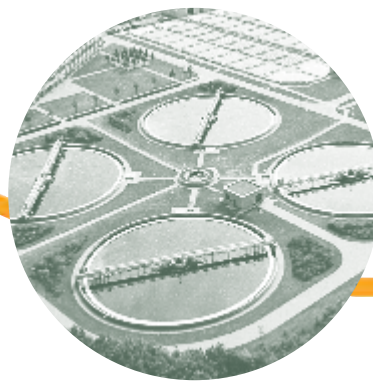


# KLÄRANLAGEN IM SPANNUNGSFELD DER ENERGIEWIRTSCHAFT



ANALYSEN ● ERGEBNISSE ● IMPULSE

# KLÄRANLAGE DER ZUKUNFT

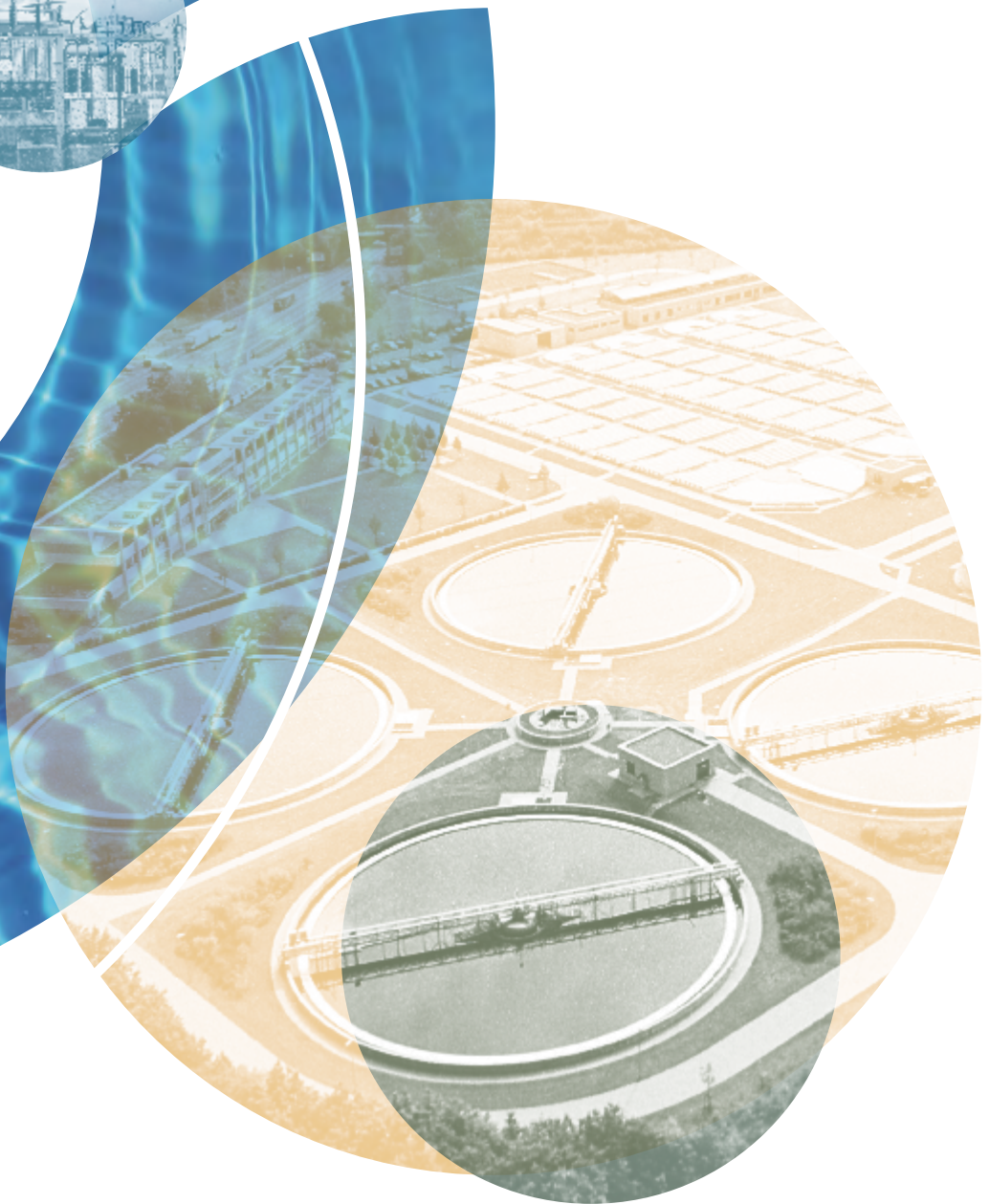


# INHALT

1	Vorwort	Kläranlage der Zukunft – von der Abwasserreinigung zum flexiblen Systemdienstleister? . . . . .	4
2	Einführung und Ziele	2.1 Das Forschungsprojekt „ESiTI“ . . . . . 2.2 Ziel und Aufbau der Broschüre . . . . .	6 7
3	Herausforderungen der Energiewirtschaft	3.1 Anforderungen der Energiewirtschaft . . . . . 3.2 Lastmanagement . . . . . 3.3 Regelernergie . . . . . 3.4 Spotmärkte . . . . .	9 10 12 14
4	Kläranlagen als flexible Energieerzeuger und -verbraucher	4.1 Kläranlagen – technische Einheiten für große Betriebsschwankungen. . . . . 4.2 Kläranlagen – vom Energieverbraucher zum Energiedienstleister . . . . .	17 18
5	Bausteine für flexible Kläranlagen	5.1 Flexibilitätstechnologien auf Kläranlagen zur Interaktion mit der Energiewirtschaft . . . . . 5.2 Das Blockheizkraftwerk als Schnittstelle zwischen Klärschlammbehandlung und Energiebereitstellung . . . . . 5.3 Die Klärschlammbehandlung zur Bereitstellung von Flexibilität . . . . . 5.4 Intelligentes Wärmemanagement als Basis einer ganzheitlichen energetischen Nutzung . . . . .	21 23 25 35
6	Strukturen und Dynamiken innerhalb der Innovationsarena	6.1 Grundgerüst einer Sektorkopplung. . . . . 6.2 Hemmnisse für die stärkere energiewirtschaftliche Ausrichtung des Kläranlagenbetriebs. . . . . 6.3 Treiber und begleitende Maßnahmen für eine stärkere Sektorkopplung. . . . .	37 38 39
7	Vergleich von Technologievarianten und Betriebsstrategien	7.1 Ökologische Bewertung . . . . . 7.2 Multikriterielle Bewertung. . . . .	41 32
8	Praktische Umsetzung	Mögliche Vorgehensweise . . . . .	47
9	Impulse für die Zukunft	Fazit und Ausblick . . . . .  Literaturverzeichnis . . . . . Impressum . . . . .	51  52 54

1

## VORWORT





## 1

# KLÄRANLAGE DER ZUKUNFT – VON DER ABWASSERREINIGUNG ZUM FLEXIBLEN SYSTEMDIENSTLEISTER?

Die Kläranlage der Zukunft vereint den Gesundheits-, Gewässer- und Ressourcenschutz. Die Herausforderungen sind vielfältig: Im Vordergrund steht die Integration neuer Verfahrenstechniken, z.B. für die Elimination von Mikroschadstoffen oder die Rückgewinnung von Phosphor. Zugleich sind die Bewirtschaftungsprozesse im Kläranlagenbetrieb auch auf die (zukünftigen) Anforderungen im Energiesektor auszurichten! Im Rahmen der Energiewende kommt es u.a. auf eine bedarfsgerechte Bereitstellung und Speicherung von Energie sowie den Ausgleich von Lastspitzen in Energie- und insbesondere Stromnetzen an. Für Kläranlagen bieten sich hier umfangreiche Potenziale, das Energiemanagement zu optimieren und eine sichtbare Rolle für eine erfolgreiche Energiewende einzunehmen.

## Klärschlamm – ein Rohstoff der Energiewirtschaft?

Im Zentrum energetischer Optimierungen auf Kläranlagen steht bislang die konventionelle Steigerung der Energieeffizienz auf der Basis von Jahresmittelwerten. Die Klärschlammbehandlung, also die Nutzung von Klärschlamm als chemisch gebundene Energie einschließlich der Umwandlung zu Faulgas bzw. Strom und Wärme, wird bislang oft vernachlässigt. Dabei bieten die Prozesse der Klärschlammbehandlung alle verfahrenstechnischen Möglichkeiten für eine bedarfsgerechte Erzeugung<sup>1</sup> bzw. Speicherung von Energie. Hierzu gehören das Zusammenspiel verschiedener Speicher wie Klärschlamm, Co-Substrate oder Faulgas, die Schaffung von Wärmesenken, beispielsweise mittels Thermodruckhydrolyse oder die unterschiedliche Flexibilität der verfahrenstechnischen Einheiten. Hohe Flexibilität bieten unter anderem Blockheizkraftwerke (BHKW), geringe Flexibilität beispielsweise die Monoklärschlammverbrennung.

Abbildung 1: Das Projektteam,  
Foto: Christian Schaum

<sup>1</sup> Aus thermodynamischer Sicht kann Energie weder erzeugt noch verbraucht, sondern lediglich umgewandelt werden. Die Begriffe Energieerzeugung und -verbrauch sind im Sprachgebrauch jedoch so verfestigt, dass diese Begriffswahl in der Fachwelt akzeptiert und hier zum einfacheren Verständnis der Ausführungen verwendet wird.

Damit kann das Energiemanagement auf einer Kläranlage auf zwei wesentliche energiewirtschaftliche Herausforderungen ausgerichtet werden:

- Die zukünftige Energieversorgung baut darauf, Energieerzeugung und -verbrauch auf möglichst niedriger Ebene auszubalancieren. Auf der Kläranlage bedeutet dies den Ausgleich von Energieverbrauch und -erzeugung im Tagesgang.
- Kläranlagenbetreiber können einen Beitrag zur Netzstabilität und Versorgungssicherheit leisten, indem sie Flexibilität im Bewirtschaftungsprozess auf den Stromhandels- und Regelleistungsmärkten vermarkten.

## Energieoptimierung im Anlagenbetrieb – das Forschungsprojekt ESiTI

Wie eine solche Energieoptimierung im Kläranlagenbetrieb funktionieren kann, hat ein Team von rund 20 Ingenieuren, Natur- und Sozialwissenschaftlern aus insgesamt 11 Forschungseinrichtungen, Beratungsunternehmen und kommunalen Abwasserbetrieben seit Frühjahr 2014 untersucht. Insgesamt wurden im Projekt „Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und verbrauch“, kurz: ESiTI, verschiedene Bausteine für die Weiterentwicklung der Kläranlage vom Energieverbraucher zum Energiesystemdienstleister erarbeitet. Unser Dank gilt allen, die zum Erfolg des Projektes beigetragen haben.

Die in ESiTI gewonnenen Impulse möchten wir an die Fachwelt weitergeben und damit einen Beitrag für eine zukünftige Energieoptimierung „der anderen Art“ für Abwasserbehandlungsanlagen leisten.

Wir freuen uns über Ihr Interesse und jedes, auch kritische, Feedback.

Ihr ESiTI-Projektteam



### 2.1

#### DAS FORSCHUNGSPROJEKT „ESiTI“

Im Rahmen des Projekts „Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch (ESiTI)“ wurden Ansätze untersucht, in denen die Kläranlage als Energiespeicher und -produzent dient. Im Vordergrund stand dabei die Vernetzung von Energieverbrauch und -erzeugung. Durch Wechselwirkungen mit technischen Infrastruktureinrichtungen, z.B. mit denen der Energiewirtschaft, konnten Potenziale einer ganzheitlich effizienten Energienutzung sowie -erzeugung erschlossen werden. Das Projekt führten 11 Verbundpartner aus Kommunen, Industrie und Wissenschaft seit 2014 über eine Laufzeit von drei Jahren durch. Es war eines von 12 Verbundprojekten, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Maßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS)“ gefördert hat ([www.bmbf.nawam-erwas.de/](http://www.bmbf.nawam-erwas.de/)).



Die Untersuchungen wurden exemplarisch in der Wissenschaftsstadt Darmstadt durchgeführt. Als südliches Oberzentrum der Metropolregion Rhein-Main mit rund 160.000 Einwohnern dient Darmstadt als Beispiel für zahlreiche Städte in Deutschland. Dies ermöglicht eine hohe Anwenderrelevanz und eine weitreichende Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse.

Kläranlagen sind durch energieverbrauchende wie auch energieerzeugende Aggregate und Prozesse charakterisiert, die in dieser Broschüre als Bausteine des Energiesystemdienstleisters „Kläranlage“ vorgestellt werden. Der Schwerpunkt des Projekts ESiTI liegt jedoch auf der ganzheitlichen Betrachtung der Nutzung von Klärschlamm als flexiblem Energielieferanten.

#### DAS ZIEL VON ESiTI

**Identifizierung der Kläranlage als Energiesystemdienstleister, mit der Klärschlammbehandlung im Zentrum als Energieverbraucher, Energiespeicher und Energieerzeuger**

## 2.2

### ZIEL UND AUFBAU DER BROSCHÜRE

Diese Broschüre richtet sich an Fachkundige der Abwassertechnik und sonstige interessierte Leser. In den folgenden Kapiteln wird gezeigt, dass und wie die heutige kommunale Abwassertechnik aus ihrer Rolle der ausschließlichen Abwasserreinigung zum Zweck des Gesundheits- und Gewässerschutzes hin zu einem Akteur der Kreislaufwirtschaft entwickelt werden kann.

Im Zentrum stehen die auf Kläranlagen heute bereits vorhandenen Flexibilitätspotenziale, welche aktuell ungenutzt oder noch nicht hinreichend im Hinblick auf ihre Anpassungsfähigkeit – unter Einhaltung ihrer Kernaufgabe, der Abwasserreinigung – untersucht sind. Ziel ist die „energetische“ Interaktion kommunaler Kläranlagen mit Einrichtungen der Energiewirtschaft – im Folgenden als periphere Einrichtungen bezeichnet – zur ganzheitlichen Optimierung der energetischen Effizienz der Anlage und als Beitrag zur Energiewende. Die Broschüre soll dabei Anstöße und Ideen für den zukünftigen Kläranlagenbetrieb geben.

Kapitel 3 geht zunächst auf die Anforderungen der Energiewirtschaft an flexible Energiespeicher infolge der Energiewende und die damit verbundenen Möglichkeiten zum Strom- bzw. Energiehandel ein.

Ausgehend von der aktuellen Situation auf kommunalen Kläranlagen und dem damit verbundenen Energieverbrauch sowie der Energieerzeugung wird die aktuell genutzte Flexibilität durch vorhandene Redundanzen im Kapitel 4 verdeutlicht. Flexibilitätsbausteine und deren Potenziale werden im Kapitel 5 vorgestellt. Dabei geht die Broschüre

#### SCHWERPUNKTE VON ESiTI

- Betrachtung des Systems „Abwasser- und Klärschlammbehandlung inklusive der umliegenden technischen Infrastruktur“
- Lösung der technischen Problemstellung im Bereich der Klärschlammbehandlung zur bedarfsgerechten, flexiblen Bereitstellung von elektrischer Energie
- ökologische und ökonomische Bewertung von flexiblen Verfahrensvarianten und Bewirtschaftungsstrategien auf der Kläranlage
- Erfassung der gesellschaftlichen Relevanz in Bezug auf Motivation und Hemmnisse

zum einen auf innovative Technologien im Bereich der Klärschlammbehandlung ein, wie die Thermodruckhydrolyse und Faulreaktoren mit Biomasseanreicherung. Zum anderen thematisiert sie auch zukünftige Anforderungen an die Klärschlammverwertung, z.B. als thermische Verwertung.

Im Kapitel 6 werden wichtige Rahmenbedingungen, Hemmnisse und Treiber für die Umsetzung der Innovationen mit entsprechenden Empfehlungen beschrieben. Da die Innovationen nur unter Berücksichtigung vieler Kriterien umfassend bewertet werden können, wird im Kapitel 7 ein ganzheitliches Bewertungsmodell vorgestellt.

Kapitel 8 beschreibt schließlich ein mögliches Vorgehen für die praktische Umsetzung.

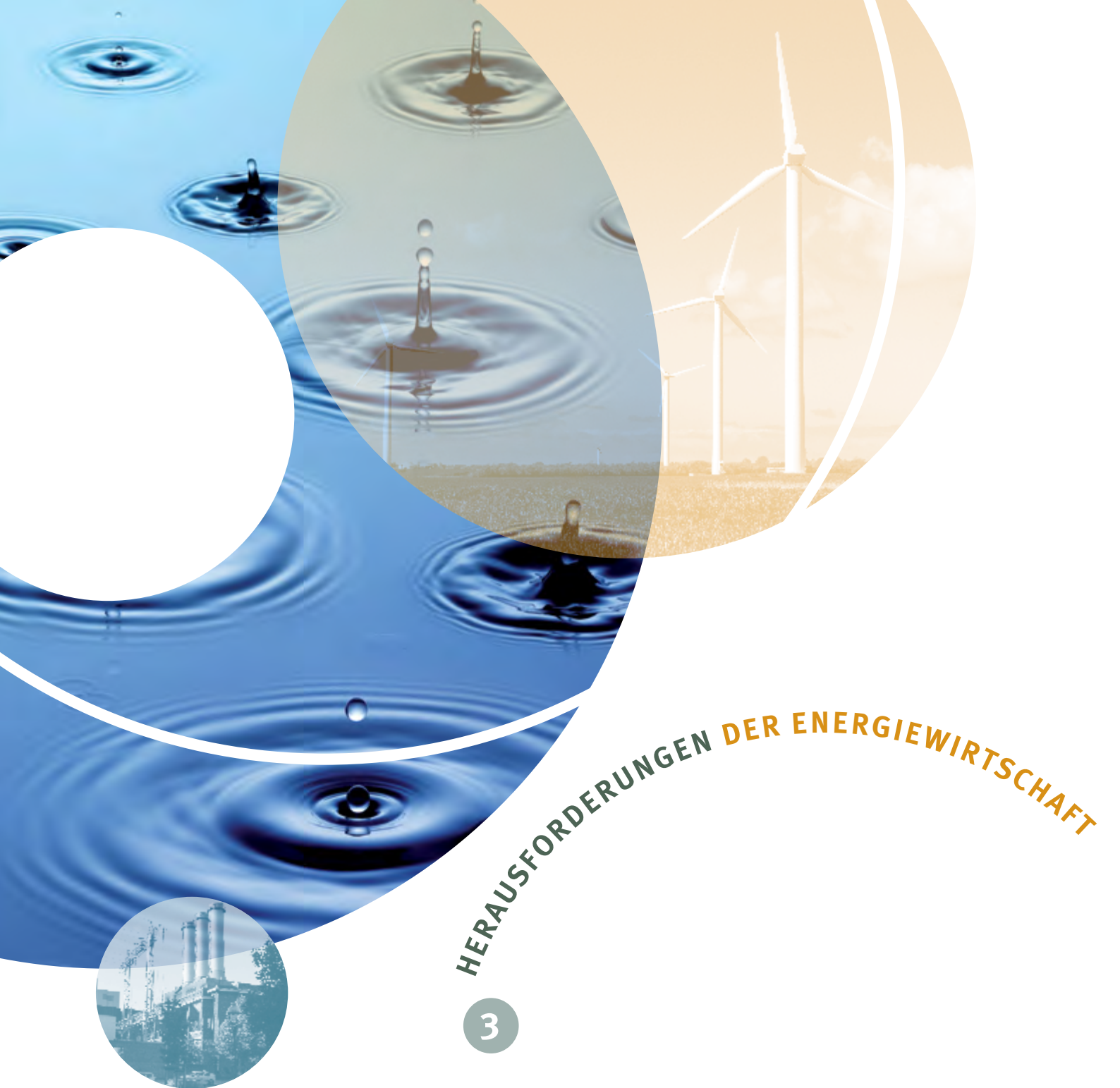
#### DIE BROSCHÜRE BIETET IHNEN

- Ideen und Anstöße für einen zukünftigen Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen als Energiespeicher/Energiesystemdienstleister
- Vorstellung von Möglichkeiten zur Interaktion mit der Energiewirtschaft
- Vorstellung der vorhandenen und möglicherweise nutzbaren Flexibilität auf Kläranlagen, insbesondere in der Klärschlammbehandlung
- Analyse von Treibern und Hemmnissen für die Interaktion mit der Energiewirtschaft
- Anleitung für ein ganzheitliches Bewertungsmodell von innovativen Verfahrensvarianten und Bewirtschaftungsstrategien



Abbildung 2: Klärwerk Darmstadt-Süd,  
Foto: Fei Yang





# HERAUSFORDERUNGEN DER ENERGIEWIRTSCHAFT

3



### 3.1

## ANFORDERUNGEN DER ENERGIEWIRTSCHAFT

Neben der Steigerung der Energieeffizienz beinhaltet die Energiewende bei der Wärme- und Stromproduktion vor allem die Substitution fossiler und treibhausgasintensiver Energieträger durch erneuerbare Energien. Die damit verbundene Ablösung konventioneller Kraftwerke durch Erneuerbare-Energie-Anlagen stellt neue Anforderungen an Stromnetzbetreiber: Die Volatilität der Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik mit ihren kurzfristigen Schwankungen muss ausgeglichen werden, damit Stromerzeugung und -verbrauch immer im Gleichgewicht stehen. Während bislang ausreichend konventionelle, regelbare Stromerzeugungsanlagen für die Stabilisierung der Netzfrequenz zur Verfügung standen, wird dieser Ausgleich durch die steigenden Anteile an Windkraft und Photovoltaikanlagen am Strommix in Zukunft weiter erschwert (dena 2014).

Zum Ausgleich von Stromerzeugung und -verbrauch können nach Elsner et al. (2015) folgende Flexibilitätstechnologien einen Beitrag leisten:

- planbare und flexibel einsetzbare Stromerzeugungsanlagen, d.h. Gas- und Kohlekraftwerke, Biomassekraftwerke, solarthermische und geothermische Kraftwerke,
- Energiespeicher,
- abschaltbare bzw. verschiebbare Lasten (Lastmanagement),
- Umwandlung von überschüssigem Strom in Wärme („Power-to-Heat“) oder in chemisch gespeicherte Energie („Power-to-Gas/Fuel/Chemicals“) und
- Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz zur Nutzung in Gasturbinen oder Gas- und Dampfkraftwerken, sodass eine vollflexible Stromerzeugung möglich ist, bei der das Erdgasnetz als Speicher fungiert.

Flexible Stromverbraucher und Stromerzeuger gewinnen somit an Bedeutung, weil sie zum Ausgleich von Differenzen im Stromnetz beitragen können. Eine flexible Steuerung von Stromverbrauchern und -erzeugern zur Glättung des Strombezugs oder zum Ausgleich von Belastungsspitzen in Stromnetzen wird als **Lastmanagement** bezeichnet (dena 2013).

Weiterhin möchte die Bundesregierung durch die Öffnung von Strommärkten Anreize für neue und dezentrale Anbieter schaffen, um auch zukünftig die Versorgungssicherheit zu gewährleisten (BMWi 2015). Wirtschaftlich äußert sich dies für Netznutzer in der Möglichkeit, sich ihre zur Verfügung gestellten Erzeugungskomponenten oder Verbraucher(lasten) als Flexibilitätsbausteine zur Einhaltung der Netzfrequenz auf verschiedenen Flexibilitätsmärkten vergüten zu lassen. Solche Märkte sind z.B. die **Regelleistungsmärkte** und **Spotmärkte** für Stromhandel.

Abbildung 3: Umspannwerk,  
Foto: Axel Dierich



### 3.2

## LASTMANAGEMENT

Der Strombedarf bzw. die erforderliche Leistung kann grundsätzlich in verschiedene Lasten unterteilt werden: Grundlast, Mittellast und Spitzenlast (vgl. Abbildung 4). Lastspitzen treten dabei nur bei wenigen Betriebsstunden im Jahr auf.

Idealerweise werden nach Kraft et al. (2013) intelligente Steuerungen implementiert, die den Energieverbrauch so regeln, dass Last von den eigenen Lastspitzen in die Lasttäler verschoben wird (vgl. Abbildung 5). Durch die Maßnahmen können je nach Stromversorgungssituation schon heute Leistungspreise reduziert werden. Zukünftig werden voraussichtlich durch dynamisierte Netzentgelte, Stromsteuern oder Umlagen auch die Kosten für die Kilowattstun-

de selbst stärker variieren. Je flexibler das Lastmanagement, desto besser kann dann der Verbraucher davon profitieren.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass Maßnahmen im Bereich des Lastmanagements aufgrund der steigenden Energieerzeugung aus regenerativen Energieträgern an Bedeutung gewinnen. Stromverbraucher können damit auch einen Beitrag für die Stabilität von Verteilnetzen leisten (SRU 2013, dena 2012).

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch flexible Energieerzeugung vor Ort das eigene Strombezugsprofil zu glätten. Die Eigenstromerzeugung kann die Spitzen im Strombezug verringern und so die zu beziehende Spitzenleistung reduzieren (vgl. Abbildung 6). Grundvoraussetzung für eine flexible Eigenstromerzeugung sind Energieerzeuger (bspw. BHKW) und Energiespeicher (bspw. für Klärschlamm, Faulgas, Strom und Wärme). Idealerweise haben diese Aggregate auch unter Teillast hohe elektrische Wirkungsgrade.

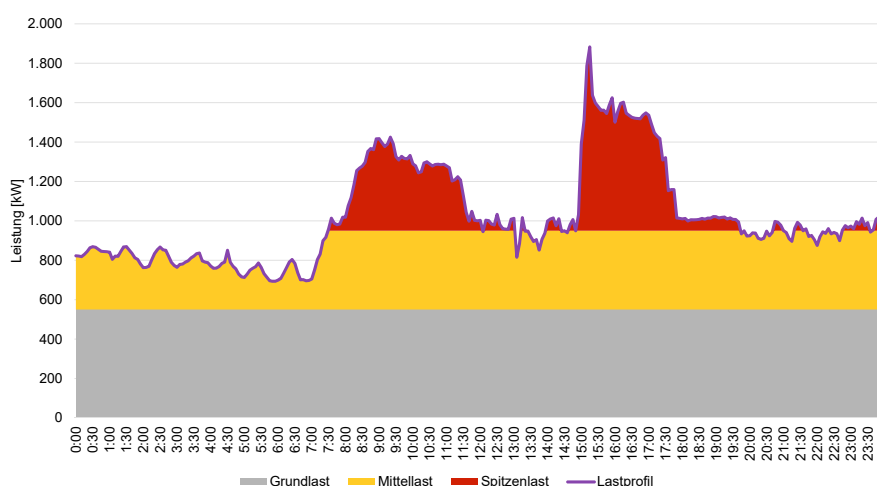


Abbildung 4: Unterteilung des Strombedarfs in Lasten  
Quelle: bluemove consulting GmbH

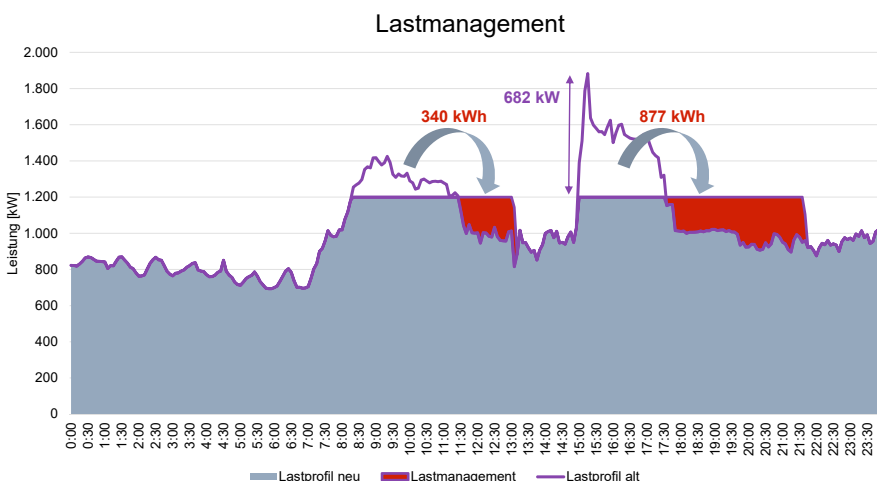


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Lastmanagements durch Glättung von Lastspitzen am Beispiel des Lastgangs einer kommunalen Kläranlage, Quelle: bluemove consulting GmbH

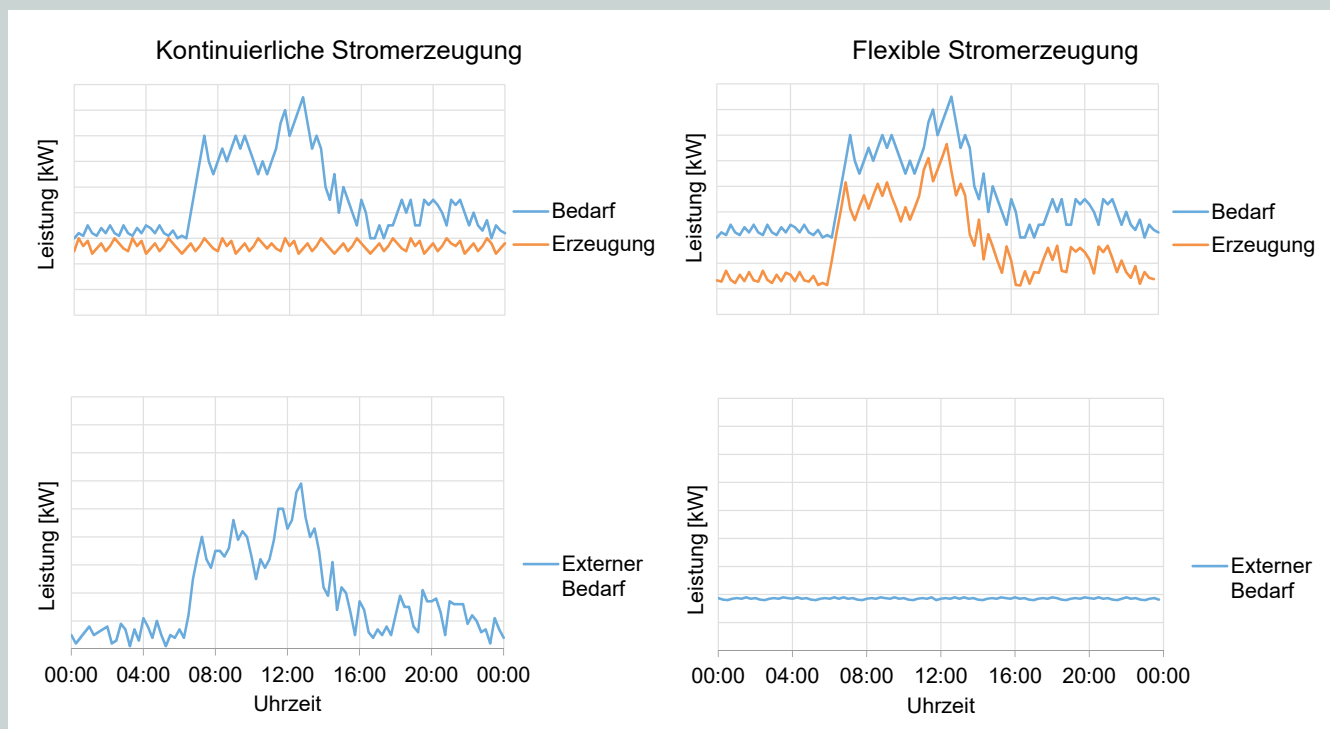


Abbildung 6: Exemplarische Darstellung zur Glättung des Lastprofils durch gezielte Eigenstromerzeugung – stark vereinfacht, Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR

#### GLÄTTUNG DES LASTPROFILS MITTELS LASTMANAGEMENT DURCH

- Verschiebung von Lastspitzen in Lasttäler
- gezielte flexible Eigenstromerzeugung zur Deckung von Lastspitzen unter Ausnutzung vorhandener Energiespeicher



### 3.3

## REGELENERGIE

Im Stromnetz werden Abweichungen zwischen Stromerzeugung und Stromverbrauch durch die Bereitstellung von Regellenergie ausgeglichen (vgl. dena 2012). Es gibt drei verschiedene Regelleistungsarten, die sich in ihren Eigenschaften sowie in der Aktivierungsgeschwindigkeit unterscheiden (StromNZV 2014, VDE 2012, dena 2012):

- **Primärregelleistung.** Die Primärregelleistung dient der Aufrechterhaltung der Netzfrequenz und muss innerhalb von 30 Sekunden zur Verfügung stehen und für 15 Minuten aufrechterhalten werden.
- **Sekundärregelleistung.** Die Sekundärregelleistung wird für die Sicherstellung des Ausgleichs zwischen einzelnen Regelzonen des Verbundnetzes benötigt, wobei eine unmittelbare automatische Aktivierung durch den betroffenen Übertragungsnetzbetreiber erfolgt. Die vollständige Leistung muss innerhalb von max. 5 Minuten zur Verfügung stehen, der abzudeckende Zeitraum der Störung beträgt 30 Sekunden bis 60 Minuten (dena 2013). Die Aktivierung erfolgt nach einer sogenannten Merit-Order, d.h. einer nach Aktivierungskosten geordneten Einsatzreihenfolge (Consentec 2014).
- **Minutenreserve** (Tertiärregelleistung). Für die Abdeckung großer Leistungsbilanzstörungen und die Konstanthaltung der Netzfrequenz müssen innerhalb von 15 Minuten Reserven aktiviert werden, wobei diese auf Abruf des Übertragungsnetzbetreibers bereitgestellt werden müssen (dena 2013). Der abzudeckende Zeitraum pro Störung liegt bei mindestens 15 Minuten in konstanter Höhe. Seit Mitte 2012 erfolgt der Abruf der Minutenreserve elektronisch über den Merit-Order-Listen-Server, wobei diese als Fahrplanlieferung aktiviert wird (Consentec 2014).

Bei Regelleistung wird grundsätzlich zwischen positiver und negativer Regelleistung unterschieden. Die positive Regelleistung ist die Kapazität, die eine Stromunterproduktion ausgleicht. Dies kann mit reduziertem Strombezug auf Seiten der Verbraucher sowie mit erhöhter Stromerzeugung erreicht werden. Negative Regelleistung ist hingegen die Kapazität zum Ausgleich einer die Nachfrage übersteigenden Stromerzeugung. Dazu wird auf Seiten der Verbraucher (dies können auch Speicher sein) der Strombezug erhöht oder die Stromerzeugung reduziert.

Um Strom auf dem Sekundärregelenergie- oder Minutenreservemarkt anbieten zu können, muss der Energieerzeuger zurzeit eine Leistung von mindestens 5 MW bereitstellen können (Bundesnetzagentur 2011). Diese Mindestleistung kann von einzelnen Abwasserbehandlungsanlagen in der Regel nicht geliefert werden. Daher formen sich am Markt zunehmend Dienstleister, sogenannte „Aggregatoren“, die eine Vielzahl von Einzelanbietern zu einer Gesamtleistung als „virtuelle Kraftwerke“ bündeln. Sie verfügen somit über einen sogenannten Pool von Anlagen, mit dem sie am Regelleistungsmarkt teilnehmen (BFE 2013). Die Aggregatoren vermarkten das Angebot an Regelleistung im Auftrag der beteiligten Unternehmen und treffen mit ihnen individuelle Vereinbarungen. Die Unternehmen erhalten einen fixen Leistungspreis für die Bereitstellung sowie einen Arbeitspreis bei tatsächlichem Abruf der Leistung.

### ZWEI ARTEN VON REGELENERGIE

- **positive Regellenergie gleicht Stromunterproduktion im Stromnetz aus, z.B. mittels erhöhter Eigenstromversorgung**
- **negative Regellenergie gleicht Stromüberproduktion im Stromnetz aus, z.B. mittels verringerter Eigenstromversorgung**

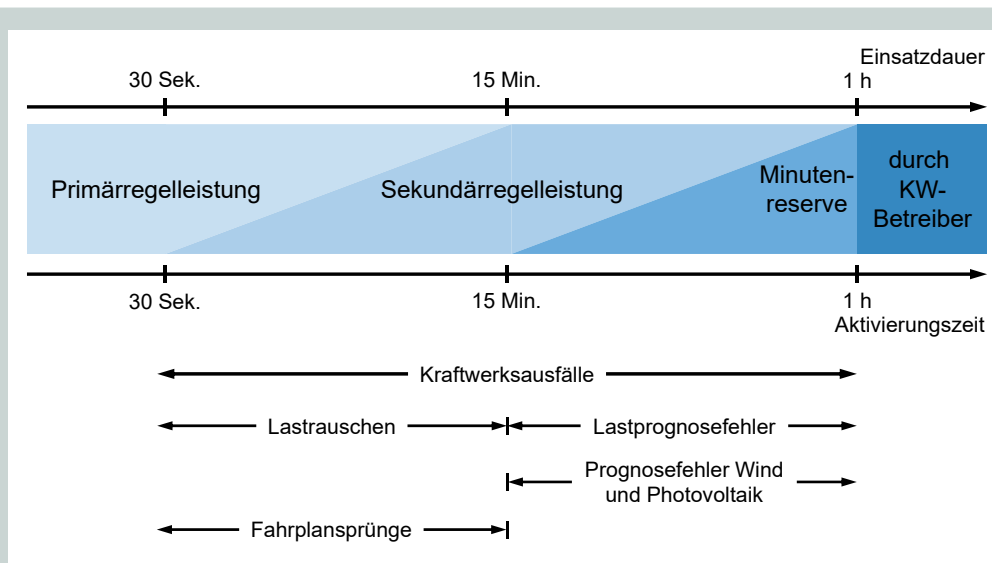


Abbildung 7: Schematische Darstellung Primär-, Sekundär- und Minutenreserve (Tertiärregelleistung) und beispielhafte Ursachen für den Bedarf an Regelleistung, Quelle: dena (2012)

#### VIRTUELLE KRAFTWERKE

Virtuelle Kraftwerke bündeln Energiesystemdienstleister mit weniger als 5 MW Anlagenleistung, damit diese an den Regellenergienmärkten teilnehmen können.

Abbildung 8 und 9: Hochspannungsmasten und Umspannwerk Pfungstadt, Fotos: Christian Schaum



### 3.4 SPOTMÄRKTE

Der Großhandelsmarkt für Strom lässt sich in Terminmärkte und Kurzfristmärkte, auch Spotmärkte genannt, aufteilen. Während auf den Terminmärkten Kontrakte mit Lieferzeiträumen von einer Woche bis hin zu einem Kalenderjahr und mit Vorlaufzeiten von bis zu mehreren Jahren gehandelt werden, werden auf dem Spotmarkt kurzfristige Verträge geschlossen. Der Spotmarkt lässt sich wiederum unterteilen in den Day-Ahead-Markt und den Intraday-Markt.

Im Day-Ahead-Handel werden Stromprodukte für den darauffolgenden Tag über die Plattform EPEX SPOT (European Power Exchange) gehandelt. Bis 12 Uhr am Vortag der Lieferung können für einzelne Stunden Gebote abgegeben werden. Zum Handelsschluss werden alle abgegebenen Stundenangebote in der sog. Merit-Order-Kurve zusammengeführt und dementsprechend die Zuschläge erteilt. Nach dem Prinzip des sog. Market Clearing Price werden alle Kontrakte dieser Stunde zum selben Preis, unabhängig von den eigenen Erzeugungskosten, gehandelt (Graeber 2013).

Im Gegensatz zum Day-Ahead-Markt ist der Intraday-Markt ein untertägiger Handel, mit einer Vorlaufzeit von lediglich 30 Minuten. Die Preisfindung erfolgt nach dem „Pay-as-bid“-Prinzip. Das bedeutet, dass Kauf- und Verkaufsgebote nach ihren Preisen zueinander gepaart werden und somit ein Anbieter bei einem Zustandekommen des

Kontrakts genau den Preis erhält, den er zuvor angeboten hat (Graeber 2013).

Aufgrund der fluktuierenden Einspeisung aus erneuerbaren Energien treten an den Spotmärkten untertägige Preisschwankungen auf. Abbildung 10 zeigt die grundsätzliche Struktur der Strompreisbildung, der sog. „Merit Order“. Auf der Abszisse werden die Angebote der Stromerzeuger nach der Höhe der Grenzkosten der Stromerzeugung geordnet, wobei Kraftwerke mit niedrigen Grenzkosten (Erneuerbare, Braunkohle, Kernenergie) vor verhältnismäßig teuren Stromerzeugungstechnologien (Erdgas) genutzt werden. Die erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien werden aufgrund des Einspeisevorrangs aus dem EEG mit Grenzkosten von 0 Euro/MWh angesetzt. Die Grenzkosten der fossilen Energieerzeugungsanlagen und der Kernkraftwerke sind abhängig von Rohstoffkosten, Wirkungsgraden der Kraftwerke, Rohstofftransportkosten sowie Preisen für CO<sub>2</sub>-Zertifikate. Der Schnittpunkt aus der vertikalen Nachfragegerade und der Grenzkostenkurve der Stromerzeugung der verschiedenen Kraftwerkstypen entspricht dem Market Clearing Price (Graeber 2013). Schwankende Preise am Spotmarkt erklären sich demnach durch die schwankende, aktuell nachgefragte Leistung, das schwankende Angebot aus erneuerbaren Energien und der Kostenstruktur der Erzeugung aus fossilen Energieträgern.

Die fossilen Kraftwerke erbringen die sog. Residuallast, die durch den „Strombedarf abzüglich der Einspeisung Erneuerbarer Energieträger“ definiert ist (Sterner und

Stadler 2014). In Zeiten von hoher Einspeisung aus erneuerbaren Energien ist die Residuallast vergleichsweise niedrig. In der Regel ist in diesen Zeitfenstern auch der Börsenstrompreis deutlich niedriger als in Zeiten mit geringer Einspeisung aus erneuerbaren Energien.

Über einen Energiedienstleister ist eine Beteiligung an den Spotmärkten möglich, sofern im Einzelfall nicht andere Randbedingungen vorliegen. Dabei können durch Bezug von Strom in Zeiten mit niedrigem Preis und Nutzung der Eigenstromerzeugung in Hochpreiszeiten Vorteile erwirtschaftet werden. Durch eine möglichst flexible Gaserzeugung, -speicherung und -nutzung lassen sich so aus Sicht des Kläranlagenbetreibers Kosteneinsparungen generieren.

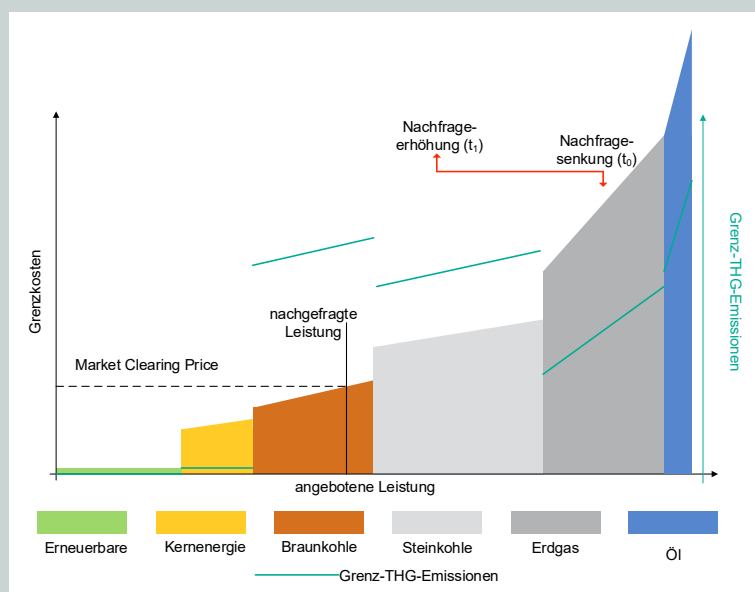


Abbildung 10: Merit Order und Prinzip des „Market Clearing Price“, Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR, verändert nach Graeber (2013)



Durch den preisoptimierten Strombezug eines Verbrauchers ergibt sich eine Glättung der Residuallastkurve, zum Vorteil der Energiewirtschaft bzw. der Netzbetreiber. Diese ist in **Abbildung 11** beispielhaft veranschaulicht.

Die schwarze Kurve veranschaulicht die Residuallast über einen Tag beispielhaft für das heutige deutsche Energiesystem. In der Regel sind die Residuallast – und damit der Börsenstrompreis – in den Mittagsstunden aufgrund der Einspeisung aus Photovoltaikanlagen geringer als in den Morgen- und Abendstunden. Die grüne Kurve hingegen zeigt die Situation, wie sich der Verlauf der Residuallast in den kommenden Jahren, bei einem weiteren Ausbau der Erzeugungskapazitäten aus Windenergie und Photovoltaik, untertägig entwickeln könnte. Es fällt auf, dass die Residuallast in den Mittagsstunden negativ ist. Mit niedriger oder gar negativer Residuallast sind bereits heute in Extremfällen negative Strompreise verbunden. Bei der heutigen Marktgestaltung und einem nicht aufeinander angepassten Erzeugungs- und Verbrauchsverhalten sind solche Negativ-Preisspitzen in Zukunft vermehrt zu erwarten (Sternier und Stadler 2014).

Dieser Situation kann mit der Abriegelung von erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen entgegnet werden. Um dies zu vermeiden – und damit möglichst viel Strom aus erneuerbaren Energieträgern zu nutzen – kann die flexible, preisgesteuerte Stromerzeugung auf Seiten der Kläranlage genutzt werden. Die dadurch vorgehaltene Energie lässt sich dann zu einem späteren Zeitpunkt nutzen, um in Zeiten einer hohen Residuallast Spitzenkraftwerke zu entlasten. So lassen sich sowohl auf Seiten der Stromerzeugung als auch auf Seiten der Stromverbraucher Kostenvorteile realisieren. Zudem führen die zunehmende Integration von erneuerbar erzeugtem Strom und die damit verbundene Verdrängung fossil erzeugten Stroms zur Reduktion von Kohlendioxidemissionen aus der Stromerzeugung.

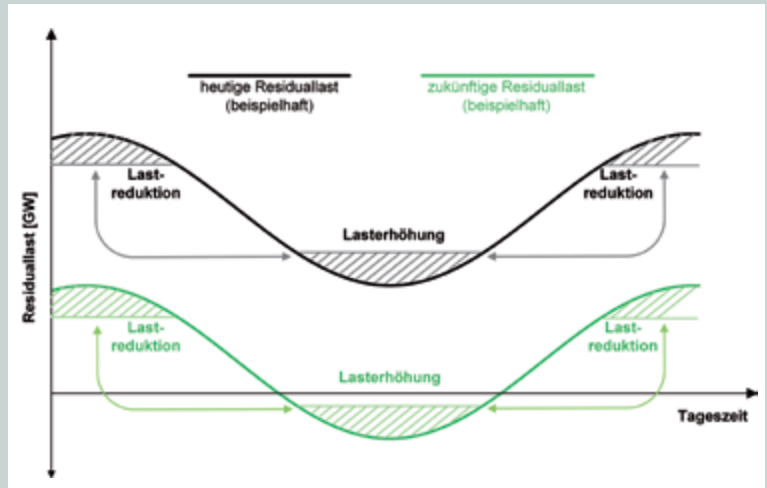


Abbildung 11: Residuallastglättung bei heutiger Einspeisung aus Erneuerbaren Energien (schwarz) und zukünftig (grün) – stark vereinfacht; Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR, verändert nach Ebert und Henkel (2012)

#### RESIDUALLASTGLÄTTUNG DURCH FLEXIBLE STROMERZEUGUNG

- langfristige Möglichkeit zu Kosteneinsparungen auf Seiten des Kläranlagenbetreibers
- Möglichkeit der Integration erneuerbarer Energien und Senkung von Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung insgesamt



Abbildung 12: Handel an Kurzfrist-Strommärkten, Foto: Energy2market GmbH

4

# KLÄRANLAGEN ALS FLEXIBLE ENERGIEERZEUGER UND -VERBRAUCHER



## 4.1

### KLÄRANLAGEN – TECHNISCHE EINHEITEN FÜR GROSSE BETRIEBSSCHWANKUNGEN

Abwasserbehandlungsanlagen sind dafür dimensioniert, die täglich anfallende Abwassermenge zu behandeln. In Abhängigkeit von diversen Randbedingungen, wie z.B. der Kanalisation, industriellen Einleitern, der Größe des Einzugsgebietes etc., muss die Anlagentechnologie so betrieben bzw. vorgehalten werden, dass jederzeit die Betriebssicherheit gewahrt und die Ablaufanforderungen eingehalten werden, trotz stark schwankender Zulaufwassermengen und Schmutzfrachten. An diese Bedingungen, die sich im Tagesgang teilweise erheblich verändern können, muss sich die Abwasserbehandlung flexibel anpassen.

Bei Regenereignissen müssen Abwasserbehandlungsanlagen in aller Regel ein Vielfaches des Trockenwetterzulaufs behandeln (vgl. Abbildung 13). Dabei übernimmt die Kanalisation durch unterschiedliche Füllstände bei Trockenwetter- und Regenwetterereignissen bereits eine Speicherfunktion. Einhergehend mit diesen Schwankungen unterliegt auch der Strombedarf einem Lastprofil, dessen konkrete Ausprägung von der eingesetzten Maschinentechnik bzw. den Hauptstromverbrauchern wie Pumphebewerk oder Belüftung der biologischen Stufen abhängt.

#### FLEXIBILITÄT AUF KLÄRANLAGEN

Kommunale Kläranlagen werden bereits flexibel betrieben, um durch Ausnutzung vorhandener Kapazitäten und Redundanzen den wechselnden Zulaufbedingungen gerecht zu werden!

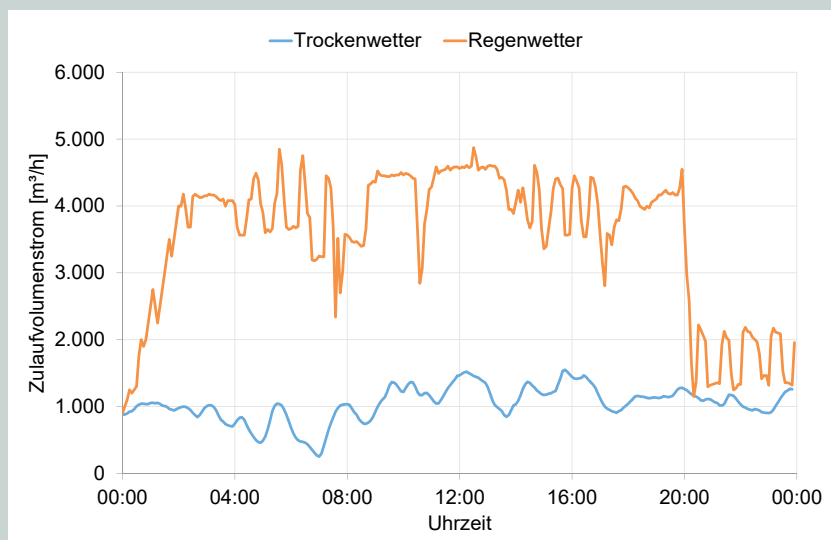


Abbildung 13: Zentralklärwerk Darmstadt, exemplarischer Zulaufvolumenstrom im Tagesgang bei Trocken- und Regenwetter, Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR

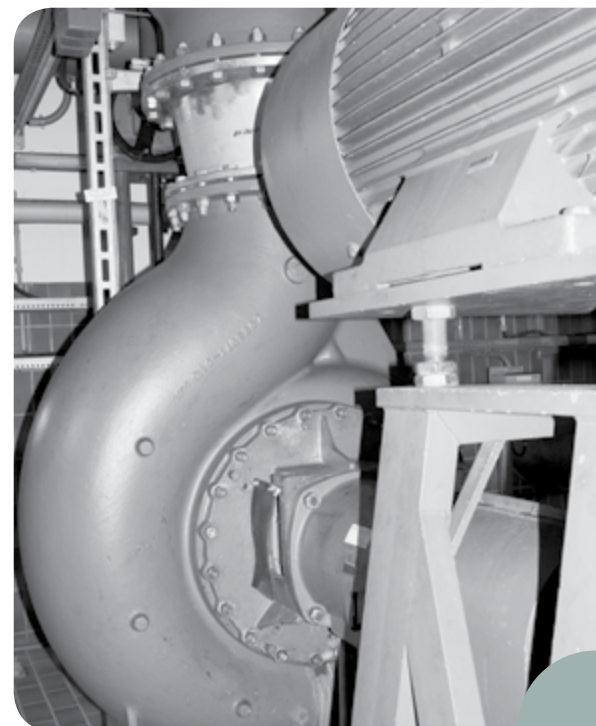


Abbildung 14: Zentralklärwerk Darmstadt, Südsammlerpumpwerk mit einer geodätischen Förderhöhe von 12 m, Foto: Christian Schaum



## 4.2

### KLÄRANLAGEN – VOM ENERGIEVERBRAUCHER ZUM ENERGIEDIENSTLEISTER

Energieverbrauch und Energieerzeugung auf kommunalen Kläranlagen resultieren in der Regel aus separat optimierten Prozessen und sind örtlich und zeitlich voneinander getrennt. In Abhängigkeit der Betriebsbedingungen auf der Abwasserbehandlungsanlage unterliegt der Energiebedarf sowohl einem Tages-, Wochen- als auch Jahresgang. Die energetische Optimierung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung erfolgt derzeit auf Basis von Jahresmittelwerten, wodurch Effekte im Tagesgang nicht berücksichtigt werden können (vgl. DWA-A 216 (2015) und diverse weitere Leitfäden der Wasserwirtschaft zum Thema Energieeffizienz auf Kläranlagen).

Abbildung 15 zeigt exemplarisch für eine kommunale Abwasserbehandlungsanlage den Strom- und Wärmebedarf sowie die Strom- und Wärmeerzeugung im Jahresgang. Beim Stromverbrauch sind saisonale Effekte über den Jahresverlauf bei einem elektrischen Eigenversorgungsgrad von rund 50-60% zumeist vernachlässigbar. Die tageszeitlichen Schwankungen im Stromverbrauch sind dafür umso größer. Der Wärmebedarf hingegen unterliegt einem starken Jahresgang; der Eigenversorgungsgrad liegt im Jahresmittel über 100%. Ebenso zeigt Abbildung 15 exemplarisch den Tagesgang des Strombedarfs. Während der Strombedarf einem starken Tagesgang unterliegt und durch Regen-

wettereffekte stark beeinflusst wird, ist der Wärmebedarf durch kontinuierlich betriebene Wärmeabnehmer (Faulung, Raumluft) im Tagesgang weitgehend konstant.

Kommunale Kläranlagen stellen also aktuell noch Energieverbraucher dar, die bemüht sind, ihren Strombezug im Jahresgang zu reduzieren. Dabei sind ein Wärmemanagement bzw. eine effiziente Wärmenutzung untergeordnet (vgl. Abbildung 16). Wechselwirkungen mit externen Anforderungen aus der Energiewirtschaft finden nicht statt bzw. werden nicht aktiv genutzt.

Eine effiziente Nutzung aller Energieformen, d.h. von Strom und Wärme, sollte jedoch insgesamt das Ziel sein, da für den Betrieb der Abwasserbehandlungsanlage die Energienutzung ein wichtiger ökonomischer Faktor ist. Häufig stellt die Abwasserbehandlungsanlage den größten Einzelenergieverbraucher auf kommunaler Ebene dar. Vergleicht man allerdings die Zahlen mit dem Endenergieverbrauch

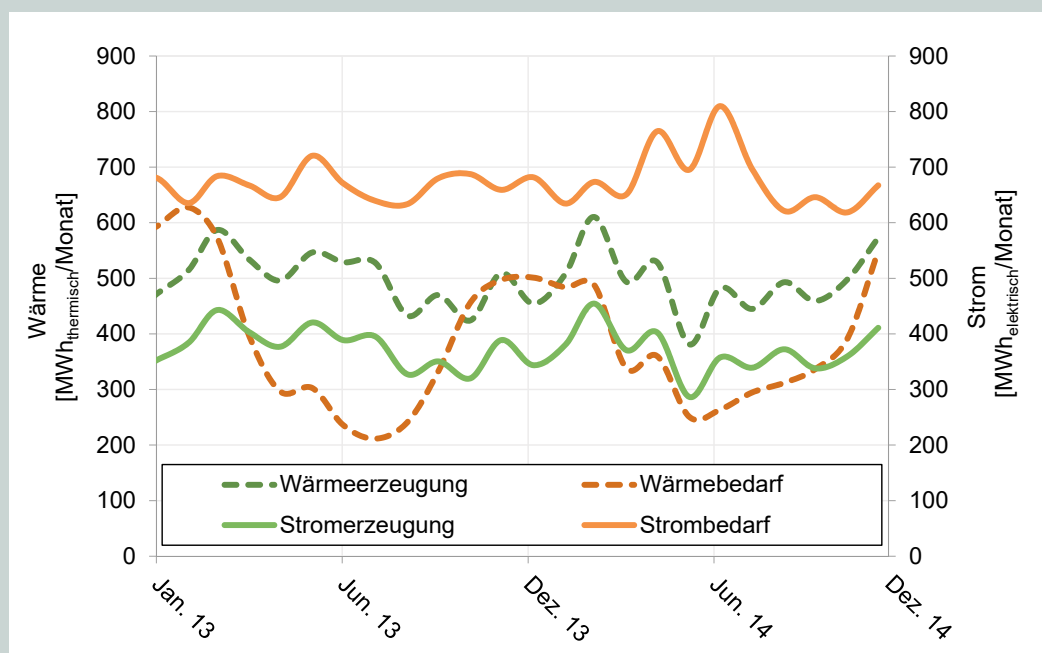
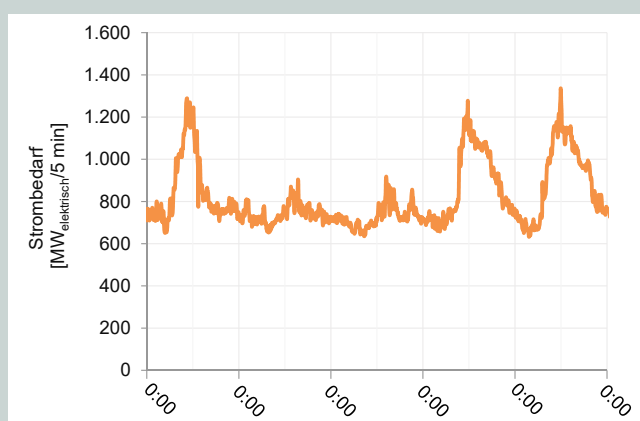


Abbildung 15: **Strom- und Wärmebedarf sowie Stromerzeugung im Jahresgang und (oberes Diagramm) Strombedarf in einem beispielhaften Tagesgang**, Quelle: Schaum und Ansmann (2016)

des Stroms von Haushalten von rd. 139 TWh/a (AGEB 2011), zeigt sich, dass die Abwasserbehandlung daran nur einen Anteil von circa 2% hat. Dem liegt die Annahme von 81 Millionen Einwohnern und einem Stromverbrauch für die Abwasserbehandlung von 34 kWh pro Einwohner und Jahr zugrunde. Dennoch können Kläranlagen zum Erreichen der Ziele der Energiewende und des Klimaschutzes einen wichtigen Beitrag leisten, beispielsweise durch Effizienzmaßnahmen oder den Einsatz von Faulgas bei gleichzeitiger Vermeidung von Methangasemissionen und anderen erneuerbaren Energieträgern bei der Abwasserbehandlung (Bundesregierung 2016).

Dafür bedarf es aber einer Anpassung des Kläranlagenbetriebs: Dieser sollte – neben der stromverbrauchenden Abwasserreinigung – zusätzlich auf das Ziel der Energiesystemdienstleistung ausgerichtet werden. Die Kläranlage wird so zur Energiezentrale, die auch auf periphere Anforderungen aus der Energiewirtschaft reagiert (vgl. Abbildung 17). Im Vordergrund steht eine effiziente Nutzung der anfallenden Energieströme von Strom und Wärme auf der Kläranlage selbst oder in Interaktion mit peripheren Einrichtungen. Dies können z.B. ein gemeinsamer Strom-Bilanzkreis mit unternehmensinternen und -externen Partnern, ein benachbarter Wärmeabnehmer oder ein Fernwärmenetz sein. Bedingung für das Zustandekommen solcher Lösungen ist eine ganzheitliche Systembetrachtung. Als Grundvoraussetzung und gleichzeitig Limitierung gilt dabei, dass die Reinigungsleistung der Kläranlage zu keinem Zeitpunkt gefährdet sein darf und die Sicherstellung der Abwasserbehandlung unter Einhaltung der Grenzwerte gewährleistet ist. Dazu gehören auch die zukünftigen Anforderungen an die Abwasserwirtschaft bezüglich 4. Reinigungsstufe und Klärschlammverwertung.

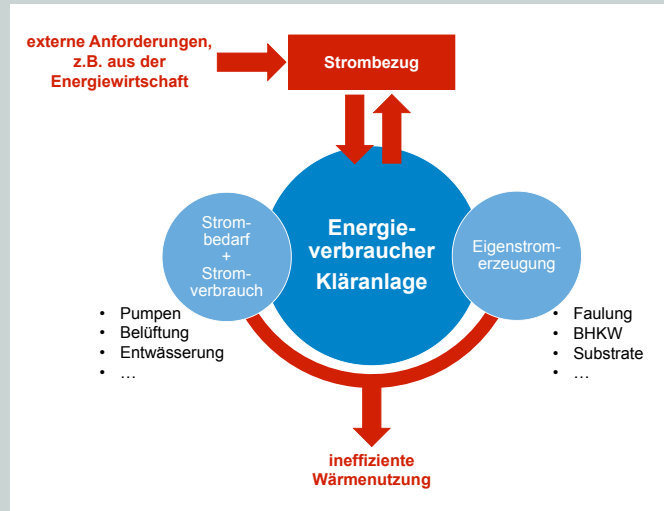


Abbildung 16: Kläranlagen als Stromverbraucher ohne Interaktion mit externen Anforderungen (Betriebsführung Jahr 2017), Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR

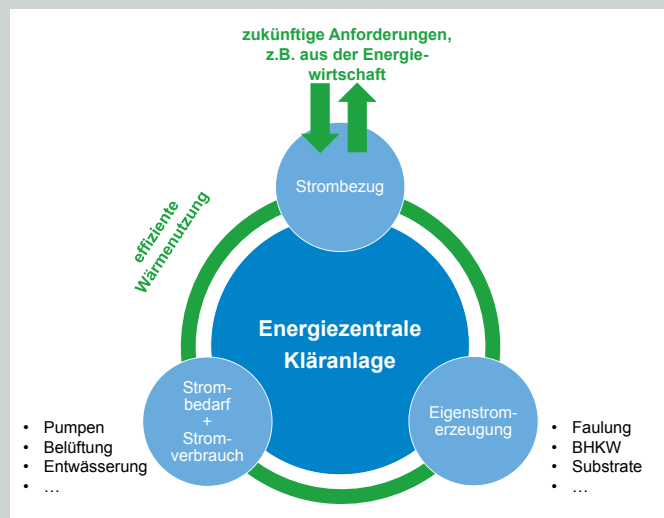
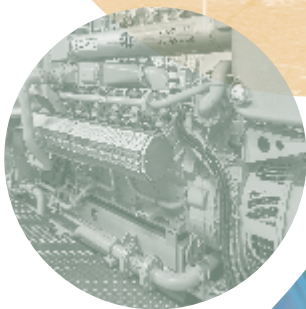


Abbildung 17: Kläranlagen als Energiezentrale zur Erbringung von Energiesystemdienstleistungen (Jahr 2030), Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR



Abbildung 18: Klärschlammverwertungsanlage Rügen, Quelle: Dr. Born – Dr. Ermel GmbH

## 5 BAUSTEINE FÜR FLEXIBLE KLÄRANLAGEN





## 5.1

### FLEXIBILITÄSTECHNOLOGIEN AUF KLÄRANLAGEN ZUR INTERAKTION MIT DER ENERGIEWIRTSCHAFT

Um Kläranlagen nicht mehr nur als Energieverbraucher zu betreiben gilt es, Stromverbrauch, Eigenstromerzeugung und insbesondere den Strombezug gezielt nach den Anforderungen der Energiewirtschaft und eigenen Bedürfnissen anzupassen. Ausreichend Aggregate und Kapazitäten stehen bereits jetzt zur Verfügung, um Stromverbrauch und Stromerzeugung im Tagesgang zu variieren bzw. zukünftigen Anforderungen zu entsprechen. Tabelle 1 vergleicht die zuvor erläuterten notwendigen Flexibilitätstechnologien zur Unterstützung der Energiewirtschaft mit dem Potenzial von Abwasserbehandlungsanlagen, die in diesem Kapitel weiter erläutert werden.

Abwasserbehandlungsanlagen stehen mit der Energiewirtschaft vornehmlich über den Strombezug in Wechselwirkung, aber auch über Stromlieferungen an das Stromnetz. Die Schnittstelle eines bedarfsgerechten Strombezugs ist insbesondere das BHKW, das aus dem erzeugten Faulgas Strom und Wärme produziert. Eine flexible Betriebsweise des BHKW zur nachfrageorientierten Stromerzeugung wird im Kapitel 5.2 näher erläutert, hängt aber allgemein von zwei wesentlichen Faktoren ab:

- wirtschaftlicher und effizienter Betrieb des BHKW im Teillastbetrieb sowie
- Verfügbarkeit von Faulgas bzw. Gasspeichermanagement.

Voraussetzungen für ein erfolgreiches Gasspeichermanagement sind:

- eine ausreichende Größe des Gasspeichers sowie
- eine Vorhersage und Beeinflussung der Faulgaserzeugung bzw. des Faulgasverbrauchs.

Unterstützend lässt sich der Strombezug von Kläranlagen durch weitere Maßnahmen bedarfsgerecht anpassen, um z.B. eine Reduktion des notwendigen Gasspeichervolumens oder eine Minimierung des Leistungsbereichs der BHKW zu erreichen. Diese Flexibilitätsbausteine werden mit einem besonderen Fokus auf die Klärschlammbehandlung im Kapitel 5.3 dargestellt.

Alle Maßnahmen setzen ein Verständnis des eigenen Stromverbrauchs im Tagesgang voraus. Dabei sind die Möglichkeiten der Flexibilisierung des Stromverbrauchs

**Tabelle 1: Flexibilitätstechnologien der Energiewirtschaft und Potenziale auf der Abwasserbehandlungsanlage**

Flexibilitätstechnologie nach Elsner et al. (2015)	Potenzial auf der Abwasserbehandlungsanlage (vgl. Kapitel 5)
planbare und flexibel einsetzbare Stromerzeugungsanlage; d.h. erdgas- und kohlegefeuerte Kraftwerke, Biomassekraftwerke, solarthermische und geothermische Kraftwerke	Betrieb von BHKW in Interaktion mit verschiedenen Energiespeichern (Rohschlamm-, Substrat-, Gasspeicher); ggf. Integration von Netzersatzanlagen
Energiespeicher	Rohschlamm-, Substrat-, Gasspeicher
abschaltbare bzw. verschiebbare Lasten (Lastmanagement)	Abschalten oder Reduzierung flexibler Stromverbraucher, Nutzung von Speicherbecken für Zulauf- und Prozesswasser
Umwandlung von überschüssigem Strom in Wärme (Power-to-Heat) oder in chemisch gespeicherte Energie (Power-to-Gas/Fuel/Chemicals)	Einsatz von Technologien bspw. zur Wärmeerzeugung oder Power-to-Gas; ggf. auch Technologien zur Verfügbarmachung von Substraten (Thermodruckhydrolyse)
Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz zur Nutzung in Gasturbinen oder Gas- und Dampfkraftwerken, sodass eine vollflexible Stromerzeugung möglich ist, die das Erdgasnetz als Speicher nutzt	Faulgasaufbereitung und Einspeisung; auch beim Eigenbetrieb des BHKW sollte eine möglichst vollständige Nutzung von Strom und Wärme erfolgen

#### OPTIONEN FÜR DIE INTERAKTION MIT DER ENERGIEWIRTSCHAFT

**Maßnahmen zur Flexibilisierung des Stromverbrauchs, der bedarfsgerechten Faulgaserzeugung und der Stromerzeugung erhöhen das Potenzial zur Interaktion mit der Energiewirtschaft.**

begrenzt, da Stromverbraucher im Bereich der Abwasserbehandlung vor allem zur Gewährleistung des Gesundheits- und Gewässerschutzes eingesetzt werden. Die Anpassungsfähigkeit der Stromerzeugung bzw. der Klärschlammbehandlung ist deutlich größer, da hier nur mit zeitlichem Verzug reagiert werden muss und nur indirekt in den Klärprozess eingegriffen wird.

Durch geänderte Anforderungen an die Klärschlamm-entsorgung steht zukünftig neben dem Energieträger Faulgas auch der Faulschlamm selbst zur weitergehenden Nutzung an. Eine Möglichkeit ist die thermische Verwertung des Faulschlammes, wodurch ebenfalls ein erheblicher Beitrag zum Strom- und Wärmehaushalt der gesamten Abwasserbehandlungsanlage geleistet werden kann.

Dabei sind grundsätzlich alle Emissionen zu betrachten

## BHKW ALS SCHNITTSTELLE

**Die Schnittstelle eines bedarfsgerechten Strombezugs ist die Betriebsweise des BHKW.**

und es gilt sicherzustellen, dass es zu keiner Verschlechterung der Umweltauswirkungen kommt. Darunter ist auch zu verstehen, dass die anfallenden Energieströme (elektrische und thermische Energie) effizient genutzt werden, was ohne ein intelligentes Wärmemanagement nicht zu gewährleisten ist.

Abbildung 19 fasst die genannten Inhalte vereinfacht zusammen.

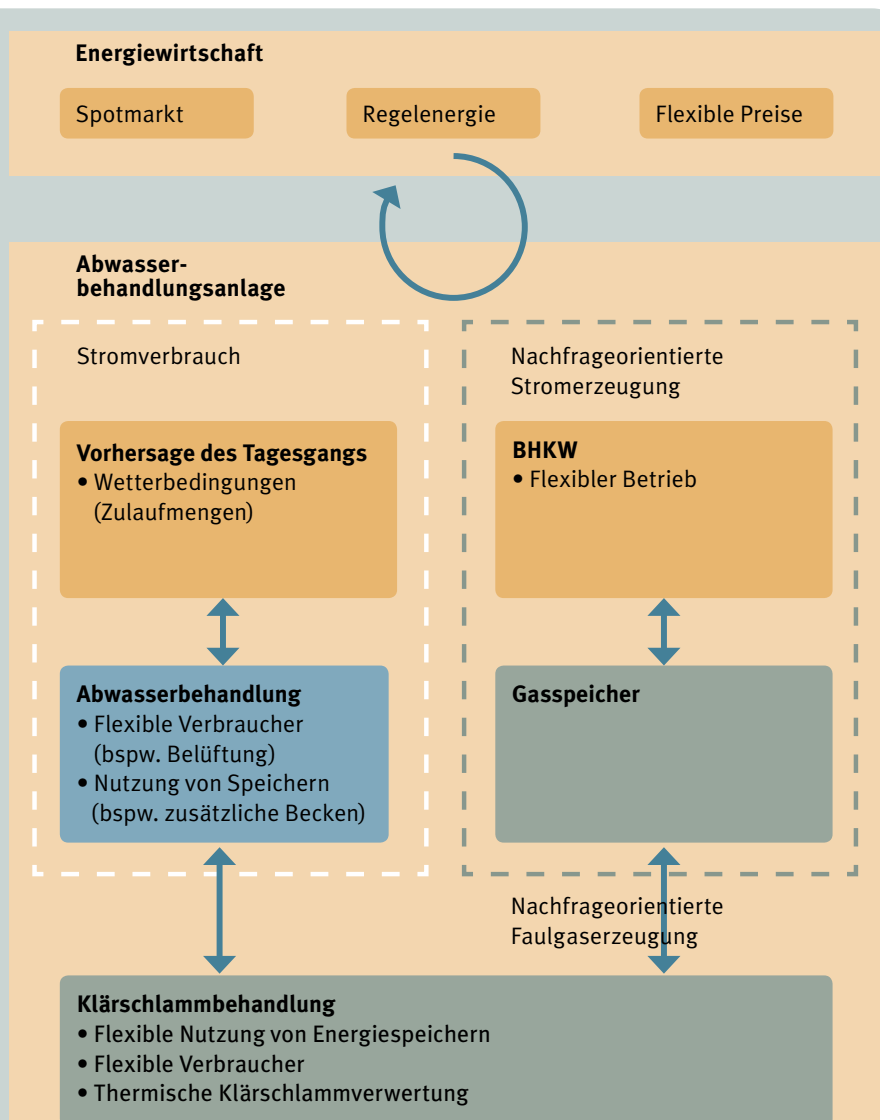


Abbildung 19: Wechselwirkungen der Energiewirtschaft mit der Abwasserbehandlungsanlage und deren Schlüsselprozessen, Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR

## 5.2

### DAS BLOCKHEIZKRAFTWERK ALS SCHNITTSTELLE ZWISCHEN KLÄRSCHLAMMBEHANDLUNG UND ENERGIEBEREITSTELLUNG

Das während der anaeroben Schlammbehandlung entstehende Faulgas wird zur Stromerzeugung energetisch in Blockheizkraftwerken (BHKW) genutzt. Für die Nutzung können unterschiedliche Aggregate zum Einsatz kommen (z.B. Gas-Otto-Motoren, Mikrogasturbinen, Brennstoffzellen). BHKW werden in aller Regel bei hohen elektrischen Wirkungsgraden und gasgeführt betrieben. Der Gasspeicher dient hierbei dem Ausgleich der Faulgasproduktion in Quantität und Qualität, um eine möglichst kontinuierliche Betriebsweise der BHKW zu ermöglichen. In Abhängigkeit von den Randbedingungen (Größe des Gasspeichers, Anzahl der BHKW) kann die Stromerzeugung bzw. Verstromung des Faulgases über den Tag schwanken. In **Abbildung 20 oben** ist die Stromerzeugung einer Kläranlage mit zwei BHKW im bislang weit verbreiteten, gasgeführten Betrieb dargestellt. Am Verlauf der grünen Kurve ist zu erkennen, dass ein BHKW kontinuierlich betrieben wird und ein zweites sich in Abhängigkeit des Gasspeicherfüllstands zuschaltet bzw. abschaltet, wodurch es zu Spitzen in der Stromerzeugung kommt. Dabei müssen die Spitzen

#### NACHTEIL GASGEFÜHRTER BHKW-BETRIEBSWEISE

Bei einem rechnerischen Eigenversorgungsgrad von 100 Prozent ist durch eine gasgeführte Betriebsweise der BHKW eine Deckung des tatsächlichen Strombezugs über den Tag nicht möglich!

und Täler in der Stromerzeugung nicht mit den Spitzen und Tälern im Stromverbrauch übereinstimmen, was dazu führt, dass eine Deckung des tatsächlichen Strombezugs über den Tag nicht möglich ist. Aus

Redundanzgründen werden häufig mehrere BHKW-Module installiert, so dass bei genauerer Betrachtung die Einzelaggregate oft nur eine sehr geringe Laufzeit aufweisen.

In Zukunft kann durch eine stromgeführte Betriebsweise der BHKW der externe Strombezug gezielt den Bedürfnissen angepasst werden. Dazu orientiert sich die Betriebsweise der BHKW z.B. am tatsächlichen Strombedarf, wie in **Abbildung 20 unten** dargestellt. Eine Zu- und Abschaltung von Einzelmodulen erfolgt nach der Verbraucherlast.

#### KRITERIEN FÜR AUSLEGUNG STROMGEFÜHRTER BHKW

- Teillastbetrieb mit hohen Wirkungsgraden
- Berücksichtigung von Aggregaten mit hoher Nennleistung zur Erzielung hoher Wirkungsgrade und zur Auskopplung von Hochtemperatur- (HT-) Wärme

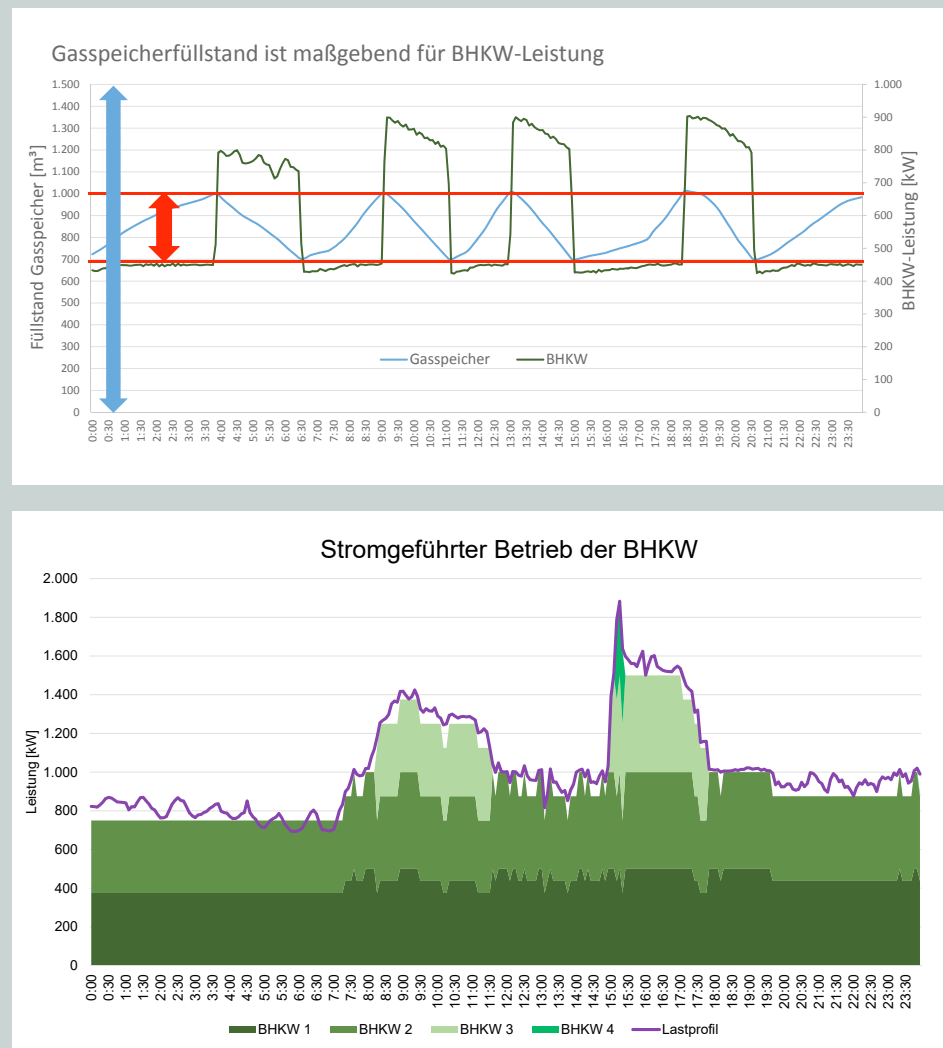


Abbildung 20: Gasgeführte Betriebsführung von BHKW zu stromgeführten BHKW, Quelle: bluemove-consulting GmbH

Die Bemessungen einer BHKW-Anlage und der Anzahl sowie Leistungsabgabe der installierten Aggregate sollte zukünftig stromgeführt anhand des benötigten Strombedarfs in Abhängigkeit des zur Verfügung stehenden Faulgases stattfinden. Hierzu wird der Strombedarf als Jahreskurve geordnet aufgetragen (vgl. Abbildung 21 die abfallende Kurve) und die BHKW-Aggregate werden mit dem Ziel einer hohen Betriebsvolllaststundenzahl bei hohem Wirkungsgrad ausgelegt. Im Allgemeinen wird hierdurch eine Grundlastabdeckung erreicht und die Möglichkeit eröffnet, Lastspitzen effizient abzufahren. Neben elektrischer Energie kann auch eine wärmeseitige Abgabe von Nieder- und auch Hochtemperaturwärme an das Gesamtsystem erfolgen. Wenn bei der Anschaffung von Blockheizkraftwerken hohe elektrische Wirkungsgrade unter Teillast ein Kriterium sind, können die Nennleistung der jeweiligen Aggregate größer ausfallen und ihre Anzahl reduziert werden. Dies optimiert nicht nur den elektrischen Wirkungsgrad, sondern erleichtert eine mögliche Hochtemperatur-(HT-)Auskopplung.

Eine Limitierung des stromgeführten Betriebs des BHKW ergibt sich durch das vorzuhaltende Faulgas bzw. die Gasspeichergröße. Bei einer möglichst kontinuierlichen Betriebsweise wird nahezu kein Gasspeicher benötigt, sondern das Gas maßgeblich als Ausgleich für bspw. Störungen im Betrieb genutzt. Infolge einer Umstellung zum stromgeführten Betrieb und damit auf eine flexible Stromerzeugung werden deutlich größere Gasspeicher notwendig, da im Falle

- ausgeschalteter BHKW das erzeugte Faulgas komplett zwischengespeichert werden muss,
- eingeschalteter BHKW erzeugtes Faulgas vorgehalten werden muss und durch die Nutzung von Aggregaten mit hoher Nennleistung größere Volumina zum Betrieb notwendig werden.

Reduzieren lässt sich der Bedarf an Gasspeichervolumen allerdings durch Maßnahmen zur bedarfsorientierten Faulgaserzeugung. Sie werden im folgenden Kapitel dargestellt.

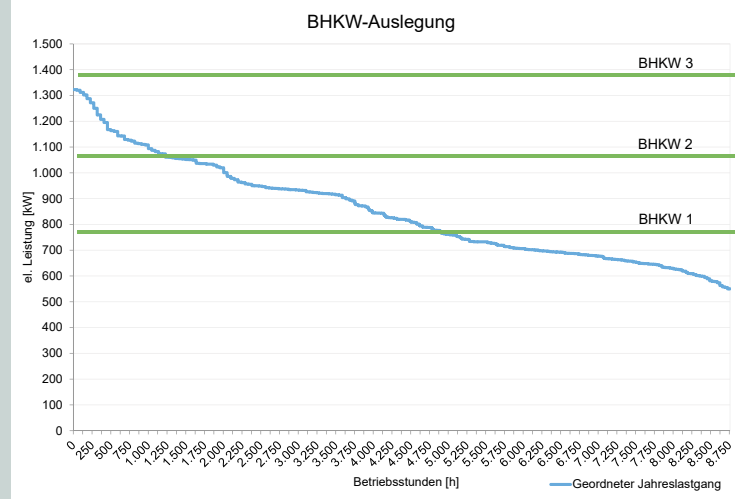


Abbildung 21: Geordneter Lastgang Strombedarf, Auslegung BHKW, Quelle: Dr. Born – Dr. Ermel

### STROMGEFÜHRTE BHKW BENÖTIGEN MEHR SPEICHERVOLUMEN

- Das im Gasspeicher vorhandene Faulgas stellt die Energieressource der BHKW dar.
- Das notwendige Volumen des Gasspeichers ist bei gasgeführter Betriebsweise der BHKW minimal und vergrößert sich deutlich im stromgeführten Betrieb.



Abbildung 22: Zentralklärwerk Darmstadt, Blockheizkraftwerk, Foto: Jürgen Mai, Entega Abwasserreinigung GmbH & Co.KG



### 5.3

## DIE KLÄRSCHLAMMBEHANDLUNG ZUR BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT

Neben dem bisher dargestellten Faulgas im Gasspeicher, das als Energiespeicher dient, gibt es entlang der Klärschlammbehandlung eine Vielzahl an weiteren Energiespeichern, die in **Abbildung 23** zusammengestellt sind.

Beginnend mit den Substratspeichern, sind hier die Energiedichten der unterschiedlichen Substrate – Primärschlamm, Überschussschlamm und Co-Substrate – im Vergleich zu Faulgas aufgeführt (vgl. **Tabelle 2**). Die Schlämme in den Substratspeichern haben hierbei die höchste Energiedichte. Im Vergleich zum Faulgas im Gasspeicher können sie daher sehr viel Energie in geringen Volumina bereitstellen. Die unterschiedlichen Energiedichten implizieren bereits, dass bei der Vergärung der jeweiligen Substrate in Abhängigkeit ihrer Verfügbarkeit und Abbaubarkeit unterschiedliche maximale Faulgasausbeuten sowie unterschiedliche Abbaugeschwindigkeiten erzielt werden können.

Eine Einbeziehung von Substratspeichern in ein Energiespeichermanagement ist folglich dringend zu empfehlen. Die Nutzung von nur geringfügig größeren Substratspeichern in Verbindung mit einem bedarfsorientierten Beschickungsmanagement der Faulung verringert den Bedarf an Gasspeichervolumen deutlich. Zu berücksichtigen ist

hierbei die höhere Bereitstellungszeit von der Beschickung des Substrats bis hin zur Erzeugung und Nutzung des Faulgases. Die Faulung, die gezielte Nutzung von Co-Substraten, die Thermodruckhydrolyse und die Klärschlammverbrennung werden somit zu Flexibilitätsbausteinen, deren Nutzungsmöglichkeiten in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden. Der Gasspeicher als „Puffersystem“ bleibt ein notwendiger Baustein für eine flexible Stromerzeugung.

**Tabelle 2: Vergleich möglicher Energiespeicher auf Kläranlagen hinsichtlich der Energiedichte, Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR**

Energiespeicher	Energiedichte (gesamt)	über Faulung + BHKW nutzbare Energiedichte		Bereitstellungszeit
		[kWh/m <sup>3</sup> ]	[kWh/m <sup>3</sup> ] <sup>5</sup>	
Primärschlamm <sup>1</sup>	294	151	67	< 4
Überschussschlamm <sup>2</sup>	282	73	32	4 - 7
Co-Substrat <sup>3</sup>	780	500	222	1 - 4
Faulgas <sup>4</sup>	6,4	5,8	2,6	< 0,25
Lithium-Ionen-Akku	300	–	–	n.a.

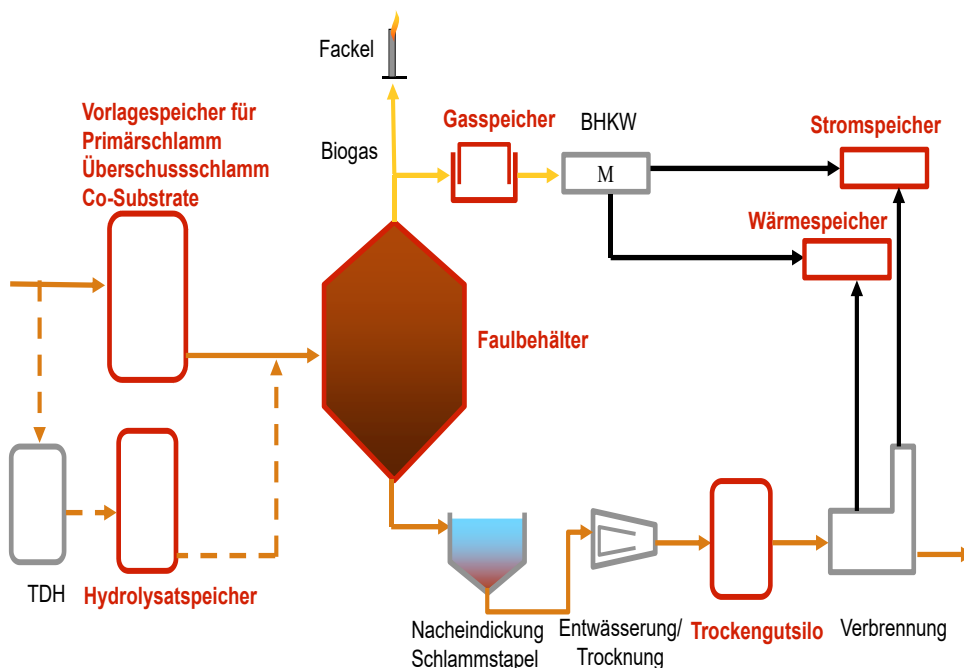
<sup>1</sup> TR = 7%; GV = 75%; CSB/ oTR = 1,6 g/g; Methanerzeugung 200 NL CH<sub>4</sub>/kg CSBzu

<sup>2</sup> TR = 7%, GV = 72%, CSB/ oTR = 1,6 g/g; Methanerzeugung 100 NL CH<sub>4</sub>/kg CSBzu

<sup>3</sup> TR = 15%, GV = 87%, CSB/ oTR = 1,7 g/g; Methanerzeugung 250 NL CH<sub>4</sub>/kg CSBzu

<sup>4</sup> Methananteil 64%, Dichte bei 65% Methan: 1,2 kg/Nm

<sup>5</sup> Heizwert Methan 10 kWh/m<sup>3</sup>; elektrischer Wirkungsgrad BHKW 40%, thermischer Wirkungsgrad 50%



**Abbildung 23: Übersicht über Energiespeicher entlang der Klärschlammbehandlung (rot), Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR**

Als potenzielle Wärmespeicher oder Wärmesenken kommen insbesondere wärmenutzende Prozesse wie Faulung und Thermodruckhydrolyse in Frage. Gemeinsam mit einer zukünftig notwendigen Klärschlammverbrennung bilden sie das Grundgerüst eines integrierten Wärmemanagements zur effizienten Nutzung aller auf der Kläranlage vorhandenen Energiepotenziale.

Batterien als Stromspeicher oder latente Wärmespeicher komplettieren die Auswahl möglicher Bausteine zur Erhöhung von Flexibilität durch Ausgleich von Schwankungen im Tagesgang. Zur Vermeidung zusätzlicher Investitionen sind zunächst jedoch interne Maßnahmen zu bevorzugen.

Die Komplexität eines flexiblen Energiemanagement-Systems verdeutlicht die energetische Verknüpfung der Einzelprozesse entlang der Klärschlammbehandlung, dargestellt im Energie-Fluss-Diagramm Abbildung 24.

#### ENERGIEDICHTE VS. SPEICHERVOLUMEN

- Faulgas hat die kleinste Energiedichte der Energiespeicher auf Kläranlagen.
- Die Nutzung von Co-Substraten als Energiespeicher bedarf der kleinsten Volumina.

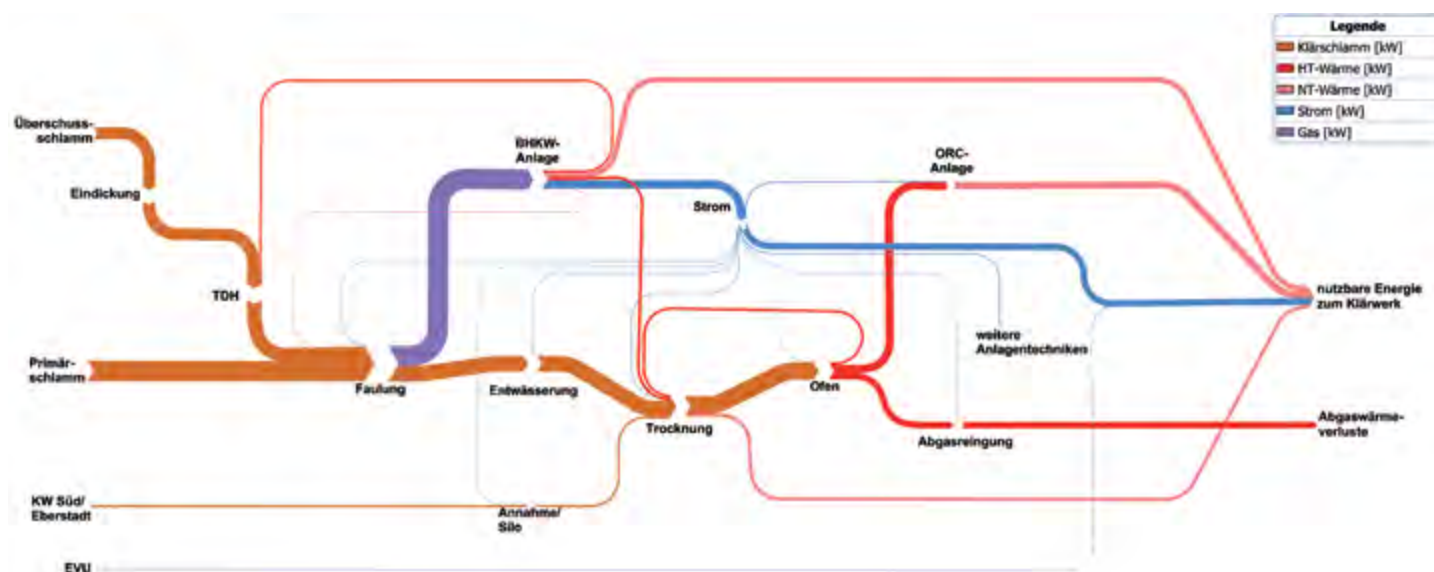


Abbildung 24: Energiefluss-Diagramm,  
Quelle: Dr. Born – Dr. Ermel GmbH



Abbildung 25: Regenüberlaufbecken  
und Faultürme im Hintergrund,  
Foto: Christian Schaum

### 5.3.1

## KONVENTIONELLE FAULUNG ZUR BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT

In der Praxis werden aus Gründen der Prozessstabilität Faulungen in aller Regel kontinuierlich beschickt (Rosenwinkel et al. 2015). Demnach wird das Faulgas vergleichsweise kontinuierlich und auf einem gleichbleibenden Niveau erzeugt (vgl. Abbildung 27).

Durch ein Beschickungsmanagement kann die Faulgaserzeugung bedarfsorientierter ausgerichtet werden. Versuche im Labor- und Pilotmaßstab mit Überschussschlamm zeigen, dass durch eine täglich einmalig stattfindende stoßweise Beschickung keine negativen Auswirkungen auf die Prozessstabilität und Faulgasausbeute zu beobachten waren. Aus der Praxis bekannte Probleme bezüglich Schaumbildung sind bei einer Faulzeit von 20 Tagen nicht aufgetreten.

Anhand des Verlaufs der Faulgaserzeugung ist ein deutliches Potenzial für ein Beschickungsmanagement zu erkennen, welches durch verschiedene Substrate und technische Verfahren zur Optimierung des anaeroben Abbaus weiter gesteigert werden kann. Kläranlagen können demnach ihre Faulgaserzeugung prinzipiell dem Strombedarf anpassen.

Eine flexible Faulgaserzeugung ist allerdings neben technischen Gegebenheiten wie Pumpentechnik auch durch die anfallenden Substrate sowie durch Substratspeicher auf der Abwasserbehandlungsanlage limitiert.

### FLEXIBILITÄTSOPTIONEN BEDARFSORIENTierter FAULGASERZEUGUNG

- Maßnahmen zur bedarfsorientierten Faulgaserzeugung verkleinern das notwendige Gasspeichervolumen, unter der Bedingung größerer Substratspeicher.
- Faulgas lässt sich durch eine stoßweise Beschickung variabel und bedarfsgerecht erzeugen.
- Dabei verändert sich die Faulgasausbeute im Vergleich zur kontinuierlichen Beschickung der Faulung nicht.



Abbildung 26: Versuchsanlage konventionelle Faulung auf dem Versuchsfeld der TU Darmstadt Institut IWAR, Foto: Christian Schaum

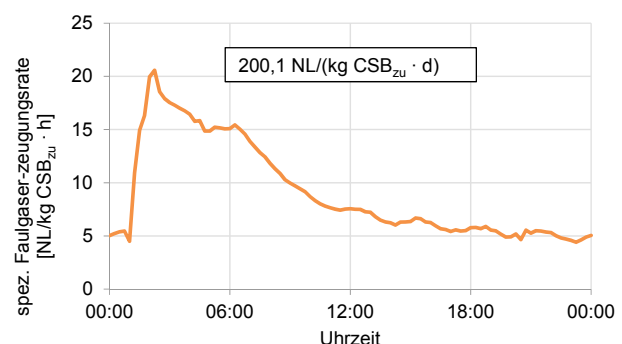
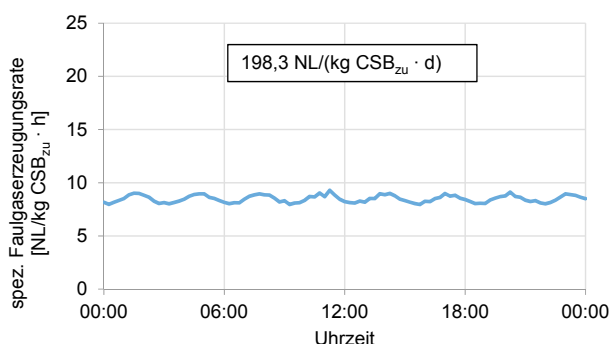


Abbildung 27: Spezifische Faulgaserzeugungsrate durch eine kontinuierliche Beschickung (links) und durch eine stoßweise Beschickung (rechts), Quelle: Rühl et al. (2017)

### 5.3.2

## EINSATZ DER THERMODRUCKHYDROLYSE ZUR BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT

Der organische Anteil der bei der Abwasserbehandlung anfallenden Rohschlämme – insbesondere beim Überschussschlamm aus der Belebung – ist nur in begrenztem Umfang unter technisch und wirtschaftlich vertretbaren Verweilzeiten in der anaeroben Schlammstabilisierung biologisch abbaubar. Vorgeschaltete Desintegrationsverfahren zum Aufschluss organischen Materials bieten daher die Möglichkeit, Faulzeiten zu verkürzen sowie Schlammabbaugrade und damit auch den spezifischen Faulgasertrag zu steigern. Die Thermodruckhydrolyse (TDH) ist ein Verfahren zur thermischen Desintegration von Klärschlämmen. Temperaturen im Bereich von 130 - 175°C bewirken unter Druck (3 - 9 bar) eine Auflösung der Flockenstruktur sowie einen (Teil)-Aufschluss der im Schlamm enthaltenen Mikroorganismen und Partikel. Hierdurch werden die im Schlamm enthaltenen organischen Bestandteile einem verbesserten biologischen Abbau in der Faulung zugänglich gemacht.

Zusammengefasst können folgende Vorteile erzielt werden (vgl. DWA-M 302 2016):

- Steigerung des spezifischen Faulgasertrags,
- Verkürzung der Faulzeiten durch schnelleren Abbau,
- Verminderung der zu entsorgenden Klärschlammmenge durch höheren oTR-Abbau,
- Verbesserung des Entwässerungsverhaltens des Faulschlammes,
- erhöhte Freisetzung von Nährstoffen für deren Rückgewinnung sowie
- Desinfektion des Klärschlammes.

Neben der Steigerung der energetischen Effizienz der Schlammfaulung auf Kläranlagen bietet der Einsatz der TDH hinsichtlich der Flexibilisierung eine Wärmesenke bei gleichzeitiger Erhöhung des Potenzials zur Stromerzeugung. Im weitesten Sinne lässt sich die TDH dafür einsetzen, Wärme in Strom umzuwandeln.

Anpassungsmöglichkeiten ergeben sich durch folgende Effekte beim Einsatz der TDH:

- Verkürzung der Bereitstellungszeit von Faulgas durch erhöhte Abbaugeschwindigkeiten des Substrats in den Faulbehältern (vgl. Abbildung 28),
- Nutzung der TDH als flexible Wärmesenke für anfallende Abwärmeüberschüsse bspw. aus dem BHKW-Abhitzeessel oder Hochtemperaturabwärme aus Klärschlammverbrennung,
- Speicherfähigkeit der Hydrolysate ohne Einbußen von spezifischen Methanausbeuten.

Der Wärmebedarf für den Betrieb der TDH lässt sich durch eine geeignete Integration in das (Ab-)Wärmemanagement der Kläranlage ohne zusätzlichen Einsatz von Primärenergie abdecken. Der erforderliche Wärmeenergiebedarf für die TDH liegt im Bereich von 130 - 190 kWh/m<sup>3</sup> Schlamm (vgl. DWA-M 302 2016) bei einem Temperaturniveau höher als 180° Celsius und ist bilanziell durch den Faulgasmehrtrag abgedeckt.

Je nach eingesetztem TDH-Verfahren können durch eine erhöhte Schlamm-Voreindickung (auf bis zu 15% TR) Hydrolysate erzeugt werden, die gegenüber üblichen Rohschlämmen, trotz einer möglichen Verdünnung mit Wasserdampf, eine höhere Energiedichte besitzen und somit das Substratspeichervolumen deutlich reduzieren. Durch die erhebliche Viskositätserniedrigung während der TDH-Behandlung bleiben die erzeugten Hydrolysate gut pumpfähig und führen zu einem verringerten Aufwand für die Eintrags- und Rührsysteme der Faulungen.

Nachteilige Effekte des Einsatzes der Thermodruckhydrolyse:

- erhöhte Freisetzung von Ammonium und Phosphor;
- Erhöhung der Bildung von refraktären organischen, gelösten Stoffen, bzw. Erhöhung des gelösten CSB.



Dementsprechend ist bei Planung und Betrieb einer TDH-Anlage einem ggf. etwas ansteigenden Bedarf an Belüftungsenergie für die Belebung (Nitrifizierung) sowie u.U. einem leichten Anstieg der CSB-Ablaufwerte der Kläranlage besondere Beachtung zu widmen.

#### FLEXIBILITÄTSOPTIONEN DER THERMODRUCKHYDROLYSE

- Verkürzung der Bereitstellungszeit von Faulgas
- Erhöhung der Faulgasausbeute
- Verbesserung der Speicherefähigkeit ohne Einbußen in der spezifischen Methanausbeute
- Wärmesenke

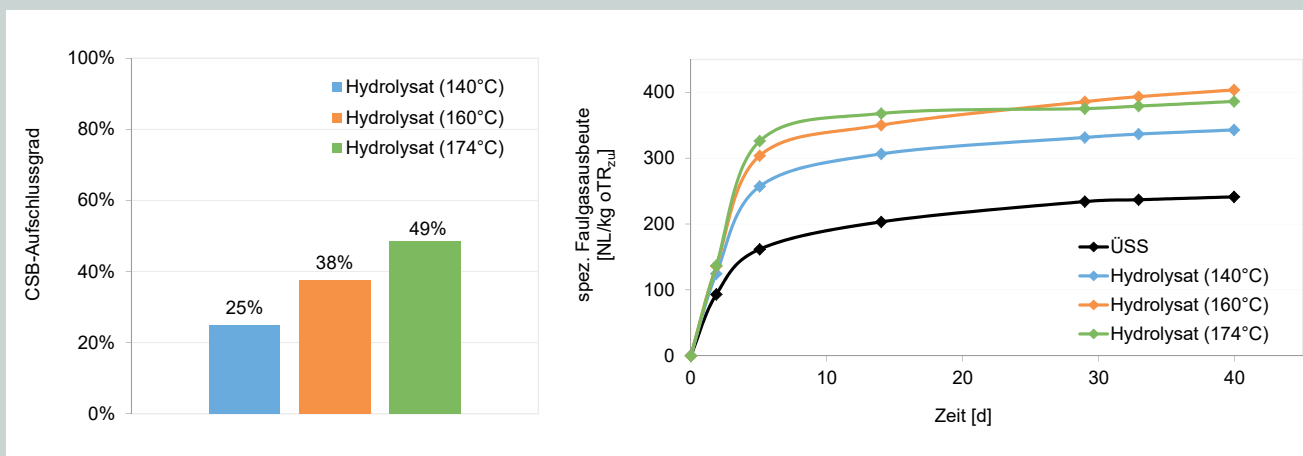


Abbildung 28: Vergleich der CSB-Auflösungsgrade, Faulgasausbeuten und Abbaugeschwindigkeiten von Überschussschlamm (ÜSS) und Hydrolysaten, Quelle: CUTEF Forschungszentrum für Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz der Technischen Universität Clausthal



Abbildung 29 und 30: Vergleich von Überschussschlamm (links) und Hydrolysat (rechts), jeweils mit 5% Trockenrückstand (TR) Quelle: CUTEF Forschungszentrum für Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz der Technischen Universität Clausthal

### 5.3.3

## EINSATZ VON CO-SUBSTRATEN ZUR BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT

Unter Co-Vergärung wird allgemein die Mitfaulung externer, energiereicher Substrate bezeichnet. Für eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Faulgas bieten Co-Substrate grundsätzlich zwei wesentliche Vorteile:

- Erhöhung der spezifischen Faulgasausbeute/ Methanausbeute sowie
- Verkürzung der Bereitstellungszeit von Faulgas durch hohe Umsatzgeschwindigkeiten der Substrate.

In konventionellen Faulungen dürfen in aller Regel nur bis zu 50 Volumenprozent an Co-Substraten genutzt werden, sofern freie Faulraumkapazitäten dies zulassen und die Betriebssicherheit der Abwasserbehandlungsanlage bzw. die Prozessstabilität der Faulung nicht negativ beeinträchtigt werden (z.B. HMUELV 2009). Vornehmlich kommen Co-Substrate aus der Sammlung von Speiseresten und der lebensmittelverarbeitenden Industrie (Flotatschlämme) zum Einsatz.

Die Prozessstabilität der Faulung kann durch die Co-Vergärung auf unterschiedliche Arten negativ beeinflusst werden:

- Übersäuerung und Störung der Abbaugeschwindigkeit,
- Schaumbildung durch unvollständig abgebaute Substrate.

Vereinfacht ausgedrückt erfolgt eine Übersäuerung, wenn der Umsatz organischer Verbindungen entlang der anaeroben Abbaukette zu organischen Säuren deutlich schneller erfolgt als der Abbau organischer Säuren zu Methan und Kohlendioxid. Dies gilt insbesondere für

schnell hydrolysierbare (versäuerbare) Substrate, zu denen Co-Substrate gehören. Die Raumbelastung richtet sich somit nach der langsamsten Stufe des anaeroben Abbaus.

Ein sicherer Betrieb unter Einsatz von Co-Substraten ist somit bei geringen Anteilen oder unter Einhaltung gleichbleibender CSB-Raumbelastungen möglich. Aktuell werden auf Kläranlagen Co-Substrate volumenstromproportional dosiert, was den gegebenen Abweichungen in den Zusammensetzungen der Co-Substrate (CSB-Konzentration, Trockenrückstand und Glühverlust) nicht gerecht wird. Da der erfolgreiche Einsatz jedoch stark von der Qualität abhängig ist, wird eine Prüfung jeder Anlieferung auf charakteristische Parameter (wie bspw. des CSB) vor Einbringung in den Faulreaktor empfohlen (Flodgren und Örnmark 2016). Dies

### PROZESSSTABILITÄT DER CO-VERGÄRUNG SICHERN

- **Beschickung nach CSB-Raumbelastung und nicht volumenproportional**
- **Beurteilung und Prüfung der Substrate vor Einsatz (empfehlenswert: mindestens CSB-Konzentration)**

erfordert idealerweise die Nutzung von zwei Substratspeichern, in denen wechselweise Substrate überprüft und nach Freigabe in die Faulung dosiert werden.

Im Labor- und Pilotmaßstab konnten Faulungen unter Einhaltung konstanter CSB-Raumbelastungen mit Co-Substraten eines milchverarbeitenden Unternehmens bei Anteilen bis zu 40 Volumenprozent bzw. bis zu 75% bzgl. der CSB-Fracht sicher behandelt und somit die spezifische Faulgasausbeute deutlich erhöht werden (vgl. Abbildung 32). Ebenso lässt sich die spezifische Methanausbeute bspw. durch Zugabe von Flotatschlämmen aus der Fleischverarbeitung steigern. Dabei zeigt sich, dass die Methanausbeute nicht allgemein branchenspezifisch, sondern stark von den jeweiligen Produktionsbedingungen und Produkten abhängig ist. Eine Prüfung der Eignung auf Mitfaulung ist somit obligatorisch.



Abbildung 31: Verfahrensschema einer Flotation, wie sie z.B. bei der milch- und fleischverarbeitenden Industrie eingesetzt wird, Quelle: EnviroChemie GmbH

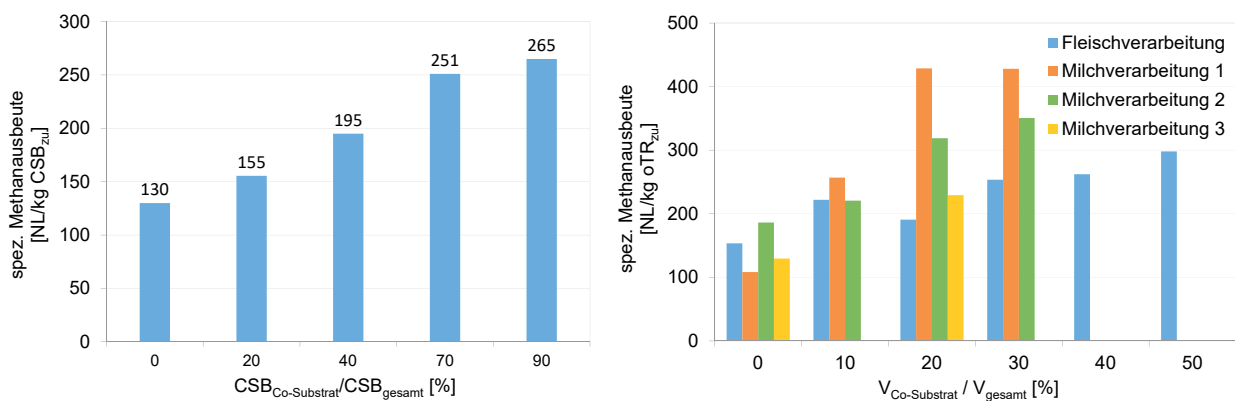


Abbildung 32: Erhöhung der Methanausbeute durch Nutzung von Flotatschlamm aus der Milchverarbeitenden Industrie (links), verschiedene Substrate (rechts), Quelle: TU Darmstadt Institut IWAR und EnviroChemie GmbH

Die Untersuchung der maximalen Faulgasausbeuten findet in aller Regel anhand von Laborgärversuchen, z.B. nach VDI 4630 (2016) oder DIN 38414-S8 (1985) statt. An den Kurven in Abbildung 33 lässt sich ebenfalls ablesen, dass Co-Substrate im Vergleich zu den Rohschlamm kommunaler Kläranlagen deutlich schnellere Abbaugeschwindigkeiten aufweisen.

Diese schnellen Abbaugeschwindigkeiten lassen sich zur Erreichung eines gezielten Faulgaspeaks mit deutlich geringeren Vorlaufzeiten nutzen. Kläranlagen können somit schneller ihre augenblickliche Faulgaserzeugung dem Bedarf anpassen. Unter Einhaltung einer gleichmäßigen, täglichen CSB-Raumbelastung ergibt sich bei Umstellung auf eine diskontinuierliche (Stoß-)Beschickung anstelle einer kontinuierlichen Beschickung ein erhebliches Potenzial zur bedarfsgerechten Faulgaserzeugung bei gleicher Faulgasausbeute.

Die Änderung stündlicher Raumbelastungen infolge von Stoßbeschickungen kann jedoch wiederum zu unterschiedlichen Abbaugeschwindigkeiten entlang der anaeroben Abbaukette und zur Akkumulation organischer Säuren führen. Dies limitiert das Flexibilitätspotenzial. Des Weiteren ist eine entsprechend dimensionierte Pumptechnik und Durchmischung der Faulung erforderlich, um ein starkes Schäumen infolge der Variation der Belastung im Tagesverlauf zu kompensieren.

#### FLEXIBILITÄTSMPTIONEN BEIM EINSATZ VON CO-SUBSTRAT

- Verkürzung der Bereitstellungszeit von Faulgas
- Erhöhung der Faulgasausbeute
- Verringerung der Substratspeichergröße

Die Gewährleistung der Betriebsstabilität bei schwankenden Zulauffrachten ist zu beachten.

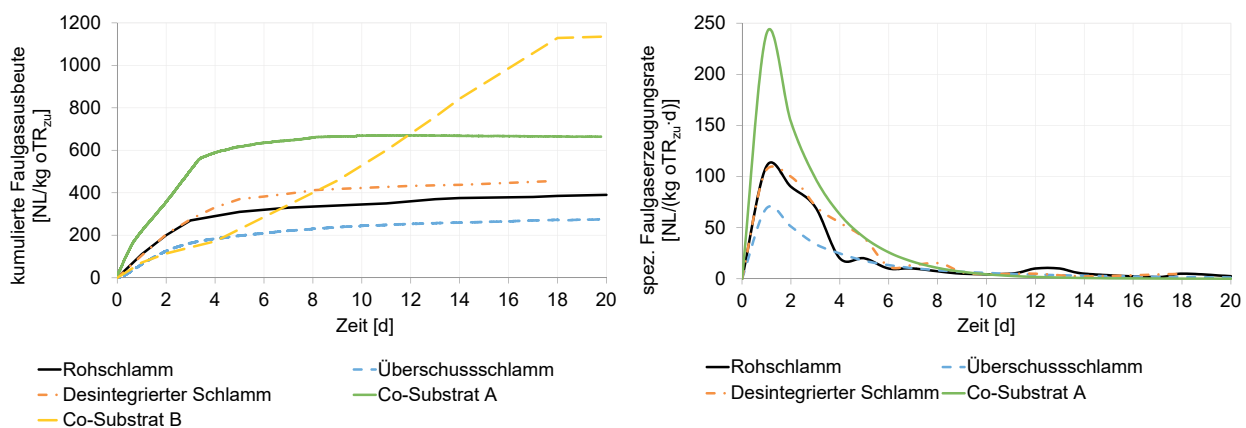


Abbildung 33: Faulgasausbeute und Umsatzgeschwindigkeiten (Faulgaserzeugungsrate) unterschiedlicher Substrate, Quelle: Lutze et al. (2016)

### 5.3.4

## FAULUNG KOMBINIERT MIT EINER SCHLAMMRÜCKFÜHRUNG ZUR BIOMASSE-ANREICHERUNG

Die Erweiterung der Faulung um eine Schlammrückführung zur Biomasseanreicherung führt zu einer Entkopplung der Feststoffverweilzeit (SRT) von der hydraulischen Verweilzeit (HRT). Die Schlammrückführung setzt eine Feststoff- bzw. Filtratabtrennung z.B. mit einer Mikrofiltration (anaerober Membranbioreaktor) oder Zentrifugation voraus.

Gegenüber konventionellen Faulungen, die nach dem Verdrängungsprinzip ohne Biomasserückführung betrieben werden, bieten sich drei wesentliche Vorteile dieses Systems:

- Erhöhung der Abbaugeschwindigkeiten,
- Erhöhung der Prozessstabilität, besonders bei einer Flexibilisierung der Faulung,
- Erhöhung des Abbaugrads durch längere Substratverweilzeit im System.

### FLEXIBILITÄTSOPTIONEN BEI DER BIOMASSE-ANREICHERUNG IN DER FAULUNG

- Reduzierung des Faulraumvolumens bei gleicher Faulgasausbeute
- Erhöhung der Prozessstabilität durch Anreicherung langsam wachsender Mikroorganismen
- gezielte Anpassung der Schlammbelastung bei variierenden Zulauffrachten

Zusätzliche Aufwendungen sind zu berücksichtigen.

Die spezifische Methanausbeute (Methanvolumen pro zugeführter CSB-Fracht) bzw. der CSB-Abbaugrad richten sich trotz höherer Biomassekonzentration nach der Feststoffverweilzeit (SRT). Abbildung 37 links verdeutlicht, dass bei gleicher SRT ein anaerober Membranbioreaktor und eine konventionelle Faulung (gestrichelte Linie) die gleiche spezifische Methanausbeute erreichen. Die Abbaugeschwindigkeit von Schlämmen in der Faulung ist in aller Regel bestimmt durch die Hydrolyse, weshalb sich die Abbaugeschwindigkeit durch höhere Biomasse- und/oder Rest-Substratkonzentration in der Faulung steigern lässt (Vavilin et al. 2008). Höhere Abbaugeschwindigkeiten können

- höhere Faulgasausbeuten bei gleichem Reaktionsvolumen (Faulraum) oder
- kleinere Reaktionsvolumina (Faulraum) bei gleichen Faulgasausbeuten bedeuten (vgl. Abbildung 37 rechts).

Infolge von Stoßbelastungen für eine bedarfsgerechte Faulgaserzeugung erfolgt allgemein ein kurzfristiger Anstieg der Konzentration organischer Säuren (vgl. Kapitel zur Co-Vergärung). Dies kann zu Hemmungen (Übersäuerung) des anaeroben Abbauprozesses führen. Vorteile für Systeme mit Biomasserückführung und Biomasseaufkonzentrierung ergeben sich, da sich langsam wachsende Mikroorganismen anreichern und damit die Umsatzgeschwindigkeiten ihrer Substrate zugunsten einer höheren Prozessstabilität deutlich erhöht werden können.

Den oben genannten Vorteilen eines kleineren Reaktionsvolumens und einer Erhöhung der Prozessstabilität müssen die zusätzlichen Aufwendungen durch Investitions- und Betriebskosten gegenübergestellt werden. Die Investitionskosten sind dabei für jeden Einzelfall separat zu untersuchen, da Platzbedarf und spezifische Kosten von Faulraumvolumina auch von den örtlichen Gegebenheiten abhängen. Mit Blick auf die Betriebskosten ist der Energieverbrauch – und ggf. Hilfsmittelverbrauch für die Feststoffabtrennung im Falle des Einsatzes einer Membran – abhängig von der Faulschlammkonzentration und der Notwendigkeit zur Minimierung von Deckschichten auf der Membran. Dekanter zur Schlammrückführung benötigen darüber hinaus in der Regel polymere Flockungsmittel zur Feststoffabtrennung.



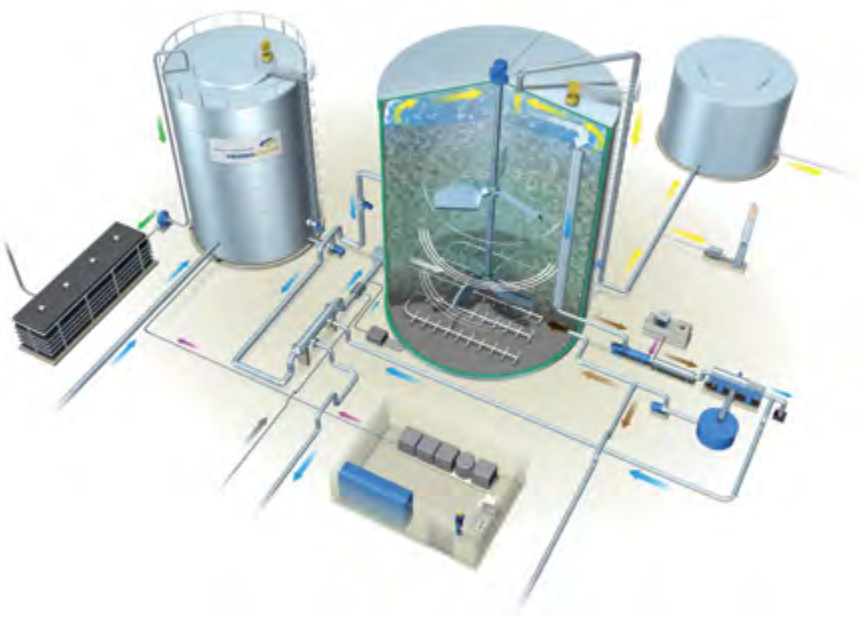


Abbildung 34: Verfahrensschema eines volldurchmischten Faulreaktors mit Rührwerk und Schlammrückführung durch Zentrifugation zur Entkopplung von hydraulischer Verweilzeit und Schlammalter, Quelle: EnviroChemie GmbH

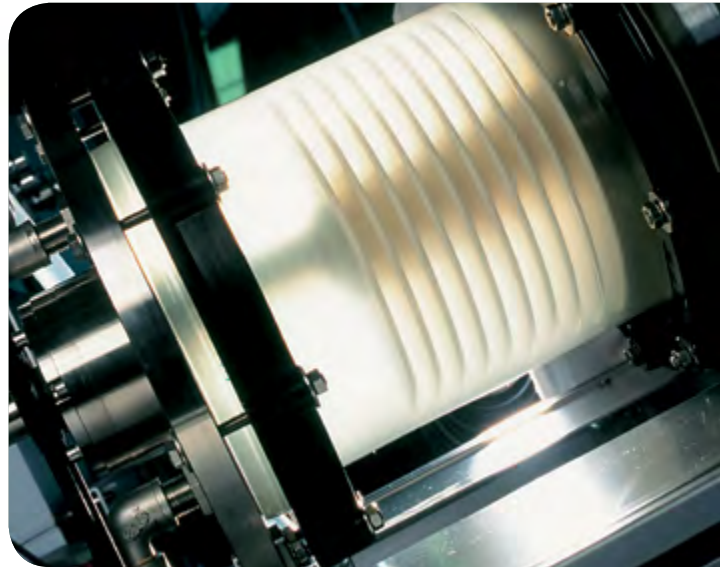


Abbildung 35: Rotationsscheibenfilter zur Feststoffabtrennung und -rückführung, Quelle: Fraunhofer IGB

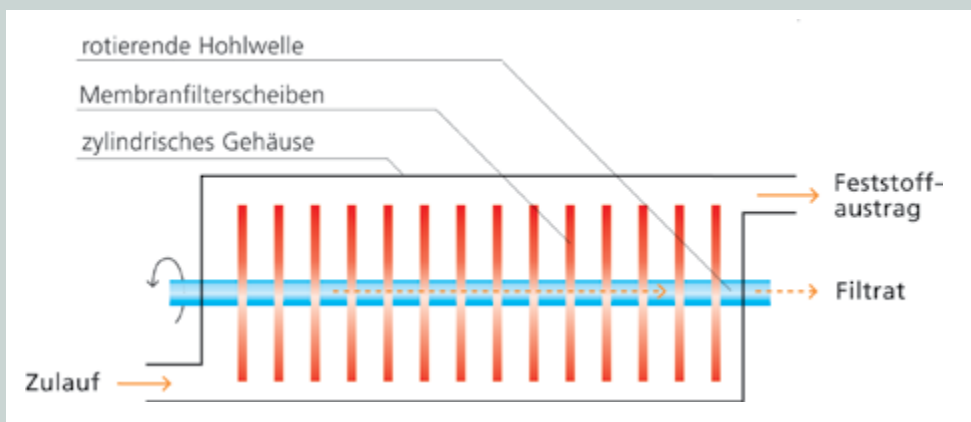


Abbildung 36: Schema Rotationsscheibenfilter, Quelle: Fraunhofer IGB

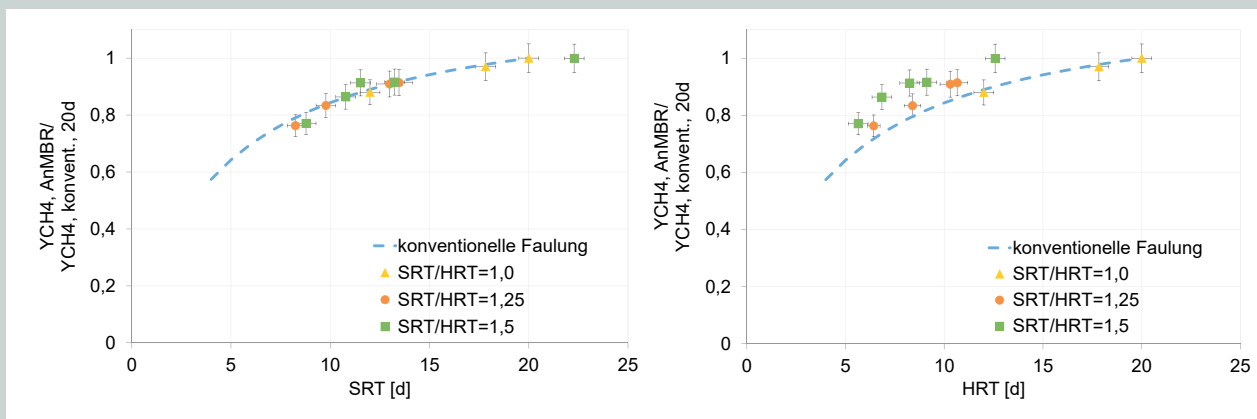


Abbildung 37: Methanausbeute in Abhängigkeit von SRT (links), HRT (rechts) eines anaeroben Membranbioreaktors (AnMBR) im Vergleich zur Methanausbeute einer konventionellen Faulung mit einem SRT=20d, Quelle: Lutze et al. (2017)

### 5.3.5

## THERMISCHE KLÄRSCHLAMMVERWERTUNG

Als weiterer Flexibilitätsbaustein innerhalb der Verfahrenskette zur Klärschlammbehandlung gilt die thermische Verwertung des Klärschlammes. Vor dem Hintergrund der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) bzw. Düngemittelverordnung (DüMV) sowie der innerhalb der Klärschlammatrix enthaltenen Schadstoffe, Medikamentenreste, Kunststoffpartikel und Krankheitserreger, zeigt sich eine thermische Behandlung in vielen Fällen als das Mittel der Wahl. Auf dem Markt stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, die unterschiedliche Herangehensweisen der thermischen Umsetzung sowie Potenziale zur Phosphorrückgewinnung beinhalten und damit einer unterschiedlichen technischen Komplexität unterliegen. Je nach Verfahren kann ein autothermer Betrieb realisiert werden, der zusätzlich einen Überschuss an Wärme produzieren kann. In Abhängigkeit der Anlagengröße kann dieser Wärmeüberschuss mit Hilfe eines Organic-Rankine-Cycle (ORC) oder eines Wasser-Dampf-Prozesses energetisch genutzt werden sowie eine energieautarke Trocknung des Klärschlammes ermöglichen. Die der Wärmerückgewinnung nachgeschaltete trockene Abgasreinigung sorgt für eine sichere Einhaltung der Grenzwerte nach 17. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV). Ein thermisches Verfahren im Überblick zeigt Abbildung 38.

Der eigentliche Verbrennungsprozess bietet mit Blick auf eine autotherme Verbrennungsführung begrenzte Flexibilitätsoptionen. In Kombination mit Apparaten zur Umwandlung von thermischer in elektrische Energie bietet die Verbrennung jedoch die Möglichkeit,

- thermisch autark (Verbrennung/Trocknung),
- als Wärmesenke unter erhöhter Stromerzeugung oder
- als Wärmelieferant unter verminderter Stromerzeugung bedarfsgerecht betrieben zu werden.

Diese variable Betriebsweise ist der Schlüssel eines integrierten, intelligenten Wärmemanagements, das nachfolgend erläutert wird.

### FLEXIBILITÄTSSOPTIONEN DER KLÄRSCHLAMMVERBRENNUNG INKLUSIVE PERIPHERER APPARATE IN INTERAKTION MIT BAUSTEINEN DER SCHLAMMBEHANDLUNG

- Nutzung als Wärmesenke unter erhöhter Stromerzeugung
- Nutzung als Wärmelieferant unter verminderter Stromerzeugung

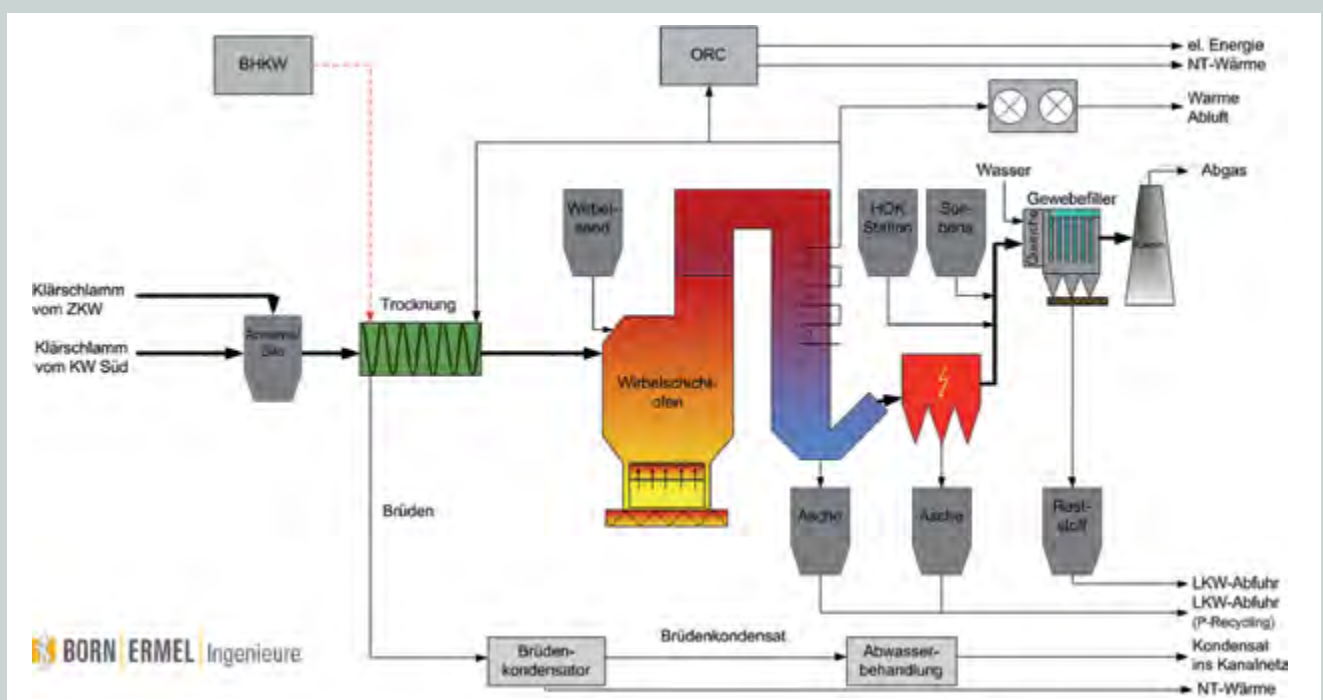


Abbildung 38: Vereinfachtes Fließbild einer thermischen Klärschlammbehandlung, Quelle: Dr. Born – Dr. Ermel GmbH

## 5.4

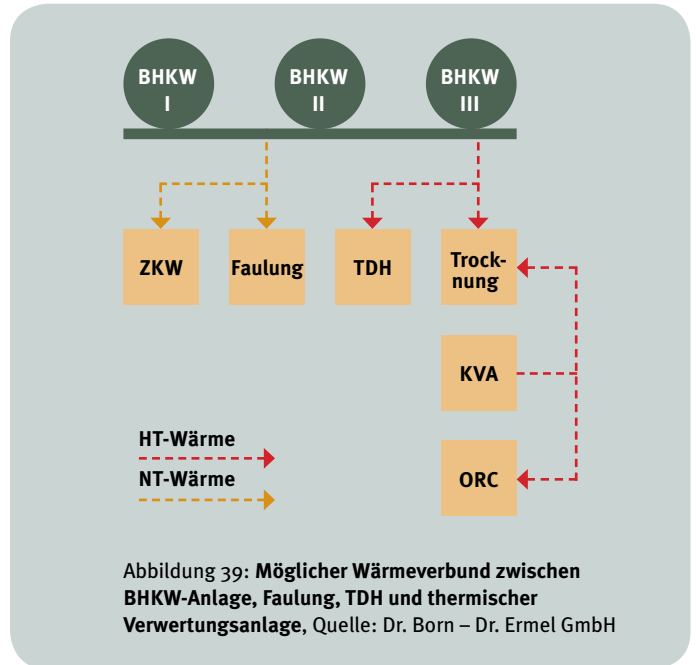
### INTELLIGENTES WÄRMEMANAGEMENT ALS BASIS EINER GANZHEITLICHEN ENERGETISCHEN NUTZUNG

Grundlage eines intelligenten Wärmemanagements ist die Unterteilung der Abwärme aus dem BHKW und der Klärschlammverbrennung in Hoch- und Niedertemperatur. Kern eines intelligenten Wärmemanagements ist die bedarfsgerechte Verteilung der Abwärme auf die entsprechenden Konsumenten (vgl. Abbildung 39). Ausgehend von der BHKW-Anlage, die ihrerseits als Wärmeproduzent für Nieder- und Hochtemperaturwärme fungiert, sind mögliche Wärmeverbraucher im Bereich der Klärschlammbehandlung insbesondere die Faulung, die Thermodruckhydrolyse und die Trocknung des Faulschlammes vor der thermischen Verbrennung. Niedertemperaturwärme kann darüber hinaus zur Bereitstellung von Warmwasser und Heizungszwecken verwendet werden. Die Klärschlammverbrennung mit der thermischen Umsetzung des Klärschlammes produziert ebenfalls Nieder- bzw. Hochtemperaturwärme, die vornehmlich zur Trocknung des Faulschlammes eingesetzt werden muss.

Als Wärmesenken der Hochtemperaturwärme können die Thermodruckhydrolyse, die Trocknung und der ORC als Apparat zur Umwandlung von Wärme zu elektrischer Energie – bei allerdings geringen Wirkungsgraden – fungieren.

Für die wärmeseitige Verknüpfung der aufgeführten Anlagenstrukturen stellt die Betriebsweise der BHKW-Anlage das ausschlaggebende Moment dar: Bei kontinuierlicher Betriebsweise der BHKW kann eine gleichbleibende Wärmebereitstellung (Hochtemperatur) erfolgen, die ihrerseits für die Trocknung des Klärschlammes genutzt werden kann. Die aus dem Verbrennungsvorgang resultierende Wärme kann so einer ORC-Anlage zur Stromgewinnung zugutekommen.

Ist dagegen keine kontinuierliche Wärmebereitstellung über die BHKWs für die Klärschlamm-trocknung möglich, muss die in der Verbrennung erzeugte Wärme in entsprechendem Umfang für die Trocknung eingesetzt werden, wodurch eine ORC-Anlage



letztlich weniger Strom bereitstellen kann. Die ganzheitliche Betrachtung der wärmeseitigen Verknüpfungen innerhalb des Klärschlammbehandlungssystems ist dem Energiefluss-Diagramm in Abbildung 24 zu entnehmen.

In Abhängigkeit der einzelnen Verfahrensbausteine als Verbraucher sind in diesem Fall die Energieströme in Form von Wärmeströmen (HT, NT), Faulgas, Klärschlamm und elektrischer Energie aufgeführt.

Die Nutzung der HT-Wärme erfordert jedoch eine geringere Anzahl von BHKW-Modulen mit dann größerer Leistung. Eine Auskopplung der HT-Wärme aus mehreren Kleinaggregaten ist wirtschaftlich, regelungstechnisch und vom Platzbedarf her nicht zu empfehlen.



#### INTELLIGENTES WÄRMEMANAGEMENT UNTER EINBEZIEHUNG VON KLÄRSCHLAMMVERBRENNUNG UND ORC-KREISLAUF UNTERSTÜTZT BEDARFSGERECHTE BHKW-BETRIEBSFÜHRUNG DURCH

- Wärmeversorgung einzelner Verbraucher wie Faulung und TDH
- Wärmeabnahme und Umwandlung in Strom zur Reduzierung energetischer Ineffizienzen

Abbildung 40: Zentralklärwerk Darmstadt, Absorptionskältemaschine, Foto: Christian Schaum

6

# STRUKTUREN UND DYNAMIKEN INNERHALB DER INNOVATIONSARENA





## 6.1

### GRUNDGERÜST EINER SEKTORKOPPLUNG

Das Themenfeld der Sektorkopplung von Abwasser- und Energiewirtschaft kann aus sozialwissenschaftlicher Sicht als sogenannte „Innovationsarena“ aufgefasst werden: Verschiedene Akteure mit unterschiedlichen Aufgaben und Interessen stehen im Austausch miteinander. Althergebrachte und neuartige Technologiebausteine werden aufeinander abgestimmt und politische, gesellschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen wirken regulierend. Dabei sind einige Hürden zu überwinden (vgl. Dierich et al. 2017).

Die Innovationsarena ist in die zwei Bereiche Siedlungswasserwirtschaft und Energiewirtschaft aufgeteilt, mit einer gemeinsamen Schnittmenge, an der auch Kläranlagen beteiligt sind, siehe Abbildung 41. Zentrale Themen sind die Klärschlammbehandlung, die Stabilisierung der Stromnetze und als verbindendes Element die Flexibilisierung von Stromverbrauch und -produktion. Als entscheidende Herausforderung für den stabilen Stromnetzbetrieb wird die zunehmend volatile Stromerzeugung und -einspeisung aufgrund steigender Anteile an Windkraft- und Solarstrom verstanden. Wichtigste Bausteine der Flexibilisierung sind verschiedene Energiespeicher, ein am Stromange-

bot orientiertes Lastmanagement sowie die Teilnahme des Kläranlagenbetreibers an Energiemärkten durch die Vermarktung von Regelleistung und eine systemdienliche Stromeinspeisung. Märkte, (rechtliche) Rahmenbedingungen, Anforderungen und sonstige in Wort oder Schrift ausgedrückte Aspekte werden in den Abbildungen 41 und 42 als sogenannte „Zeichenelemente“ kartiert. Bedeutsame energiewirtschaftliche Akteure sind die Verteilnetzbetreiber, die Energieversorger (als Vertragspartner der Kläranlagen) und die sog. „Aggregatoren“ und Direktvermarkter. Die Übertragungsnetzbetreiber sind als Nachfrager nach Regelleistung weitere wichtige Akteure, die jedoch in keinem engen Zusammenhang mit den Kläranlagen stehen.

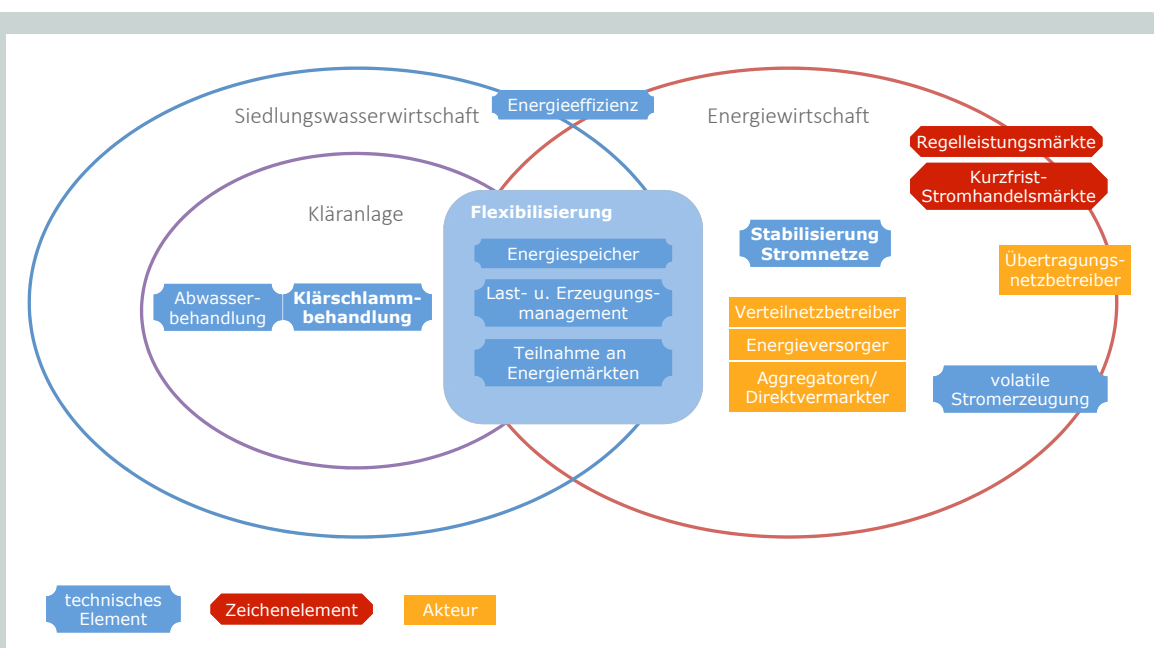


Abbildung 41: Überblick über die Innovationsarena der energiewirtschaftlichen Sektorkopplung von Kläranlage und Energiesektor, Quelle: inter 3 GmbH

## 6.2

### HEMMNISSE FÜR DIE STÄRKERE ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE AUSRICHTUNG DES KLÄRANLAGENBETRIEBS

Abbildung 42 bildet zusätzlich zur vorherigen Abbildung auch die als zentral identifizierten Hemmnisse bei der Flexibilitätssteigerung sowie der energiewirtschaftlichen Neuausrichtung des Kläranlagenbetriebs mit ab.

Auf Seiten der Siedlungswasserwirtschaft stellt die regulatorische Handhabung der Anforderungen des Gewässerschutzes ein – unanfechtbares – Hemmnis dar: Die Einhaltung der Einleitparameter zu jeder Zeit und auch bei Spitzenbelastungen reduziert den Spielraum kommunaler Kläranlagen für die Kappung von Stromlastspitzen und eine stärkere verbraucherseitige Flexibilisierung.

Zukünftig erfordern die 4. Reinigungsstufe und die Phosphor-Rückgewinnung jeweils einen gesteigerten Energieaufwand. Dies empfinden Entscheidungsträger als starke Einschränkung einer energetischen Flexibilisierung ihrer Kläranlagen. Ihre Modernisierungsbestrebungen konzentrieren sich weitgehend auf diese verpflichtenden Herausforderungen.

Bei hohem Aufwand für ihre Genehmigung, nimmt die Wirtschaftlichkeit einer Co-Vergärung von organischen Abfallstoffen aufgrund zunehmender Nachfrage-Konkurrenz und steigenden Bezugskosten für die Co-Substrate stetig ab.

Das weitgehend auf die Abwasserreinigung beschränkte kommunalhoheitliche Mandat grenzt die energiewirtschaftlichen Handlungsmöglichkeiten von Kläranlagenbetreibern stark ein. Insbesondere Anstalten öffentlichen Rechts und kommunale Eigenbetriebe sind eng an die Vorgaben ihrer Satzungen gebunden.

Weit verbreitet ist die Befürchtung, eine Flexibilisierung der Betriebsführung – insbesondere von Verbräuchen im Kläranlagenbetrieb – könne zu Lasten der Betriebssicherheit gehen. Unberücksichtigt bleibt dabei, dass Abrufe der Flexibilitätspotenziale seitens des Aggregators immer nur im Rahmen vorab abgestimmter Korridore erfolgen und per Veto kurzfristig abgelehnt werden können.

Auf energiewirtschaftlicher Seite stehen der Betätigung von Abwasserunternehmen an Energiemärkten ebenfalls Hemmnisse entgegen: Vollversorgungsverträge mit den Energieversorgern lassen dem Kunden keine Verfügungsgewalt über die eigene Energiebilanz. Er kann so nicht von Einsparungen oder Zuverdienstmöglichkeiten an Kurzfristhandelsmärkten profitieren.

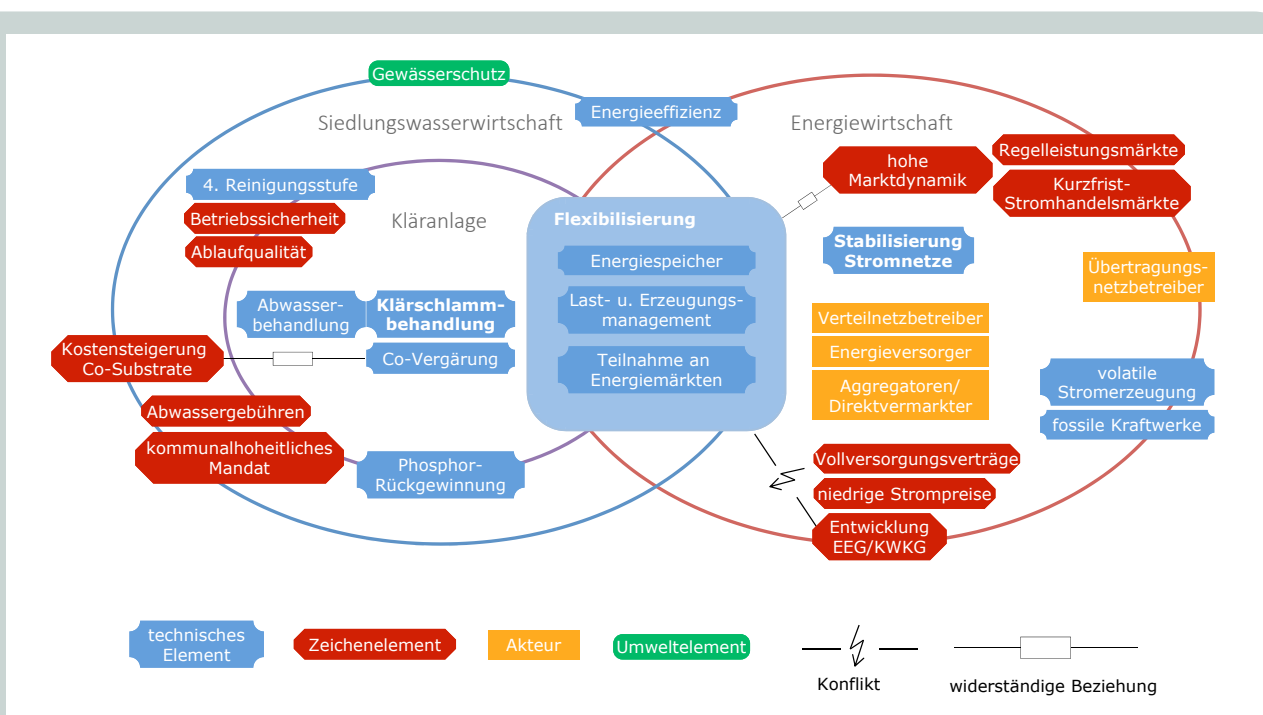


Abbildung 42: Hemmnisse einer Sektorkopplung, Quelle: inter 3 GmbH

Zum anderen erschwert die hohe Dynamik der Märkte für Regelleistung und Kurzfriststromhandel die Kalkulation von Risiken und Chancen des Markteintritts. So schwankten die Leistungspreise für Minutenreserve und Sekundärreserve in den vergangenen drei Jahren stark und waren tendenziell rückläufig. Zugleich wurden allerdings die Ausschreibungsbedingungen für Kleinanbieter verbessert und Marktchancen im Intraday-Handel durch kürzere Vorlaufzeiten und größere Handelsvolumina vergrößert.

Einige Akteure sehen in der EEG-Umlage, dem Wegfall der KWKG-Förderung in 2016 und zugleich sinkenden Energiepreisen eine Gefahr für die Wirtschaftlichkeit von BHKW (BMWi 2015) und somit für das Grundgerüst einer energiewirtschaftlichen Neuausrichtung von Kläranlagen.

Diese hinderlichen Rahmenbedingungen fördern in der Siedlungswasserwirtschaft Vorbehalte gegenüber einer Sektorkopplung. Umso schwerer fällt es Innovatoren, die stabilen Konstellationen im Abwassersektor aus rechtlichen Regularien, langfristig gebundenem Kapital und ausgereiften fachlichen Praktiken zu durchdringen. Damit sektorübergreifende Konzepte und Technologien erfolgreich zur Anwendung kommen können, sind daher begleitende politisch-rechtliche, organisatorische und betriebliche Innovationen in der Wasser-, wie auch Energiewirtschaft erforderlich.

#### HEMMNISSE EINER STÄRKEREN SEKTORKOPPLUNG

- **Modernisierungserfordernisse mit erhöhtem Energieaufwand: 4. Reinigungsstufe, Phosphor-Rückgewinnung**
- **kommunalwirtschaftliche Restriktionen**
- **sinkende Wirtschaftlichkeit der Co-Vergärung**
- **Sorgen über Betriebssicherheit bei Flexibilisierung**
- **Vollversorgungsverträge ohne Flexibilitätsoption**
- **hohe energiewirtschaftliche Marktdynamik**
- **energiepolitische Veränderungen: EEG, KWKG**

**Der Gewässerschutz ist als oberstes Gebot und Limitierung aller Flexibilitätsoptionen unanfechtbar!**

### 6.3

#### TREIBER UND BEGLEITENDE MASSNAHMEN FÜR EINE STÄRKERE SEKTORKOPPLUNG

Als erster Schritt einer stärkeren energiewirtschaftlichen Orientierung der Abwasserunternehmen kann deren verbreitetes Streben nach gesteigerter Energieeffizienz und Eigenversorgung mit Strom gesehen werden. Allerdings geht damit bislang noch keine Flexibilisierung der BHKW-Betriebsweise einher, so dass die Energiewirtschaft bislang keinen Vorteil daraus zieht.

Die obigen Befunde legen einige strategische Ansätze nahe, aus denen folgende Impulse zur Sektorkopplung von Wasser- und Energiewirtschaft abgeleitet werden können:

- Umsetzen der Anforderungen der 4. Reinigungsstufe im Verbund mit energetischen Flexibilisierungsmaßnahmen – Auf diese Weise kann der zusätzliche Energiebedarf infolge der weitergehenden Reinigungsschritte im Einklang mit den Anforderungen der Stromwirtschaft geplant werden;
- Schaffung klarer rechtlicher Rahmenbedingungen für die Verbuchung von Einnahmen aus energiewirtschaftlichen Aktivitäten seitens Abwasserunternehmen bzw. Erstellung politischer oder verbandlicher Vorgaben für eine entsprechende Umsetzung in den Satzungen;
- Energieversorgungsverträge mit variablen, am Marktgeschehen ausgerichteten Stromkosten;
- Überprüfung der Regelungen im EEG 2017 zur EEG-Umlage für Eigenstromproduktion auf mögliche Gefährdungen der Wirtschaftlichkeit von BHKW, insbesondere bei flexiblisierter Betriebsweise;
- Förderung von Energieverbünden, z.B. durch Steuerermäßigungen für Strom, der im Rahmen eines Bilanzkreises durch benachbarte Abnehmer verbraucht wird – so können Verteilnetze auf den unteren Spannungsebenen entlastet werden;
- Politische und stadtplanerische Förderung von Nahwärmenetzen und der dezentralen Wärme-Einspeisung, um u.a. für Kläranlagen eine Wärmesenke zu schaffen und so in jedem Moment höchste Energieeffizienz zu ermöglichen.

# VERGLEICH VON TECHNOLOGIEVARIANTEN UND BETRIEBSSTRATEGIEN

7



## 7.1

### ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG

Im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung von unterschiedlichen Flexibilitätstechnologien und deren Bewirtschaftung auf der Kläranlage müssen Einflüsse von Prozessen und Verfahren auch hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen bewertet werden. Hierzu hat sich die Ökobilanz (Life Cycle Assessment) inzwischen als geeignetes Instrument in Forschung und Praxis etabliert. Die Ökobilanz verfolgt einen systematischen, ganzheitlichen Ansatz: Alle relevanten Effekte auf verschiedene Umweltmedien werden erfasst. Zudem werden Emissionen und Ressourcenbedarfe für die Produktion von Betriebsmitteln, Transportaufwendungen oder Entsorgungsprozessen mit bewertet.

Für die Bewertung der im Kapitel 5 aufgezeigten Flexibilitätstechnologien und deren Bewirtschaftung spielt der systematische Ansatz der Ökobilanz eine besondere Rolle hinsichtlich der Nutzung von Co-Substraten für die Faulgasproduktion. Die Nutzung von Co-Substraten kommt einer sogenannten Koppelproduktion gleich: Die Klärschlammbehandlung erfüllt aus systemischer Sicht einen zusätzlichen Nutzen, nämlich die Verwertung eines weiteren Substrats. Mit diesem zusätzlichen Nutzen gehen jedoch weitere Effekte einher. Das Substrat wird, statt beispielsweise in einer Biogasanlage, direkt auf der Kläranlage für die Energiegewinnung genutzt. Während die zusätzliche Faulgasproduktion auf der Kläranlage einen geringeren Fremdstrombezug ermöglicht, kann an einer anderen Stelle weniger Substrat zur Stromerzeugung genutzt werden. Die systemweite Nettostromerzeugung bleibt also unverändert, unabhängig davon ob das Substrat auf der Kläranlage oder extern zur Stromerzeugung genutzt wird.

In der Ökobilanz wird dies über die Abbildung der Vorketten visualisiert (vgl. Abbildung 43). Hier wird die Stromerzeugung in einer Biogasanlage mit späterer Gärresteausbringung als alternative (durch die Co-Vergärung wegfallende) Behandlung des Co-Substrats abgebildet. In diesem Fall muss der kommunalen Kläranlage ein Malus zugeschrieben werden, da der Biogasanlage weniger Co-Substrat für die Stromerzeugung zur Verfügung steht und sie weniger Gärrest als Dünger ausbringen kann.

Die Bewertung, ob die Co-Vergärung tatsächlich ökologisch vorteilhaft ist, unterliegt diesen fallspezifischen Gegebenheiten. Für die Bewertung sind sowohl kläranla-

genspezifische Parameter, wie die Effizienz der BHKW oder die Transportdistanz des Substrats zur Kläranlage, als auch Parameter der externen Behandlung relevant: Im Beispiel betrifft dies u.a. die Effizienz der BHKW der Biogasanlage, Transportdistanzen, Inhaltsstoffe des Gärrestes und darauf beruhendes Emissionsverhalten bei der Gärrestausbringung.

Für die Ergebnisse der Ökobilanz kann dies bedeuten, dass die Bewertung verschiedener Umweltwirkungen unterschiedlich ausfallen kann. Während im konkret beschriebenen Beispiel für die Umweltwirkung Klimawandel (Global Warming Potential 100) kein signifikanter Unterschied festzustellen ist, zeigt die Co-Vergärung bspw. für die Umweltwirkungskategorie Versauerung (Acidification Potential) durch die vermiedene Ausbringung von Ammoniakverbindungen Vorteile gegenüber der externen Behandlung der Substrate.

Festzuhalten ist, dass für eine ökologische Bewertung stets systemische Effekte mit betrachtet werden müssen, um einen fairen Vergleich zu ermöglichen.

Des Weiteren sind die Ergebnisse bzw. Kennzahlen der Ökobilanzierung nutzbar für einen erweiterten Vergleich von Varianten auf Grundlage einer multikriteriellen Bewertung, die im nachfolgenden Kapitel vorgestellt wird.

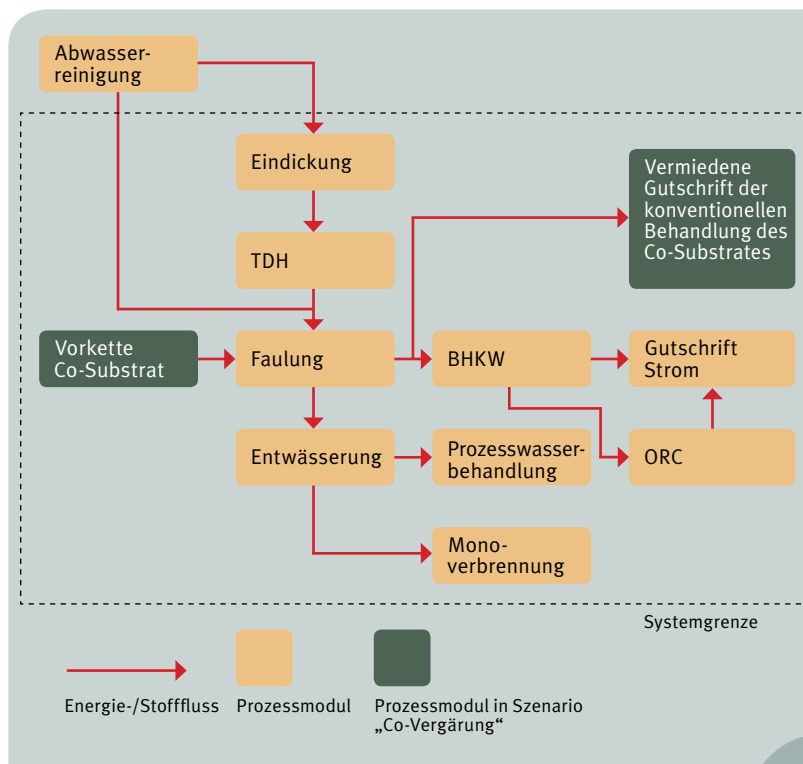


Abbildung 43: Systemgrenze der Ökobilanz der zukünftigen Klärschlammbehandlung im Szenario „Co-Vergärung“, Quelle: Seier et al. (2016)

## 7.2

### MULTIKRITERIELLE BEWERTUNG

Bei der energiewirtschaftlichen Neuausrichtung der Abwasser- und Klärschlammbehandlung hilft eine frühzeitige grobe Analyse verschiedener tauglich erscheinender Technologievarianten (vgl. Kapitel 5) und deren Bewirtschaftung, um sich auf die aussichtsreichsten Handlungsoptionen fokussieren zu können. Dabei sind neben ökonomisch-technischen Kriterien auch Aspekte der Nachhaltigkeit von Bedeutung. Mittels einer multikriteriellen Bewertung können technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Kriterien zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Die Entscheidung und der ihr zugrunde liegende Entscheidungsprozess werden so für alle Beteiligten mit ihren verschiedenen Ansichten und Erfahrungswerten sowie auch für Außenstehende transparent gemacht.

Das Vorgehen bei der multikriteriellen Bewertung wird in Abbildung 44 dargestellt und im Folgenden näher beschrieben.



Abbildung 44: Vorgehen bei einer multikriteriellen Analyse und Bewertung, Quelle: inter 3 GmbH

#### 1. Definition der verfügbaren Handlungsoptionen

Mögliche verfügbare Handlungsoptionen können z.B. verschiedene Technologievarianten oder auch Betriebsstrategien sein. Im Projekt ESiTI wurden auf Basis einer zuvor festgelegten Technologie der Klärschlammbehandlung (mit Klärschlamm-Monoverbrennung und Thermodruckhydrolyse) vier verschiedene Strategien für deren Betriebsweise als Handlungsoptionen miteinander verglichen:

- „Status-Quo“: gasgeführte Betriebsweise der BHKW entsprechend der derzeit vorherrschenden Praxis, keine Flexibilisierung;
- „Flex-1“: Flexibilisierung von Faulung/Faulgasproduktion und BHKW-Betriebsweise zum Zweck des Ausgleichs von Strombedarf und -produktion im Tagesgang;
- „Flex-2“: gasgeführte Fahrweise, aber teilweise Ausrichtung der BHKW-Betriebsweise auf das Anbieten von Regelleistung;
- „Flex-3“: Ausrichtung von Faulung und BHKW-Betriebsweise nach der Preisentwicklung auf dem Day-Ahead-Strommarkt: Strombezug bei niedrigen Preisen, eigene Stromproduktion bei hohen Preisen.

Zudem sollten Randbedingungen für die Einschätzung der Handlungsoptionen festgelegt werden. Das sind bspw. prognostizierte Energieverbräuche, Energiemarktpotenziale sowie mögliche politische Entwicklungen.

#### 2. Auswahl der Bewertungskriterien

Die Auswahl der Bewertungskriterien ist der zentrale Schritt der multikriteriellen Bewertung. In ESiTI wurde ein übertragbares Set an Bewertungskriterien für energiewirtschaftliche Innovationen auf Kläranlagen entwickelt. Es umfasst Kriterien aus den Bereichen Technologie, Wirtschaftlichkeit, Politik, Recht und Ökologie (vgl. Tabelle 3). Zur Bestimmung der Kriterienwerte sollten – soweit möglich – konkrete Kennzahlen festgelegt werden.

#### 3. Gewichtung der Kriterien

Durch diesen Schritt können verschiedene Prioritäten der involvierten Akteure in die Entscheidungsfindung einbezogen und dabei transparent gemacht werden. Auf Grundlage einer Umfrage unter 170 wasserwirtschaftlichen Experten wurde in ESiTI eine Gewichtung der Kriterien vorgenommen (0 = unwichtig bis 10 = sehr wichtig) (vgl. Tabelle 3 rechte

Tabelle 3: **Kriterien zur multikriteriellen Bewertung von energiewirtschaftlichen Innovationen auf Kläranlagen,**  
Quelle: inter 3 GmbH

Bereich	Kriterium	Gewichtung
Technologie	Komplexität der Verfahren/Technologien	6,07
	Gewährleistung der Betriebssicherheit	8,99
	Flexibilität der Stromerzeugung	7,17
	Flexibilität der Faulgaserzeugung	6,52
	Ausnutzung des Gasspeicherpotenzials	6,50
	Eigenversorgungsgrad der Kläranlage	7,60
	Anpassungsfähigkeit an geänderte Rahmenbedingungen	7,68
	Spezifischer Energieverbrauch	7,96
	Umfang der Abwärmenutzung	7,57
	Personalaufwand/ Arbeitsbelastung	7,25
	Aufwand für die Klärschlamm-Entsorgung	6,47
	CSB-Fracht im Rücklauf aus Schlammbehandlung	7,37
	Stickstoff-Fracht im Rücklauf aus Schlammbehandlung	7,65
	Phosphor-Fracht im Rücklauf aus Schlammbehandlung	6,97
Wirtschaftlichkeit	Aufwand für Genehmigungen und Vertragsänderungen	5,94
	Aufwand für Capacity Development und Change Management	6,50
	Kapitalkosten	6,43
	Betriebskosten	8,01
	Modernisierungs- und Instandhaltungskosten	7,78
	mögliche Erlöse aus der Vermarktung von Regelleistung	4,81
Politik und Recht	mögliche Diskussionen öffentlicher Beeinträchtigungen	6,89
	Notwendige (kurzfristige) Gebührenanhebung	6,51
	Übereinstimmung mit der Rechtslage	8,41
	Übereinstimmung mit politischen Zielen	6,82
Ökologie	Erhalt der Senkenfunktion der Kläranlage	7,66
	Human- und Ökotoxizität von Emissionen	7,68
	Treibhausgasemissionen	6,78
	Geruchsemissionen	6,81
	mögliche Beeinträchtigung der Rückgewinnung von Phosphor	7,62
	Nutzbarkeit rückgewonnener Nährstoffe	7,73

Spalte), die als Ausgangspunkt für die eigene Bewertung genutzt werden können. Dennoch gilt es immer, die Aussagekraft der allgemeinen Kriterien und der allgemeinen Gewichtung für den jeweiligen Kläranlagenstandort zu prüfen und ggf. standortspezifische Anpassungen vorzunehmen.

#### 4. Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgt auf Basis von Planungsdaten und Erfahrungswerten am Kläranlagenstandort. Dazu können spezifische Kennzahlen definiert werden, wie z.B. Euro/Jahr für Kosten, Einsparungen oder Einnahmen, kWhel(eingesetzt)/ kWhel(erzeugt) für den spezifischen

Stromverbrauch oder kWtherm(genutzt)/ kWtherm(produziert) für den Grad der Wärmenutzung. Wenn keine exakten Daten vorliegen, können die betreffenden Kriterien in einem Workshop, an dem die wesentlichen Akteure teilnehmen, gemeinsam eingeschätzt werden. Meinungsverschiedenheiten im Workshop können durch „Unsicherheitsbereiche“ abgebildet werden, innerhalb derer sich die möglichen Kriterienwerte bei einer Handlungsoption bewegen. So könnte beispielsweise die Betriebssicherheit einer Handlungsoption auf einer Skala als „hoch“ bis „sehr hoch“ eingeschätzt werden.

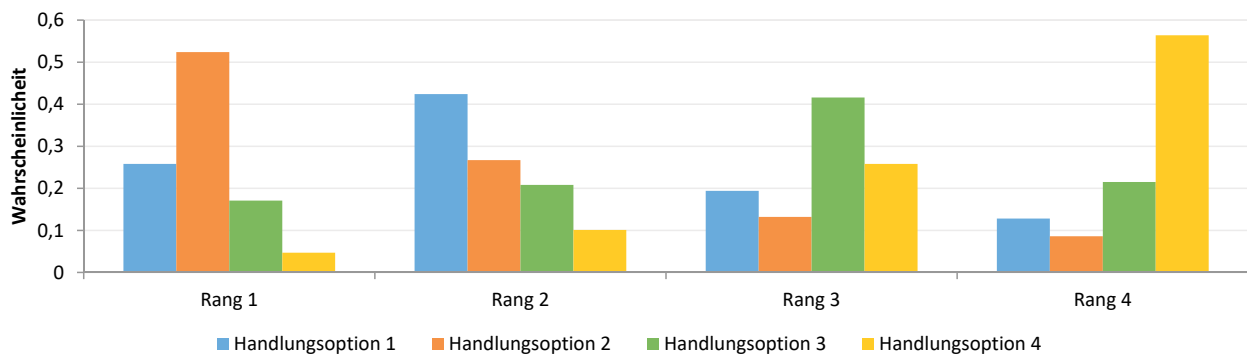
## 5. Bewertung

Für die umfassende Bewertung der Handlungsoptionen werden die Ergebnisse aus den bisherigen Arbeitsschritten zusammengetragen. Am Ende steht eine Rangfolge der Handlungsoptionen. Dabei ist die Rangverteilung mit Wahrscheinlichkeiten versehen, wenn zuvor für einzelne Kriterien Unsicherheiten angenommen wurden. **Abbildung 45** verdeutlicht dies durch die unterschiedliche Säulenhöhe: Mit etwas über 50%iger Wahrscheinlichkeit landet z.B. Handlungsoption 2 (rot) auf Rang 1, Option 4 mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Rang 4.

Zur Unterstützung der Berechnungen kann das sog. Outranking-Verfahren PROMETHEE II genutzt werden (vgl. Lange et al. 2004; Gebhardt et al. 2012). Es beruht auf dem paarweisen Vergleich der Varianten für jedes Kriterium einzeln und zählt die „Siege“ der einzelnen Handlungsoptionen, wie in **Abbildung 47** exemplarisch an Hand ausgewählter Kriterien dargestellt.

## 6. Plausibilitätsprüfung und Interpretation der Ergebnisse

Zuletzt sollte erfasst werden, wie robust das Bewertungsergebnis ist, insbesondere wenn es weniger eindeutig als im obigen Beispiel ausfällt. Dazu werden (1.) die Einzelergebnisse für jedes Kriterium auf Plausibilität und (2.) die Auswirkungen einer Änderung einzelner Kriterienwerte auf das Gesamtranking (also die Sensitivität des Ergebnisses) überprüft. Außerdem können (3.) auch die Auswirkungen von stark divergierenden Gewichtungen und damit unterschiedlichen Priorisierungen transparent gemacht werden, indem für die Gewichtung jeden Teilnehmers ein Ranking berechnet und mit dem Gesamtergebnis der aggregierten Gewichtung verglichen wird. Zudem sollte (4.) versucht werden, bei Unsicherheiten die Datengrundlage zu verbessern, um verlässlichere Ergebnisse zu erzielen.



**Abbildung 45: Beispielhaftes Bewertungsergebnis für vier verschiedene Handlungsoptionen,**  
Quelle: inter 3 GmbH



**Abbildung 46: Die Nutzung der Gasfackel führt zur energetischen Ineffizienz und sollte zwingend vermieden werden!**  
Foto: Christian Schaum



Die multikriterielle Bewertung verdeutlicht, zu welchen Aspekten sich detailliertere Berechnungen lohnen und welche Aspekte unstrittig sind und keiner tiefergehenden und kostspieligen Analyse bedürfen. Entscheidend für den Erfolg einer umfassenden Bewertung ist eine gemeinsame Durchführung der Arbeitsschritte mit allen beteiligten Akteuren (z.B. Kläranlagenpersonal, Management, politische Entscheidungsträger). So können Missverständnisse verhindert und eine Identifikation mit dem Resultat von vornherein abgesichert werden. Zudem werden die vielfachen Wissens- und Erfahrungsbestände der Beteiligten integriert.

#### DIE MULTIKRITERIELLE BEWERTUNG DIENT DREI ZIELEN

- umfassende Berücksichtigung verschiedener Lösungsvarianten bei der Auswahl neuartiger Kläranlagentechnologie und Betriebsstrategien
- Identifikation von Konfliktlinien zwischen Personen und Interessengruppen
- Optimierung und Beschleunigung von Planungsprozessen

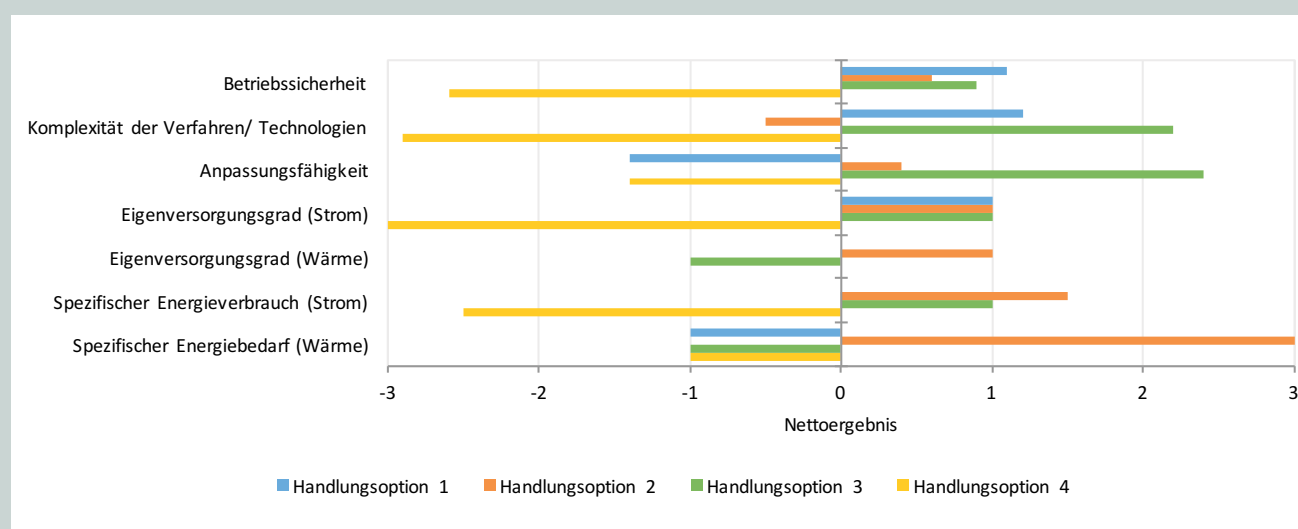


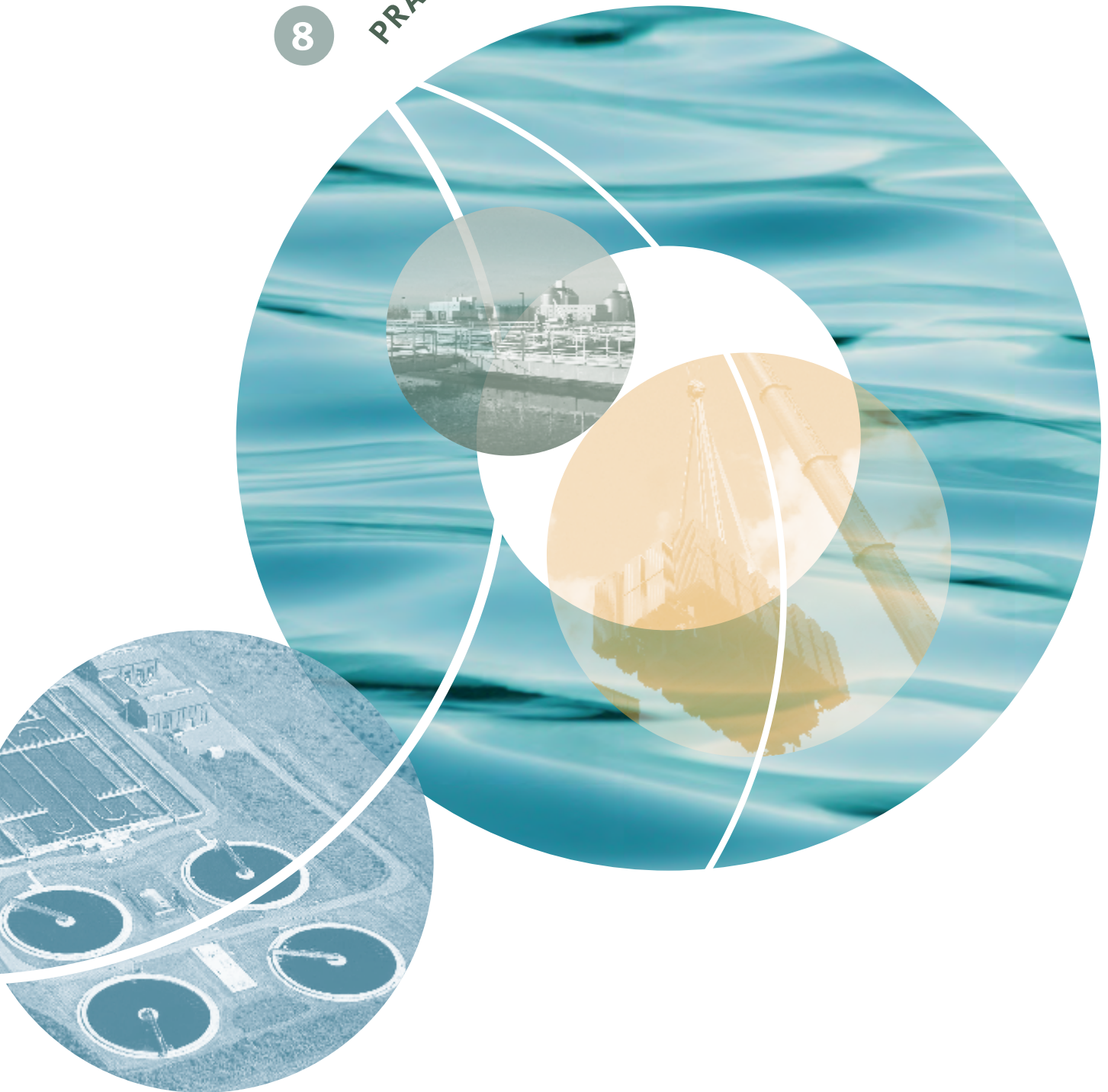
Abbildung 47: Beispielhafte Ergebnisse des paarweisen Vergleichs nach Einzelkriterien, Quelle: inter 3 GmbH



Abbildung 48: Die Reinigungsleistung der Kläranlage darf zu keinem Zeitpunkt gefährdet sein. Foto: Entega Abwasserreinigung GmbH & Co.KG

8

## PRAKTISCHE UMSETZUNG



## 8

### MÖGLICHE VORGEHENSWEISE

Eine bedarfsgerechte Bereitstellung und Nutzung von Energie auf kommunalen Kläranlagen und somit eine stärkere Rolle der Kläranlage als Energiesystemdienstleister kann zukünftig ökonomisch und ökologisch vorteilhaft sein. Um den dynamischen Anforderungen der Energiewirtschaft entsprechen zu können, muss auf den Anlagen das dafür notwendige Instrumentarium geschaffen bzw. optimiert werden. Die beschriebenen Inhalte sollen dabei Hilfestellungen geben und sowohl technische als auch organisatorische Möglichkeiten aufzeigen.

**Wie können Kläranlagenbetreiber die veränderten Rahmenbedingungen aufgreifen und die Flexibilitätskapazität ihrer Anlagen abschätzen?**

Abbildung 49 stellt dazu eine mögliche Vorgehensweise für Kläranlagenbetreiber zur Abschätzung von Flexibilitätskapazitäten für eine Interaktion mit der Energiewirtschaft vor.

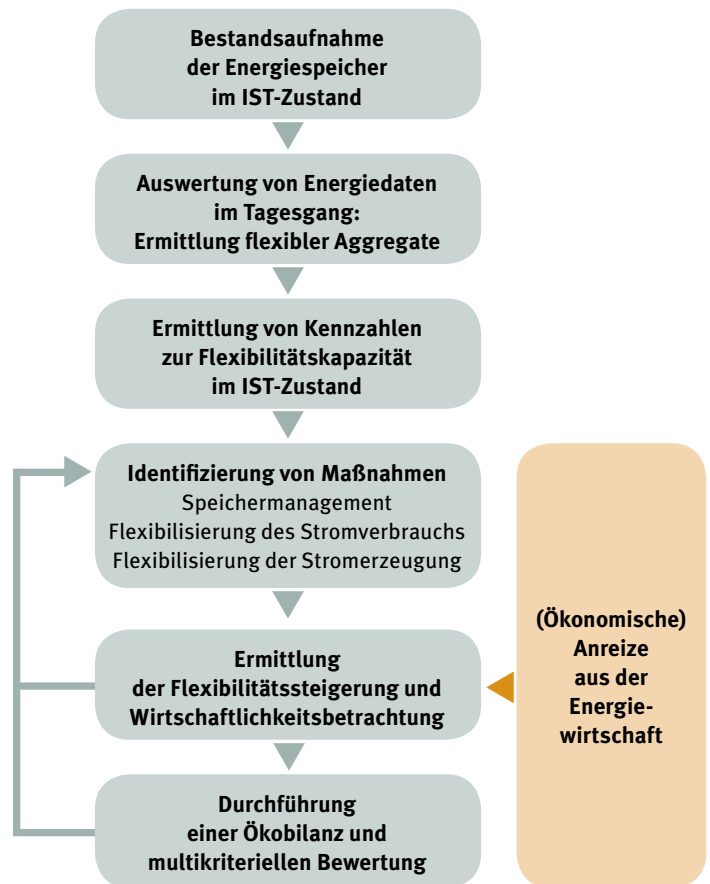


Abbildung 49: Exemplarische Vorgehensweise zur Ermittlung und Steigerung der Flexibilitätskapazität, Quelle: TU Darmstadt, Institut IWAR



Abbildung 50: Substratspeicher, Foto: Christian Schaum

## 1. BESTANDSAUFNAHME DER ENERGIE-SPEICHER IM IST-ZUSTAND

Zunächst erfolgt eine Bestandsaufnahme der unterschiedlichen Energiespeicher. Neben dem Faulgasspeicher sind auf Kläranlagen weitere Energiespeicher vorhanden, wie Substratspeicher mit unterschiedlichen Energiedichten (vgl. Kapitel 5.3), aber auch potenzielle Wärmespeicher oder -senken. So können Faulbehälter selbst als Wärmespeicher dienen. Die Energiespeicher und deren Einbindung in den Abwasser-, respektive Schlammweg sind darzustellen. Die Aufstellungen sollten neben dem Volumen der einzelnen Speicher auch Angaben zu Grenzwerten (Füllstände, Temperatur) und zu den peripheren Aggregaten wie bspw. dem Leistungsbereich der Pumpen beinhalten. Dadurch wird die Grundlage für die Beurteilung der aktuell vorhandenen Flexibilitätskapazität der Kläranlage geschaffen.

## 2. AUSWERTUNG VON ENERGIEDATEN IM TAGESGANG: ERMITTLUNG FLEXIBLER AGGREGATE

Voraussetzung für eine dynamische Interaktion mit der Energiewirtschaft ist eine energetische Bewertung und Optimierung der einzelnen Verbraucher der Kläranlage auf Basis von Minutenwerten. Die energetischen Betrachtungen gehen damit deutlich weiter als Empfehlungen bisheriger Arbeitsblätter der Abwasserwirtschaft, z.B. DWA A-216 (2015). Ziel ist es, die vorhandene Flexibilität zu erfassen und Möglichkeiten zur Steigerung und Nutzung dieser Flexibilität zu erarbeiten. Voraussetzungen hierfür sind die dazu notwendige messtechnische Ausstattung und eine entsprechende Datenerfassung.

## 3. ERMITTLUNG VON KENNZAHLEN ZUR FLEXIBILITÄTSKAPAZITÄT IM IST-ZUSTAND

Mithilfe von Kennzahlen werden Flexibilitätskapazitäten aufgezeigt. Anhand dieser Kennzahlen können zusätzlich Auswirkungen von verschiedenen Maßnahmen auf die Flexibilitätskapazität beschrieben und verglichen werden. Unter der Prämisse eines dynamischen BHKW-Betriebs und eines bedarfsgerechten Stromverbrauchs, stellt ein freies, für die Flexibilität nutzbares Volumen des Faulgasspeichers die maßgebliche absolute Kennzahl für Flexibilität dar (vgl. Kapitel 5.2).

## 4. IDENTIFIZIERUNG VON HANDLUNGSOPTIONEN

Aufbauend auf der Bestandsaufnahme und der Auswertung von Energiedaten gilt es, die einzelnen Flexibilitätspotenziale herauszuarbeiten und verschiedene Handlungsoptionen zu identifizieren. Durch Entwicklung eines Energiespeicher- und Beschickungsmanagements kann bspw. das erforderliche Volumen eines Gasspeichers zur bedarfsgerechten Stromerzeugung deutlich reduziert werden, was mitunter eine Erweiterung des vorhandenen Gasspeichers kompensieren kann. Als Hilfestellung können hierbei die vorgestellten Bausteine aus dem Bereich der Schlammbehandlung auf Kläranlagen herangezogen werden (vgl. Kapitel 5.3). Neben der Flexibilisierung auf Seiten der Strom- bzw. Faulgaserzeugung gilt es auch, den Stromverbrauch z.B. durch Abstimmung verschiedener Prozesse aufeinander, in Kombination mit weiteren Speichern (Zulaufspeicher, Prozesswasserspeicher etc.), flexibel zu gestalten.



## 5. ERMITTLUNG DER FLEXIBILITÄTS- STEIGERUNG UND WIRTSCHAFTLICHKEITS- BETRACHTUNG

Neben dem Potenzial für die Minimierung von Energieverbrauch bzw. Energiebezug der Kläranlage kann vor allem die Energiewirtschaft Anreize für eine Kooperation und insbesondere für die aktive Teilnahme an Energiemärkten geben (vgl. Kapitel 3). Diese Anreize sind für Kläranlagenbetreiber in der Regel zunächst von wirtschaftlichem Interesse. Beim Vergleich verschiedener Handlungsoptionen kann auf Basis von Kennzahlen ein Vergleich zum IST-Zustand hergestellt und eine gesteigerte Flexibilität ökonomisch bewertet werden. Mögliche Erlöse oder Einsparungen aus der Interaktion mit der Energiewirtschaft sind dem Aufwand für eine Flexibilisierung auf der Kläranlage, d.h. für die Erweiterung von Energiespeichern und ggf. auch für die Neuinstallation von BHKW, gegenüberzustellen. Letztere erfolgt möglichst in Symbiose mit ohnehin bestehendem Erneuerungsbedarf. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das neue BHKW auch bei Teillast noch eine hohe Effizienz erzielt.

## 6. DURCHFÜHRUNG EINER ÖKOBILANZ UND MULTIKRITERIELLEN BEWERTUNG

Abschließend sollte eine ganzheitliche Bewertung erfolgen, da in zunehmendem Maße volkswirtschaftliche, gesellschaftliche und ökologische Effekte zu berücksichtigen sind. Ziel ist es dementsprechend, verschiedene Handlungsoptionen nicht nur auf ihre Wirtschaftlichkeit zu untersuchen, sondern auch ihre systemischen Umweltwirkungen (Emissionen, Ressourcenbedarf, etc.) anhand einer Ökobilanz zu bestimmen. Mittels einer multikriteriellen Bewertung werden technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Kriterien als objektive Entscheidungshilfen herangezogen und die Meinungen unterschiedlicher Akteure berücksichtigt, um frühzeitig mögliche Hemmnisse zu erkennen und ihnen begegnen zu können (vgl. Kapitel 7).



Abbildung 51: Die Belüftung ist der größte Energieverbraucher kommunaler Kläranlagen; hier: Sauerstoffeintrag durch Membrantellerbelüfter, Foto: Christian Schaum



## IMPULSE FÜR DIE ZUKUNFT

9

## FAZIT UND AUSBLICK

Betreiber von Kläranlagen stehen heute und in Zukunft vor der Herausforderung, die Aufgaben der Abwasserreinigung unter den sich schnell wandelnden energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu leisten. Die Energiewende und besonders der steigende Anteil von erneuerbarer Energie führen zu neuen Anforderungen an die Energiewirtschaft, die diese entsprechend an ihre Kunden weitergibt. Dies eröffnet Energieerzeugern und Energieverbrauchern neue Chancen, verursacht aber auch neue Risiken. Strom wird in Zukunft weniger bedarfsgerecht produziert werden. In den kommenden Jahren und Jahrzehnten wird die nur noch begrenzt steuerbare Stromerzeugung dazu führen, dass vermehrt Instrumente für die erzeugungsgerechte Nutzung bzw. Zwischenspeicherung gesucht werden. Bereits heute zeigt sich dies in der Öffnung des Regelenenergiemarkts für eine Vielzahl kleiner Energieverbraucher und -erzeuger. Aus Sicht der Abwasserwirtschaft gilt es, die sich bietenden Chancen zu nutzen und Kläranlagen als häufig größte kommunale Energieverbraucher frühzeitig technisch und organisatorisch für eine erfolgreiche Interaktion mit der Energiewirtschaft und zum Systemdienstleister für die Energiewende weiterzuentwickeln.

Im Rahmen des Projekts ESiTI wurden mögliche Potenziale der Abwasserwirtschaft untersucht, um flexibel auf sich ändernde Randbedingungen aus der Energiewirtschaft zu reagieren und diese Änderungen als Anreize positiv für sich zu nutzen. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Schlammbehandlung als „energetische Schaltzentrale“ der Kläranlage. Mit den vorgestellten Technologiebausteinen kann eine Optimierung der Anpassungsfähigkeit an dynamische Prozesse der Energieerzeugung und des Energieverbrauchs erreicht werden. Neben der absoluten Höhe des zur Verfügung stehenden Energiepotenzials spielt bei der Beurteilung der Anpassungsfähigkeit allerdings auch der Faktor Zeit eine entscheidende Rolle. Es zeigt sich, dass das Denken in Jahresmittelwerten zur Beurteilung nicht ausreicht. Die Erfassungshäufigkeit und Dichte von Energiedaten auf Kläranlagen muss in den Minutenbereich gesteigert werden.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, kann eine einheitliche Vorgehensweise, unterteilt in einzelne Bewertungsschritte, dazu genutzt werden, zukunftsfähige

Energieoptionen für den Kläranlagenbetrieb zu erarbeiten. Diese einheitliche Vorgehensweise bietet für Betreiber und Verantwortliche die Möglichkeit, nachvollziehbare Entscheidungen zu zukünftigen Investitionen im Bereich der Energieoptimierung zu treffen und diese abzusichern. Jede Abwasseranlage und ihr Umfeld bilden ein einzigartiges Netzwerk, das nicht formalisiert betrachtet, sondern durch Spezialisten (Ingenieure, Ökonomen) exakt analysiert und bewertet werden sollte. Die Aufgaben der Abwasserreinigung und Einhaltung gesetzlicher Standards stehen dabei immer an erster Stelle.

**Wir als Beteiligte des Projekts ESiTI hoffen, dass wir Ihnen Impulse für die Integration von Kläranlagen als Systemdienstleister für die Energiewende geben konnten. Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei der Umsetzung der Maßnahmen!**

## LITERATURVERZEICHNIS

- AGEB - AG Energiebilanzen e.V. (2011): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2009 und 2010, Berlin
- BFE - Bundesamt für Energie (2013): Potential der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung, Bern, Schweiz
- Boßmann, T./ Wietschel, M. (2015): Lastmanagement als bedeutender Baustein für die Energiewende; In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 65 (2015), Heft 11, S. 62-65
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2015): Ein Strommarkt für die Energiewende, Ergebnispapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Weißbuch), Berlin
- Bundesnetzagentur (2011): BK6-10-099 Beschluss der Bundesnetzagentur, Bonn
- Bundesregierung (2016): Klimaschutz Berlin 2050, Berlin
- Consentec GmbH (2014): Beschreibung von Regelleistungskonzepten und Regelleistungsmarkt, Studie im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Aachen
- dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH (2012): Handbuch Lastmanagement, Vermarktung flexibler Lasten: Erlöse erwirtschaften – zur Energiewende beitragen, Berlin
- dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH (2013): Die Bedeutung des geplanten Pumpspeichers Heimbach und weiterer Stromspeicher im aktuellen und zukünftigen deutschen Stromversorgungssystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien, Berlin
- Dierich, A./ Hüesker, F./ Ansmann, T./ Gretzschel, O. (2017): Rahmenbedingungen für die Sektorkopplung von Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung mit der Energiewirtschaft. Hemmnisse, Treiber und Chancen, In: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 2017 (58), Nr. 8, S. 697-706, Hennef
- DIN 38414-S8 (1985): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 8: Bestimmung des Faulverhaltens
- DWA-A 216 - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2015): Arbeitsblatt DWA-A216 Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA-M 302 - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2016): Merkblatt DWA-M302 Klärschlammdeintegration, DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA-M 368 - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2014): Merkblatt DWA-M 368 Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, DWA-Regelwerk, Hennef
- Ebert, T./ Henke, K. (2012): Energiewende Nordhessen, Vortrag auf dem Hessenforum / 100% EE-Kongress, 26.9.2012, online verfügbar unter: [http://www.sun-stadtwerke.de/fileadmin/dokumente/Veranstaltung/4ee-Kongress-Energiewende\\_Nordhessen\\_SUN\\_IWES\\_2012\\_09.pdf](http://www.sun-stadtwerke.de/fileadmin/dokumente/Veranstaltung/4ee-Kongress-Energiewende_Nordhessen_SUN_IWES_2012_09.pdf), zuletzt abgerufen am 17.08.2017
- Elsner, P./ Fischdeck, M./ Sauer, D.U. (2015): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge, Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München
- Flodgren, J./ Örnmark, J. (2016): Assessment criteria and evaluation for external substrates in a co-digestion process. IWA "Holistic Sludge Management 2016", 07.-09. Juni 2016, Malmö, Schweden
- Gebhardt, O./ Brenck, M./ Meyer, V./ Hansjürgens, B. (2012): Bewertung und Priorisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen – Leitfaden zur Entscheidungsunterstützung bei der urbanen Klimaanpassung, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UfZ), Leipzig
- Graeber, D. (2013): Handel mit Strom aus Erneuerbaren Energien, Dissertationsschrift an der Universität Hohenheim, Springer Gabler, Wiesbaden
- Günther, O./ Maeding, S./ Mandatova, P. (2014): Verteilnetzregulierung: Halten sich Anreize für Innovationen, Investitionen und Effizienz die Waage?; In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 64 (2014), Heft 11, S. 8-11
- HMUELV - Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2009): Co-Vergärung organischer Materialien in Faulbehältern von kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen, Arbeitshilfe



Kraft, A./ Obenaus, F./ Grün, E. (2013): Energieautonomie einer Kläranlage durch vernetzte Strukturen, in: Klimaschutz und Energiewende; Welchen Beitrag liefert der Abwassersektor?, 31. Bochumer Workshop, in Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum

Kreit, F./ Goswamy, F.Y. (2007): Energy Management and Conservation Handbook, CRC Press, USA

Lange, M./ Drechsler, M./ Meyer, V. (2004): PRIMATE – An Interactive Software for Probabilistic Multi-Attribute Evaluation, Manual, Helmholtz Centre for Environmental Research Leipzig (UFZ), Leipzig

Lutze, R./ Rühl, J./ Schaum, C./ Cornel, P. (2016): From sewage sludge treatment to demand-driven energy supply using an anaerobic membrane digester, IWA “Holistic Sludge Management 2016”, 07.-09. Juni 2016, Malmö, Schweden

Lutze, R./ Rühl, J./ Engelhart, M. (2017): Membrane digester as key unit of sludge treatment at changing frame conditions, IWA Specialist Conference on Sludge Management, 09.-13. Juli 2017, London, UK

MULEWF - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz/ MWKEL - Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz (2014): Umstellung von Kläranlagen auf Schlammfäulung – Energetisches und ökonomisches Optimierungspotenzial

Rosenwinkel, K.-H./ Kroiss, H./ Dichtl, N./ Seyfried, C.-F./ Weiland, P. (2015): Anaerobtechnik, 2., neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg

Rühl, J./ Lutze, R./ Engelhart, M. (2017): Use of thermal pressure hydrolysis to increase degradation of readily biodegradable fraction of surplus sludge for demand-oriented biogas production, Poster presentation at 15th IWA World Conference on Anaerobic Digestion, 17.-20. Oktober 2017, Peking, China

Scholz, R./ Tietje, O. (2002): Embedded Case Study Methods – Integrating quantitative and qualitative Knowledge, Sage Publications, Thousand Oaks, California, USA

Schaum, C. (2016): Abwasserbehandlung der Zukunft: Gesundheits-, Gewässer- und Ressourcenschutz, Habilitation, Schriftenreihe IWAR 233

Schaum, C. / Lutze, R. / Rühl, J. / Ansmann, T. / Dierich, A. (2016): Bausteine einer zukünftigen Kläranlage: Abwasserbehandlung und Energiesystemdienstleistung, 13. September 2016, ERWAS-DACH-Seminar, Augsburg

Seier, M./ Schebek, L./ Schaum, C./ Lutze, R./ Rühl, J./ Cornel, P. (2016): Life Cycle Assessment of co-digestion on a wastewater treatment plant, Poster Präsentation, SETAC Europe 26th Annual Meeting, 22.-26. Mai 2016, Nantes, Frankreich

SRU - Sachverständigenrat für Umweltfragen (2013): Den Strommarkt der Zukunft gestalten, Berlin

Sterner M./ Stadler, I. (2014): Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, Berlin/Heidelberg

StromNZV - Stromnetzzugangsverordnung (2014): Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen, zuletzt geändert am 21.07.2014

Vavilin, V.A./ Fernandez, B./ Palatsi, J./ Flotats, X. (2008): Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview, Waste Management, 28, 939-951, doi:10.1016/j.wasman.2007.03.028

VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2012): Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke – Szenarien 2020, Frankfurt am Main

VDE - Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2015): Der Zelluläre Ansatz, Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende, Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt am Main

VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2016): VDI 4630 – Vergärung organischer Substrate, Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche

Zeig, C. (2014): Stoffströme der Co-Vergärung in der Abwasserwirtschaft, Dissertation, Hg. v. Verein zur Förderung des Instituts IWAR an der TU Darmstadt e.V. Darmstadt, Schriftenreihe IWAR 226

## ERWAS-VERBUNDPROJEKT ESiTi UND IHRE FACHLICHEN ANSPRECHPARTNER

### **Anaerobe Klärschlammbehandlung | Co-Vergärung |**

#### **Thermodruckhydrolyse | Faulung mit Biomasserückhaltung |**

#### **Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen**

Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR, Fachgebiet Ab-  
wassertechnik, Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

[www.iwar.tu-darmstadt.de](http://www.iwar.tu-darmstadt.de)

Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart, Robert Lutze, Johannes Rühl

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum

### **Ökobilanz in der kommunalen Abwasserreinigung |**

#### **Energiesystemanalyse (Interaktion zwischen Kläranlagen und Spotmarkt)**

Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR,  
Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft,  
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

[www.iwar.tu-darmstadt.de](http://www.iwar.tu-darmstadt.de)

Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek, Maximilian Seier

### **Energieeinsparpotentiale | Optimierte Eigenerzeugung |**

#### **Flexibilität durch Lastmanagement und Regelernergie |**

#### **Stromspeicher & Elektromobilität**

Bluemove-consulting GmbH, Kellerbachstr. 8, 82335 Berg

[www.bluemove-consulting.de](http://www.bluemove-consulting.de)

Arthur Dornburg, Nikola Vukovic

### **Kommunale Abwasserbehandlung | Energieanalyse**

ENTEKA Abwasserreinigung GmbH & Co.KG,

Gräfenhäuser Straße 118, 64293 Darmstadt,

[www.entega.ag](http://www.entega.ag), Dr. Julia Klinger (Geschäftsleitung),

Martin Jakob, Wolfgang John (Betrieb Abwasserreinigung)

### **Anaerobe Klärschlammbehandlung | Co-Vergärung |**

#### **Faulung mit Biomasserückhaltung**

EnviroChemie GmbH, In den Leppsteinswiesen 9, 64380 Rossdorf

[www.envirochemie.com](http://www.envirochemie.com)

Dr.-Ing. Eva Gilbert, Eva Feit

### **Hochlastfaulung, Rotationsscheibenfilter**

Fraunhofer – Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik

IGB, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

[www.igb.fraunhofer.de](http://www.igb.fraunhofer.de)

Dr.-Ing. Marius Mohr, Barbara Waelkens

### **Thermodruckhydrolyse | Klärschlammbehandlung |**

#### **Energieeffizienz auf Kläranlagen**

CUTEC Forschungszentrum für Rohstoffsicherung und Ressour-  
ceneffizienz der Technischen Universität Clausthal,

Abteilung Abwasserverfahrenstechnik, Leibnizstraße 21+23,  
38678 Clausthal-Zellerfeld

[www.cutec.de](http://www.cutec.de)

Prof. Dr.-Ing. Michael Sievers, Michael Niedermeiser,

Hinnerk Bormann

### **Thermische Klärschlammverwertung |**

#### **Intelligentes Wärmemanagement als Basis einer ganzheit- lichen energetischen Nutzung**

Dr. Born – Dr. Ermel GmbH, Finienweg 7, 28832 Achim

[www.born-ermel.eu](http://www.born-ermel.eu)

Jörn Franck, Ralf Wittstock, Gertrud Edens

### **Analyse Innovationsarena | Innovationsmanagement |**

#### **multikriterielle Bewertung | intersektorale Infrastruktur- konzepte und Digitalisierung**

inter 3 GmbH, Otto-Suhr-Allee 59, 10585 Berlin

[www.inter3.de](http://www.inter3.de)

Dr. Till Ansmann, Axel Dierich



Weitere Informationen

[www.esiti.de](http://www.esiti.de)

# IMPRESSUM

## Herausgeber

ERWAS-Verbundprojekt ESiTI –

„Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch“

## Gefördert durch

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
im Förderschwerpunkt „Nachhaltiges Wassermanagement (NaWaM)“ im Rahmen der Fördermaßnahme „Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft – ERWAS“ innerhalb des Rahmenprogramms „Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA)“

Förderkennzeichen 02WER1322A-I

## Projektkoordination

Technische Universität Darmstadt Institut IWAR

Fachgebiet Abwassertechnik

Prof. Dr.-Ing Markus Engelhart

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum

## Redaktion

Axel Dierich, Helke Wendt-Schwarzburg

(inter 3 Institut für Ressourcenmanagement)

Robert Lutze, Johannes Rühl

(Technische Universität Darmstadt, Institut IWAR)

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum

## Text

Dr. Till Ansmann, Hinnerk Bormann, Axel Dierich,

Arthur Dornburg, Gertrud Edens, Prof. Dr.-Ing. Markus

Engelhart, Eva Feit, Robert Lutze, Dr.-Ing Marius Mohr,

Michael Niedermeiser, Johannes Rühl, Prof. Dr.-Ing. habil.

Christian Schaum, Maximilian Seier, Nikola Vukovic,

Ralf Wittstock

## Design und Realisation

spierling-art.de, Berlin und Düsseldorf

## Fotoautoren Grafikelemente

Christian Schaum: Seite 2, 16, 36

Entega Abwasserreinigung GmbH & Co.KG: Seite 2, 4, 6, 40

Jürgen Mai/Entega Abwasserreinigung GmbH & Co.KG: Seite 20  
inter 3 GmbH: Seite 4, 6, 8, 20, 36, 40, 46, 50

p2m berlin GmbH: Seite 20, 40, 46

iStock Getty Images: Titel, Seite 2, 4, 6, 8, 16, 20, 36, 40, 46, 50

Die Herausgeber übernehmen keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Umsetzbarkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen.

© Oktober 2017

