeugung

Faulgasanfall bezogen auf zugeführte Organik

Bezogen auf die zugeführte Organik wurden für die Anlagen mit Schlammfäulung im IST-Zustand spezifische Klärgasausbeuten von 300 bis 600 $l_N/kg\ oTR_{zu}$ ermittelt (siehe Bild 3.2). Der Median der Gasausbeute beträgt 460 $l_N/kg\ oTR_{zu}$ und liegt damit knapp über dem Richtwert in Höhe von 450 $l_N/kg\ oTR_{zu}$ gemäß Energiehandbuch NRW bzw. in dem Wertebereich, welcher gemäß DWA-A 216 (Gelbdruck) als Idealwert angegeben wird.

Ein Großteil der untersuchten Kläranlagen hat damit bereits im IST-Zustand (Untersuchungszeitraum: 2007 - 2011) eine sehr gute Faulgasausbeute. Als Grund für die hohe Ausbeute sind einerseits die auf einigen Anlagen praktizierte Mitausfäulung von energiereichen Co-Substraten und andererseits die langen Faulzeiten zu nennen, die insbesondere für kleinere Anlagen deutlich über den erforderlichen Mindestverweilzeiten im Faulbehälter liegen (MKULNV NRW, 2014).

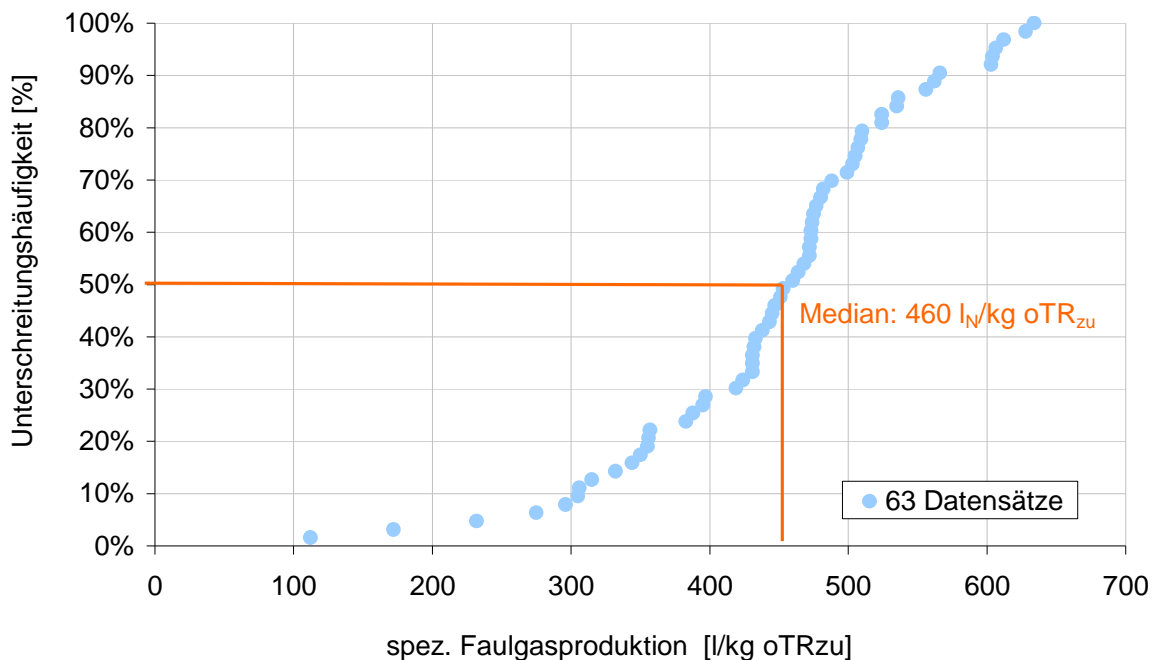


Bild 3.2: Faulgasproduktion bezogen auf die zugeführte Organik

Einwohnerspezifische Faulgasproduktion

Die einwohnerspezifische Faulgasausbeute liegt im Mittel (Median) bei $23,5 \text{ l}_N/(\text{E}^*\text{d})$ und damit über dem üblicherweise angenommenem Richtwert in Höhe von $20,0 \text{ l}_N/(\text{E}^*\text{d})$. Dies bestätigt die hohe Faulgasproduktion der meisten Anlagen.

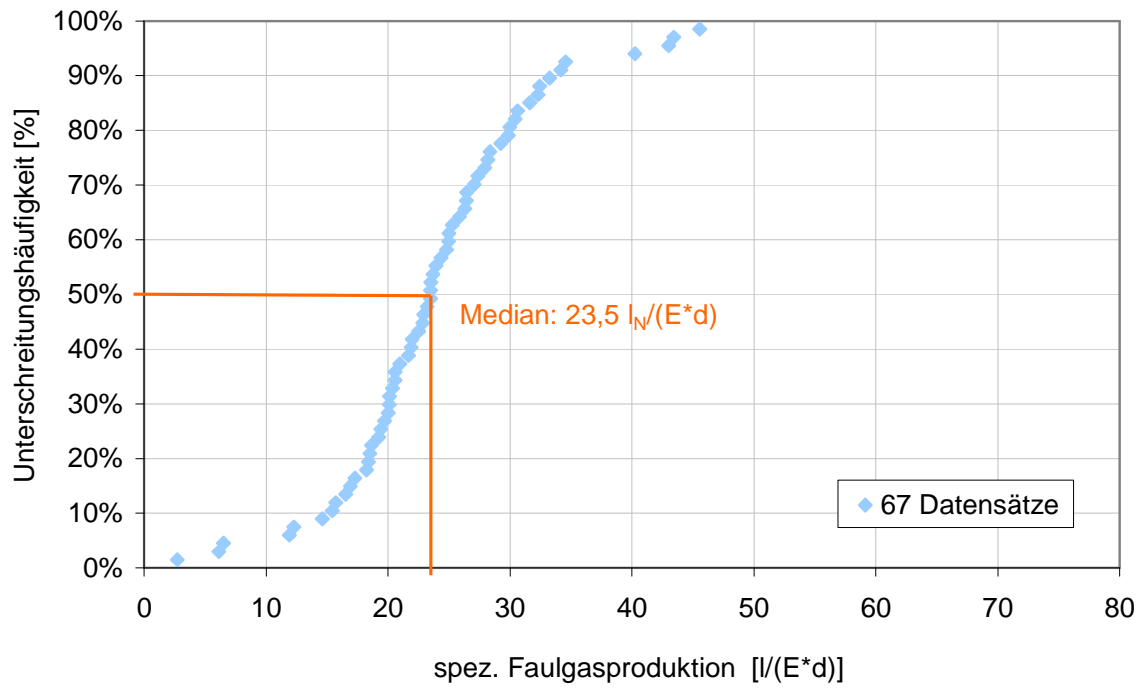


Bild 3.3: Verteilung der einwohnerspezifischen Faulgasproduktion

3.2 Faulgasnutzung

Neben der Senkung des Energieverbrauchs wird in den Energieanalysen gleichermaßen die optimierte Nutzung des anfallenden Faulgases untersucht. Als Bewertungsfaktoren dienen dabei der Anteil des genutzten und somit nicht der Notfackel zugeführten Faulgases sowie die prozentuale Umwandlung der im Gas enthaltenen Energie in Kraft bzw. Elektrizität. Des Weiteren wird für die abschließende Bewertung der prozentuale Eigenversorgungsgrad an Strom und Wärme berechnet.

Grad der Faulgasnutzung

Die Auswertung der Energieanalysen des IPA-Förderprogramms ergibt im Mittel (Median) eine Faulgasnutzung in Höhe von 94 %. Aus der Summenlinie in Bild 3.4 wird jedoch ersichtlich, dass auf vielen Anlagen ein erheblicher Anteil des Faulgases abgefackelt wird.

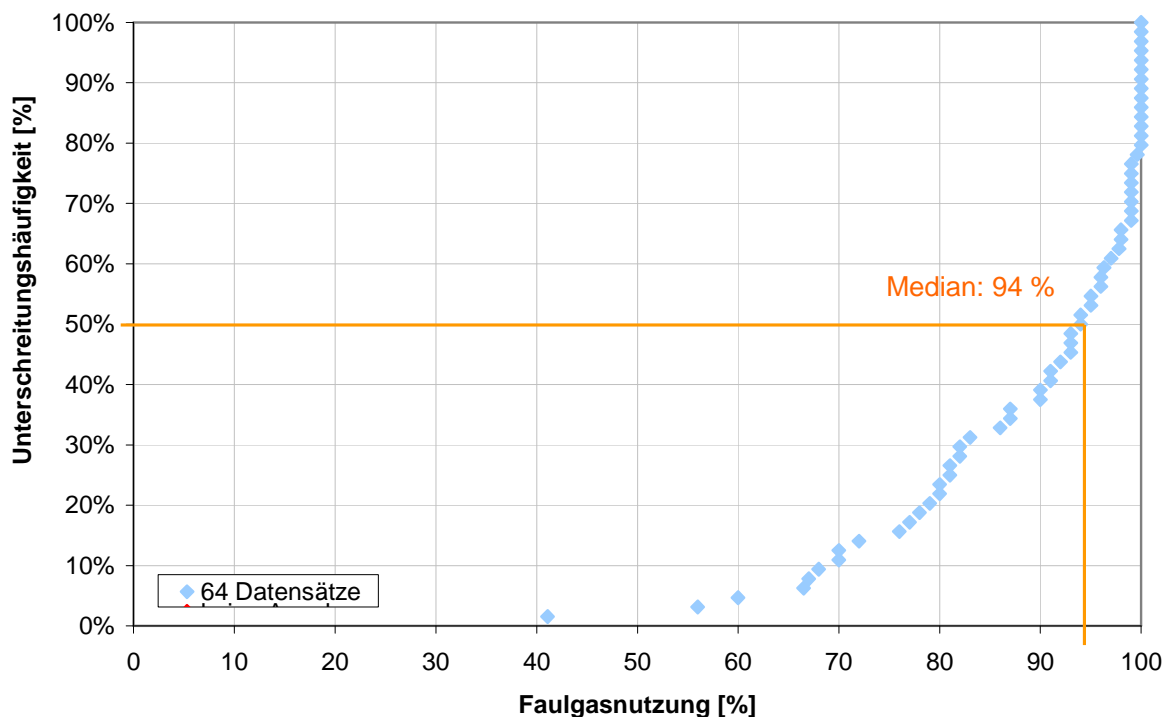


Bild 3.4: Grad der Faulgasnutzung im IST-Zustand

Wie Bild 3.5 zeigt, gilt dies hauptsächlich für Kläranlagen mit Anschlussgrößen < 100.000 EW. Insbesondere die kleineren Anlagen verfügen zum Teil nur über einen Kessel zur Wärmeerzeugung ohne Kraft-Wärme-Kopplung. Infolge eines Wärmeüberschusses im Sommer muss aus diesem Grund ein hoher Anteil des Faulgases ungenutzt der Notfackel zugeführt werden.

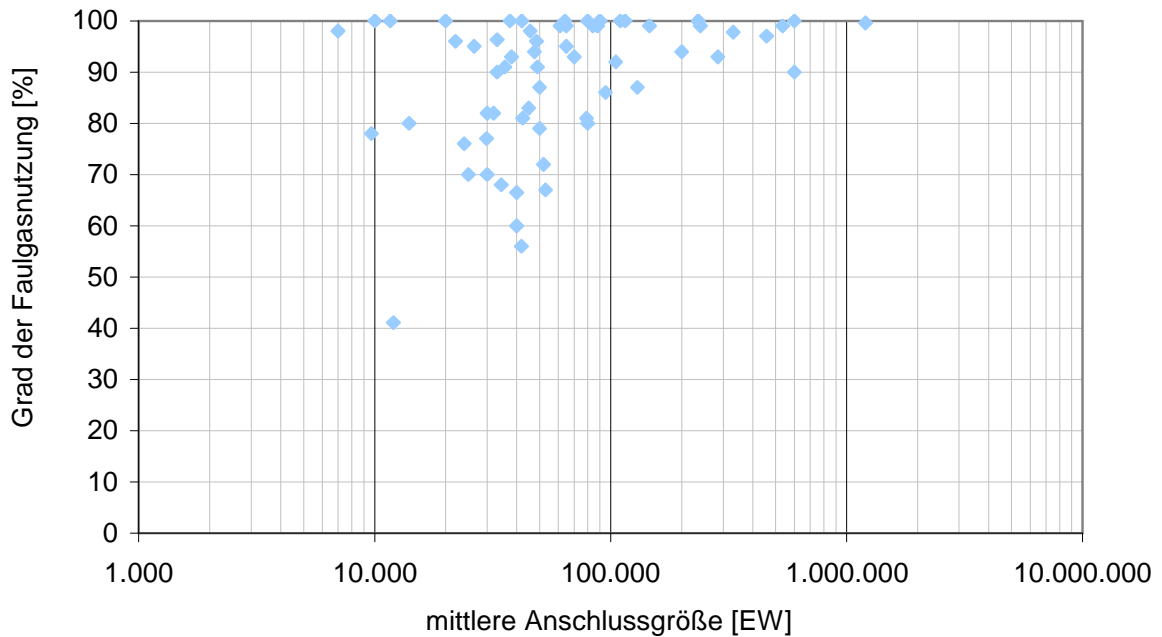


Bild 3.5: Grad der Faulgasnutzung in Abhängigkeit der mittleren Anschlussgröße (n=64)

Grad der Faulgasumwandlung in Kraft/Elektrizität

Bezogen auf die gesamte Faulgasproduktion, wird die Energie des Faulgases im Mittel zu 22 % in Elektrizität umgewandelt. Die Faulgasumwandlung liegt demnach unter dem Richtwert gemäß Energiehandbuch in Höhe von 29 %. Von den untersuchten Anlagen verfügten zum Zeitpunkt der Untersuchung etwa 30 % über kein Aggregat zur Verstromung des anfallenden Faulgases (ausschließlich Wärmeerzeugung ohne Kraft-Wärme-Kopplung). Ohne Berücksichtigung dieser Anlagen liegt die Gasumwandlung allerdings mit etwa 27 % im Mittel dennoch unter dem Richtwert des Energiehandbuches.

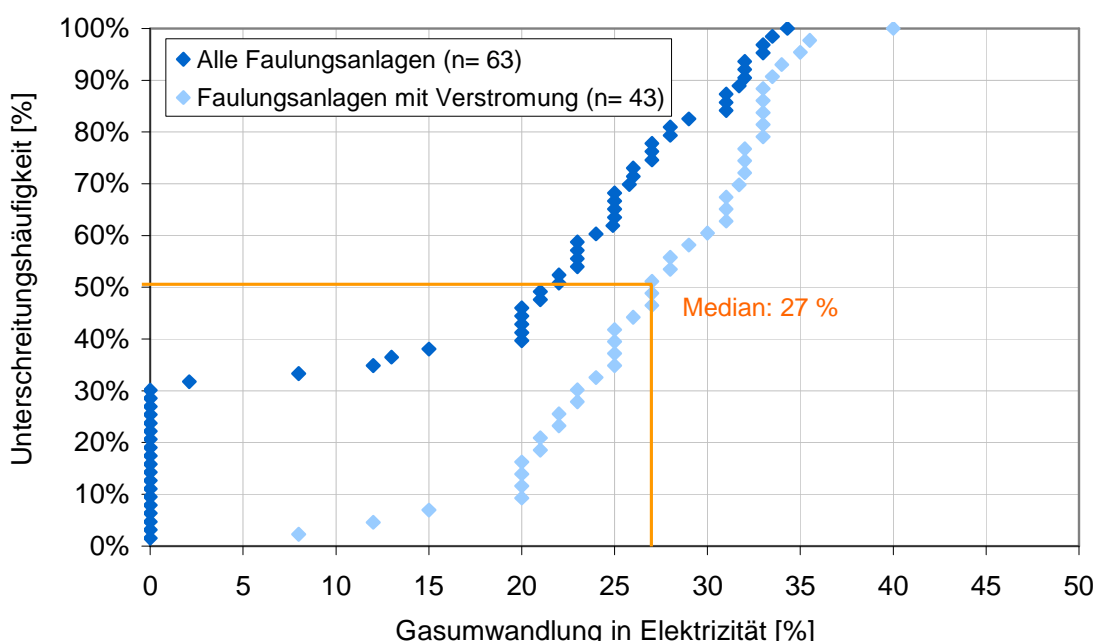


Bild 3.6: Umwandlungsgrad des Faulgases in Kraft bzw. Elektrizität

Eigenversorgungsgrad Elektrizität und Wärme

Der geringe Grad der Umwandlung von Faulgas in Elektrizität führt in Verbindung mit den teilweise sehr hohen Energieverbrauchswerten zu einem insgesamt niedrigen mittleren Strom-Eigenversorgungsgrad in Höhe von 29 %. Sofern nur jene Anlagen berücksichtigt werden, die zum Zeitpunkt der Energieanalyse über ein Aggregat zur Verstromung verfügten, erhöht sich der Wert auf 43 %. Bezogen auf die Versorgung mit Wärme liegt der mittlere Eigenversorgungsgrad dagegen - bereits ohne die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen - bei etwa 93 % (siehe Bild 3.8).

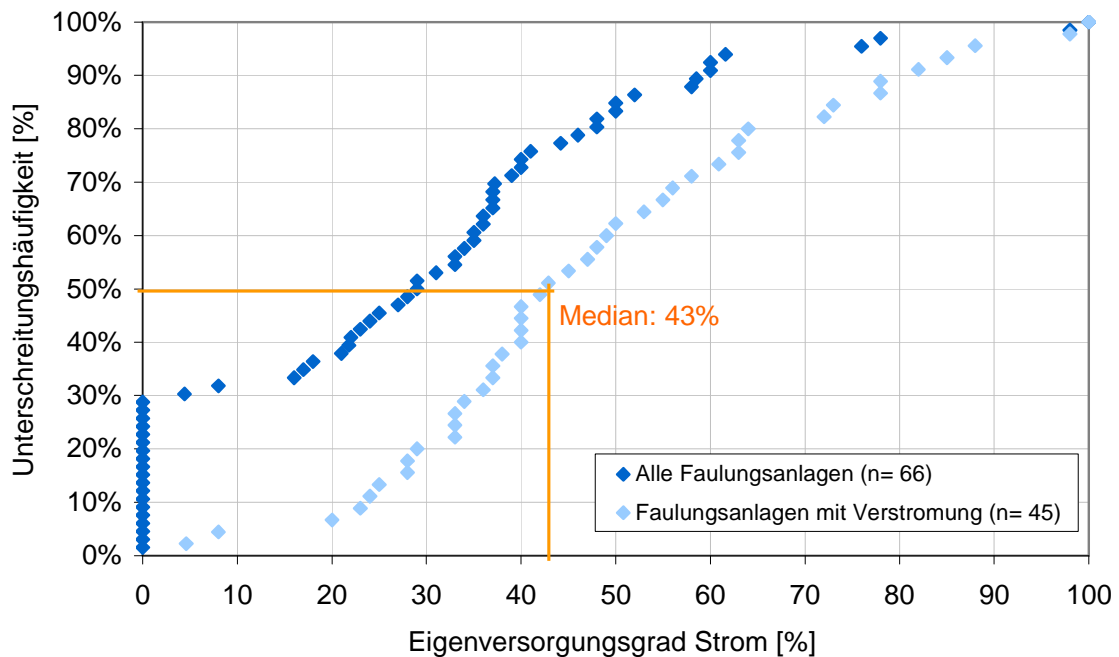


Bild 3.7: Eigenversorgungsgrad für Strom im IST-Zustand

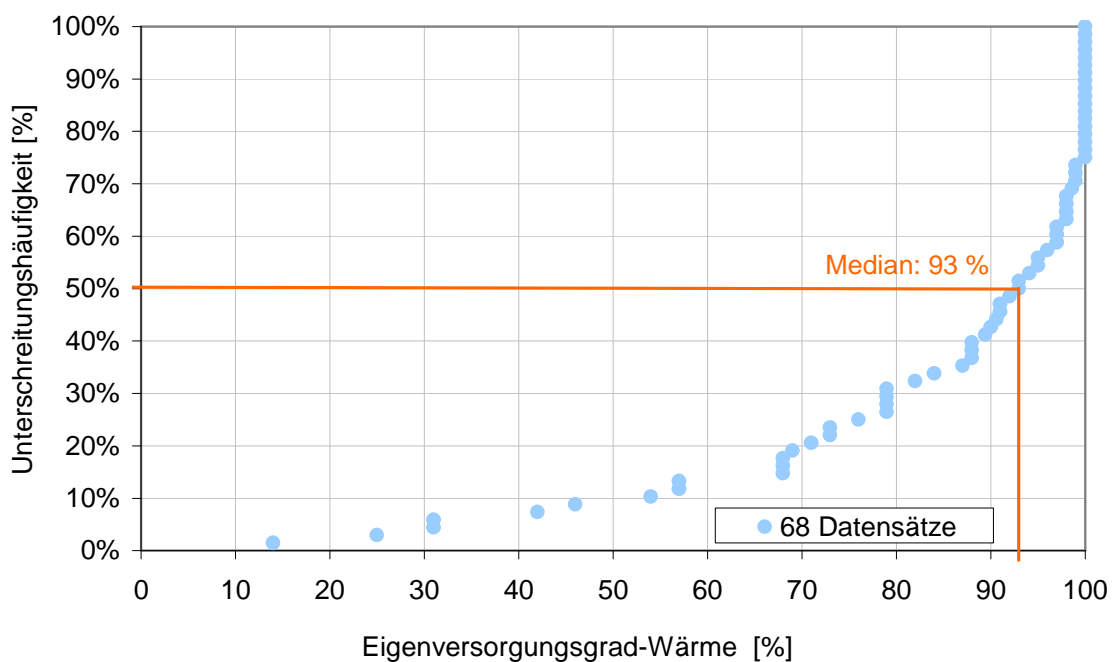


Bild 3.8: Eigenversorgungsgrad für Wärme im IST-Zustand

4 Einsparpotentiale und Maßnahmen zur Optimierung

Aus den Untersuchungen der energetischen IST-Situation werden in den Energieanalysen Maßnahmen zur Optimierung der Energieeffizienz abgeleitet. Durch energieoptimierte Betriebsführung oder den Einsatz energieeffizienter Aggregatetechnik tragen diese Maßnahmen dazu bei, den Energieverbrauch zu senken. Die Optimierungsmaßnahmen werden dabei in drei Realisierungsphasen zeitlich unterteilt:

- **Sofortmaßnahmen (S)** sind sehr rentabel, erfordern geringe Investitionen und können auf Grund der technischen Randbedingungen sofort realisiert werden.
- **Kurzfristige Maßnahmen (K)** sind in der Regel insgesamt wirtschaftlich, aber mit entsprechenden Investitionen verbunden.
- **Abhängige Maßnahmen (A)** sind an bestimmte Bedingungen geknüpft und können vielfach erst mittel- bzw. langfristig realisiert werden.

In den 91 ausgewerteten Energieanalysen wurden in Summe 751 Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen. Anzahl, Einsparpotential und Kategorisierung dieser Maßnahmen sind in Bild 4.1 getrennt nach Verfahrensgruppen dargestellt. Die größte Anzahl von Maßnahmen (44 %) betreffen die biologische Stufe. Wie bereits in Kapitel 2 dargestellt, handelt es sich hierbei um die Verfahrensgruppe mit dem größten Energieverbrauch, so dass sich auch insgesamt das bei Weitem größte Einsparpotential ergibt.

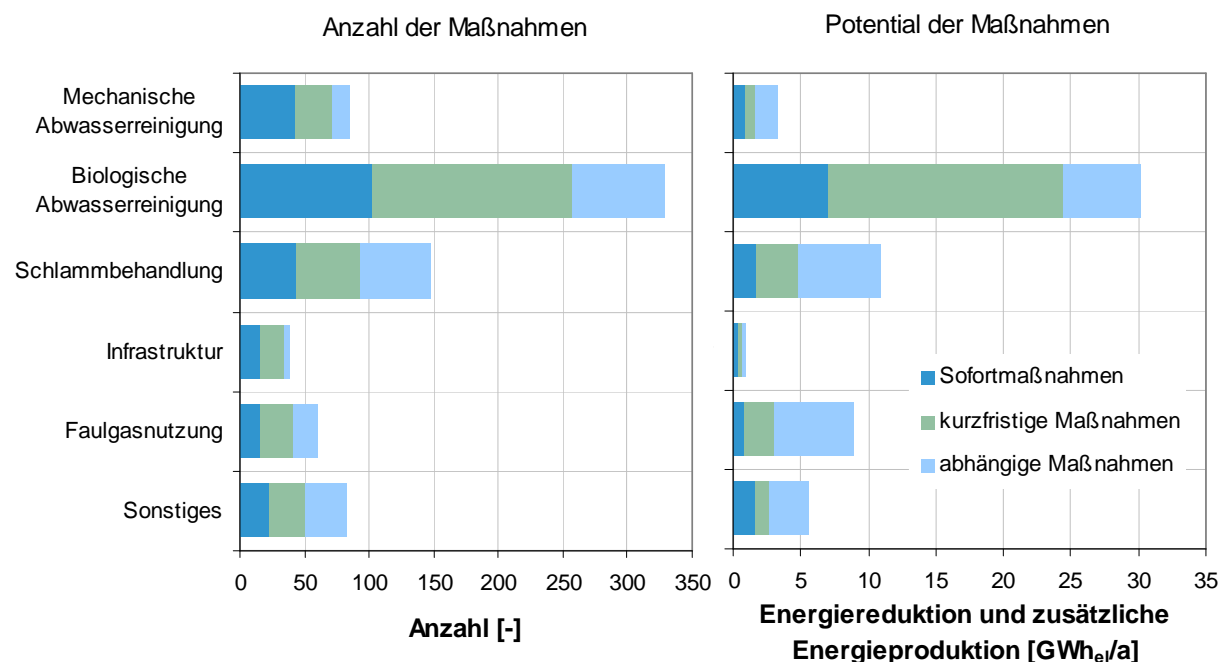


Bild 4.1: Anzahl und Potential der Maßnahmen getrennt nach Verbrauchergруппen

4.1 Einsparpotentiale

Das energetische Einsparpotential leitet sich aus der Bewertung des IST-Zustandes ab. Hierbei werden die ermittelten Verbrauchsdaten mit theoretischen Idealwerten verglichen, die sich wiederum aus dem Verbrauch einer Modellanlage (Energiehandbuch-NRW) oder aus errechneten anlagenspezifischen Kennwerten ergeben (DWA-A 216).

Die ausgewerteten Energieanalysen aus den Jahren 2007 bis 2011 orientieren sich noch sehr eng an das Energiehandbuch und beziehen sich daher auf Idealwerte aus dem Energiehandbuch, die nur teilweise an die Kläranlagengröße bzw. an die Ausstattung angepasst wurden.

Neben dem Vergleich mit den Idealwerten kann das erreichbare Einsparpotential als Differenz des IST-Verbrauchs zu dem anlagenspezifischen Verbrauch nach Umsetzung aller identifizierten Maßnahmen angesehen werden.

Das prozentuale Einsparpotential im Vergleich zu der IST-Situation zeigt Bild 4.2. Der Stromverbrauch kann demnach auf Basis der Idealwerte um 33 % reduziert werden, wohingegen bei Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen im Mittel nur 25 % eingespart werden.

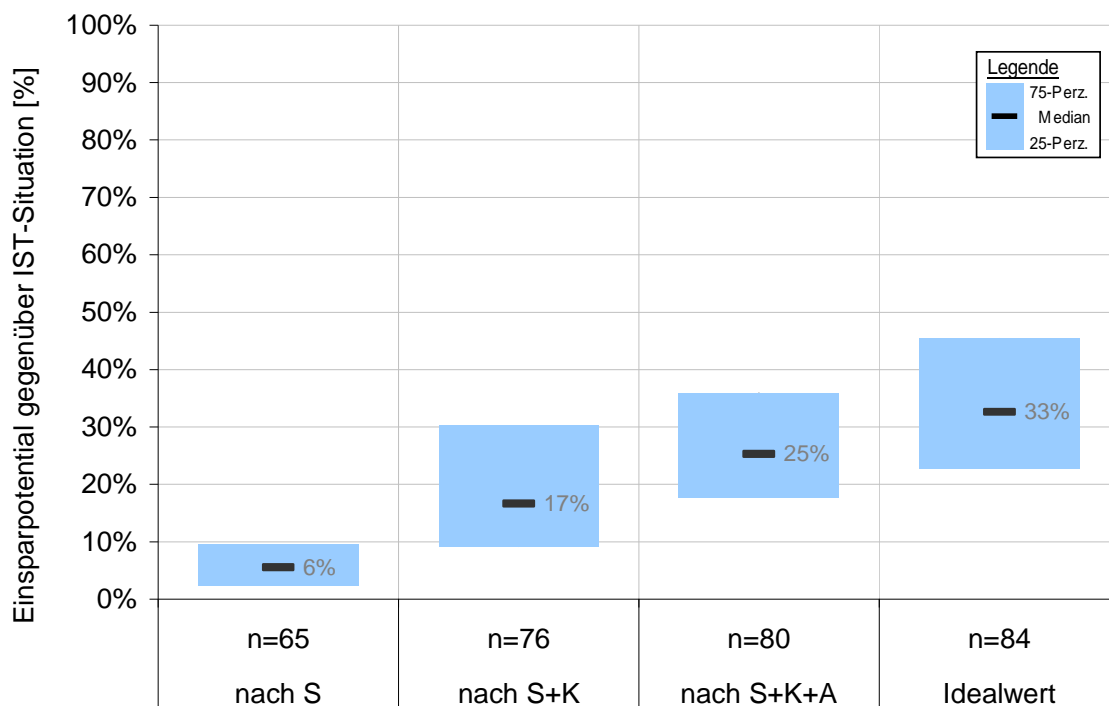


Bild 4.2: Prozentuales Einsparpotential gegenüber dem IST-Zustand nach Umsetzung der Maßnahmen und im Vergleich zu den gewählten Idealwerten

Die größten relativen Einsparungen von 33 % lassen sich für die kleineren Kläranlagen unter < 20.000 EW Anschlussgröße erzielen, wohingegen die Anlagen über 100.000 EW ihren Stromverbrauch im Mittel nur zu 16 % senken können (Bild 4.3).

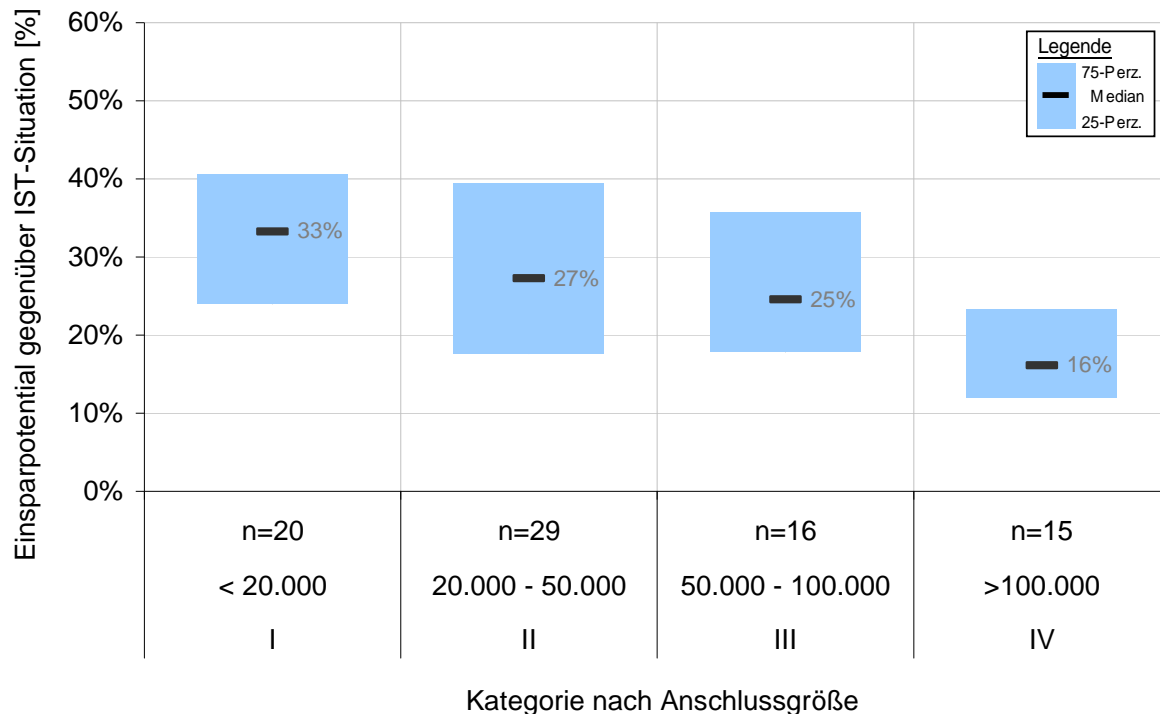


Bild 4.3: Prozentuales Einsparpotential im Vergleich nach Anlagengröße bei Umsetzung aller Maßnahmen

Die Einsparungen führen zu einer Reduzierung des mittleren spezifischen Gesamtstromverbrauchs von 42 kWh/(E*a) auf 29,3 kWh/(E*a). In Bild 4.5 ist hierzu der spezifische Verbrauch nach Umsetzung der Maßnahmenkategorien sowohl dem IST-Zustand als auch den Idealwerten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass der erreichbare mittlere Verbrauch nach Umsetzung aller Maßnahmenpakete nahe an den Idealwert in Höhe von 27 kWh/(E*a) kommt.

Die Einsparungen der einzelnen Maßnahmen sind in Bild 4.5 den verfahrenstechnischen Teilbereichen zugeordnet. Die Belüftung hat demnach mit Abstand das größte Einsparpotential gefolgt von der Faulgasnutzung, der jedoch zum größten Teil nur abhängige Maßnahmen zugeordnet wurden.

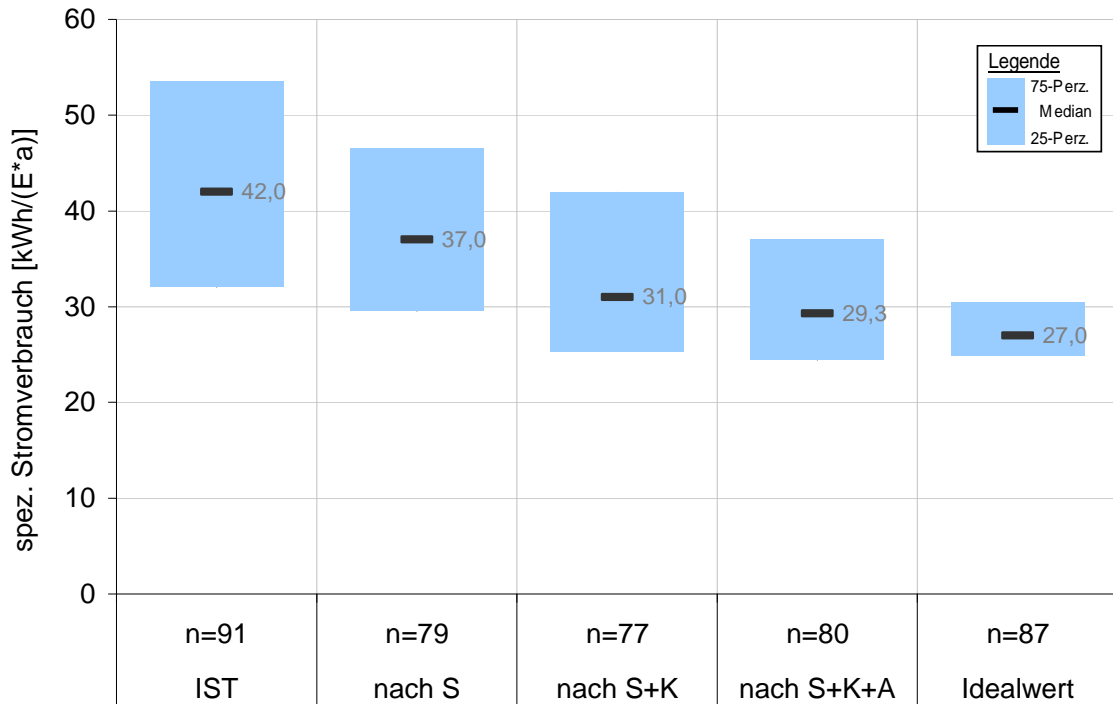


Bild 4.4: Erreichbarer Spezifischer Stromverbrauch nach Umsetzung der Maßnahmen

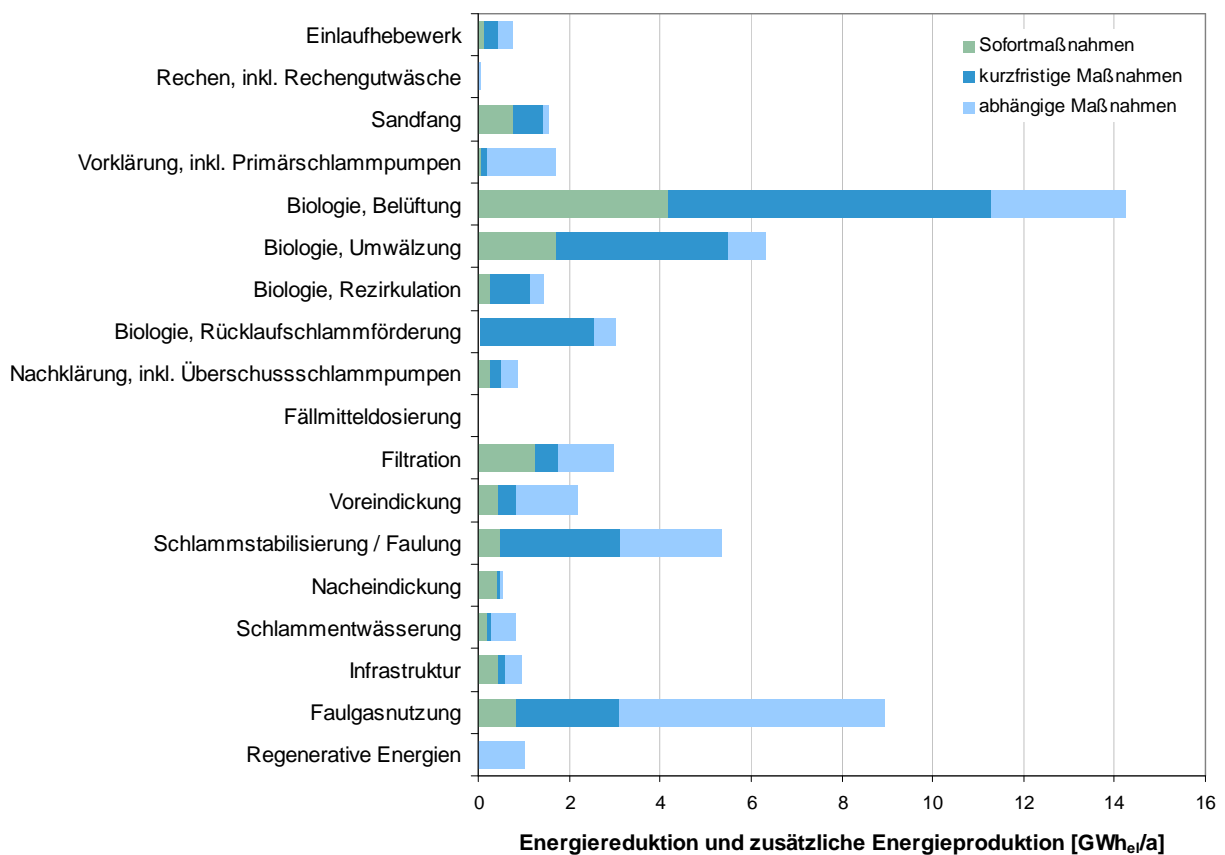


Bild 4.5: Potential der energetischen Optimierungsmaßnahmen (n=751) nach verfahrenstechnischen Teilbereichen untergliedert

4.2 Maßnahmenauswertung

Bei den untersuchten Maßnahmen variieren sowohl die Einsparpotentiale, als auch die notwendigen Zusatzinvestitionen. Als Folge ergeben sich erhebliche Unterschiede bei den Kosten-Nutzen-Verhältnissen. Die zugrundeliegenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind den jeweiligen Energieanalysen entnommen. D.h. die angesetzten Strombezugspreise zur Ermittlung der eingesparten Energiekosten sowie die angesetzten Zinssätze zur Kapitalisierung der Zusatzinvestitionen sind nicht einheitlich gewählt.

4.2.1 Optimierung der biologischen Reinigungsstufe

In Summe betreffen 44 % der Maßnahmen die biologische Reinigungsstufe, die damit von allen Verfahrensgruppen das größte Optimierungspotential aufweist. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Maßnahmen gibt die nachfolgende Tabelle 4.1.

Tabelle 4.1: Die häufigsten Maßnahmen im Bereich der biologischen Stufe

Verfahrensbereich	Maßnahmenbereich	Beispiele
Rücklaufschlamm-förderung	Betriebsweise	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung nach Zulaufmenge
	Maschinenteknik	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch alter Aggregate
Rezirkulation	Betriebsweise	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung in Abhängigkeit von $\text{NO}_3\text{-N}$
	Maschinenteknik	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch alter Aggregate
Umwälzung	Betriebsweise	<ul style="list-style-type: none"> • Zeittaktung bzw. Intervallregelung • Einbauorte überprüfen • Verriegelung bei Belüftung • Frequenzumrichter einbauen • Weniger Rührwerke (Strömungssimulationen) • Stoßbelüftung statt Rührwerke
	Maschinenteknik	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch alter Aggregate
Belüftung	Belüftungsregelung	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung in Abhängigkeit von $\text{NH}_4\text{-N}$ • Anpassung der Sauerstoffsollwerte • Implementierung einer Gleitdruckregelung
	Belüfterelemente	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch durch neue Systeme • Sanierung bzw. Reinigung
	Gebläse / Verdichter	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch nicht effizienter Gebläse • Betrieb kleiner Gebläse bei Schwachlast • Neuauslegung der Gebläse • Umstellung von Oberflächenbelüftung auf Druckbelüftung
Biologie allgemein		<ul style="list-style-type: none"> • Schlammalter reduzieren • Kaskadenschaltung • Außerbetriebnahme

Die Maßnahmen zur Optimierung des Stromverbrauchs der biologischen Stufe betreffen neben der Erneuerung oder Austausch der verfahrenstechnisch notwendigen Aggregate insbesondere betriebliche Optimierungen. Diese sind infolge der niedrigen Zusatzinvestitionen sehr wirtschaftlich. So haben die Maßnahmen zur Optimierung der Belüftungsregelung im Mittel ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von 0,1. Im Gegensatz dazu weisen insbesondere die maschinentechnischen Anpassungen der Gebläse oder der Rührwerke ein höheres Kosten-Nutzen-Verhältnis auf, so dass deren Umsetzung oft erst im Zuge des verschleißbedingten Austausches eines Aggregates möglich ist.

Die nachfolgende Tabelle 4.2 zeigt die mittlere Wirtschaftlichkeit pro Maßnahme für die einzelnen Bereiche der biologischen Stufe.

Tabelle 4.2: Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen im Bereich der biologischen Stufe

Verfahrensgruppe	Maßnahmenbereich	Anzahl	Kosten / Nutzen im Mittel pro Maßnahme				
			Reduktion Strombezug	Investitionskosten	Jahreskosten	Jahresnutzen	K/N
			[kWh _{el} /a]	[€]	[€/a]	[€/a]	-
Rücklaufschlammförderung	betriebstechnisch	n=29	88.608	37.994	1.415	6.491	0,2
	maschinentechnisch	n=19	146.394	65.963	5.869	11.413	0,5
Rezirkulation	betriebstechnisch	n=17	37.663	13.568	1.642	6.251	0,3
	maschinentechnisch	n=9	85.740	54.995	10.947	13.788	0,8
Umwälzung	betriebstechnisch	n=44	49.161	2.500	343	6.338	0,1
	maschinentechnisch	n=44	102.972	66.387	6.003	10.722	0,6
Belüftung	Belüftungsregelung	n=44	68.847	17.172	1.587	9.744	0,2
	Belüfter	n=33	125.135	86.443	6.211	23.133	0,3
	Gebläse	n=41	149.092	150.254	11.231	27.825	0,4
Biologie	Reduzierung Schlammalter	n=13	45.479	3.846	1.472	6.924	0,2
	Sonstiges	n=38	76.561	38.165	3.227	10.237	0,3

4.2.2 Optimierung der Schlammbehandlung

Mit einem Anteil von 20 % der vorgeschlagenen Maßnahmen weist die Schlammbehandlung neben der biologischen Stufe das nächstgrößte Optimierungspotential auf. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Maßnahmen gibt die nachfolgende Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: Die häufigsten Maßnahmen im Bereich der Schlammbehandlung

Maßnahmenbereiche	Beispiele
Umwälzung des Faulraums	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch der Umwälzpumpen / Mischer • getakteter Intervall-Betrieb vorhandener Aggregate
Voreindickung	<ul style="list-style-type: none"> • Installation einer maschinellen Überschuss-schlammeindickung
Entwässerung	<ul style="list-style-type: none"> • Austausch durch neue effizientere Technik
Faulraumtemperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Absenkung der Temperatur im Winter

Im Mittel ergeben sich pro Maßnahmenbereich die in Tabelle 4.4 aufgelisteten Kosten-Nutzen-Verhältnisse. Es wird deutlich, dass insbesondere die betriebstechnischen Maßnahmen wie Temperaturanpassungen oder das Absenken des Schlammalters die höchste Wirtschaftlichkeit aufweisen. Als häufigste Optimierungsmaßnahme ist jedoch eine Überprüfung der Faulraumumwälzung zu nennen.

Im Fokus steht bei den Maßnahmen die Verringerung des Energieeinsatzes und meist nur an zweiter Stelle die Steigerung der Energieausbeute, wobei sich diese dann überwiegend auf die Faulgasnutzung (z.B. Installation eines BHKW) oder eine Co-Fermentation beschränkt. Eine erhöhte Gasproduktion durch Verbesserung der Faulgasausbeute wird bei Umsetzung der Maßnahmen dagegen kaum betrachtet (Bild 4.6).

Tabelle 4.4: Verfahrensbereiche der vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen innerhalb der Schlammbehandlung mit Angaben zu Kosten und Nutzen

Maßnahmenbereich	Anzahl	Kosten / Nutzen im Mittel pro Maßnahme				
		Reduktion Strombezug	Investitions-kosten	Jahres-kosten	Jahres-nutzen	K/N
		[kWh _e /a]	[€]	[€/a]	[€/a]	-
Umwälzung Faulraum	n=43	41.128	25.981	2.260	6.669	0,3
Voreindickung	n=36	73.879	137.777	15.496	22.902	0,7
Entwässerung	n=15	55.956	319.239	15.948	9.296	1,7
Temperaturanpassung	n=13	12.020	769	15	6.816	0,0
Pumpen	n=9	32.770	16.955	1.608	4.742	0,3
Nacheindickung	n=9	37.681	6.128	227	5.174	0,0
Co-Fermentation	n=8	194.421	54.125	13.396	20.256	0,7
Prozesswasser	n=5	154.980	67.300	7.439	15.152	0,5
Wärmerückgewinnung	n=4	-	91.750	4.611	6.320	0,7
Faulstufe errichten	n=2	748.328	45.000	9.622	22.424	0,4
Desintegration	n=1	600.000	600.000	123.300	85.200	1,4

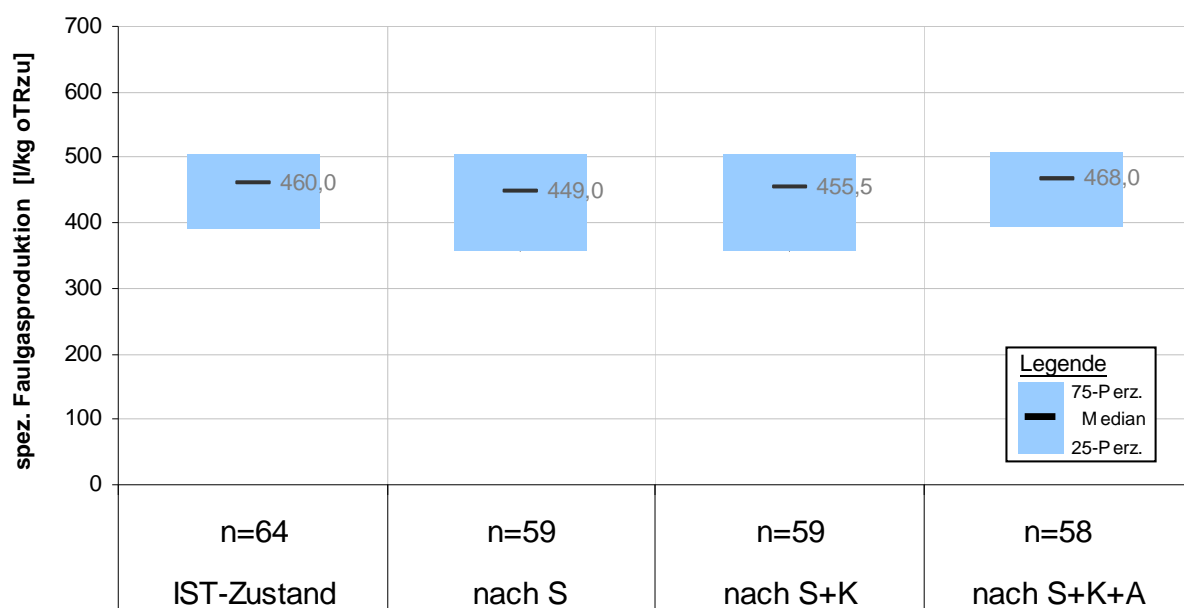


Bild 4.6: Faulgasausbeute vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

4.2.3 Optimierung der Faulgasnutzung

Insgesamt entfallen zwar verhältnismäßig wenige Maßnahmen auf die Faulgasnutzung (8 %), allerdings weisen diese ein erhebliches Energiepotential auf. Die Maßnahmen unterteilen sich dabei in drei Bereiche:

- **Repowering:** Austausch vorhandener Aggregate durch moderne KWK-Anlagen
- **Nachrüstung:** Neubau auf Kläranlagen ohne vorhandene KWK-Nutzung
- **Betriebsoptimierung:** detaillierte Anpassung der Betriebsführung

Etwa 70 % der untersuchten Kläranlagen mit Faulstufe verfügen bereits im IST-Zustand über Aggregate zur Kraft-Wärme-Kopplung (vgl. Kapitel 3.2). Der Austausch durch effizientere Aggregate (Repowering) überwiegt aus diesem Grund bei den ausgewerteten Energieanalysen mit 24 von 54 Optimierungsmaßnahmen. Bei den Kläranlagen mit vorhandenen KWK-Anlagen handelt es sich dabei zumeist um größere Kläranlagen der GK 4 und 5. Die Repowering-Maßnahmen erfordern daher im Mittel weit höhere Investitionen als eine Nachrüstung von KWK-Anlagen, die überwiegend für kleinere Kläranlagen relevant ist. Die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen ist in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Tabelle 4.5: Kosten und Nutzen der Maßnahmen zur Optimierung der Faulgasnutzung

		Kosten / Nutzen im Mittel pro Maßnahme				
Maßnahmenbereich	Anzahl	Reduktion Strombezug	Investitions-kosten	Jahres-kosten	Jahres-nutzen	K/N
		[kWh _e /a]	[€]	[€/a]	[€/a]	-
BHKW-Repowering	n=24	622.520	450.968	50.995	96.390	0,5
BHKW-Nachrüstung	n=20	364.104	201.613	26.181	42.535	0,6
BHKW-Betriebsoptimierung	n=15	64.733	6.917	2.795	9.146	0,3

Bei Umsetzung aller in den Energieanalysen vorgeschlagenen Maßnahmen wird die mittlere Gasnutzung der untersuchten Kläranlagen auf 100% gesteigert (vgl. Bild 4.7) und zeitgleich der Umwandlungsgrad in Elektrizität von 22 % auf 31 % angehoben (vgl. Bild 4.8).



Bild 4.7: Grad der Faulgasnutzung vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

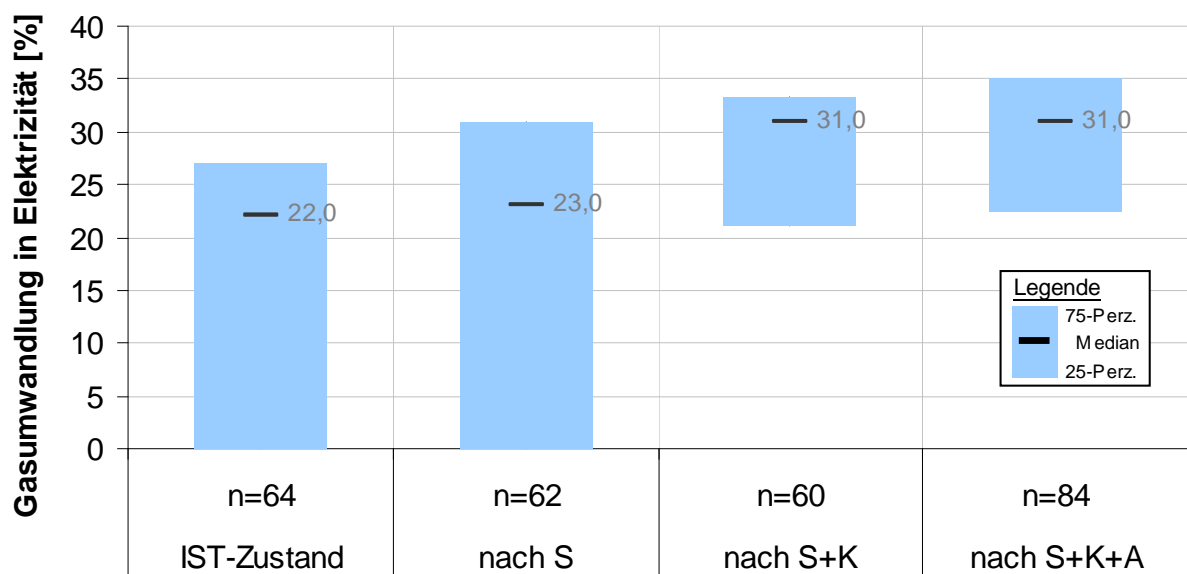


Bild 4.8: Gasumwandlung in Elektrizität vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

Auswirkungen auf den Eigenversorgungsgrad

In Summe führen die Einsparmaßnahmen und die Optimierung der Gasnutzung zu einem deutlichen Anstieg des Strom-Eigenversorgungsgrades. So steigt der Anteil der Eigenversorgung mit elektrischer Energie für die untersuchten Kläranlagen mit Faulstufen von 29 % auf knapp 60 % nach Umsetzung aller Maßnahmen (siehe Bild 4.9).

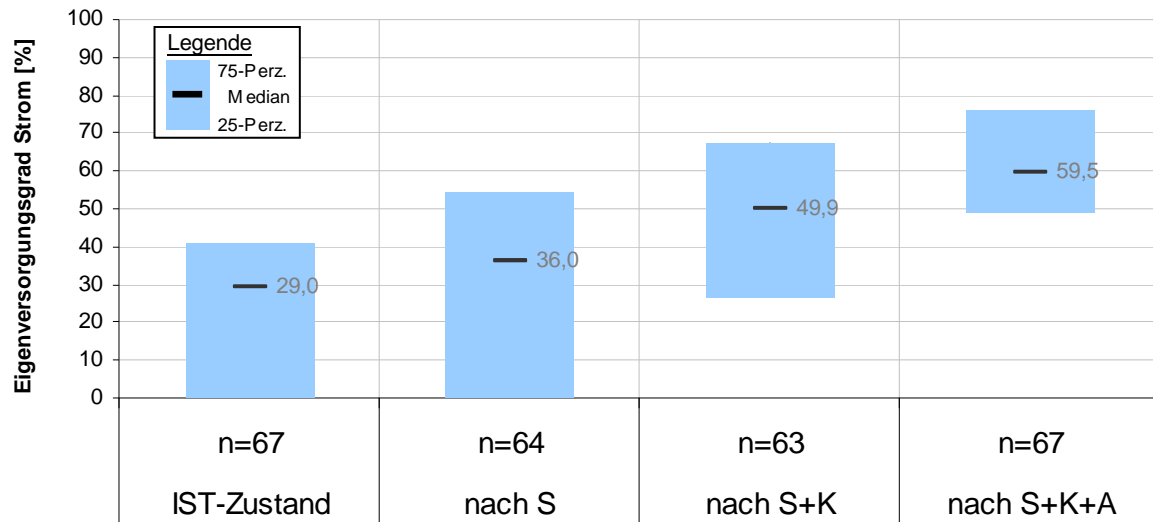


Bild 4.9: Strom-Eigenversorgungsgrad vor und nach Umsetzung der Maßnahmen

5 Fazit

Voraussetzung für die Reduzierung des Energieverbrauchs kommunaler Kläranlagen ist die Erstellung von Energieanalysen. Der Energieeinsatz bei der Abwasserreinigung wird über eine umfangreiche energetische Bestandsaufnahme detailliert erfasst. Auf Basis dieser Daten wird der Energieverbrauch der Gesamtanlage und einzelner Verfahrensstufen bewertet und es können Optimierungsmaßnahmen identifiziert werden. In Nordrhein-Westfalen werden Energieanalysen seit 1999 und bis heute durch das Umweltministerium in verschiedenen Förderprogrammen öffentlich gefördert. Anhand einer Auswertung von 91 Energiestudien aus den Jahren 2007 bis 2011 konnte im Rahmen der vorliegenden Studie eine detaillierte Übersicht sowohl für das Gesamtpotential als auch für Schwerpunkte der Optimierungsmaßnahmen ermittelt werden.

Gesamtpotential

Bei Umsetzung aller vorgeschlagenen Maßnahmen kann der Stromverbrauch im Mittel um 26 % gesenkt werden. Bezogen auf den mittleren spezifischen Energieverbrauch der Kläranlagen in Höhe von 42 kWh/(E*a) ergibt sich damit ein energetisches Einsparpotential von 10,9 kWh/(E*a). Übertragen auf die gesamte Anschlussgröße in NRW (27,9 Mio. EW) kann der Stromverbrauch der Abwasserreinigung damit theoretisch um 304 GWh/a reduziert werden. Bei einem für den Untersuchungszeitraum angegebenen mittleren Bruttostrompreis von 0,15 €/kWh entspricht dies einer Einsparung von 45 Mio. €/a. Da die Maßnahmen im Mittel ein Kosten-Nutzen-Verhältnis von 0,42 aufweisen, können die notwendigen Jahreskosten mit etwa 19 Mio. €/a abgeschätzt werden.

Die ermittelten Optimierungspotentiale lassen sich in verschiedene Schwerpunktbereiche untergliedern, die sich an den verfahrenstechnischen Bereichen der Abwasserbehandlung orientieren. Nach der biologischen Stufe besitzen Schlammbehandlung und Faulgasnutzung die größten Potentiale zur Verbesserung der Energiesituation. Im Vergleich zur IST-Situation kann insbesondere die Gasnutzung noch weiter verbessert werden. Die Strom-Eigenversorgung kann dadurch im Mittel auf bis zu 60 % bei Umsetzung aller Maßnahmen gesteigert werden.

Biologische Stufe

Fast die Hälfte aller vorgeschlagenen Maßnahmen zur Optimierung des Energieverbrauchs betrifft die biologische Stufe, die mit einem Anteil von 57 % des Gesamtverbrauchs als maßgebende Verbraucherguppe anzusehen ist. Zahlreiche Maßnahmen sind hierbei ohne großen finanziellen Aufwand kurzfristig umsetzbar bzw. amortisieren sich in relativ kurzer Zeit. Dies betrifft insbesondere die betriebstechnischen Maßnahmen mit K/N-Verhältnissen von 0,1 bis 0,3, aber auch alle maschinentechnische Maßnahmen mit K/N von 0,6 bis 0,8.

Schlammbehandlung

Bei der Abwasserreinigung lässt sich der Anfall von Klärschlamm nicht vermeiden. Die Stabilisierung der Schlämme erfordert je nach Verfahrensart unterschiedlich viel Energieeinsatz. Da Klärschlamm als Energieträger anzusehen ist, empfiehlt es sich, das Potential so weit wie möglich und wirtschaftlich auf den Kläranlagen auszunutzen. Dies sollte dadurch geschehen, dass der Klärschlamm anaerob behandelt, d.h. ausgefault wird.

Nach der biologischen Stufe ist die Schlammbehandlung der größte Energieverbraucher (ca. 11 % des Gesamtverbrauchs). Wobei über die Hälfte der Energie dabei auf die Faulung entfällt und etwa ein Drittel auf die Schlammentwässerung. Es wurden hohe Faulgasausbeuten ermittelt ($23,5 \text{ l}_N/\text{EW}/\text{d}$; $> 450 \text{ l}_N/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$), die im Wesentlichen auf die Mitvergärung von Co-Substraten sowie lange Faulzeiten zurückzuführen sind.

Gasnutzung

Ein durchaus großes Potential bietet die Eigenstromerzeugung und –nutzung. Eine konsequente Nachrüstung der vorhandenen Faulungsanlagen mit effizienten BHKWs bietet hier ein erhebliches Optimierungspotential. Bei Umsetzung aller in den Energieanalysen vorgeschlagenen Maßnahmen wird die mittlere Gasnutzung der untersuchten Kläranlagen auf 100 % gesteigert und zeitgleich der Umwandlungsgrad in Elektrizität von 22 % auf 31 % angehoben.

Ausblick und Empfehlungen

Die vorliegende Zusammenstellung der Ergebnisse von 91 Energieanalysen konnte aufzeigen, dass in vielen Verfahrensbereichen der Abwasserreinigung energetische Einsparpotentiale bestehen und den Betreibern eine Vielzahl an wirtschaftlichen Optimierungsmaßnahmen als Handlungsempfehlungen gegeben werden können. Eine Bewertung des Fortschritts in der Entwicklung des Energieeinsatzes bei der Abwasserreinigung konnte auf Basis der ausgewerteten Energiestudien jedoch nicht erbracht werden.

Die in der aktuellen ResA-Förderrichtlinie verankerte Fortführung der öffentlichen Förderung von Energieanalysen ist als sinnvoll anzusehen. Das Ziel einer Reduzierung des Energieverbrauchs und der Verminderung der CO₂-Emissionen erfordert allerdings neben den Energieanalysen ein ganzheitliches systematisches Vorgehen, welches auch eine regelmäßige Erfolgskontrolle beinhaltet. Diese kann z.B. in Form von jährlichen Energiechecks (nach DWA-A 216, Gelbdruck 2013) durchgeführt werden.

Verzeichnis der Bilder

Bild 1.1:	Verteilung der in den untersuchten Energieanalysen verwendeten Bezugsgrößen zur Ermittlung der mittleren Anlagenbelastung bzw. der Anschlussgröße.....	3
Bild 1.2:	Verteilung der Anschlussgrößen gemäß Angaben der Energieanalysen	3
Bild 2.1:	Summenlinie des spezifischen Gesamtstromverbrauchs der Kläranlagen	5
Bild 2.2:	Spezifischer Stromverbrauch getrennt nach EW-Kategorien	6
Bild 2.3:	Spezifischer Stromverbrauch nach Verfahrensgruppen	7
Bild 2.4:	Verteilung des Stromverbrauchs der einzelnen Verfahrensgruppen	8
Bild 2.5:	Spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche der biologischen Stufe.....	10
Bild 2.6:	Verteilung des mittleren Stromverbrauchs auf die Teilbereiche der Biologie	10
Bild 2.7:	Spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche der Mechanik.....	11
Bild 2.8:	Verteilung des mittleren Stromverbrauchs auf die Teilbereiche der Mechanik	11
Bild 2.9:	Spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche der Schlammbehandlung.....	12
Bild 2.10:	Verteilung des Stromverbrauchs auf die Teilbereiche der Schlammbehandlung	12
Bild 2.11:	Spezifische Stromverbräuche der Teilbereiche der Infrastruktur.....	13
Bild 2.12:	Verteilung des Stromverbrauchs auf die Teilbereiche der Infrastruktur	13
Bild 2.13:	Stromverbrauch der Verfahrensgruppen nach Stabilisierungsverfahren	15
Bild 2.14:	Stromverbrauch nach mittlerer Anschlussgröße getrennt nach Stabilisierungsart	15
Bild 2.15:	Verteilung des spezifischen Wärmebezugs über externe Energieträger	16
Bild 2.16:	Wärmebezug nach Anschlussgröße	16
Bild 3.1:	Nutzungsmöglichkeiten des anfallenden Klärgases	17
Bild 3.2:	Faulgasproduktion bezogen auf die zugeführte Organik	18
Bild 3.3:	Verteilung der einwohnerspezifischen Faulgasproduktion	19

Bild 3.4:	Grad der Faulgasnutzung im IST-Zustand.....	20
Bild 3.5:	Grad der Faulgasnutzung in Abhängigkeit der mittleren Anschlussgröße	21
Bild 3.6:	Umwandlungsgrad des Faulgases in Kraft bzw. Elektrizität	21
Bild 3.8:	Eigenversorgungsgrad für Strom im IST-Zustand	22
Bild 3.7:	Eigenversorgungsgrad für Wärme im IST-Zustand	22
Bild 4.1:	Anzahl und Potential der Maßnahmen getrennt nach Verbrauchergruppen.....	23
Bild 4.2:	Prozentuales Einsparpotential gegenüber dem IST-Zustand nach Umsetzung der Maßnahmen und im Vergleich zu den gewählten Idealwerten.....	24
Bild 4.3:	Prozentuales Einsparpotential im Vergleich nach Anlagengröße bei Umsetzung aller Maßnahmen.....	25
Bild 4.4:	Erreichbarer Spezifischer Stromverbrauch nach Umsetzung der Maßnahmen	26
Bild 4.5:	Potential der energetischen Optimierungsmaßnahmen (n=751) nach verfahrenstechnischen Teilbereichen untergliedert.....	26
Bild 4.6:	Faulgasausbeute vor und nach Umsetzung der Maßnahmen	30
Bild 4.7:	Grad der Faulgasnutzung vor und nach Umsetzung der Maßnahmen	32
Bild 4.8:	Gasumwandlung in Elektrizität vor und nach Umsetzung der Maßnahmen.....	32
Bild 4.9:	Strom-Eigenversorgungsgrad vor und nach Umsetzung der Maßnahmen	33
Bild 5.3:	Aus den Energieanalysen entnommene Objekt- und Anlagendaten	40
Bild 5.4:	Aus den Energieanalysen entnommene Daten zu Energienachweis und - matrix	41
Bild 5.5:	Aus den Energieanalysen entnommene Daten der Optimierungsmaßnahmen	42
Bild 5.1:	Summenlinien der Verbraucher der mechanischen Reinigungsstufe	42
Bild 5.2:	Summenlinien der Verbraucher der biologischen Reinigungsstufe	43

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1.1: Grundlegende Daten der ausgewerteten Energieanalysen	2
Tabelle 2.1: Statistische Auswertung (Perzentilwerte) des einwohnerspezifischen Stromverbrauchs getrennt nach Verfahrensgruppen der Abwasserreinigung	9
Tabelle 2.2: Stromverbrauchsdaten von Faulungs- und Stabilisierungsanlagen.....	14
Tabelle 4.1: Die häufigsten Maßnahmen im Bereich der biologischen Stufe	27
Tabelle 4.2: Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen im Bereich der biologischen Stufe	28
Tabelle 4.3: Die häufigsten Maßnahmen im Bereich der Schlammbehandlung.....	29
Tabelle 4.4: Verfahrensbereiche der vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen innerhalb der Schlammbehandlung mit Angaben zu Kosten und Nutzen	30
Tabelle 4.5: Kosten und Nutzen der Maßnahmen zur Optimierung der Faulgasnutzung.....	31

Literaturverzeichnis

DWA (2013): *Arbeitsblatt DWA-A 216, Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen*, Hennef. (Gelbdruck)

LANUV-NRW (2013): *Daten des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV)*. Datenquellen: NIKLAS-KOM (kommunales Kläranlagenkataster) und ELWAS (elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem). Datenstand 2012

MURL NRW (1999): *Handbuch ‚Energie in Kläranlagen‘*. Ministerium für Umweltschutz, Raumordnung und Landwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf

MKULNV NRW (2014): *Optimierung des Energieertrages kommunaler Kläranlagen durch prozess- und standortbezogene Verbundstrategie*, Abschlussbericht F&E-Vorhaben. (unveröffentlicht)

Anhang

Objektdaten				
Auftraggeber der Energieanalyse				
Kläranlagenbezeichnung				
Baujahr der Kläranlage				
letzter Ausbau der Kläranlage				
Ingenieurbüro der Energieanalyse				
Erstellungsjahr der Energieanalyse				
Besonderheiten (z.B. A/B-Anlage, Teichkläranlage, etc.)				

Anlagendaten				
Untersuchungszeitraum				
Belastungsdaten Zulauf Kläranlage	Einwohnerwert Ausbaugröße	EW_{Ausbau}		[EW]
	Abwasseranfall, Jahresmenge	Q_{gesamt}		[m³/a]
	BSB ₅ -Zulauftracht im Jahresmittel	$B_{\text{d,BSB,aM}}$		[kg/d]
	CSB-Zulauftracht im Jahresmittel	$B_{\text{d,CSB,aM}}$		[kg/d]
	TKN-Zulauftracht im Jahresmittel	$B_{\text{d,TKN,aM}}$		[kg/d]
	Einwohnerwert (Bezugswert Energieanalyse)	EW		[EW]
	Bezugsparameter Einwohnerwert Energieanalyse	-		[-]
	Ausrüstung	Reinigungsziel	-	
Volumen Vorklärung		V_{VK}		[m³]
Volumen Belegung		V_{BB}		[m³]
Schlammalter		t_{TS}		[d]
Filtration		-		[ja/nein]
Hebewerke gesamt		$h_{\text{man,ges}}$		[m _{FH}]
Zulaufhebewerk		$h_{\text{man,zu}}$		[m _{FH}]
Ablaufhebewerke		$h_{\text{man,ab}}$		[m _{FH}]
Schlammdaten	Rohschlammfall	Q_{RS}		[m³/a]
	Feststoffgehalt Rohschlamm	TR_{RS}		[%TR]
	Rohschlammmasse	$m_{\text{TR,RS}}$		[Mg/a]
	Glühverlust Rohschlamm	GV_{RS}		[%GV]
	Organik im Rohschlamm	$m_{\text{oTR,RS}}$		[Mg/a]
Faulgas	Anfall gesamt	$Q_{\text{FG,ges}}$		[Nm³/a]
	Faulgasnutzung Heizung	$Q_{\text{FG,th}}$		[Nm³/a]
	Faulgasnutzung Stromerzeugung (BHKW o.ä.)	$Q_{\text{FG,KWK}}$		[Nm³/a]
	Faulgasnutzung Direktantrieb (Luftverdichter o.ä.)	$Q_{\text{FG,KWK}}$		[Nm³/a]
	Abfackelung Faulgas	-		[Nm³/a]
	Faulgasverkauf	-		[Nm³/a]
Wärme	Eigenproduktion aus Faulgas	$E_{\text{KWK,th}}$		[MWh/a]
	Einkauf (Heizöl, Erdgas)	$E_{\text{ext,th}}$		[MWh/a]
	Wärmebedarf gesamt	$E_{\text{ges,th}}$		[MWh/a]
Elektrizität	Eigenproduktion (inkl. Stromäquivalente Direktantriebe)	$E_{\text{KWK,el}}$		[MWh/a]
	Einkauf (negativ bei Einspeisung)	$E_{\text{EVU,el}}$		[MWh/a]
	Gesamtverbrauch (inkl. Stromäquivalente Direktantriebe)	$E_{\text{ges,el}}$		[MWh/a]
Energiekosten (brutto)	Brennstoffe, Jahreskosten	JK_{BS}		[€/a]
	Elektrizität, Jahreskosten	JK_{E}		[€/a]
Bruttostrompreis (inkl. Gebühren, Leistung, etc.)	-			[Cent/kWh]

Bild 5.1. Aus den Energieanalysen entnommene Objekt- und Anlagendaten

Energienachweis		Einheit	IST-Zustand	nach S	nach S+K	nach S+K+A	Richtwert	Idealwert
e_{ges}	spezifischer Gesamtstromverbrauch	kWh/(EW*a)						(anlagenspezifisch)
e_{el}	spezifischer Stromverbrauch der Belebung	kWh/(EW*a)						
N_1	Grad der Faulgasnutzung	%						
N_2	Grad der Faulgasumwandlung (in Kraft/Elekt.)	%						
N_3	Spezifische Faulgasproduktion (pro kg oTR _o)	l/kg oTR						
V_w	Eigenversorgungsgrad-Wärme	%						
V_e	Eigenversorgungsgrad-Elektrizität	%						

Energiematrix		Stromverbrauch (absolut)	Idealwert (anlagenspezifisch)	Anmerkung: Idealwert der Modellanlage (inklusive anlagenspezifischer Anpassungen gemäß Energieanalyse)
		kWh _a /a	kWh/(EW*a)	
Abwasserbehandlung				
	Einlaufhebwerk			
	Mechanische Stufe, gesamt			
	Rechen, inkl. Rechengutwäsche			
	Sandfang			
	Vorklärung, inkl. Primärschlamm-pumpen			
	Biologie, gesamt			
	Biologie, Belüftung			
	Biologie, Umwälzung			
	Biologie, Rezirkulation			
	Biologie, Rücklaufschlammförderung			
	Nachklärung, inkl. Überschussschlamm-pumpen			
	Fällmitteldosierung			
	Filtration			
	Eingabe Sonstiger Verbraucher			
	Eingabe Sonstiger Verbraucher			
Schlammbehandlung				
	Schlammbehandlung, gesamt			
	Voreindickung			
	Schlammstabilisierung / Faulung			
	Nacheindickung			
	Schlammwässerung			
	Eingabe Sonstiger Verbraucher			
	Eingabe Sonstiger Verbraucher			
Infrastruktur				
	Lüftung			
	Elektroheizung			
	Allgemein (Licht, o.ä.)			
	Brauchwasser			
	Eingabe Sonstiger Verbraucher			
	Eingabe Sonstiger Verbraucher			
	Eingabe Sonstiger Verbraucher			
Idealwert Gesamtanlage				

Bild 5.2: Aus den Energieanalysen entnommene Daten zu Energienachweis und -matrix

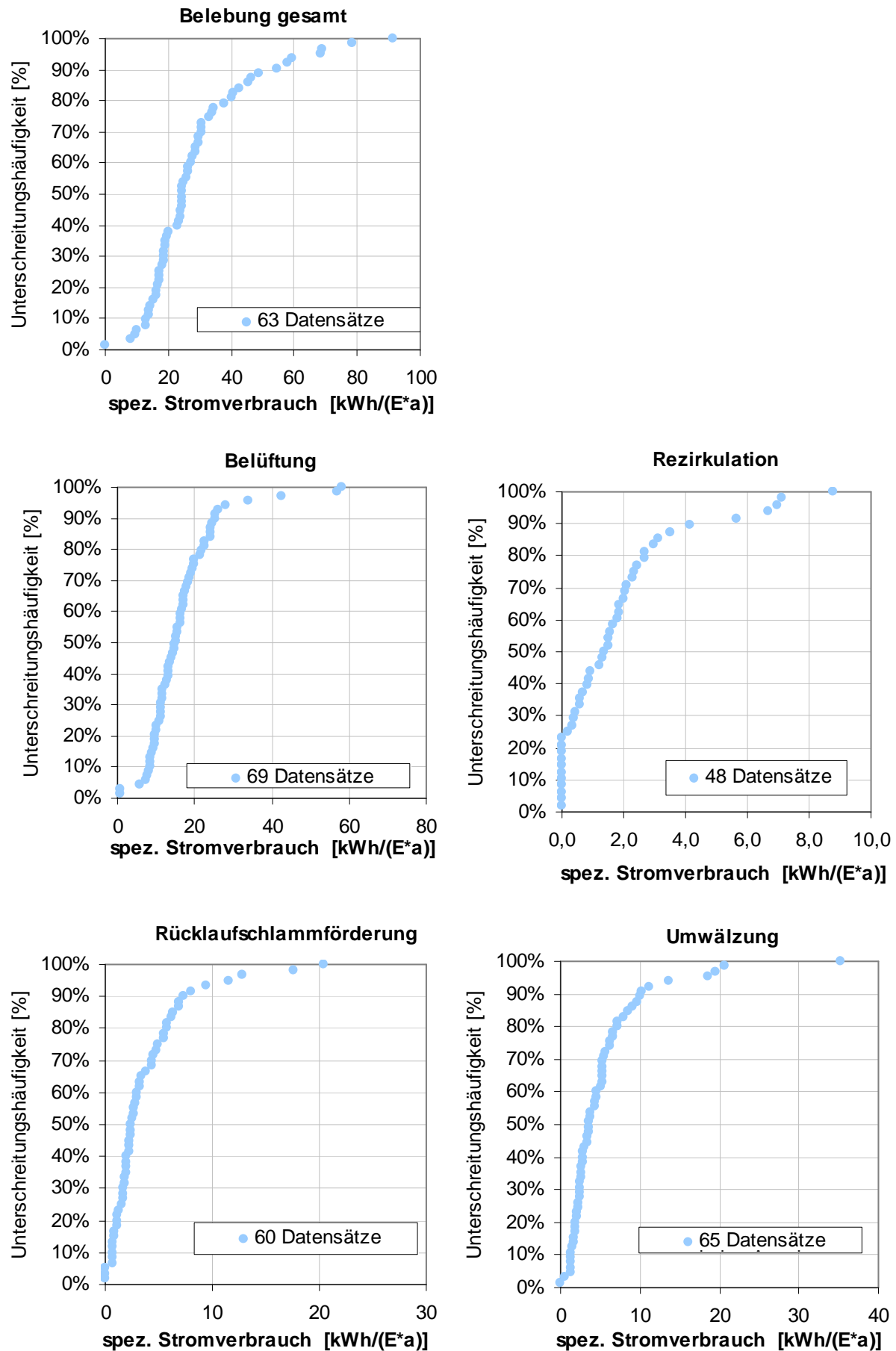


Bild 5.5: Summenlinien der Verbraucher der biologischen Reinigungsstufe