



01

Studien

# Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung

**BASE TECHNOLOGIES GmbH**  
in Kooperation mit Fachhochschule München

<b>03</b>	<b>Vorwort</b>	
<b>04</b>	<b>Kurzzusammenfassung</b>	
<b>05</b>	<b>Zielsetzungen</b>	
<b>06</b>	<b>Hintergrund</b>	
	Erklärung des Begriffes Eigenstromverbrauch	06
	Darstellung des Status Quo	07
	Wirtschaftlichkeitsanforderungen und EEG	07
<b>08</b>	<b>Einführung</b>	
	Biogasentstehung	08
	Verfahren der Biogaserzeugung	09
	Biogasausbeute	10
	Prinzipieller Aufbau einer Biogasanlage	11
	Biogaspotenzial	12
	Kennzahlen zur Beurteilung des Eigenstrombedarfes	13
	Elektrische Hauptkomponenten einer Biogasanlage	14
	Grundlagen zur Ermittlung des Eigenstromverbrauchs	18
<b>21</b>	<b>Datenerhebung</b>	
	Methodische Vorgehensweise	21
	Literaturrecherche	22
	Herstellieranfragen	22
	Betreiberumfrage	22
	Kriterien für die Anlagenauswahl	22
	Anlagenbesichtigungen und Betreiberinterviews	23
	Messungen des Eigenstromverbrauchs	23
	Prüfung des Datenmaterials	24
<b>25</b>	<b>Auswertung</b>	
	Ergebnisse von Herstellieranfragen und Literaturrecherche	25
	Statistische Auswertung der Betreiberumfrage	26
	Auswertung der Betriebsdaten	28
	Ergebnisse der Messungen	30
	Analyse der Ergebnisse	34
<b>37</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse</b>	
	Zusammenfassung	37
	Empfehlungen an Anlagenhersteller	38
	Empfehlungen an Anlagenbetreiber	38
	Wirtschaftliche Bewertung	39
	Technologietrends und zukünftige Entwicklungsperspektiven	39
<b>40</b>	<b>Anhang</b>	
	Auswertung einer Beispielanlage	40
	Abkürzungsverzeichnis	41
	Unterstützende Hersteller und Planungsbüros	41

## Vorwort

Seit der Neufassung des EEG im Jahre 2004 erlebt die Biogasbranche in Deutschland einen Aufschwung, der die schwierigen Gründerjahre dieser noch jungen Technologie beinahe vergessen lässt. Die Idee, pflanzliche und tierische Abfallstoffe in elektrische und thermische Energie zu wandeln, hat inzwischen zu einer bundesweit installierten elektrischen Gesamtleistung von 650 MW und im Jahr 2005 zu einer Jahresstromerzeugung von 1,33 TWh geführt. Dies ist mehr als das 3-fache der Energieerzeugung, die die Photovoltaik mit einer installierten Leistung von etwa 1.400 MW jährlich erzeugt.

Eine Biogasanlage benötigt für ihren Betrieb allerdings auch selbst elektrische Energie für Rührwerke, Pumpen, Lüfter und Biomasseeinbringsysteme. In der aktuellen Literatur existiert so gut wie keine übergreifende, systematische Bestandsaufnahme zum elektrischen Eigenbedarf. In der Biogasbranche werden nur, da über einen sehr weiten Bereich streuend, wenig aussagekräftige Daten über die Bandbreite des Eigenstrombedarfs von landwirtschaftlichen Biogasanlagen genannt. Vor diesem Hintergrund lag es nahe, das Thema näher zu beleuchten und den Stand der Technik in systematischer Form darzustellen.

Ohne die Unterstützung zahlreicher Anlagenbetreiber, Hersteller und Fachverbände wäre diese Studie nicht in diesem Umfang möglich gewesen. Die Autoren möchten deshalb den folgenden Unternehmen und Institutionen für die gute Zusammenarbeit und ihre Unterstützung bei der Finanzierung, der Datenerhebung und der Messwerterfassung danken:

Dem **Solarenergieförderverein Bayern e. V.** für das Interesse und die finanzielle Unterstützung der Studie.

Der **E.ON Bayern AG**, allen teilnehmenden Anlagenherstellern (siehe Liste im Anhang) und Planungsbüros für die Mithilfe bei der Datenerhebung und der Kontaktaufnahme zu Anlagenbetreibern sowie für die Bereitstellung von Informationen zu Anlagenkonzepten und -technologien.

Den folgenden **Fachverbänden** für die Bereitstellung von Fachinformationen, die tatkräftige Unterstützung und Veröffentlichung der Studie:

- **Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft**, Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik, Freising
- **Biogasvereinigung Ostbayern GmbH**, Erding
- **C.A.R.M.E.N. e. V.**, Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk, Straubing
- **Fachverband Biogas e. V.**, Freising
- **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.**, Gülzow

Der **Fluke Deutschland GmbH** für die fachliche Unterstützung und die Bereitstellung von 3-phasigen Netzanalysatoren zur Energie- und Leistungsmessung.

Schließlich sei den insgesamt 77 Biogasanlagen-Betreibern ein herzliches Dankeschön gesagt, die ihre Ertragsdaten für die Studie zur Verfügung gestellt und es zum Teil ermöglicht haben, ihre Anlagen vor Ort zu vermessen.

## Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden insgesamt 35 landwirtschaftliche Biogasanlagen der Baujahre 1995 bis 2005 auf ihren Eigenstromverbrauch hin untersucht.

Nach der Definition geeigneter Kennzahlen zur Beurteilung des Eigenstromverbrauchs werden die wesentlichen elektrischen Hauptkomponenten von Biogasanlagen und deren typische Leistungsdaten beschrieben. Zur Vergleichbarkeit werden geeignete Bezugsgrenzen definiert und die verschiedenen Anschlussvarianten der Eigenverbraucher an das aufnehmende Stromnetz gegenübergestellt.

Der Datenerhebung aus Literaturrecherche, Hersteller- und Betreiberumfrage und eigenen Messungen kommt eine besondere Bedeutung zu, da jeder hier vermiedene Fehler hilft, die zumeist deutliche Diskrepanz zwischen Theorie und Praxis aufzuklären. Bei sechs Anlagen vor Ort konnten detaillierte Messungen der aufgenommenen elektrischen Leistung und Energie an allen relevanten Verbrauchern der Anlagen durchgeführt und als Referenz für andere Daten genutzt werden. Dass die durchschnittlichen Werte zwischen 5,8 % (Literaturangaben) und 8,1 % (eigene Messungen) liegen, zeigt, dass der Eigenstromverbrauch sowohl in Fachkreisen als auch von Betreibern und Anlagenherstellern oft unterschätzt bzw. zu optimistisch bewertet wird.

Verschiedene Korrelationen des Eigenstromverbrauches mit geeigneten Größen wie z. B. Anlagenauslastung und -bauart ermöglichen die Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf den praktischen Nutzen der Studie, nämlich Anlagenbetreibern und -herstellern Hinweise auf Verbesserungspotenziale zu geben. Eine Priorisierung der Verbraucher nach ihrem Anteil am Gesamtverbrauch zeigt schnell die Optimierungsbereiche auf, wobei für detaillierte Aussagen allerdings weitergehende Untersuchungen notwendig sind, beispielsweise der Einfluss von Rührwerktyp, -einsatzzeit und -leistung auf den Biogasertrag.

## Zielsetzungen

Die vorliegende Studie soll die erzielbare Effizienzsteigerung bei der Energieerzeugung aus Biogas durch Senkung des Eigenstromverbrauchs aufzeigen und Anregungen zu Optimierungen im Anlagenbau und Anlagenbetrieb geben. Grundlage hierfür ist die Schaffung eines Bewusstseins für die Bedeutung des Eigenstromverbrauchs und seine Auswirkungen auf Energieerzeugungseffizienz und Umwelt.

Die Hauptmotivation für Anlagenbetreiber den Eigenstromanteil zu senken, ist sicherlich die damit einher gehende Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebes. Speziell bei Biogasanlagen, die z. Zt. und auch in den nächsten Jahren nur aufgrund der gesetzlichen Einspeisevergütung wirtschaftlich betrieben werden können, beeinflusst der Anteil des Eigenstromverbrauchs als Kostenfaktor die Wirtschaftlichkeit der Anlage nicht unerheblich.

In diesem Sinne soll die Studie basierend auf der Erhebung praxisbezogener Daten von Biogasanlagen in Deutschland den Status Quo des Eigenstromverbrauchs von modernen Biogasanlagen aufzeigen. Parallel dazu werden Messungen an exemplarischen Anlagen durchgeführt, um die erhaltenen Daten zu verifizieren. Angestrebt wird hierbei nicht die Ermittlung der effizientesten Anlagenkonzepte, sondern vielmehr ein herstellerunabhängiges Aufzeigen der erzielbaren Einsparpotenziale.

Motive für Anlagenhersteller den Eigenstromverbrauch zu reduzieren, können darüber hinaus auch rein technologische Gesichtspunkte sein. Technisch einfachere Anlagen mit weniger und optimal auf das Anlagenkonzept abgestimmten Komponenten sind nicht selten kostengünstiger und können oft leichter standardisiert werden. Hierbei liegt das Hauptaugenmerk vor allem auf einer optimierten Regelungstechnik, die den Biogasprozess abhängig von den Betriebsparametern, z. B. Substratart und -zufuhr in einem optimierten Betriebsfenster regelt.

Die Untersuchungsergebnisse beschränken sich auf Biogasanlagen im landwirtschaftlichen Bereich. Die Veröffentlichung soll der Richtungsweisung für Hersteller und Betreiber dienen und gleichzeitig den Grundstein für Langzeitstudien mit breiterem Fokus auf die Analyse und Optimierung des Energieerzeugungsprozesses entlang des geschlossenen Biomasse-Stoffkreislaufes legen.

## Hintergrund

Das heute verfügbare Technologie Know-how, der weltweit florierende Markt im Bereich der regenerativen Energieerzeugung und nicht zuletzt die nachhaltige gesetzliche Förderung stellen die Weichen immer mehr in Richtung der erneuerbaren Energiequellen als Alternative zu den fossilen Energieträgern.

In der regenerativen Energieerzeugung ist neben der Windkraft die Nutzung von Biogas von besonderem Interesse, da sich in Kombination mit Gasspeichersystemen der große Vorteil der Energiespeicherung erschließen lässt. Durch die dezentrale Energieerzeugung in Biogasanlagen werden zudem Übertragungs- und Netzkosten gesenkt und das Risiko großflächiger Stromausfälle verringert. Dank der vielseitigen Einsatzbarkeit von Biogas zur Strom-, Wärme- oder Kraftstoff-erzeugung befindet sich der Markt der Biogaserzeugung derzeit in seiner bisher stärksten Wachstumsphase.

Im Gegensatz zu Windkraftanlagen ermöglichen Biogasanlagen genaue Aussagen über die Anlagenverfügbarkeit sowie eine Steuerung des Energieeinsatzes, da der verwendete Primärenergieträger Biomasse so gut wie keinen natürlichen Schwankungen unterlegen ist bzw. problemlos über einen längeren Zeitraum bevorratet werden kann. Obwohl derzeit nur Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Bemessungsleistung von einigen Megawatt realisiert werden, ermöglichen zentral koordinierte Erzeugungsparks einen Betrieb im Grund- und Mittellastbereich.

## Erklärung des Begriffes Eigenstromverbrauch

Unter dem Eigenstromverbrauch einer Biogasanlage versteht man den gesamten Stromverbrauch aller elektrischen Komponenten, die zum Betrieb der Anlage notwendig sind. Es handelt sich also um alle elektrischen Antriebe, Ventile, Beleuchtungsanlagen, Steuerungs- und Regelungseinrichtungen, die zum Zwecke des Anlagenbetriebes mit Strom versorgt werden müssen. Dabei ist es unerheblich, ob diese elektrische Energie aus dem Netz, vom Generator der Anlage oder von anderen Quellen stammt. Der Eigenbedarf von Biogasanlagen setzt sich bei den meisten Anlagen aus dem erzeugten Eigenstromanteil und dem aus dem öffentlichen Stromnetz bezogenen Eigenstromanteil zusammen:

- $EB_{\text{Erzeugt}}$  = Eigenstromanteil, der aus dem erzeugten Strom des BHKW gedeckt wird
- $EB_{\text{Bezogen}}$  = Eigenstromanteil, der mit bezogenem Fremdstrom aus dem öffentlichen Stromnetz gedeckt wird

Neben den Laufzeiten und Bemessungsleistungen der elektrischen Anlagenkomponenten beeinflussen auch das Fermentierungsverfahren und die Prozessbiologie die Höhe des durchschnittlichen Eigenstrombedarfs. Eine schwankende Biogausausbeute und ein erhöhter Rührbedarf bei Problemen in der Substratdurchmischung (z. B. bei Schwimmdeckenbildung im Fermenter) bedingen häufig große Abweichungen von den vom Hersteller genannten Verbrauchswerten.

Im Sinne der Vergleichbarkeit von verschiedenen Anlagenleistungsklassen wurde der Eigenstromverbrauch aller Anlagen einheitlich auf die Bruttostromerzeugung des BHKW bezogen. Diese Bezugsgröße wird als Eigenbedarfsanteil bezeichnet.

$$EB\text{-Anteil} = \frac{W_{\text{el EB}}}{W_{\text{el Brutto}}} = \frac{W_{\text{el EB}}}{W_{\text{el Netto}} + W_{\text{el EB}}}$$

$W_{\text{el EB}}$  = Elektrische Arbeit für den Eigenbedarf

$W_{\text{el Brutto}}$  = Erzeugte elektrische Bruttoarbeit an den Generatorklemmen

$W_{\text{el Netto}}$  = Elektrische Arbeit nach Abzug des Eigenbedarfs

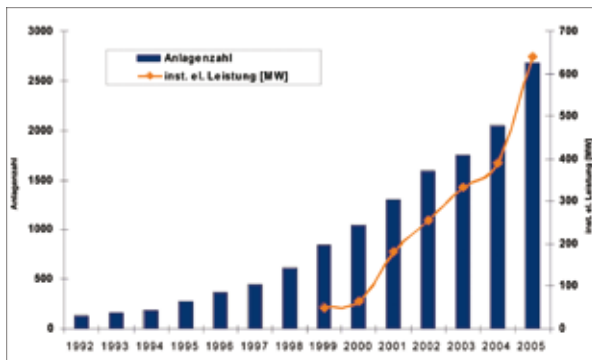
## Darstellung des Status Quo

Die Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland liegt derzeit bei ca. 2.700, wobei etwa ein Drittel aller Biogasanlagen in Bayern steht. Seit Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im März 2000 ist die Anzahl installierter Blockheizkraftwerke zur Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung stark angewachsen. Die installierte elektrische Gesamtleistung der Biogasanlagen in Deutschland beträgt etwa 650 MW<sub>el</sub> (2006), sie ist im Vergleich zum letzten Jahr um 70 % gestiegen.

### Aktuelle Zahlen und Fakten der Biogasbranche in Deutschland (Fachverband Biogas e.V.)

Anzahl der Biogasanlagen	ca. 2.700
Installierte elektrische Leistung	650 MW <sub>el</sub>
Wachstum gegenüber Vorjahr	70 %
Neuzubau	250 MW <sub>el</sub>
Geschätzter Umsatz Anlagenbau	650 Mio. EUR/a
Wachstum gegenüber Vorjahr	80 %
Arbeitsplätze	> 5.000
Vermiedene CO <sub>2</sub> -Emissionen	2,8 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquivalent (entspricht der Verfeuerung von 1 Mrd. Liter Heizöl EL)

### Entwicklung der Biogasanlagenzahl in der Landwirtschaft (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.)



Der überproportionale Anstieg der elektrischen Gesamtleistung ist auf die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2004 zurückzuführen, wobei sich eine deutliche Entwicklung hin zu Biogasanlagen mit höheren Leistungsklassen bis über 1.500 kW<sub>el</sub> abzeichnet.

Im Rahmen der Studie wurden zahlreiche Indizien festgestellt, die darauf deuten, dass das Optimierungspotenzial im elektrischen Eigenstromverbrauch bisher kaum zielstrebig verfolgt wurde. Der Wissensstand bei Betreibern ist meist auf eine optimale Prozessführung und Gasausbeute ausgerichtet, nicht aber auf eine Minimierung der elektrischen Eigenstromaufnahme.

Hintergrund für die Schwierigkeiten der Eigenverbrauchsmessung ist der fehlende Standard im Anlagenbau, insbesondere in der Elektrotechnik, was sich in einer Vielzahl von hersteller-

spezifischen Schaltungsvarianten widerspiegelt. Auch Fermentierungsverfahren und Biologie beeinflussen die Höhe des durchschnittlichen Prozessstrombedarfs. Eine schwankende Biogausausbeute und ein höherer Rührbedarf bei Problemen in der Homogenität der Durchmischung (z.B. bei Schwimmdeckenbildung im Fermenter) bedingen häufig große Abweichungen von den vom Hersteller referenzierten Verbrauchswerten.

Ein weiterer Punkt ist, dass es zahlreiche Methoden gibt, den Eigenstrom auf eine Bezugsgröße zu normieren, z. B. auf die Einspeisearbeit oder die zugegebene Substratmenge. Nachdem nun die Biogausausbeute in Folge variierender Substrat-, Klima- und Prozessbedingungen schwankt, ist der vom Hersteller genannte Eigenstromverbrauchswert meist nicht zu erreichen.

## Wirtschaftlichkeitsanforderung und EEG

Seit dem 1. August 2004 ist das novellierte EEG in Kraft, das dem Betreiber einer Biogasanlage eine Grundvergütung garantiert, wenn er seinen aus Biogas erzeugten Strom in das öffentliche Stromnetz einspeist. Zudem kann er die Stromvergütung durch das EEG über verschiedene Boni aufstocken.

Das EEG wirkt mit Hilfe der gesetzlich festgelegten Strom-einspeisevergütungen als Marktanreizprogramm zur Förderung der regenerativen Energieerzeugung. Dies ermöglicht eine Steuerung der Technologieentwicklungen, im Biogassektor vor allem zur Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen, der Kraft-Wärme-Kopplung und innovativer Technologien. Durch die degressive Gestaltung der EEG-Grundvergütung wird eine kontinuierliche Steigerung der Anlageneffizienz angestrebt, mit dem Ziel der Erlangung einer wettbewerbsfähigen Marktreife im Konkurrenzkampf gegen die etablierte konventionelle Energieerzeugung mit fossilen Brennstoffen.

### Grundvergütungen in Abhängigkeit von der elektrischen Leistungsklasse

Elektrische Anlagenleistung	Vergütung pro kWh (Stand 2004)
Anlagen bis 150 kW	11,5 Cent pro kWh
Anlagen bis 500 kW	9,9 Cent pro kWh
Anlagen bis 5 MW	8,9 Cent pro kWh
Anlagen von 5 MW bis 20 MW	8,4 Cent pro kWh

Die Vergütungen werden für 20 Jahre gewährt. Seit dem 01.01.2005 wird die Grundvergütung jährlich für neu in Betrieb genommene Anlagen um jeweils 1,5 % gesenkt. Der Bonus für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Anlagen bis 500 kW<sub>el</sub> beträgt zum Beispiel 6 Cent/kWh, bei Anlagen mit höherer Nennleistung 4 bzw. 2,5 Cent/kWh. Zusätzlich wird auch für Strom, der in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen nach § 3 Abs. 4 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG 2002) oder unter Einsatz innovativer Technologien gewonnen wird, ein Bonus von jeweils 2 Cent pro kWh gewährt.

## Einführung

### Biogasentstehung

Biogas ist ein durch den anaeroben, mikrobiellen Abbau von organischen Substanzen entstehendes Gasgemisch, das zu 50-70 % aus dem hochwertigen Energieträger Methan ( $\text{CH}_4$ ) besteht. Weitere Bestandteile sind 30 - 40 % Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) sowie Spuren von Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Stickstoff ( $\text{N}_2$ ), Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ).

Als Ausgangsstoffe für die Biogaserzeugung kommen grundsätzlich alle Arten von Biomasse in Frage, deren Hauptkomponenten Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette oder Cellulosen sind. Wird Flüssigmist oder speziell vorbehandelter Festmist zusammen mit landwirtschaftlichen, gewerblichen, agroindustriellen oder kommunalen biogenen Abfällen vergärt, so bezeichnet man dies als Kofermentation. Das Ziel der Kofermentation ist, im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (Oktober 1996 in Kraft getreten) eine verantwortbare Rückführung der organischen Abfälle einschließlich der darin enthaltenen Nährstoffe in den landwirtschaftlichen Stoffkreislauf zu erreichen und gleichzeitig das in den Abfällen verfügbare Energiepotenzial technisch zu nutzen.

Aufgrund des relativ hohen Energiegehalts lässt sich das Biogas als Energieträger für die Wärme- und Stromerzeugung nutzen. Der Energiegehalt ist direkt vom Methangehalt im Biogas abhängig. Ein Kubikmeter ( $\text{m}^3$ ) Methan ( $\text{CH}_4$ ) hat einen Energiegehalt von knapp zehn Kilowattstunden (9,94 kWh). Angenommen, der Methananteil im Biogas liegt bei 60 %, so beträgt der energetische Nutzen von einem  $\text{m}^3$  Biogas ca. sechs Kilowattstunden. Somit entspricht der durchschnittliche Heizwert eines  $\text{m}^3$  Biogases etwa 0,6 Liter Heizöl.

Die biologische Methangasbildung (Klimafaktor 30 gegenüber Kohlendioxid) ist ein Prozess, der in der Natur überall dort stattfindet, wo organisches Material in feuchter Umgebung und unter Luftabschluss durch die Stoffwechselaktivität natürlicher Methanbakterien verrottet. Beispiele hierfür sind die Entstehung von:

- Sumpfgas
- Methan in den Verdauungsorganen von Wiederkäuern
- Methan in nassen Kompostierungsanlagen
- Methan in überfluteten Reisfeldern.

Die Biogasentstehung (Fermentation) kann in vier Phasen unterteilt werden:

- In der Hydrolysephase werden die festen Substanzen (Proteine, Fette, Kohlenhydrate) durch bakterielle Enzyme in einfachere Bestandteile (Monomere wie z. B. Aminosäuren, Glukose, Fettsäuren) zerlegt (hydrolysiert).
- In der Versäuerungsphase werden die gelösten Stoffe zu organischen Säuren (Essigsäure, Propionsäure, Butter-säure), niederen Alkoholen, Aldehyden, Wasserstoff, Kohlendioxid und anderen Gasen wie Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) abgebaut.
- Die essigsäurebildende (acetogene) Phase wandelt die Stoffe durch acetogene Bakterien zu Essigsäure um.
- In der methanbildenden Phase wird die Essigsäure zu Methan, Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) gespalten. Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Kohlendioxid werden zu Methan und Wasser reduziert (Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow 2004).



## Verfahren der Biogaserzeugung

Fermentation oder Fermentierung bezeichnet in der Biotechnologie die Umsetzung von biologischen Materialien mit Hilfe von Bakterien-, Pilz-, Zellkulturen oder aber durch Zusatz von Enzymen (Fermenten).

Eine strikte Unterteilung der Fermentation in Nass- oder Trockenfermentation ist aus biologischer Sicht eigentlich irreführend, da die am Vergärungsprozess beteiligten Bakterien in jedem Fall ein flüssiges Medium für ihr Überleben benötigen. Deswegen erfolgt die Einteilung in Nass- oder Trockenfermentation über den Trockensubstanzgehalt des Fermenterinhalt.

In der Praxis hat sich eingebürgert, dass man bis zu einem Trockensubstanzgehalt im Fermenter von 12 -15 % von Nassfermentation spricht, da der Fermenterinhalt bei diesem Wassergehalt noch pumpbar ist. Steigt der Trockensubstanzgehalt im Fermenter auf über 16 %, so ist das Material in der Regel nicht mehr pumpbar und man bezeichnet den Prozess als Trockenvergärung.

Grundsätzlich laufen chemische Reaktionen umso schneller ab, je höher die Umgebungstemperatur ist. Dies lässt sich aber nur bedingt auf biologische Abbau- und Umsetzungsprozesse anwenden. Für die an den Stoffwechselprozessen beteiligten Bakteriengruppen existieren unterschiedliche Temperatur-optima.

Werden diese optimalen Temperaturbereiche unter- bzw. überschritten, kann dies zu einer Hemmung und im Extremfall zur unwiderruflichen Schädigung der beteiligten Bakterien führen. Die am Abbau der Biomasse beteiligten Bakterien lassen sich auf Grund ihrer Temperaturoptima in zwei Gruppen einteilen, in die mesophilen und die thermophilen Bakterien.

Der größte Teil der bekannten Methanbakterien hat sein Wachstumsoptimum im mesophilen Temperaturbereich zwischen 32 - 42 °C. Anlagen, die im mesophilen Bereich arbeiten, sind in der Praxis am weitesten verbreitet, da in diesem Temperaturbereich eine relativ hohe Gasausbeute sowie eine gute Prozessstabilität erreicht wird.

Sollen durch eine Hygienisierung des Substrates gesundheits-schädliche Keime abgetötet werden oder werden Substrate verwendet, die mit hoher Eigentemperatur anfallen, bieten sich thermophile Bakterienkulturen für die Vergärung an.

Diese haben ihr Optimum im Temperaturbereich zwischen 50 - 57 °C. Es wird hier durch die hohe Prozesstemperatur eine höhere Gasausbeute erreicht. Jedoch wird auch mehr Energie für das Aufheizen des Gärprozesses benötigt.

Da die Bakterien bei ihrer Arbeit nur geringe Mengen an Eigenwärme produzieren, die nicht für die nötige Umgebungstemperatur ausreicht, muss der Fermenter in jedem Fall isoliert und extern beheizt werden, damit die optimalen Temperaturbedingungen der Bakterien erreicht werden (Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow 2004).

## Biogasausbeute

Die Biogasausbeute ist nicht nur substratspezifisch, sondern sie muss vor allem auch unter den jeweils vorherrschenden Randbedingungen (z. B. Temperatur, Verweilzeit oder Belastung) beurteilt werden. So ist es zu erklären, dass zum Teil erheblichen Streuungen für gleiche Substrate auftreten. Hinzu kommt, dass z. B. bei Abfällen aus der Tierhaltung die Verwendung des Futtermittels, die Art der Entmistung und auch das Güllealter den Wert der Biogasausbeute beeinflussen.

Prinzipiell kann die Berechnung des Gasertrages wie folgt durchgeführt werden (Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow 2004): Den drei Stoffgruppen – verdauliches Eiweiß (RP), verdauliches Fett (RL) und verdauliche Kohlenhydrate (Rohfaser RF + N-freie Extrakte NfE), aus denen sich jedes Substrat zusammensetzt, lassen sich spezifische Gaserträge und Methanergehalte zuordnen, die sich aus den unterschiedlichen relativen Kohlenstoffanteilen ergeben:

### Spezif. Methanergehalte von Eiweiß, Fett u. Kohlenhydraten

	Biogasertrag in l/kg	Methanergehalt in Vol-%
Verdauliches Eiweiß (RP)	600 - 700	70 - 75
Verdauliches Fett (RL)	1.000 - 1.250	68 - 73
Verdauliche Kohlenhydrate (RF + NfE)	700 - 800	50 - 55

Aus diesen Vorgaben kann man nun den organischen Trockensubstanzgehalt (oTS-Gehalt) sowie die jeweilige Masse je kg der verdaulichen Stoffgruppen, bezogen auf ein kg Trockensubstanz (TS) eines bestimmten Substrates errechnen, wobei der jeweilige Verdauungsquotient (VQ) zu berücksichtigen ist:

- oTS-Gehalt:  $(TS - \text{Rohascheanteil})/TS$
- Verdauliches Eiweiß: Rohproteinanteil · Verdauungsquotient RP (VQRP)
- Verdauliches Fett: Rohfettanteil · Verdauungsquotient RL (VQRL)
- Verdauliche Kohlenhydrate: Rohfaseranteil · Verdauungsquotient RF (VQRF) + NfE-Anteil · Verdauungsquotient NfE (VQNfE)

Mit den Daten für Silomais (fett gedruckt) errechnen sich z. B. folgende Werte:

- oTS-Gehalt:  $(1 \text{ kg} - 0,053 \text{ kg})/1 \text{ kg TS} = 0,9470 \text{ kg}/(\text{kg TS}) = 94,7\% \text{ oTS-Gehalt}$
- Verdauliches Eiweiß:  $0,092 \text{ kg}/(\text{kg TS}) \cdot 57\% = 0,0524 \text{ kg}/(\text{kg TS})$
- Verdauliches Fett:  $0,042 \text{ kg}/(\text{kg TS}) \cdot 87\% = 0,0365 \text{ kg}/(\text{kg TS})$
- Verdauliche Kohlenhydrate:  $(0,185 \text{ kg}/(\text{kg TS}) \cdot 63\% + (0,628 \text{ kg}/(\text{kg TS}) \cdot 78\% = 0,6064 \text{ kg}/(\text{kg TS})$

Mit dem bereits bekannten oTS-Gehalt von 94,7% können nun die Massen eines Kilogramms der jeweiligen Stoffgruppe bezogen auf 1 kg oTS berechnet werden:

- Verdauliches Eiweiß:  $0,0524 \text{ kg}/(\text{kg TS}) : 94,7\% \text{ oTS-Gehalt} = 0,0554 \text{ kg}/(\text{kg oTS})$
- Verdauliches Fett:  $0,0365 \text{ kg}/(\text{kg TS}) : 94,7\% \text{ oTS-Gehalt} = 0,0386 \text{ kg}/(\text{kg oTS})$
- Verdauliche Kohlenhydrate:  $0,6064 \text{ kg}/(\text{kg TS}) : 94,7\% \text{ oTS-Gehalt} = 0,6403 \text{ kg}/(\text{kg oTS})$

Die Ergebnisse werden nun mit den spezifischen Ausbeuten und den Methangehalten multipliziert. Man erhält damit die folgenden durchschnittlichen Biogas- und Methanerausbeuten für Silomais:

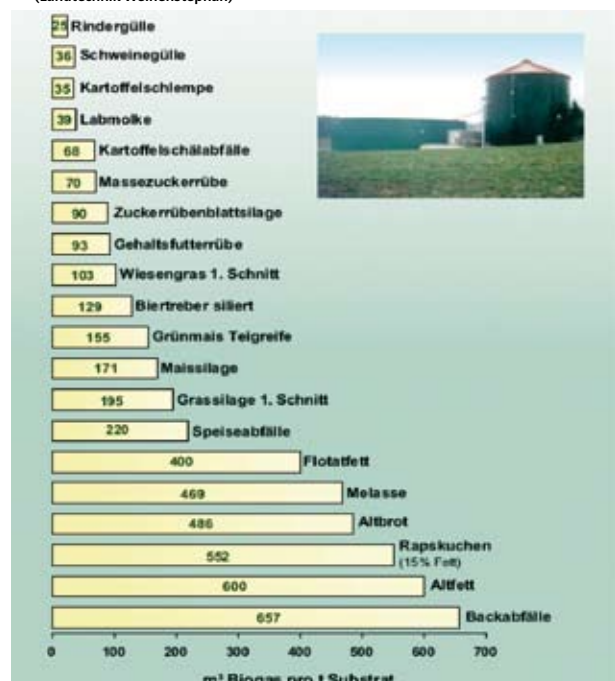
### Spezifische Methanerausbeute von Eiweiß, Fett und Kohlenhydraten für Silomais

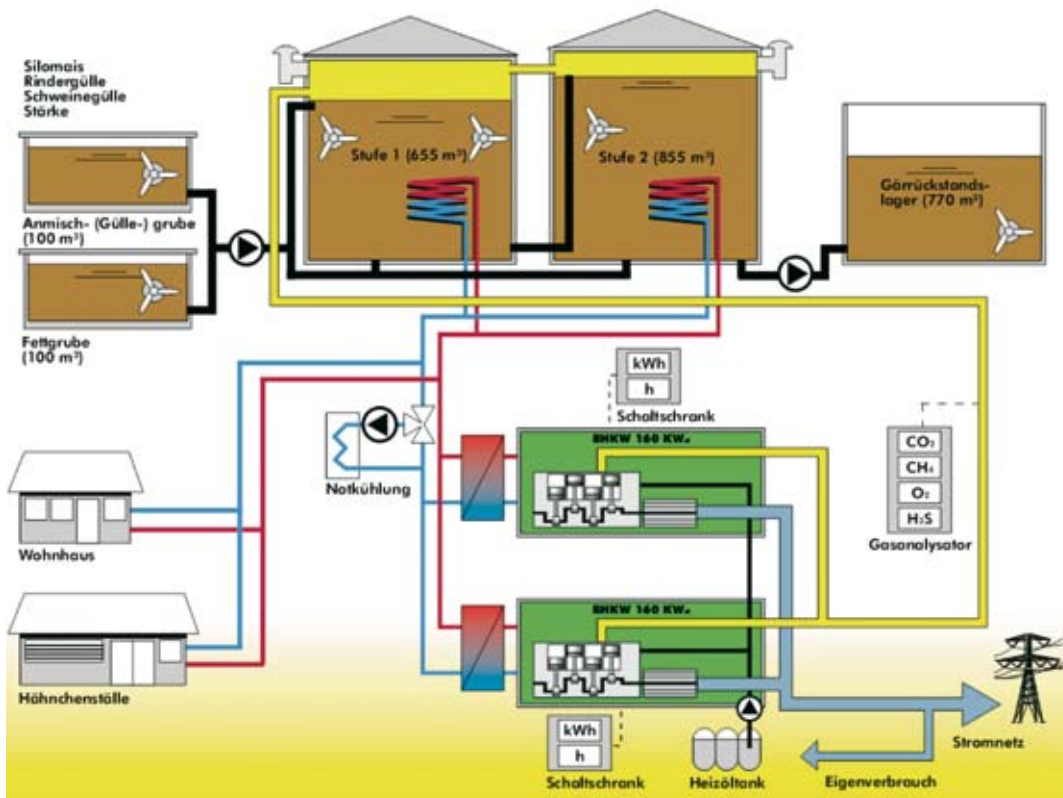
	Biogasertrag in l/(kg oTS)	Methanergehalt in l/(kg oTS)
Verdauliches Eiweiß (RP)	35,99	26,10
Verdauliches Fett (RL)	43,41	30,60
Verdauliche Kohlenhydrate	480,25	252,13
Summe pro kg oTS	559,65	308,83

Aus einem Kilogramm organischer Trockensubstanz von Silomais können durchschnittlich etwa 309 Liter Methan gewonnen werden.

Die folgende Abb. gibt einen Überblick über die Gasausbeute von verschiedenen Gärsubstraten bezogen auf eine Tonne Frischmasse:

### Spezifische Gasausbeute verschiedener Gärsubstrate (Landtechnik Weihenstephan)





## Prinzipieller Aufbau einer Biogasanlage

Nach Art des Substratflusses unterscheidet man Durchfluss- und Speicheranlagen. Bei Durchflussanlagen wird das Substrat dem Faulraum kontinuierlich oder in kurzen Intervallen zugeführt und abgeleitet. Etwa 70 % der Anlagen in Deutschland entsprechen dieser Bauart. Speicheranlagen sind häufig durch nachträgliche Umrüstung von Güllebehältern entstanden. Der Faulbehälter dient gleichzeitig als Gärrückstandslager, in dem das Substrat bis zur Ausbringung verbleibt. Nachteilig ist dabei der höhere Energiebedarf für die Beheizung des großen Reaktorraums, vorteilhaft sind geringe Investitionen und die Nutzung des Biogases aus der Nachgärung.

Die Vorgrube dient der Zwischenlagerung von Gülle und Kosubstraten und dem Aufbereiten (Zerkleinern, Verdünnen, Mischen etc.) des Gärsubstrates. Sie ist so zu dimensionieren, dass Schwankungen beim Substratanfall ausgeglichen werden können.

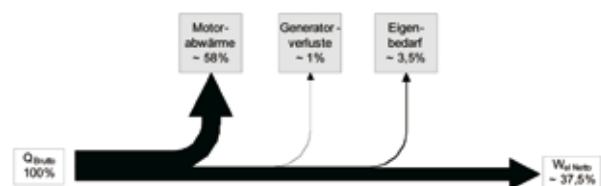
Der Faulbehälter oder Fermenter, das Kernstück einer Biogasanlage, wird aus der Vorgrube mit Gärsubstrat beschickt. Neben den unterschiedlichen Fermenterausführungen (Stahl oder Beton, rechteckig oder zylindrisch, liegend oder stehend) ist entscheidend, dass der Behälter gas- und wasserdicht sowie lichtundurchlässig ist. Eine Rührereinrichtung sorgt für die Homogenität des Substrates, das je nach Ausgangsmaterial unterschiedlich stark zur Ausbildung von Schwimm- und Sink-schichten neigt. Durch die Rührbewegung wird auch das Entweichen des Gases aus dem Substrat unterstützt. Wenn sich

Sinkschichten bilden, z. B. bei Vergärung von Hühnergülle oder Bioabfällen, müssen sie regelmäßig mit geeigneten Austragsvorrichtungen entfernt werden.

Vom Fermenter gelangt das ausgefaule Substrat in das Gärückstandslager (Güllelager). Dieses kann durch eine Abdeckung zum Nachgärbehälter ausgebaut werden, was die Nutzung des Biogases aus der Nachgärung ermöglicht und gleichzeitig Gas- und Geruchsemissionen mindert.

Das entstandene Biogas wird in Folienspeichern über den Fermentern gesammelt, durch Lufteintrag entschwefelt und zur Verbrennung einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zugeführt. Das BHKW erzeugt Wärme und Strom, wobei der erzeugte Strom in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird. Der Fermentierungsprozess benötigt etwa 35 % der erzeugten Wärme für die Beheizung des Fermenters. Der restliche Anteil (etwa 65 %) kann als Nutzwärme verwendet werden oder muss über Kühler an die Umgebung abgeführt werden.

## Beispielhafte Energiebilanz eines BHKW – prinzipieller Energiefluss in einer Biogasanlage von der Primärenergie zur Nutzenergie



## Gegenüberstellung der verschiedenen BHKW-Motortypen (Biomasse Info-Zentrum am IER Universität Stuttgart)

Merkmal	Benzinmotor Gas-Otto-Verfahren	Dieselmotor Gas-Otto-Verfahren	Dieselmotor Zündstrahl-Verfahren
Preis	niedrig	sehr hoch	hoch
Wirkungsgrad	20 - 25 %	30 - 35 %	25 - 35 %
Lebensdauer	niedrig	mittel	mittel
Geräusch	mittel	stark	stark
Ruß im Abgas	-	-	vorhanden
Wartung	hoch	gering	hoch
Zündölverbrauch	-	-	ca. 10 % vom Energieinhalt des Biogases
Ersatzkraftstoff bei Biogasausfall	Flüssiggas (Benzin)	Flüssiggas	Heizöl, Dieselöl (Pflanzenöl)
Leistungsklasse (kW)	5 - 30	> 150	30 - 150

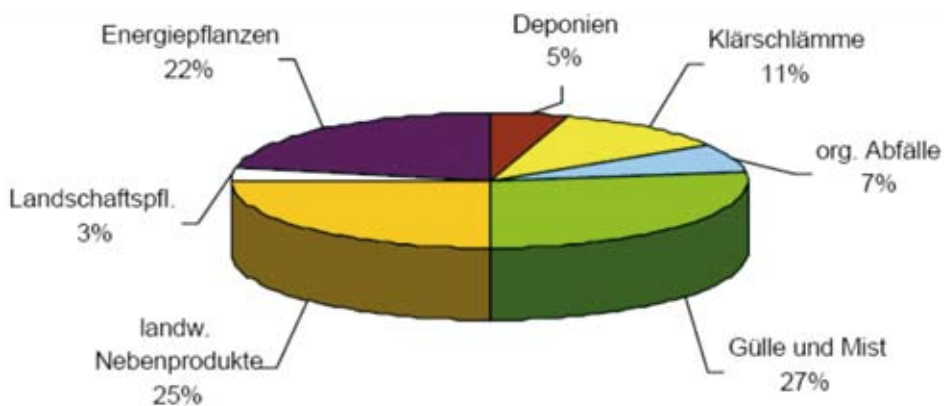
In der Praxis werden zur Biogas-Verstromung neben reinen Gas-Ottomotoren auch Dieselmotoren (Zündstrahlverfahren) eingesetzt, bei denen zusätzlich zum Biogas Heiz- oder Dieselöl (auch Zündöl genannt) verbrannt und damit verstromt wird.

## Biogaspotenzial

Das Potenzial an Bio-, Klär- und Deponiegas in Deutschland beträgt ca. 23 - 24 Mrd. m<sup>3</sup> pro Jahr. Dabei leistet das potenzielle Biogasaufkommen des landwirtschaftlichen Sektors mit ca. 85 % den größten Beitrag. Daraus ergibt sich ein technisches Energieträgerpotenzial der Bio-, Klär- und Deponiegaserzeugung von rd. 457 - 523 PJ/a. Bezogen auf den gesamten Primärenergieverbrauch in Deutschland von 14.501 PJ/a im Jahr 2004 entspricht dies einem Anteil von 3,2 - 3,6 %. Die potenziellen Gaserträge können zur Strom- und Wärmegewinnung eingesetzt werden. Das aus dem technischen Energieträgerpotenzial errechnete Endenergiepotenzial zur Stromerzeugung liegt bei ca. 39 TWh/a. Legt man ein theoretisches Strompotenzial aus erneuerbaren Energieträgern von ca. 600 TWh/a zugrunde, könnte somit ca. 6,5 % der derzeitigen regenerativen Stromerzeugung durch den Einsatz von Biogas, Klär- und Deponiegas erfolgen.

Eine im Auftrag von BGW/DVGW erstellte „Biogas-Studie“ hat ein technisch-wirtschaftliches Potenzial von bis zu 265 TWh ergeben (Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie: Analyse der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse, Essen 2006). Biogas könnte demnach langfristig etwa soviel zur Energiebedarfsdeckung beitragen wie bisher die inländische Erdgasförderung.

## Anteil der vergärbaren organischen Stoffströme am Gesamtpotenzial (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.)



## Kennzahlen zur Beurteilung des Eigenstrombedarfs

In diesem Kapitel werden die in der Studie verwendeten Bezugsgrößen und Parameter definiert (Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft e. V. (AGFW): Pluralistische Wärmeversorgung. Band 1: Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung, Zertifizierungsverfahren und Fördermodelle, Frankfurt 2001).

### Leistungsdefinitionen

**Elektrische Wirkleistung  $P_{el}$  in Kilowatt [kW]** ist die von einem Generator gelieferte oder von einem Verbraucher aufgenommene elektrisch nutzbare Leistung.

**Elektrische Brutto-Leistung  $P_{el, brutto}$  in Kilowatt [kW]** ist die an den Generatorklemmen abgegebene elektrische Leistung. Die Integration über eine Zeitspanne, wie eine Stunde, einen Tag oder ein Jahr entspricht der erzeugten Brutto-Arbeit.

**Elektrische Netto-Leistung  $P_{el, netto}$  in Kilowatt [kW]** ist die an der Oberspannungsseite des Maschinentransformators abgegebene elektrische Leistung, vermindert um den elektrischen Leistungsbedarf aller Hilfs- und Nebenanlagen der Energieerzeugungsanlage. Die Integration über eine Zeitspanne, wie eine Stunde, einen Tag oder ein Jahr entspricht der erzeugten Netto-Arbeit.

**Elektrische Bemessungsleistung  $P_B$  in Kilowatt [kW]** ist die höchste abgegebene bzw. aufgenommene Dauerleistung einer Erzeugungs- bzw. Verbrauchsanlage. Sie wird auch als elektrische Nennleistung bezeichnet und ist auf dem Typenschild eines elektrischen Verbrauchers angegeben.

### Energetische Kennzahlen

**Primärenergie  $Q_{Primär}$**  ist der Energieinhalt von Energieträgern, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden. Man unterscheidet zwischen den regenerativen, den fossilen und den nuklearen Energieträgern.

**Sekundärenergie  $Q_{Sek}$**  ist der Energieinhalt von Energieträgern, die aus Primärenergie durch einen oder mehrere Umwandlungsschritte gewonnen wurden (z. B. Heißwasser, Dampf etc.).

**Nutzenergie  $Q_{Nutz}$**  umfasst alle technischen Formen der Energie, welche der Verbraucher letztendlich benötigt, um Energiedienstleistungen ausführen zu können, also Wärme, mechanische Energie, Licht, elektrische und magnetische Feldenergie und elektromagnetische Strahlung.

**Brennwert  $H_o$  und Heizwert  $H_u$  in Kilojoule pro Kilogramm [kJ/kg], pro Liter [kJ/l] oder auch pro Kubikmeter [kJ/m<sup>3</sup>]** werden anstelle der früheren Bezeichnung oberer und unterer Heiz-

wert zur Bezeichnung des Energieinhaltes von Brennstoffen verwendet. Der Brennwert gibt die bei vollständiger Verbrennung einer bestimmten Brennstoffmenge freigesetzte Reaktionswärme an, wobei das bei der Verbrennung gebildete Wasser in flüssigem Zustand anfällt. Bei festen und flüssigen Brennstoffen wird der Brennwert auf 1 kg Brennstoff, bei gasförmigen auf 1 m<sup>3</sup> Gas unter Normbedingungen (Temperatur 0 °C, Druck 1013,25 hPa) bezogen. Der Heizwert gibt die Reaktionswärme bei vollständiger Verbrennung an, sofern das bei der Verbrennung gebildete Wasser in gasförmigem Zustand anfällt. Die Differenz zwischen Brennwert und Heizwert entspricht (siehe auch DIN 9499) der Verdampfungsenthalpie des entsprechenden Wasserdampfes bei 25 °C (2442 kJ/kg).

**Bruttostromerzeugung  $W_{el, Brutto}$  in Kilowattstunden [kWh]** einer Erzeugungsanlage ist die in einer Zeitspanne, z. B. ein Jahr, erzeugte elektrische Arbeit gemessen an den Generatorklemmen.

**Nettostromerzeugung  $W_{el, Netto}$  in Kilowattstunden [kWh]** einer Stromerzeugungsanlage ist die um ihren Betriebseigenverbrauch verminderte Bruttostromerzeugung in einer festgelegten Zeitspanne.

**Eigenstromanteil in Prozent [%]** ist die elektrische Wirkenergieaufnahme aller Eigenstromverbraucher innerhalb einer definierten Messperiode, geteilt durch die in dieser Messperiode elektrisch abgegebene Wirkenergie der Anlage (Bruttostromerzeugung) im stationären Nennbetrieb.

**Komponentenspezifischer Eigenstromanteil in Prozent [%]** ist die elektrische Wirkenergieaufnahme einer einzelnen Komponente innerhalb einer definierten Messperiode, geteilt durch die in dieser Messperiode elektrisch abgegebene Wirkenergie der Anlage (Bruttostromerzeugung) im stationären Nennbetrieb. Hiermit ist eine Aussage über den Bedarfsanteil einer einzelnen Komponente, z. B. des Rührwerkes, möglich.

### Betriebswerte

**BHKW-Auslastung in Stunden pro Monat [h/Monat] bzw. pro Jahr [h/a]** auch Volllaststundenzahl genannt, ist gleich dem Quotienten aus der in einem Zeitraum von einem Jahr erzeugten Bruttostrommenge und der Nennleistung der betrachteten Anlage. Dieser Wert gibt Aufschluss über die mittlere Anlagenauslastung innerhalb einer Jahresperiode und ist ein Maß für die Adaption der Anlagengröße an den erzielbaren Gasertrag. In der Studie wurden allerdings auch Anlagen untersucht, die erst Mitte des Jahres 2005 oder später in Betrieb genommen wurden. Nachdem für diese Biogasanlagen keine Betriebsdaten über ein vollständiges Jahr vorlagen, wurde in der Studie für die Berechnung der durchschnittlichen BHKW-Auslastung die gemittelte Volllaststundenzahl pro Monat herangezogen.

## Elektrische Hauptkomponenten einer Biogasanlage

Um den Eigenstrombedarf erfassen zu können, sind alle elektrischen Verbraucher einer Biogasanlage zu betrachten. Weiterführende Informationen über die in der Praxis eingesetzten Technologien können der Veröffentlichung „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“ der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. entnommen werden. Nachfolgend sind die größten elektrischen Verbraucher näher beschrieben.

### Substrateinbringung

Zur Einbringung des Substrates in den Gärbehälter werden Kratzbodenförderer, Einbringschnecken und Dosierwalzen mit elektrischen Leistungen zwischen 1 - 11 kW verwendet.

### Rührreinrichtungen

Sie dienen zur Vermischung des frischen mit dem schon angefaulten Substrat. Dabei wird das unvergorene Substrat mit aktiven Bakterien des vergorenen Substrates geimpft. Außerdem ist das Rühren notwendig, um eine möglichst konstante Temperatur im Fermenter zu erhalten und eine homogene Durchmischung zu erzielen.

Es kommt auch aufgrund von thermischen Konvektionsströmen zu einer passiven Durchmischung der Biomasse. Diese reicht aber nur für sehr dünnflüssige, homogene Gärmassen aus. Da im landwirtschaftlichen Bereich eher dickflüssige, verschiedenartige Substrate zum Einsatz kommen, kann auf ein aktives Rühren nicht verzichtet werden.

Leistungsstarke Rührreinrichtungen werden meist von frequenzumrichter gespeisten, drehzahlvariablen Asynchronmotoren angetrieben.

Ein mechanisches Rührwerk besteht ganz allgemein aus einem Antrieb (1), bestehend aus Motor und Getriebe auf einer Lagerlaterne (2), mindestens einer Lagerstelle (hier im Getriebe integriert) mit Dichtung (3), einer Welle (7) und dem Rührorgan (8).

Die nebenstehende Abbildung zeigt die wesentlichen Rührerformen im Überblick.

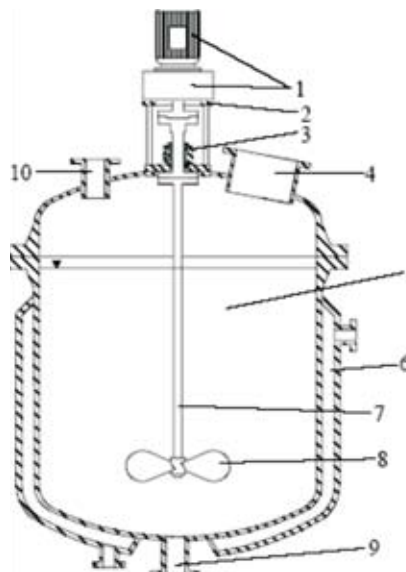
Man wendet z. B. Propeller- und Scheibenrührer für niedrigviskose sowie Anker- und Wendelrührer für hochviskose Medien an. Rührer können zentrisch, exzentrisch oder unter einem Winkel eingebaut werden.

### Feststoffmischwerk zur Substrateinbringung mittels Schneckenförderer



### Prinzipieller Aufbau eines mechanischen Rührwerkes

(Institut für Energie und Verfahrenstechnik, Universität Paderborn)



### Übersicht verschiedener Rührerformen

(Institut für Energie und Verfahrenstechnik, Universität Paderborn)

		$\eta \leq 0,5 \text{ Pas}$	$0,5 \text{ Pas} < \eta < 5 \text{ Pas}$	$\eta \geq 5 \text{ Pas}$
Hauptförderichtung	axial	a, b	c	d
	radial, unaxial	e, f	g, h, i	j
		a Propellerührer b Schrägblatührer e Scheibenührer f Impellerührer	c MIG-Rührer g Kreuzbalkenührer h Blatührer i Gitterührer	d Wendelührer j Ankerrührer

In einer Flüssigkeit mit der Dichte  $\rho$  entsteht am Flächenelement  $dA$  eine Widerstandskraft  $dF$ :

$$dF = c_w \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} \cdot dA$$

mit  $c_w$  = Widerstandsbeiwert

$u = 2\pi nr$  = Umfangsgeschwindigkeit

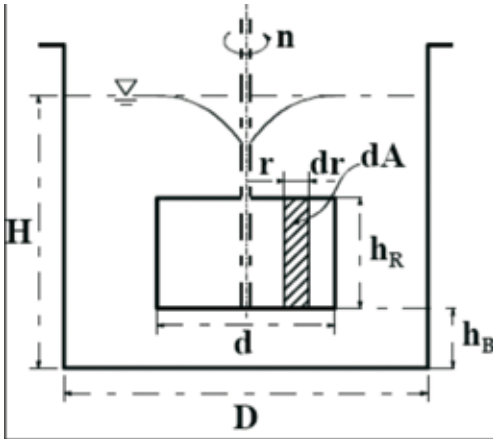
$n$  = Drehfrequenz

$r$  = Radius

$d$  = Durchmesser

## Prinzipskizze zur Leistungsberechnung

(Institut für Energie und Verfahrenstechnik, Universität Paderborn)



Die Rührerleistung errechnet sich nun aus

$$dP = u \cdot dF = 4 \cdot \pi^3 \cdot \rho \cdot c_w \cdot n^3 \cdot h_R \cdot r^3 \cdot dr$$

Integriert man die obere Gleichung bis zur Grenze  $d/2$ , so folgt

$$P = Ne \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

$$Ne = f(Re, Fr, \frac{\eta_2 \Delta \rho}{\eta_1 \rho_1} \frac{d}{D} \frac{H}{D} \frac{h_R}{D}, \dots \text{Stromstörer})$$

wobei die hier eingeführte dimensionslose Newton-Zahl  $Ne$  alle Einflüsse enthält, die sich aus der Geometrie, den Stoffeigenschaften und den Strömungsbedingungen ergeben.

Es gilt

mit der Rührer-Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{n \cdot d^2}{\nu} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}}$$

und der kinematischen Viskosität

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

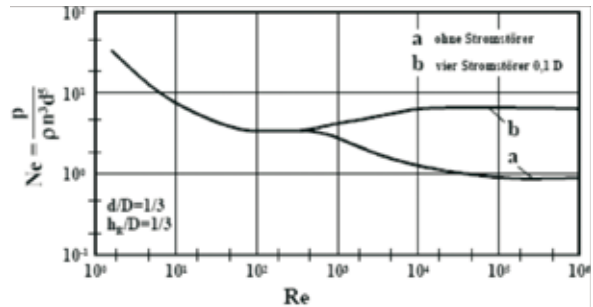
Die Froude-Zahl lautet

$$Fr = \frac{n^2 \cdot d}{g} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}}$$

Die Newton-Zahl muss für definierte Geometrien gemessen werden, z. B. mit einem Drehmomentmessgerät. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für eine Leistungskennlinie.

## Leistungskennlinie eines 6-Blatt-Scheibenrührers

(Institut für Energie und Verfahrenstechnik, Universität Paderborn)



Man verwendet in der Biogastechnik mechanische, hydraulische und pneumatische Rührwerke.

## Mechanische Rührwerke

Bei mechanischen Rührinrichtungen unterscheidet man zwischen langsam laufenden, großflächig wirkenden Ausführungen, wie z. B. dem Paddelrührwerk und den schnell laufenden, kompakten Propellerrührwerken und Mixern.

Paddel- und Haspelrührwerke werden bei horizontal liegenden Gärbehältern eingesetzt. Typisch an ihnen ist, dass sie den gesamten Fermenter durchlaufen und ihre Wirkrichtung in einer horizontalen Ebene liegt. Daher kommt es zur Entstehung einer so genannten „Pfropfenströmung“. Diese hat zur Folge, dass das frisch zugeführte Substrat den Fermenter gradlinig durchläuft und sich nicht mit den ausgefalteten Substratanteilen vermischt. Dies wirkt sich unter anderem positiv auf die Hygienisierung des Gärsubstrates aus.

Der Unterschied zwischen Haspel- und Paddelrührwerk liegt darin, dass beim Haspelrührwerk waagrechte Leisten mithilfe von Tragarmen an die Welle geschweißt sind.

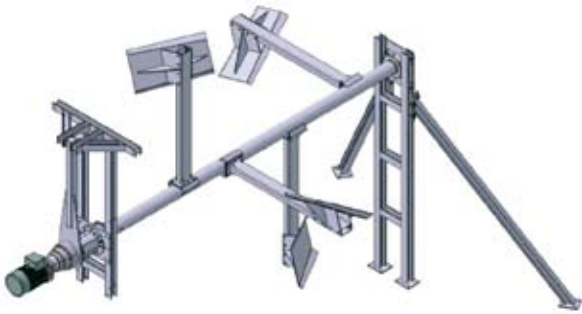
## Seitlich im Nachgärer montiertes Tauchmotorrührwerk

( $P_B = 11 \text{ kW}$ )



Beim Paddelrührwerk werden sternförmig versetzte Tragarme eingesetzt, an deren Enden sich kurze waagrechte Paddel befinden. Dadurch kann das Anlaufdrehmoment im Vergleich zum Haspelrührwerk erheblich gesenkt werden. Daher werden bei horizontal liegenden Fermentern in letzter Zeit bevorzugt Paddelrührwerke eingesetzt.

## (Zeichnung eines Paddelrührwerkes mit Befestigungskonstruktion (Agrikom))



Allgemein haben diese beiden Rührwerksarten den Vorteil, dass ihr Leistungsbedarf vergleichsweise zu den anderen Rührwerken sehr gering ist. So muss für einen 100 m<sup>3</sup>-Faulraumbehälter bei einer Drehzahl von 1 - 2 Umdrehungen pro Minute nur eine elektrische Leistung von 0,5 - 1,0 kW aufgebracht werden.

Das Grindelrührwerk ist ein weiteres mechanisches Rührwerk, bei dem die Antriebswelle senkrecht im Gärbehälter steht. Diese Art wird für vertikale Fermenter mit fester Decke verwendet. Das Rührwerk wird exzentrisch – also außerhalb der Gärbehältermitte – eingebaut, um eine zirkulierende Substratströmung zu erzeugen.

Das Tauchmotor-Propellerrührwerk ist ebenfalls ein mechanisches Rührwerk, welches sich bei stehenden Gärbehältern in den letzten Jahren durchgesetzt hat. Dabei treibt ein Elektromotor einen zwei- oder dreiflügeligen Propeller an, der sich waagrecht oder senkrecht geneigt betreiben lässt. Ähnlich wie beim Grindelrührwerk führt das exzentrisch-tangential eingebaute Rührwerk zu einer stark zirkulierenden Strömung des Behälterinhalts. Des Weiteren lässt sich der Tauchmotor mittels einer Seilwinde nivellieren, um Schwimmdecken und Sinkschichten gezielt gegensteuern zu können.

Eine ähnliche Funktion erfüllen die so genannten Stabmixer. Hierfür wird ebenfalls ein Propeller verwendet, der über eine lange Welle elektromotorisch angetrieben wird. Über eine Lagerung lässt sich der Stab im Behälter senkrecht und idealerweise auch waagrecht schwenken. Der Name Stabmixer leitet sich aus der Tatsache ab, dass die Welle mit Schneideinrichtungen versehen werden kann, um zur Zerkleinerung der Inhaltsstoffe beizutragen. Daher werden Stabmixer vorwiegend zum Verkleinern und Verflüssigen des Festmistes in der Vorgrube eingesetzt.

## Hydraulische Rührwerke

Sie bestehen meist aus einer leistungsstarken Zentralpumpe, die neben dem Aufrühren des Fermenterinhalts vor allem zur Verteilung des Substrats zwischen den Gärbehältern eingesetzt wird. Sie dient sowohl zur Beschickung des Fermenters mit Biomasse aus der Vorgrube als auch zur Ausbringung des vergorenen Materials aus dem Endlager.

Die Durchmischung des Substrates wird durch gleichzeitiges Absaugen und Einleiten der Biomasse erreicht. Die dabei entstehende zirkulierende Bewegung des Behälterinhalts kann über schwenkbare Rührdüsen gesteuert werden. Vorteilhaft am hydraulischen Aufrühren ist, dass sich keine bewegten Teile im Inneren des Fermenters befinden. Damit befinden sich keine Verschleißteile, z. B. Propeller, mehr in den Gärbehältern, die ausgetauscht werden müssen.

## Pneumatische Rührwerke

Ähnlich wie ein hydraulisches Rührwerk funktioniert auch das pneumatische Aufrühren. Hierbei wird das gewonnene Biogas in das Substrat eingepresst. Durch die aufsteigenden Gasblasen entsteht im Gärsubstrat eine horizontale Strömung. Diese Rührtechnik findet Anwendung, wenn eine vollständige Durchmischung des Gärbehälters nicht erwünscht oder erforderlich ist.

## Peripherieantriebe des BHKW

Die Peripheriekomponenten des BHKW werden bei Anlagen mit hoher Auslastung fast ganzjährig im Dauerbetrieb betrieben. Daraus resultiert trotz der geringen elektrischen Bemessungsleistung der einzelnen Peripheriekomponenten ein nicht zu unterschätzender Anteil des Eigenstromverbrauchs der Biogasanlage.

## (BHKW-Aggregat der Firma GE Jenbacher (P<sub>B</sub> = 500 kW<sub>el</sub>))





## Sonstiges

Die elektrische Leistungsaufnahme der MSR-Technik einer Biogasanlage beträgt abhängig von der Anlagengröße und der Anzahl der BHKW etwa 1 - 2 kW.

Um den Schwefelgehalt des Biogases zu reduzieren, wird dem Fermenter über einen elektrischen Kompressor oder ein separates Gebläse Luft zugeführt.

Die Dickstoffpumpe (z. B. Ausführung Drehkolbenpumpe) wird zum Transport und zur Ausbringung der Gärsubstrate eingesetzt.

Nachfolgend sind die typischerweise installierten Peripheriekomponenten eines Gas-Ottomotors ( $P_B = 500 \text{ kW}_{el}$ ) einschließlich ihrer elektrischen Bemessungsleistungen aufgelistet, die zum Betrieb des Aggregats erforderlich sind:

• Gasverdichter	4,0 kW
• Heizwasserpumpe	4,0 kW
• Gemischkühlwasserpumpe	0,8 kW
• Ladegerät für Starterbatterien	1,6 kW
• MSR-Technik	0,5 kW
• Notkühlventilatoren	1,8 kW
• Raumlüftung (FU geregelt)	12,0 kW
• Gesamt	24,7 kW

Bei Gas-Otto-Motoren ist ein Gasverdichter notwendig, der das Biogas auf den notwendigen Vordruck bringt. Dieselmotoren verdichten das Gas-Luft-Gemisch meist im vorhandenen Turbolader.

Zur Kühlung des Motors sind Primärpumpen für den Kühlflüssigkeitskreislauf und Sekundärpumpen für den Wärmekreislauf zum Fermenter sowie Netzpumpen bei Nutzwärmeauskopplung notwendig. Um die Kühlung des Motors bei zu geringer Wärmeabnahme zu gewährleisten, sind Lüfter (Not- oder Tischkühler) vorgesehen, die teilweise auch im Nennbetrieb der Anlage zur Regelung der Kühlmitteltemperatur des Motors dienen. Zur Schmierung der bewegten Motorteile sind bei größeren Modulen zudem eine Schmierölpumpe und ein Ölkühler vorhanden. Zur Kühlung des BHKW-Raumes sind Raumlüfter vorgesehen, die eine bestimmte Luftwechselrate garantieren müssen. Bei turboaufgeladenen Motoren dient zusätzlich noch ein Ventilator für den Ladeluftkühler zur Kühlung der verdichteten Verbrennungsluft.

### Drehkolbenpumpe einer NawaRo-Anlage ( $P_B = 18 \text{ kW}$ )



## Grundlagen zur Ermittlung des Eigenstromverbrauchs

### Betrachtungsumfang und Bezugsgrenzen

Der Betrachtungsumfang der Studie ist im Folgenden stichpunktartig dargestellt:

#### Betrachtungsumfang allgemein:

- Biogasanlagen im landwirtschaftlichen Bereich
- Detaillierte Analyse von Anlagen ab Baujahr 2000
- Ausschließliche Betrachtung des elektrischen Anlagenwirkungsgrades
- Keine biologisch-chemische Betrachtung

#### Betrachtungsumfang Eigenstromverbrauch:

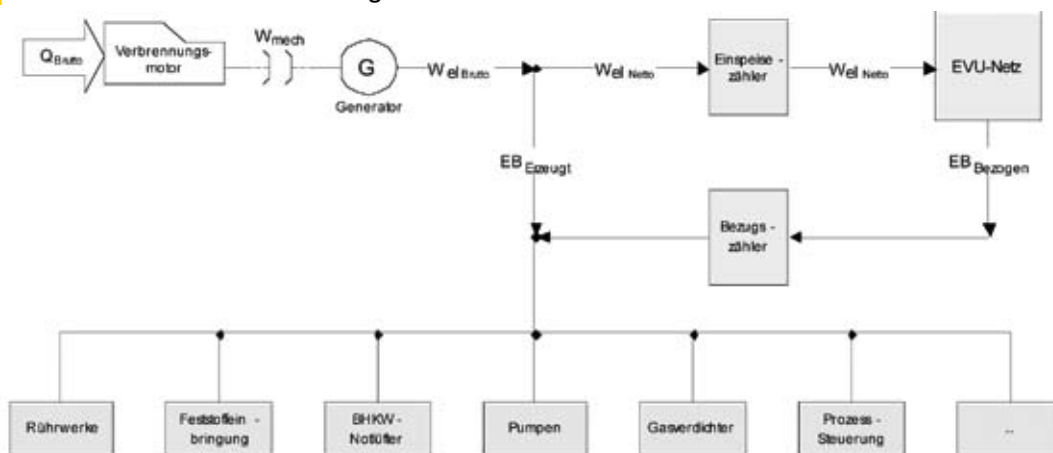
- Erfassung aller für den Anlagenbetrieb notwendigen elektrischen Verbraucher:
  - Rühr- und Fördertechnik
  - Gasaufbereitung
  - Wärmenutzung (nur elektrische Pumpenleistung)
  - Peripheriekomponenten des BHKWs (z. B. Lüfter, Heizkreis-, Kühlkreisumpfen)
  - Gärrestaufbereitung (z. B. Entwässerung)
  - Lüftung und Beleuchtung der Anlagenräume
  - Steuerungs- und Regelungstechnik
  - etc.
- Substrat-Anlieferung: Nicht im Betrachtungsumfang
- Substrat-Aufbereitung: Im Betrachtungsumfang
- Substrat-Ausbringung: Nur elektrische Pumpleistung zur Ausbringung aus der Biogasanlage im Betrachtungsumfang
- Substrat-Abtransport: Nicht im Betrachtungsumfang
- Abwärmenutzung: Keine energetische Betrachtung der Wärmenutzung

#### Bezugsgrenzen:

- Bruttostromerzeugung:
  - Ideal: Generatorklemmen
  - Real: Stromzähler im Aggregat-Steuerschrank
- Nettostromeinspeisung:
  - Ideal: Primärklemmen am Transformator
  - Real: Niederspannungsseitiger Stromspeisezähler des EVU
- Fremdstrombezug: Stromzähler des EVU innerhalb der Biogas-Anlage

Unten stehende Abbildung zeigt die in der Praxis übliche elektrische Versorgung der einzelnen Eigenstromverbraucher einer Biogasanlage mit erzeugtem Eigenstrom ( $EB_{\text{erzeugt}}$ ) bzw. mit aus dem EVU-Netz bezogenem Fremdstrom ( $EB_{\text{bezogen}}$ ).

### Elektrisches Anschlussschema der Eigenverbraucher



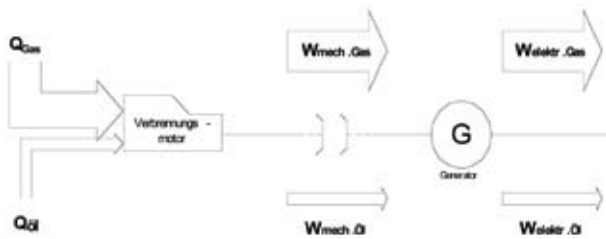
- $Q_{\text{Brutto}}$  = Brutto Energieinhalt Biogas
- $W_{\text{el Brutto}}$  = An den Generatorklemmen abgegebene elektrische Energie
- $W_{\text{el Netto}}$  = In das EVU-Netz eingespeiste elektrische Energie
- $W_{\text{mech}}$  = Erzeugte mechanische Energie des BHKW-Motors

- $EB_{\text{erzeugt}}$  = Eigenstromanteil, der mit erzeugtem Strom des BHKW gedeckt wird
- $EB_{\text{bezogen}}$  = Eigenstromanteil, der mit bezogenem Fremdstrom gedeckt wird

## Berücksichtigung der Zündölenergie

Um eine realistische Vergleichbarkeit des Eigenstromanteils von Anlagen mit Gasmotor- und Zündstrahlmotor-BHKW zu gewährleisten, müsste bei Zündstrahlmotoren nur der Anteil der Bruttostromerzeugung herangezogen werden, der aus Biogas stammt. Korrekterweise müsste man zusätzlich die elektrisch aufgenommene Arbeit der Peripheriekomponenten im gleichen Verhältnis reduzieren. Die Abbildung veranschaulicht den Energiefluss bei einem Zündstrahlaggregat.

### (Anteil der Zündölenergie an der Bruttostromerzeugung



Unter der Annahme, dass der Gesamtwirkungsgrad für beide Brennstoffe gleich ist, kann er wie folgt berechnet werden:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{W_{\text{el}}}{Q_{\text{Gas}} + Q_{\text{Öl}}}$$

Die aus Zündöl erzeugte elektrische Energie ergibt sich dann zu:

$$W_{\text{el, Öl}} = \eta_{\text{ges}} \cdot Q_{\text{Öl}} = \frac{W_{\text{el}} \cdot Q_{\text{Öl}}}{Q_{\text{Gas}} + Q_{\text{Öl}}}$$

Damit erhält man den korrigierten Eigenbedarfsanteil  $EB_{\text{korr}}$ :

$$EB_{\text{korr}} = \frac{W_{\text{el EB}}}{W_{\text{el Brutto}} - W_{\text{el Brutto Öl}}}$$

- $Q_{\text{Gas}}$  = Energieinhalt Biogas
- $Q_{\text{Öl}}$  = Energieinhalt Zündöl
- $\eta_{\text{ges}}$  = Elektrischer Wirkungsgrad des BHKW
- $W_{\text{el Brutto}}$  = insgesamt erzeugte elektrische Bruttostromerzeugung
- $W_{\text{el Brutto Öl}}$  = aus der Verbrennung des Zündöles gewonnene elektrische Energie

Wird nun der Anteil des eingesetzten Zündöls bei Zündstrahlmotoren berücksichtigt, so ergibt sich ein mittlerer Eigenbedarfsanteil von 8,4 %. In Bezug auf den in der Studie ermittelten Wert von 8,2 % (s. S. 29 „Verteilung des Eigenstromverbrauchs“) lässt sich eine Abweichung von nur 0,2 %-Punkten ermitteln.

Nachdem der relative Fehler bei der Gesamtbetrachtung als gering eingestuft werden kann und die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebes auch durch den Zündölanteil beeinflusst wird, wurde in der Studie auf eine rechnerische Bereinigung der Bruttostromerzeugung um den Zündölanteil verzichtet. Allerdings muss dem Vorteil des geringeren Eigenverbrauchs von Zündstrahl-BHKW basierten Anlagenkonfigurationen der Nachteil der Zusatzkosten für den Heizölverbrauch gegenübergestellt werden. Die Heizölkosten übersteigen den Kostenvorteil des geringeren Eigenstromverbrauchs deutlich.



## Datenerhebung

Mit dem Ziel, statistische Aussagen über den derzeitigen Stand des Eigenstromverbrauchs von Biogasanlagen im landwirtschaftlichen Bereich treffen zu können, wurde versucht, deutschlandweit einen möglichst großen Kreis von Anlagenbetreibern und -herstellern anzusprechen, um die aktuelle Situation darlegen und die branchenspezifischen Probleme aufdecken zu können.

### Methodische Vorgehensweise

Ziel der ersten Datenerhebungsphase war es, bundesweit möglichst viele Betreiber von Biogasanlagen, vornehmlich ab dem Baujahr 2000, zu kontaktieren und deren Interesse für die Teilnahme an der Studie zu gewinnen. In diesen Sinne wurden etwa 80 Anlagenhersteller, Planungs- und Beratungsbüros nach den Referenzlisten des Fachverbands Biogas e. V. angeschrieben sowie telefonisch angesprochen. Mit einem standardisierten Anschreiben wurde für die Datenerhebung um die Mithilfe bei der Kontaktherstellung zu den Betreibern ausgewählter Anlagen gebeten.

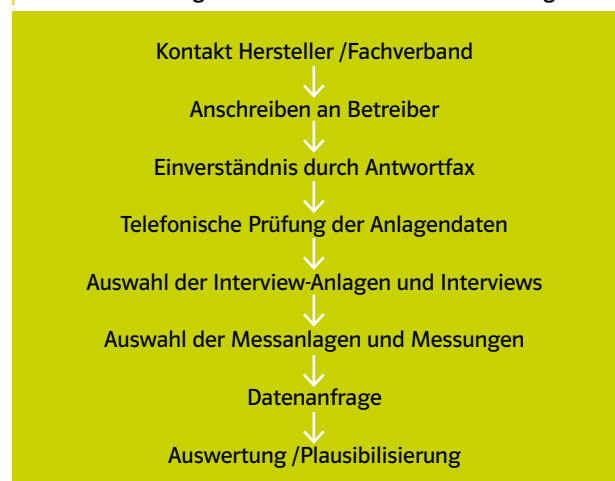
Parallel dazu wurde das gleiche Vorgehen zur Kontaktaufnahme über verschiedene Fachverbände und ein Energieversorgungsunternehmen angewendet. Mit Hilfe eines Antwortfaxformulares konnten die über den Hersteller, die Fachverbände oder das EVU kontaktierten Betreiber ihr Einverständnis zur Teilnahme an der Studie erklären.

Nach Prüfung der eingegangenen Antwortfaxe wurden im Rahmen von Telefongesprächen technische Details der Anlage abgefragt, um den Umfang und die Auswertbarkeit der Anlagenbetriebsdaten zu eruieren.

In einer zweiten Phase wurden Anlagen für Vor-Ort Besuche und Interviews mit den Anlagenbetreibern ausgewählt. Die darauf folgenden Vor-Ort Besuche dienten zur Aufnahme der jeweiligen Systemspezifikationen, technischen Anlagendaten, Betriebswerten und Abrechnungsdaten anhand eines standardisierten Fragebogens. Von allen weiteren Anlagen wurden die erforderlichen Daten zur Bestimmung des Eigenstromverbrauchs nach telefonischer Anfrage per Fax abgefragt. Zur Auswertung wurden Abrechnungsdaten bzw. Zählerablesungen für Bruttostromerzeugung, Nettostromeinspeisung und Fremdstrombezug für einen Zeitraum von sechs bis zwölf Monaten herangezogen.

Nach Abschluss der Interviews erfolgte eine engere Auswahl von repräsentativen Anlagen, um diese messtechnisch zu analysieren und die Betriebsdaten zu verifizieren.

#### Methodische Vorgehensweise bei der Datenerhebung



## Literaturrecherche

Ziel der Literaturrecherche war es, den Status Quo und erarbeitete Empfehlungen über das Thema in bereits veröffentlichten Fachartikeln oder Studien darzustellen.

## Herstellieranfragen

Neben der Literaturrecherche wurde ein Teil der führenden Hersteller Deutschlands direkt nach dem durchschnittlichen Eigenstromverbrauch ihrer Standard-Biogasanlagen befragt.

## Betreiberumfrage

Erst anhand einer Betreiberumfrage können die in der Praxis auftretenden Betriebsprobleme berücksichtigt und analysiert werden. Als Datengrundlage wurden die messtechnisch ermittelten sowie die aus den Betriebs- und Abrechnungsdaten berechneten Eigenstromverbräuche herangezogen. Die Betreiberumfrage erbrachte folgende Rücklaufquoten:

### Rücklaufquoten der Betreiberumfrage

Anfrage über	Anzahl Betreiberanfragen	Rücklaufquote	Anlagenanteil an der Studie
Hersteller	ca. 100	54 %	70 %
Fachverbände	ca. 150	10 %	18 %
Energieversorger	ca. 100	10 %	12 %

### Verteilung der an der Studie teilnehmenden Biogasanlagen



Nach anfänglich zurückhaltender Resonanz erklärten sich bundesweit 77 Betreiber zur Teilnahme bereit, wobei 70 % direkt über die Hersteller angesprochen wurden. Die regionale Verteilung der Anlagenstandorte ist in der Abbildung dargestellt.

Anhand der Deutschlandkarte lässt sich ein räumlicher Schwerpunkt der im Rahmen der Studie erfassten Anlagen auf Norddeutschland und Bayern erkennen. Dies spiegelt zum Teil die generelle örtliche Verteilung der Biogasanlagen in Deutschland wider. Etwa ein Drittel aller Biogasanlagen Deutschlands ist in Bayern zu finden.

## Kriterien für die Anlagenauswahl

Aus den Rückantworten wurden 25 Anlagen für die Durchführung der Vor-Ort-Interviews ausgewählt. Innerhalb dieser Anlagenauswahl wurde darauf geachtet, eine möglichst weitgehende Diversität der Anlagen zu gewährleisten.

Folgende Anlagenauswahlkriterien wurden für die Durchführung der Vor-Ort-Interviews gewählt:

- Mindestens eine Anlage je Anlagenhersteller
- Gleichmäßige Verteilung der elektrischen Leistungsklassen
- Gleichmäßige Verteilung der Anlagenbaujahre (Schwerpunkt marktspezifisch auf neueren Anlagen)
- Gleichmäßige Verteilung der Fermentertypen und Rührwerkstechnologien

Für die Durchführung der Messungen wurde neben den oben genannten Kriterien Wert auf das Vorliegen der Stromlaufpläne und auf eine übersichtliche elektrische Niederspannungsverteilung gelegt, um eine klare Auswertbarkeit des Eigenstromanteils der Anlage sicherzustellen.

Nachfolgende Anlagenauswahlkriterien wurden darüber hinaus für die Durchführung der Messungen gewählt:

- Vorliegen der Datenprotokolle zur Brutto- und Nettostromerzeugung über einen Zeitraum von sechs bis zwölf Monaten
- Umfangreiche Betriebserfahrung des Anlagenbetreibers, um dieses Wissen zur Erarbeitung von Optimierungsmaßnahmen zu nutzen

## Anlagenbesichtigungen und Betreiberinterviews

Die Betreiberinterviews wurden größtenteils von einer Mitarbeiterin der BASE TECHNOLOGIES durchgeführt, um eine einheitliche Befragung und Protokollführung zu ermöglichen. Diese Phase wurde im Zeitraum von November 2005 bis Januar 2006 durchgeführt.

Im Rahmen der Interviews wurden unter anderem folgende Informationen erfragt:

- Anlagentyp und Hersteller
- Baujahr
- Fermentervolumen und Fermenterauslastung
- Elektrische Bemessungsleistung des BHKW
- BHKW-Hersteller und -typ
- Durchschnittlicher Zündölverbrauch (Zündstrahlmotoren)
- Zusammensetzung der Biomasse
- Trockensubstanzgehalt der Biomasse
- Prozesstemperatur
- Nutzung der BHKW-Abwärme
- Art des geführten Betriebsprotokolls
- Umfang von Leittechnik und Steuerung
- Zufriedenheit mit dem Anlagenbetrieb bzw. Betriebsprobleme
- Durchgeführte Optimierungsmaßnahmen
- Entfernung zum Einspeisetransformator
- Ort des Stromeinspeisezählers
- Eingespeiste Nettostrommenge über zwölf Monate
- Anlagenbetrieb aus Eigen- und / oder Fremdstrom
- Art der Eigenstromverbrauchsmessung
- Fremdstrombezug über zwölf Monate
- Durchschnittlicher geschätzter oder ermittelter Eigenstromverbrauch
- Aufstellung der elektrischen Verbraucher und deren Laufzeiten

Um während der Auswertungsphase möglichst konkrete Ergebnisse zu erzielen, wurden neben Anlagen- und Abrechnungsdaten auch noch Informationen zu Betriebserfahrungen und biologischen Anlagenparametern erfragt.

## Messungen des Eigenstromverbrauchs

Die Messreihen der Studie wurden im Rahmen einer Diplomarbeit an der FH München durchgeführt.

Es zeigte sich, dass Auswertemöglichkeit, wie z. B. Eigenstrombezugszähler, nur bei den wenigsten Anlagen zu finden sind. Bei neueren und leistungsstärkeren Anlagen konnte eine bessere Datenerfassung und eine eindeutige Trennung zwischen Eigenstrom- und prozessfremden elektrischen Verbrauchern festgestellt werden. Im Bereich kleinerer Anlagenleistung ist eine Unterscheidung zwischen dem Fremdstrombezug der Anlage und dem der benachbarten Gebäude oft nicht ohne Hilfe zusätzlicher Messtechnik möglich. Andernfalls ist eine korrekte und vollständige Bilanzierung des Eigenstromverbrauchs der Anlage nicht realisierbar.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass auf Betreiberseite oft nicht alle für den Energieerzeugungsprozess erforderlichen Komponenten im Rahmen der Eigenverbrauchsmessung eingerechnet werden. Der elektrische Energiebedarf der Peripheriekomponenten des BHKW (Kühlkreisumpfen, Notkühler, Ladeluftkühler, Ölversorgung etc.) ist nicht zu unterschätzen und wird im Falle der direkten Speisung aus dem erzeugten Strom des Aggregats meist nicht dem Eigenstromverbrauch hinzu gerechnet.

Aus diesen Gründen wurde die Fluke Deutschland GmbH als einer der führenden Messgerätehersteller in das Projekt mit einbezogen. Dank der zur Verfügung gestellten mobilen Messtechnik der Firma Fluke konnten zeitkontinuierliche Messungen der elektrischen Leistungs- und Stromaufnahme ausgewählter Biogasanlagen und einzelner Anlagenkomponenten durchgeführt werden.

Das „Fluke 433“, ein Stromversorgungsanalysator für Drehstromnetze, wurde für Messreihen zur Langzeit-Aufzeichnung der elektrisch erzeugten oder bezogenen Arbeit verwendet. Daneben konnte dieses Gerät auch für Kurzzeitmessungen der Leistungsaufnahme eines dreiphasigen Verbrauchers ohne Unterbrechung der Versorgungsleitungen eingesetzt werden, da das Gerät über Strommesszangen zur Erfassung der einzelnen Phasenströme verfügt.

Wie das Fluke 433 ist die „LEM Memobox 300 smart“ zur dreiphasigen Netzanalyse geeignet und verfügt über Stromaufnehmer in Form von flexiblen Ringkabeln, welche sich einfach um den zu messenden Leiter legen lassen. Die Memobox wurde überwiegend für Langzeitaufzeichnungen eingesetzt, da sie Daten über einen Zeitraum von mehreren Tagen bzw. Wochen (abhängig von der Abtastrate) aufzeichnen und speichern kann.

Im Einzelnen wurden die Rührwerke der Fermenter, die Einbringungskomponenten für die Biomassebeschickung sowie der BHKW-Notkühler gemessen. Sämtliche restlichen Verbraucher, wie z. B. Pumpen oder Raumlüfter, wurden gemeinsam erfasst, da sie in Summe durchschnittlich nur 15 % des gesamten Eigenstromverbrauchs der Anlage benötigen. Darüber hinaus wäre eine zeitgleiche Erfassung aller Einzelverbraucher messtechnisch nur sehr aufwändig zu realisieren gewesen.

Für eine wissenschaftlich fundierte Vergleichbarkeit der verschiedenen Rührwerkstypen müssen auch biologisch-chemische Parameter über einen längeren Zeitraum bestimmt und analysiert werden. Da dies im zeitlichen Rahmen der Studie nur eingeschränkt möglich gewesen wäre und diese Parameter von Anlage zu Anlage sehr unterschiedlich sein können, wurde auf eine Betrachtung der Fluideigenschaften des Substrates verzichtet. Zudem lassen sich die biologischen Bedingungen im Fermenter nur mit Hilfe zusätzlicher Messtechnik oder Laboruntersuchungen feststellen. Private Betreiber von Biogasanlagen verzichten in der Regel aus Kostengründen auf solche Analysemethoden. Stattdessen war es für die Auswahl der zu messenden Anlagen wichtig, Betreiber auszuwählen, die ein umfangreiches Praxiswissen über die Prozesssteuerung ihrer Anlage besitzen.

Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse bei unterschiedlichen Anlagentypen zu gewährleisten, wurden im Messzeitpunkt zusätzliche Zustandsvariablen erfasst. Diese waren zum einen das aktuelle Substratvolumen, welches von den Rührwerken durchmischt werden musste, zum anderen der Trockenmassegehalt des Substrates. Er ist ein Maß für die Viskosität des Gärsubstrates und beeinflusst damit das aufzuwendende Drehmoment und die Leistungsaufnahme des Rührwerkmotors.

## Prüfung des Datenmaterials

Die Plausibilisierung der erhaltenen Betriebsdaten der Anlagen sowie der Messdaten wurde anhand der charakteristischen Kennzahlen Anlagenauslastung und Eigenstromverbrauch vorgenommen. Aus der monatlichen Bruttostromerzeugung und der elektrischen Bemessungsleistung lässt sich die durchschnittliche Anlagenauslastung berechnen. Dies wurde für alle Anlagen vorgenommen, um die erhaltenen Daten auf ihre Verwendbarkeit und Plausibilität zu überprüfen. Anlagenauslastungen größer 95 % im Jahresdurchschnitt sind in der Praxis so gut wie nicht zu erreichen, wenn man neben den Schwankungen in der Gasausbeute bei gleichzeitig geringer Gasspeicherkapazität auch die BHKW-Stillstandszeiten in Folge von Wartung und Instandhaltung berücksichtigt (s. S. 28 „Berechnung der Anlagenauslastung“).

Der errechnete Eigenstromverbrauch kann als zweites Kriterium zur Plausibilitätsprüfung herangezogen werden. Anlagen, für die ein Eigenstromanteil kleiner als 4 % errechnet wird, sollten eingehend überprüft werden, da alleine die Peripheriekomponenten des BHKW gemäß der Herstellerumfrage und der Messergebnisse durchschnittlich 3,1 % Eigenverbrauch aufweisen (s. S. 31 „Eigenbedarf der BHKW-Peripheriekomponenten“). Nicht plausible Daten wurden mit den Betreibern nochmals diskutiert und nach Möglichkeit korrigiert bzw. nicht in die Studie aufgenommen.

Um mögliche Messfehler oder methodische Fehler zu vermeiden, wurden die Ergebnisse der Energiemessungen – soweit möglich – mit der zuordenbaren elektrischen Arbeit verglichen, die sich über vorhandene Fremdstrom- oder Eigenstromzähler ermitteln ließ.



## Auswertung

In den nachfolgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der im Kapitel „Datenerhebung“ erläuterten Recherchen und Umfragen zusammengefasst.

### Ergebnisse von Herstelleranfragen und Literaturrecherche

In der Literatur finden sich aktuell (2006) nur wenige Veröffentlichungen, die das Thema Eigenstromverbrauch detaillierter betrachten. Vereinzelt findet man in Studien zur Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen, wie beispielsweise im Ergebnisbericht des Biogasmessprogramms der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Hinweise auf den durchschnittlichen Eigenstromanteil.

Nach Herstellerangaben bewegt sich der Eigenstrombedarf aktueller Anlagenkonzepte in einer Bandbreite von 5,0 - 8,0 %, wobei festgestellt wurde, dass zahlreiche Hersteller den Eigenbedarf des BHKW nicht oder nur anteilig berücksichtigen. Aus den erhaltenen Daten lässt sich ein Mittelwert von 6,5 % ermitteln.

#### Ergebnisse der Herstelleranfrage und der Literaturrecherche

Eigenstromverbrauch der gesamten Biogasanlage mit BHKW		
	Bandbreite	Durchschnitt
Literatur	2 - 10 %	5,8 %
Angaben der Anlagenhersteller für eine Standardanlage	5 - 8 %	6,5 %

Eigenstromverbrauch der BHKW-Peripheriekomponenten		
	Bandbreite	Durchschnitt
Angaben der BHKW-Hersteller	2 - 5 % abhängig von Anlagen- spezifika	3,1 %

Nach Angabe von fünf verschiedenen Herstellern und Packagern von BHKW lässt sich abhängig von der Betriebsweise und dem Anteil der über den Notkühler abzuführenden Motorabwärme ein Eigenstromverbrauch der BHKW von 2 - 5 % abschätzen. Bei geringen BHKW-Auslastungen und keiner Wärmeabgabe an die Fermenter oder prozessfremde Wärmenenken werden bis zu 5 % Eigenstrom verbraucht. Aus den erhaltenen Daten lässt sich ein Mittelwert von 3,1% bei durchschnittlicher Wärmeabnahme in der Übergangszeit ermitteln. Wie schon im Kapitel „Prüfung des Datenmaterials“ dargestellt, sollten Anlagen nochmals überprüft werden, für die ein Eigenstromanteil kleiner 4 % errechnet wird. Oftmals sind hier nicht alle Eigenverbraucher im Fremd- oder Eigenstrombezug erfasst oder die Stromzähler der BHKW-Leistungsschränke bzw. andere interne Verrechnungszähler sind nicht geeicht und weisen zudem größere Messfehler auf.

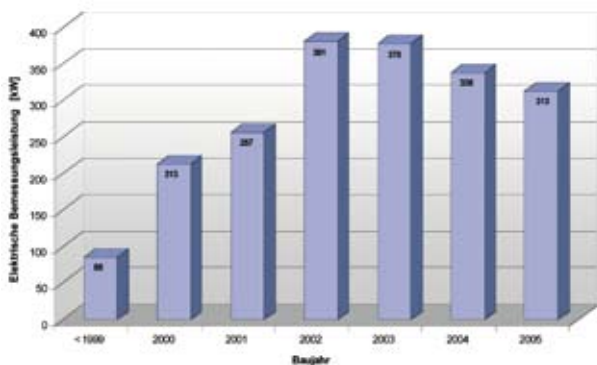
## Statistische Auswertung der Betreiberumfrage

Die Auswertung der eingegangenen Antwortfaxe der Betreiber lässt erste Rückschlüsse auf die derzeitige Situation in der Biogasbranche in Deutschland zu. Die Ergebnisse sind in diesem Kapitel zusammengestellt und erläutert.

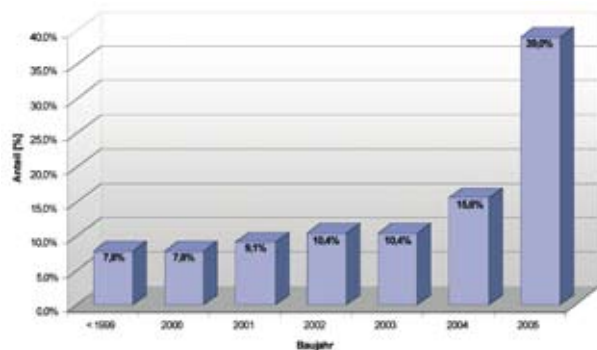
### Allgemeine Daten und Kenngrößen

Von den 77 an der Studie teilnehmenden Anlagen wurden 26 besichtigt, wovon wiederum an sechs Anlagen Messungen durchgeführt wurden. Nach Aussage der Betreiber wird bei etwa 42 % der Anlagen der Eigenstromverbrauch bereits erfasst. Auf Basis der auf Seite 28 aufgezählten Auswertekriterien konnten von den eingegangenen Antwortfaxen etwa 56 % ausgewertet werden, um den Eigenstromverbrauch ohne Einsatz von zusätzlicher Messtechnik zu ermitteln. Der Anteil der 77 Anlagen, der nach dem Prinzip der Überschusseinspeisung arbeitet, also im Regelfall keinen Fremdstrom für den Betrieb benötigt, beträgt etwa 50 %.

### Verteilung der untersuchten Biogasanlagen nach Baujahren



### Entwicklung der durchschnittlichen elektrischen Bemessungsleistung der BHKW gegenüber dem Anlagenbaujahr



### Verteilung nach Anlagenbaujahren

Die Baujahre der untersuchten Biogasanlagen verteilen sich über einen Zeitraum von 10 Jahren (1995 - 2005). Der Schwerpunkt der Studie wurde auf Anlagen ab Baujahr 2000 gesetzt. Aus den Baujahren bis 1999 wurden sechs Anlagen in die Studie aufgenommen, um die Entwicklung von elektrischer Leistungsklasse und Eigenstromverbrauch über einen Zeitraum von zehn Jahren untersuchen zu können. Die meisten der in der Studie untersuchten Anlagen wurden, wie in nebenstehender Abbildung zu sehen ist, in den Jahren 2004 und 2005 errichtet und in Betrieb genommen. Für Anlagen, die in den letzten Jahren erweitert oder grundlegend umgebaut wurden, wurde das Jahr der erneuten Inbetriebnahme als neues Baujahr definiert.

Der Anstieg der elektrischen Bemessungsleistung ab dem Jahr 2000 ist auf das Inkrafttreten des EEG zurückzuführen. Interessanterweise ist bei den Anlagen des Baujahres 2005 nicht zwangsläufig ein weiterer Anstieg der mittleren Anlagenleistung zu verzeichnen. Eine Ursache ist, dass das EEG höhere Grundvergütungen bis zu einer elektrischen Bemessungsleistung von 150 kW bzw. 500 kW gewährt.

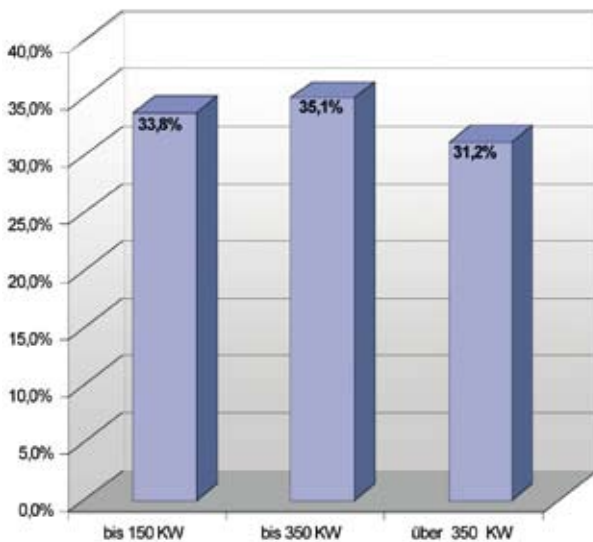
## Kategorisierung nach elektrischen Leistungsklassen

Grundlage für die Darstellung nach Leistungsklassen war die Auswertung der eingegangenen Antwortfrage der Betreiber. Bei Anlagen mit mehreren BHKW-Modulen wurde stets die Summe der elektrischen Bemessungsleistungen aller betriebenen BHKW angesetzt.

Die Biogasanlagen wurden in folgende 3 Leistungsklassen eingeteilt:

1. Elektrische Bemessungsleistung bis einschließlich 150 kW
2. Elektrische Bemessungsleistung bis einschließlich 350 kW
3. Elektrische Bemessungsleistung über 350 kW

Verteilung der Anlagenzahl nach der Kategorisierung der Anlagen in die drei Leistungsklassen



Die elektrische Bemessungsleistung der untersuchten Anlagen liegt zwischen 30 und 999 kW. Die durchschnittliche Bemessungsleistung beträgt 275 kW. Diese Ergebnisse basieren auf der Auswertung von 77 Anlagen.

## Kategorisierung nach BHKW-Motortypen

Wird zwischen den Motortypen der eingesetzten BHKW unterschieden, so ergibt sich ein Anlagenanteil mit Zündstrahlmotoren von 32 %. Biogasanlagen mit Zündstrahl- und Gasmotoren wurden dem Anteil der Zündstrahl-BHKW zugeordnet. Diese Konfiguration ist allerdings nur bei erneuerten bzw. erweiterten Anlagen zu finden. Grundsätzlich kann mit wachsender Anlagenleistungsklasse eine Tendenz zum Einsatz von Gas-Ottomotoren festgestellt werden.

Der Zündölanteil, der dem Biogas bei einem Zündstrahlmotor-BHKW zugegeben wird, liegt in einer Spanne von 3 - 24 %. Durchschnittlich beträgt er 9 %, liegt also innerhalb des in der Praxis häufig genannten Richtwerts von 10 %. Diese Ergebnisse basieren auf den Auswertungen von 35 detaillierter analysierten Anlagen (s. S. 28 ff. „Auswertung der Betriebsdaten“).

In der folgenden Tabelle ist das Durchschnittsergebnis der Biogasanlagen mit Gas-Ottomotor dem durchschnittlichen Ergebnis aller untersuchten Anlagen mit Zündstrahlmotor gegenübergestellt.

Gegenüberstellung der Anlagen nach BHKW-Motortyp

	Biogasanlagen mit Gas-Ottomotoren	Biogasanlagen mit Zündstrahlmotoren
Durchschnittliche elektrische Leistung	353 kW	260 kW
Durchschnittliche Auslastung BHKW	86,0 %	84,9 %
Durchschnittlicher Eigenstromverbrauch	8,4 %	7,6 %
Durchschnittlicher Zündölanteil	-	9,0 %

Im Mittel ist der Eigenstromverbrauch der betrachteten Anlagen mit Zündstrahl-BHKW um 0,8 %-Punkte geringer als der von Gas-Ottomotoren. Für die Gas-Ottomotoren wurden etwas höhere BHKW-Auslastungen und eine höhere elektrische Bemessungsleistung ermittelt.

## Auswertung der Betriebsdaten

### Kriterien für die Auswertbarkeit der Daten

Obwohl bei jeder Anlage die eingespeiste elektrische Arbeit durch den Einspeisezähler und der bezogene Fremdstrom über den Fremdstrombezugszähler erfasst werden, lässt sich nicht in jedem Fall der Eigenstromanteil bestimmen. Vor allem im Bereich kleinerer Anlagenleistungen ist eine Unterscheidung zwischen dem Fremdstrombezug der Anlage und prozessfremder Verbraucher (z. B. Wohngebäude oder Stallungen) nicht möglich, wenn alle elektrischen Verbraucher über einen gemeinsamen Stromanschluss versorgt werden. Auch wird die Bruttostromerzeugung des BHKW nicht bei jeder Anlage über einen internen Verrechnungszähler registriert.

Für die Bestimmung des Eigenstromanteils ohne Zuhilfenahme von zusätzlicher Messtechnik konnten nur Biogasanlagen ausgewertet werden, die folgende Kriterien erfüllten:

- Separater Fremdstrombezugszähler für die Biogasanlage
- Erfassung aller elektrischen Eigenverbraucher der Biogasanlage
- Protokollierung der Bruttostromerzeugung der BHKW durch den Betreiber
- Zählung und Protokollierung des Energieverbrauchs von prozessfremden Verbrauchern bei Überschusseinspeiseanlagen

Witterungsbedingte Schwankungen und kurzzeitige Anlagenprobleme haben Einfluss auf die Anlagenauslastung und die Bruttostromerzeugung. Um diesen Einfluss in den Auswertungen nicht zu stark zu gewichten, wurden für die Auswertungen die monatlichen Durchschnittswerte über einen Zeitraum von sechs bis zwölf Monaten herangezogen. Einzige Ausnahmefälle waren Anlagen, die Mitte des Jahres 2005 oder später in Betrieb gingen und für die daher zum Zeitpunkt der Auswertung nur Betriebsdaten (ohne Inbetriebnahmephase) über einen Zeitraum von vier bzw. fünf Monaten vorlagen.

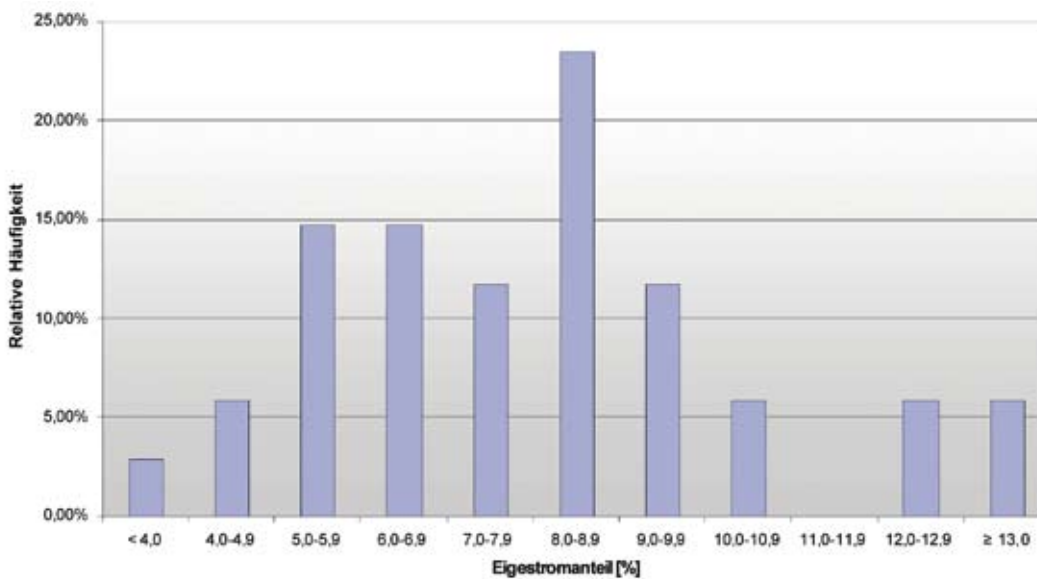
### Berechnung der Anlagenauslastung

Aus der monatlichen Bruttostromerzeugung und der elektrischen Bemessungsleistung lässt sich die durchschnittliche Anlagenauslastung berechnen. Dies wurde für alle Anlagen vorgenommen, um die erhaltenen Daten auf ihre Verwendbarkeit und Plausibilität zu überprüfen. Anlagenauslastungen größer 95 % im Jahresdurchschnitt sind in der Praxis so gut wie nicht zu erreichen, wenn man neben den Schwankungen in der Gasausbeute bei gleichzeitig geringer Gasspeicherkapazität auch die BHKW-Stillstandszeiten in Folge von Wartung und Instandhaltung berücksichtigt. Anlagen mit BHKW-Auslastungen kleiner 60 % wurden in der Studie nicht bewertet, da derartig geringe Auslastungen bei korrekter Anlagenauslegung nur durch biologische oder technische Probleme bedingt sein können. Der Eigenstromanteil bezogen auf die geringere Bruttostromerzeugung fällt hier relativ hoch aus und erschwert damit die Vergleichbarkeit zu durchschnittlich ausgelasteten Anlagen. Aus diesem Grund wurden auch die Betriebsdaten der durch den biologischen Anfahrprozess beeinträchtigten Inbetriebnahmephase nicht ausgewertet.

Die biologisch bedingten Schwankungen in der Gasproduktion durch den Einsatz von Zündöl als Brennstoff können beim Gasdieselmotor ausgeglichen werden. Allerdings sollte der Zündölanteil nicht mehr als 10 % betragen, um für den gesamten erzeugten Strom die volle EEG-Vergütung zu bekommen.

Im Rahmen der Studie wurde eine durchschnittliche errechnete Anlagenauslastung von 84,9 % für Zündstrahlmotoren und von 86,0 % für Gas-Ottomotoren ermittelt. Dieses Ergebnis resultiert aus der Auswertung von 35 Anlagen.

## Häufigkeitsverteilung des ermittelten Eigenstrombedarfs der 35 detailliert untersuchten Biogasanlagen



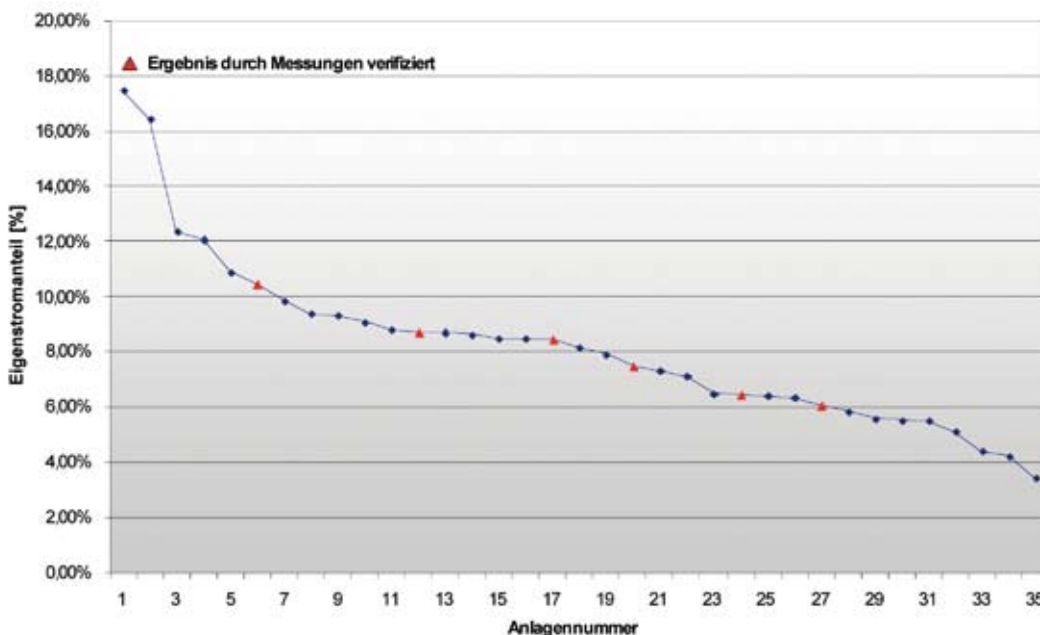
## Verteilung des Eigenstromverbrauchs

Aus der oberen Graphik wird ersichtlich, dass der Eigenstromanteil von etwa 65 % der untersuchten Anlagen zwischen 5,0 und 9,0 % liegt. Optimal betriebene Anlagen mit geringerem Energiebedarf für den Rührprozess und hoher Gasausbeute zeigen Werte kleiner 5,0 %. Etwa ein Zehntel der Anlagen weist einen Eigenstromanteil größer 12 % auf, wobei im Untersuchungszeitraum nur geringe Anlagenauslastungen erreicht wurden. Nach der Analyse dieser Anlagen wurde festgestellt, dass die Prozessführung einen großen Optimierungsbedarf aufweist und die Anlagenkonfiguration zum Teil nicht optimal auf den Substratdurchsatz abgestimmt wurde. Darunter sind

auch zwei Anlagen mit einem Eigenverbrauchsanteil von über 16 bzw. 17 % (s. Graphik unten).

Der ermittelte Eigenstrombedarf der untersuchten Anlagen bewegt sich in einer Bandbreite von 3,5 - 17,5 %. Für die untersuchten Anlagen lässt sich ein mittlerer Eigenbedarfsanteil von 8,2 % bei einer Standardabweichung von 3,0 % ermitteln. Durchschnittlich werden 70 % des Eigenstrombedarfs durch den selbst erzeugten Strom des BHKW gedeckt.

## Geordnet aufgetragener Eigenstromverbrauch aller analysierten Biogasanlagen.



## Statistische Aussagekraft der Ergebnisse

Insgesamt gibt es in Deutschland nach Angaben des Fachverbands Biogas e. V. rund 2.700 Biogasanlagen im landwirtschaftlichen Bereich. Der Anteil der Anlagen, die ab dem Jahr 2000 gebaut wurden, liegt bei etwa 1.600. Dies kann der Grafik auf Seite 7 entnommen werden. Die Anzahl der Biogasanlagen ab dem Baujahr 2000, die die Inbetriebnahmephase abgeschlossen haben und eine BHKW-Auslastung größer 60 % aufweisen, wurde von BASE TECHNOLOGIES auf Basis der vorliegenden Daten auf etwa 1.200 abgeschätzt. Legt man diese Zahl als maximal mögliche Datenbasis der Studie zu Grunde, so beträgt der angesprochene Kreis der Anlagenbetreiber (siehe Tab. S. 22) einem Anteil von etwa 30 % bzw. die Anzahl der untersuchten Biogasanlagen ab Baujahr 2000 einem Anteil von 6 %.

Die geringe Rücklaufquote der Betreiberumfrage und die geringe Anzahl der davon auswertbaren Anlagen lassen nur bedingt Rückschlüsse auf die gesamten Biogasanlagen in Deutschland zu. Statistisch bewertet sind die Ergebnisse der Studie auf dieser Datenbasis nicht repräsentativ, ermöglichen dennoch die Erarbeitung von Empfehlungen für Anlagenhersteller und -betreiber auf Basis marktüblicher Problemstellungen.

Hier sei noch erwähnt, dass statistische Aussagen nur nach umfangreichen mehrjährigen Untersuchungsreihen sinnvoll erscheinen. Dieser Studie wurde die Ermittlung von Potenzialen zur Reduzierung des Eigenstromverbrauchs auf Basis einer aktuellen Marktumfrage zur Darstellung des Status Quo als Ziel gesetzt. Nachdem die Biogasbranche derzeit eine hohe Entwicklungsdynamik an den Tag legt, wurde auf die Erarbeitung von aktuellen Ergebnissen unter Einhaltung eines kurzen Zeitrahmens Wert gelegt.

## Ergebnisse der Messungen

### Komponentenspezifische Aufgliederung des Eigenstrombedarfs

Schlüsselt man den Eigenstromanteil in die Anteile der Hauptkomponenten BHKW, Rührwerke, Einbringung und die Zusammenfassung aller sonstigen Verbraucher auf, so zeigt sich die in der unten stehenden Grafik dargestellte Aufteilung. Die sonstigen elektrischen Verbraucher setzen sich aus Dickstoff- und Heizkreispumpen, MSR-Technik, Kompressoren, Beleuchtung etc. zusammen.

Wertet man die Aussagen der Grafik anhand der Anlagen-daten aus, so ergeben sich folgende Feststellungen:

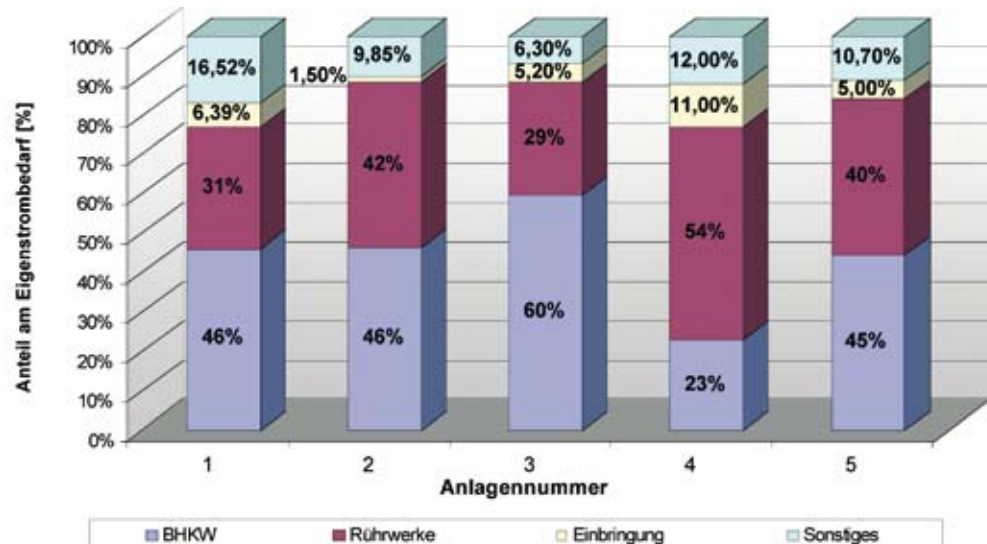
Der Anteil des BHKW am Eigenstromverbrauch beträgt 23 - 60 %. Der Anteil der Rührwerke beträgt 29 - 54 %. Die Einbringung bei den untersuchten Anlagen benötigt lediglich einen Eigenbedarfsanteil von 1,5 - 11 %. Der summierte Anteil aller sonstiger elektrischer Verbraucher entspricht maximal einem Sechstel des gesamten Eigenstromverbrauchs.

Der geringe Energiebedarf für die Einbringung bei Anlage 2 lässt sich auf die hohe Effizienz des eingesetzten Feststoffdosierers und die daraus resultierenden geringen Laufzeiten zurückführen. Anlage 4 verwendet zur Durchmischung des Fermenters ein kontinuierlich rührendes Langachsrührwerk. Dadurch fällt der Eigenbedarfsanteil der Rührwerke gegenüber dem BHKW verhältnismäßig groß aus.

Auf Basis der Messergebnisse lässt sich folgende Reihenfolge unter den größten Eigenstromverbrauchern einer Biogasanlage ermitteln:

1. Peripheriekomponenten des BHKW
2. Rührwerke
3. Einbringsysteme

( Aufteilung des Eigenstrombedarfs von fünf Beispielanlagen



## Wirkleistungsaufnahme der BHKW-Peripheriekomponenten einer Beispielanlage

Anzahl	Komponente	Bemessungsleistung	Laufzeit/Tag	Messung Eigenstrombedarf/Tag
2	Notkühler	je 2,4 kW	24 h	48 kWh/d
1	Gasverdichter	2,0 kW	24 h	36 kWh/d
1	Heizwasserpumpe Fermenter	0,4 kW	24 h	7,2 kWh/d
1	Heizwasserpumpe Nachgärer	0,4 kW	24 h	4,8 kWh/d
1	Raumlüfter	0,5 kW	24 h	9,6 kWh/d

### Eigenbedarf der BHKW-Peripheriekomponenten

Nachdem bei einzelnen Anlagen auch der Eigenbedarf der Peripheriekomponenten des BHKW separat gemessen wurde, konnten folgende Komponenten als die größten Eigenstromverbraucher des BHKW identifiziert werden:

1. Notkühler
2. Gasverdichter (nur bei Gasmotoren)
3. Primäre und sekundäre Umwälzpumpen der Motorkühlung
4. Raumlüfter

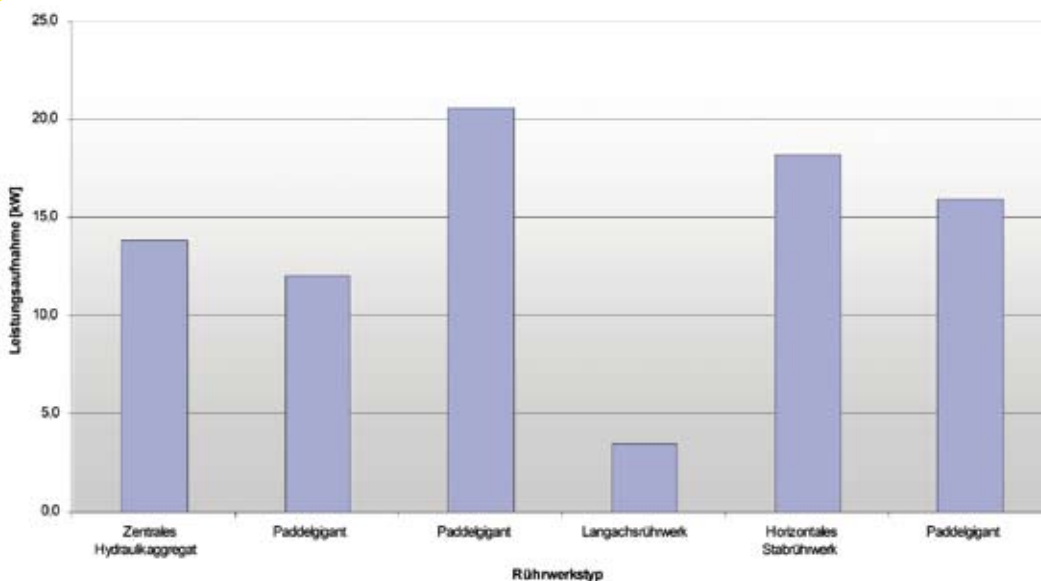
Die Tabelle zeigt an einem Beispiel die Messergebnisse für die Wirkleistungsaufnahme und den Eigenstromverbrauch der BHKW-Peripheriekomponenten ( $P_B = 210 \text{ kW}$ ). Im Anhang sind die gesamten Messergebnisse dieser Beispielanlage tabellarisch aufgelistet.

### Eigenbedarf der Rührwerke

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse der Rührwerksmessungen ist die Wirkleistungsaufnahme verschiedener Rührwerkstypen in in der unteren Grafik dargestellt.

Es zeigen sich je nach Betriebsart der Rührwerke deutliche Unterschiede in der Wirkleistungsaufnahme. Wird, wie bei dem dargestellten Langachsührwerk kontinuierlich mit geringer Drehzahl und Antriebsleistung gerührt, so können niedrige elektrische Momentanleistungen erzielt werden. Aufgrund der größeren Flächenelemente der Paddel tritt bei den Paddelgiganten eine höhere Widerstandskraft auf, die eine höhere Wirkleistungsaufnahme zur Folge hat. Wie im Kapitel „Rühreinrichtungen“ beschrieben, ist die Wirkleistungsaufnahme direkt proportional zur aufzuwendenden Widerstandskraft und damit von der Dichte, der Umfangsgeschwindigkeit und dem Widerstandsbeiwert des zu rührenden Mediums abhängig. Nachdem die Widerstandskraft direkt proportional zum Quadrat der Umfangsgeschwindigkeit des Rührorgans ist, erfordert das gemessene Stabührwerk mit größerer Drehzahl eine höhere Antriebsleistung.

## Wirkleistungsaufnahme verschiedener Rührwerkstypen bei Nennbetrieb



## Tägliche Betriebsstunden der Rührwerke der gemessenen Anlagen

Anlage	Fermenter 1	Bh / Tag	Fermenter 2	Bh / Tag
1	Hydraulikaggregat	3,6 h	Hydraulikaggregat	2,0 h
2	Paddelrührwerk	9,6 h	Tauchmotorrührwerk	1,8 h
3	Paddelrührwerk	9,6 h	Stabrührwerk	1,2 h
4	Langachs-rührwerk	24,0 h	Tauchmotorrührwerke	2,0 h
5	Paddelrührwerk	8,0 h	Stabrührwerk	4,0 h
6	Paddelrührwerk	2,4 h	Tauchmotorrührwerke	3,2 h

Nachdem auch die Laufzeiten der Rührwerke maßgeblich den Energiebedarf bestimmen, sind je Anlage die täglichen Betriebsstunden der einzelnen Rührwerke in der Tabelle oben aufgeführt.

Bezieht man den Energiebedarf des Rührwerks auf das durchmischende Fermentervolumen (je 100 m<sup>3</sup>) und die täglichen Betriebsstunden (Bh), so ergibt sich der in der unteren Grafik aufgetragene spezifische Rührwerks-Eigenbedarf.

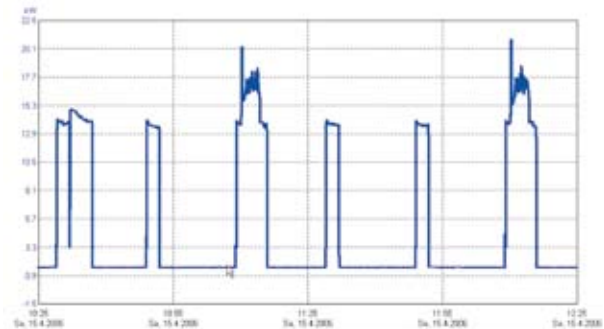
Das bei Anlage 1 eingesetzte zentrale Hydraulikaggregat zeigt neben den Paddelrührwerken den höchsten spezifischen Eigenstromverbrauch. Der Vorteil des hydraulischen Antriebs ist, dass es als alleiniger Antrieb für mehrere sequentiell arbeitende Rührwerke eingesetzt werden kann.

Der geringe spezifische Energieverbrauch des Paddelgiganten von Anlage 5 ist darauf zurückzuführen, dass die elektrische Leistung über einen vorgeschalteten Frequenzumformer auf 40 % gedrosselt wird. Daneben wirkt bei einem Langachs-rührwerk in Folge des kleineren Flächenelements des Rührorgans eine geringere Widerstandskraft. An diesem Beispiel zeigt sich, dass bei Paddelrührwerken durch eine Reduzierung der Drehzahl über einen Frequenzumformer auch bei höherer Betriebsdauer elektrische Antriebsenergie eingespart werden

kann. Allerdings kann vermutet werden, dass unterhalb einer gewissen Mindestdrehzahl die Gasausbeute beeinträchtigt werden könnte.

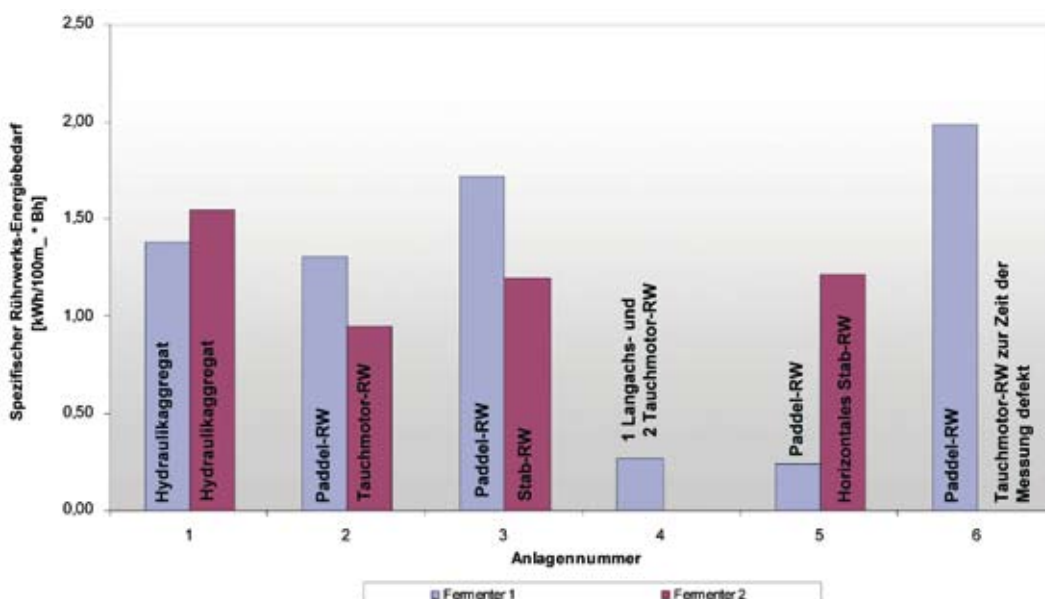
Eine interessante Alternative ist der Einsatz eines Langachs-rührwerks, das bei Anlage 4 trotz des kontinuierlichen Betriebs den geringsten gemessenen Eigenverbrauch aufwies.

## Wirkleistungsaufnahme von Einbringung und Rührwerk



Die ersten beiden Wirkleistungsspitzen sind jeweils einem Rührwerk gleicher elektrischer Bemessungsleistung ( $P_B = 15 \text{ kW}$ ) zuzuordnen. Die MSR-Technik nimmt kontinuierlich eine Wirkleistung von etwa 1 kW auf, was sich in der Mess-

## Eigenstrombedarf der Rührwerke im Verhältnis zur Fermentergröße





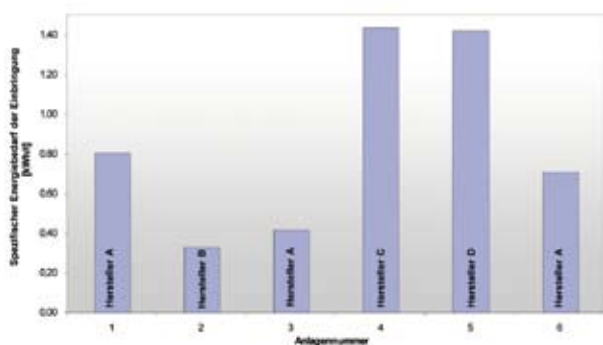
kurve als Grundlast widerspiegelt. Gegen 11.15 Uhr des Mess-tages ist die Wirkleistungsaufnahme der Einbringung der Wirkleistungsaufnahme eines Rührwerks überlagert. Die Grafik verdeutlicht, dass die Anlagenkomponenten nicht geregelt, sondern über Zeitintervalle gesteuert werden. Interessanterweise kann festgestellt werden, dass die Hauptkomponenten der in dieser Studie betrachteten Anlagen fast ausschließlich zeitlich gesteuert, aber nicht aus dem Biogasprozess heraus geregelt werden.

## Eigenbedarf der Einbringung

Mit dem Ziel, Einsparpotenziale bei den marktüblichen Einbringssystemen aufzudecken, werden in der Tabelle die eingesetzten Feststoffdosierer der sechs gemessenen Anlagen gegenübergestellt.

Die Grafik zeigt den spezifischen Eigenstrombedarf der Einbringung, bezogen auf die eingebrachte Substratmasse.

### Spezifischer Eigenbedarf des Einbringensystems



Die Anlagen 4 und 5 benötigen spezifisch mehr elektrische Energie, um eine Tonne Substrat in den Fermenter einzubringen. Der Eigenbedarf der Feststoffeinträge von Anlage 4 umfasst neben dem Feststoffdosierer ein Förderbandsystem, das den spezifischen Eigenstrombedarf deutlich erhöht. Grundsätzlich wird der Eigenbedarf hauptsächlich durch die tägliche Gesamtlaufzeit beeinflusst. Deutlich wird dies an einem Vergleich der Anlagen 2 und 5. Zur Einbringung einer vergleichbaren Substratmasse ist bei Anlage 5 das Einbringssystem 10-mal länger in Betrieb als bei Anlage 2.

### Technische Daten der Einbringensysteme der gemessenen Anlagen

Anlage	Einbringensystem	El. Bemessungsleistung gesamt	Betriebsstunden / Tag	Substratmasse / Tag
1	Feststoffdosierer Fa. A	13,6 kW	1,6 h	18,0 t
2	Feststoffdosierer Fa. B	18,0 kW	0,3 h	19,0 t
3	Feststoffdosierer Fa. A	22,5 kW	0,8 h	16,4 t
4	Feststoffdosierer Fa. C	19,5 kW	2,5 h	16,0 t
5	Feststoffdosierer Fa. D	18,0 kW	4,0 h	20,4 t
6	Feststoffdosierer Fa. A	22,5 kW	1,2 h	17,1 t

Herstellerspezifisch lassen sich kaum Unterschiede im Eigenstromverbrauch feststellen. Am Rande sei noch erwähnt, dass von allen gemessenen Anlagen lediglich eine über eine Wiegeeinrichtung verfügt, die zur Steuerung der Feststoffdosierer herangezogen wird.

## Leitungsverluste des Einspeisekabels

Bei Anlagen, die über einen kundeneigenen Transformator in das Mittelspannungsnetz einspeisen, und der Einspeisezähler in der Anlage installiert ist, wird von Seiten des EVU eine Pauschale für die entstehenden Transformator- und Leitungsverluste abgezogen. Die Höhe des Abzugs ist von der Leitungslänge des Einspeisekabels und der elektrischen Bemessungsleistung des BHKW abhängig (s. Kap. „Verlustabzüge durch den Energieversorger“). Neben dem pauschalen Abzug für die Transformatorverluste werden in dieser Einspeisevariante für die Leitungsverluste bis zu 2,5 % der NS-seitig gemessenen Nettostromerzeugung abgezogen.

Messungen an einer Beispielanlage mit einer elektrischen Bemessungsleistung von 210 kW ergaben bei Volllastbetrieb des BHKW folgende Stromwärmeverluste des Einspeisekabels:

- Leitungslänge: 170 m
- Leitungsquerschnitt: 4 x 120 mm<sup>2</sup>
- Stromwärmeverluste: 0,2 %

Bei richtiger Dimensionierung des Einspeisekabels sind die auftretenden Stromwärmeverluste des Einspeisekabels geringer als die vom EVU abgezogene Pauschale. Vor diesem Hintergrund sollte beim Anlagenneubau angestrebt werden, dass die Biogasanlage nicht über einen kundeneigenen Transformator in das Mittelspannungsnetz einspeist und zudem der Einspeisezähler in der Anlage installiert ist. Dadurch können EVU-seitige Abzüge von der eingespeisten elektrischen Arbeit vermieden werden.

## Analyse der Ergebnisse

### Vergleich mit Angaben der Hersteller und Betreiber

- Eigenstromverbrauch nach Literaturangaben: 5,8 %
- Eigenstromverbrauch nach Herstellerangaben: 6,5 %
- Eigenstromverbrauch nach Betreiberaussage: 7,2 %
- Ermittelter Eigenstromverbrauch (Studie): 8,1 %

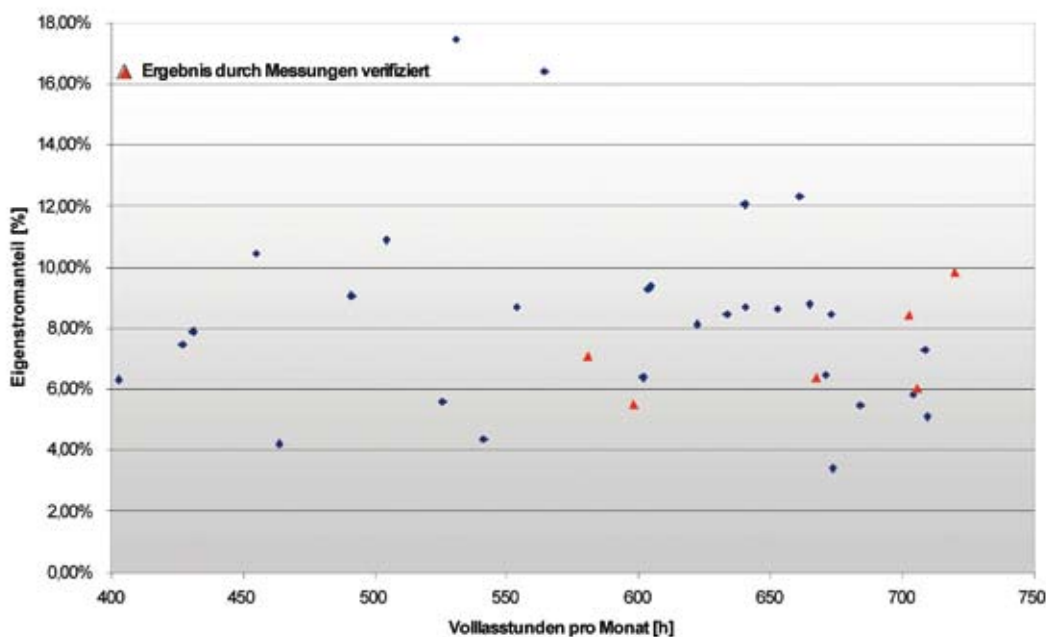
Werden die oben genannte Zahlen gegenüber gestellt, so zeigt sich, dass der Eigenstromverbrauch sowohl in Fachkreisen, von den Betreibern und auch von den Anlagenherstellern unterschätzt bzw. idealisiert bewertet wird. Angesichts des geringen Eigenstromverbrauchs, der in der Fachliteratur genannt wird, kann vermutet werden, dass das BHKW als sich selbst speisender Eigenverbraucher zu meist nicht berücksichtigt wird. Die durchschnittlichen Angaben der Anlagenbetreiber zeigen die geringste Abweichung zum Eigenverbrauch, der im Rahmen der Studie ermittelt wurde. Die Angaben einiger Betreiber über den Eigenstromverbrauch ihrer eigenen Biogasanlage liegen allerdings teilweise um die Hälfte unter dem Ergebnis der Studie. Dies kann unter anderem auf das Fehlen von Messtechnik zur vollständigen Erfassung des Eigenstrombedarfs zurückgeführt werden. Die Anlagenhersteller nennen meist Richtwerte, die mit Referenzanlagen unter optimalen Bedingungen erzielt werden können, aber bei den untersuchten Anlagen in der Praxis nur sehr selten erreicht werden.

### Korrelation des Eigenstromverbrauches mit der Anlagenauslastung

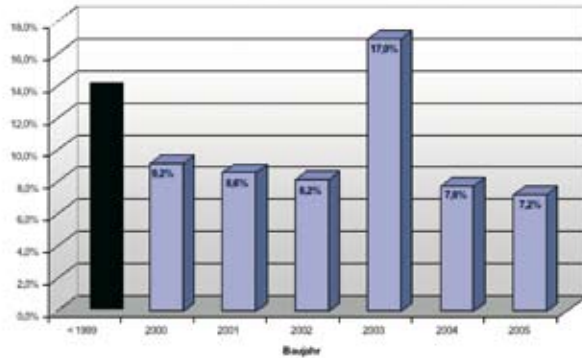
Die Abbildung zeigt den prozentualen Eigenstromanteil der Anlagen gegenüber den Volllaststunden pro Monat. Obwohl mit steigender Auslastung ein degressiver Verlauf des Eigenstromanteils vermutet werden könnte, lässt die Abbildung keine Abhängigkeit zwischen den beiden Kennzahlen erkennen. Eine Ursache könnte sein, dass sich die zahlreichen biologischen, chemischen und technischen Parameter im Fermentierungsprozess untereinander zu sehr beeinflussen. So können sich zwei baugleiche Biogasanlagen, die mit gleichem Substratmaterial und -massen gefüttert werden, durchaus in der Gasausbeute und in der Höhe des Eigenstromverbrauchs unterscheiden.

Eine vereinfachte Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Gasertrag und Eigenstromanteil ist ohne die Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen nicht sinnvoll. Nachdem in dieser Studie die biologisch-chemischen Prozesse nicht betrachtet wurden, ist eine tiefer gehende Analyse des Eigenstromanteils gegenüber den Volllaststunden nicht möglich.

### Eigenstromanteil im Verhältnis der Volllaststunden pro Monat



## Darstellung des Eigenstromverbrauchs gegenüber dem Anlagenbaujahr



## Korrelation des Eigenstromverbrauches mit dem Anlagenbaujahr

Zur Veranschaulichung des mittleren Eigenstromverbrauches aller Anlagen eines Baujahres sind die Ergebnisse der Anlagenbaujahre 2000 bis 2005 in obiger Graphik aufgetragen. Auf die Auswertung der Anlagen älteren Baujahres wurde aufgrund der geringen Zahl auswertbarer Anlagen verzichtet.

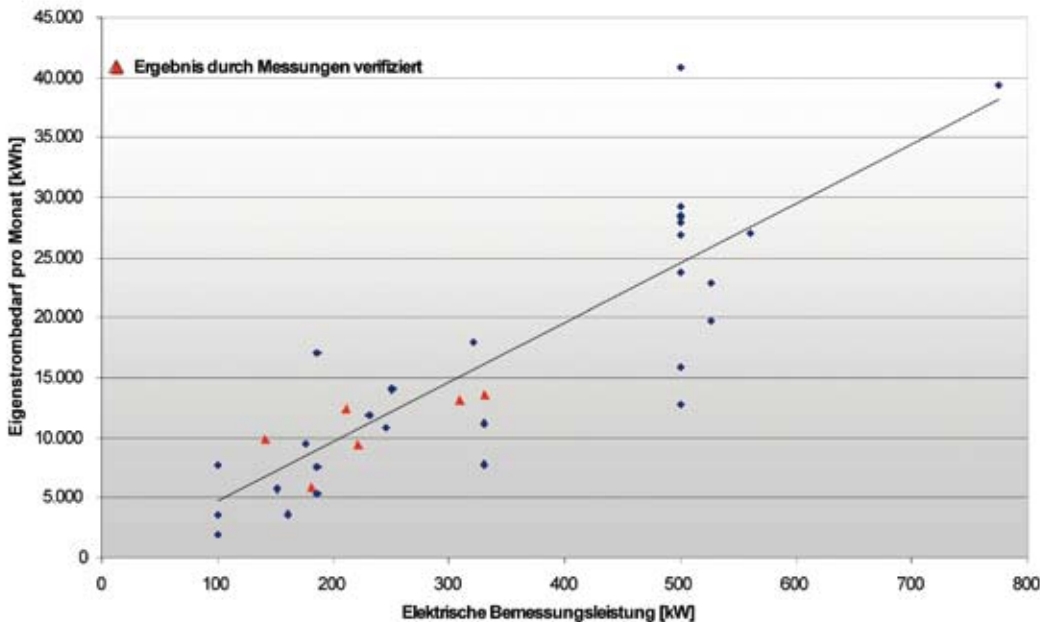
Lässt man das auf lediglich zwei Anlagen gestützte Ergebnis des Jahres 2003 außer acht, so lässt sich ab dem Jahr 2000 eine kontinuierliche Verringerung des prozentualen Eigenstromverbrauches erkennen. Der Eigenverbrauch der beiden Anlagen des Baujahres 2003 setzt sich zufälligerweise aus den beiden Biogasanlagen zusammen, die den höchsten Eigenstrombedarf aller analysierten Anlagen aufweisen. Die hier festgestellten Probleme in der Prozessführung und der ungünstigen Anlagenkonfiguration sind nicht repräsentativ für das Baujahr 2003 und stellen keinen Widerspruch zu der Aussage über die Korrelation des Eigenstromverbrauches mit dem Anlagenbaujahr dar.

## Korrelation des Eigenstromverbrauches mit der elektrischen Bemessungsleistung

Die untere Abbildung zeigt den prozentualen Eigenstromanteil gegenüber der elektrischen Bemessungsleistung der Anlage. Der lineare Zusammenhang zwischen beiden Größen deutet an, dass bei größeren Anlagenleistungsklassen keine Steigerung der Anlageneffizienz erreicht wird, wie es z. B. bei der konventionellen Energieerzeugung der Fall ist. Beachtet werden muss allerdings, dass bei Biogasanlagen höherer elektrischer Bemessungsleistung meist ein höherer Automatisierungsgrad vorzufinden ist, der den Eigenstrombedarf etwas anhebt.

Die Abbildung lässt deutlich die vom EEG vorgegebene 500 kW-Grenze erkennen, bis zu der für Biogasanlagen eine höhere Grundvergütung gewährt wird.

## Elektrische Bemessungsleistung im Verhältnis zum Eigenstromverbrauch



## Gegenüberstellung der spezifischen Rührwerksarbeit zweier Anlagen

	Einheit	Anlage 2	Anlage 4
Bemessungsleistung	kW	210	310
Fermentervolumen	m <sup>3</sup>	920 + 1250	1.500
Substratmasse	t/a	6.935	5.840
Trockensubstanzgehalt	%	8 - 9	8 - 9
Raumbelastung	kg oTS/m <sup>3</sup> -d	0,74	0,91
Fermentertemperatur	°C	40	43
Bruttostromerzeugung	kWh/a	1.750.540	2.607.925
EB-Anteil gesamt	%	8,5	6,1
EB-Rührwerk	kWh/a	36.135	35.405
EB-Rührwerk bezogen auf das Fermentervolumen	kWh/m <sup>3</sup> -a	16,7	23,6
EB-Rührwerk bezogen auf die Substratmasse	kWh/t-a	5,2	6,1

### Korrelation des Eigenstromverbrauches mit der Anlagenbauart

Bemerkenswerte Ergebnisse ergaben Messungen an zwei vergleichbar aufgebauten Anlagen. Die zwei in der Tabelle gegenüber gestellten Durchfluss-Speicher-Anlagen gleichen Baujahres (2004) werden mit unterschiedlichen NawaRo-Substratmengen bei gleichem Trockensubstanzgehalt beschickt. Anlage 2 ist zweistufig aufgebaut, besitzt ein größeres Fermentervolumen und unterscheidet sich von Anlage 4 zudem in der eingesetzten Rührtechnik. Beide Anlagen laufen weitgehend störungsfrei und weisen keine feststellbare Überproduktion an Biogas auf. Die zwei Gärbehälter der Anlage 2 werden mit jeweils zwei Tauchmotorrührwerken über ein zentrales Hydraulikaggregat durchmischt. Anlage 4 verfügt über drei Rührwerke, darunter sind zwei zeitintervall-gesteuerte Tauchmotorrührwerke und ein Langachs-rührwerk, das kontinuierlich 24 Stunden am Tag mit reduzierter Drehzahl läuft (durch Einsatz eines Frequenzumformers).

Wie man in der Gegenüberstellung deutlich erkennen kann, erzielt Anlage 4 jährlich eine etwa 50 % höhere Bruttostromerzeugung bei geringerem Fermentervolumen. Dies spiegelt sich in der höheren Raumbelastung der Anlage 4 wider, die berechnet werden kann, indem die Masse der täglich durchgesetzten Trockensubstanz auf das Fermentervolumen bezogen wird. Interessant ist ein Vergleich der aufgewendeten Rührwerksenergie beider Anlagen. Bezogen auf die zu vermischende Substratmasse und das Fermentervolumen weisen die Rührwerke der Anlage 4 einen größeren spezifischen Eigenverbrauch auf als bei Anlage 2. Wird aber zudem die eingesetzte Rührwerkstechnik bewertet (s. Kap. „Eigenbedarf der Rührwerke“), so kann abschließend festgestellt werden, dass die hohe Gasausbeute bei Anlage 4 unter anderem auf den intensiveren, kontinuierlichen Rührprozess zurückzuführen ist.

## Bewertung der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen der Studie aufgezeigten und erarbeiteten Optimierungsvorschläge für Anlagenhersteller, -planer und Betreiber stichpunktartig zusammengestellt.

### Zusammenfassung

#### Reihenfolge der größten Eigenstromverbraucher einer Biogasanlage:

1. Peripheriekomponenten des BHKW
2. Rührwerke
3. Einbringsysteme

#### Reihenfolge der größten Eigenstromverbraucher unter den Peripheriekomponenten des BHKW:

1. Notkühler
2. Gasverdichter (nur bei Gasmotoren)
3. Primäre und sekundäre Umwälzpumpen der Motorkühlung
4. Raumlüfter

#### Betreiberumfrage und Recherchen

- Das BHKW als sich selbst speisender Eigenverbraucher wird oft nicht im Eigenstrombedarf berücksichtigt.
- Angaben einiger Betreiber über den Eigenstromverbrauch ihrer eigenen Biogasanlage liegen teilweise um die Hälfte unter dem Ergebnis der Studie. Dies kann unter anderem auf das Fehlen von Messtechnik zur vollständigen Erfassung des Eigenstrombedarfs zurückgeführt werden.
- Die Anlagenhersteller nennen meist Richtwerte, die mit Referenzanlagen unter optimalen Bedingungen erzielt werden können, aber bei den untersuchten Anlagen in der Praxis nur sehr selten erreicht werden.
- In der Praxis ist keine Steigerung der Anlageneffizienz mit steigender Anlagenleistungsklasse erkennbar.
- Bei Betrachtung der Anlagenbaujahre ist eine kontinuierliche Verringerung des prozentualen Eigenstromverbrauchs hin zu den neueren Biogasanlagen feststellbar.

#### Rührwerke

- Es zeigen sich je nach Betriebsart der Rührwerke deutliche Unterschiede in der Wirkleistungsaufnahme.
- Eine Eigenstromeinsparung ist durch Reduzierung der Drehzahl von langsam drehenden zentralen Rührwerken, wie z. B. Paddelrührwerken über einen Frequenzumformer nach individueller Fallprüfung möglich.
- Der Einsatz eines Frequenzumformers ist für leistungsstarke Rührwerke empfehlenswert. Es ist meist günstiger, mit geringer Leistung kontinuierlich – anstelle mit hoher Leistung in Intervallen – zu rühren.

#### Einbringung

- Bei Feststoffdosierern sind kaum herstellertypische Unterschiede im Eigenstromverbrauch feststellbar.
- Der Eigenbedarf wird hauptsächlich durch die tägliche Gesamtlaufzeit beeinflusst.
- Es sind Feststoffdosierer empfehlenswert, die zur Steuerung der Einbringung Wiegeeinrichtungen heranziehen.

#### Anschlussvarianten an den Einspeisetransformator

- Die Installation des Stromeinspeisezählers sollte auf der Mittelspannungsseite des Einspeisetransformators erfolgen, sofern der Transformator Eigentum des Kunden bzw. Betreibers ist, um pauschale Abzüge von der Nettostromspeisung durch das EVU zu vermeiden.
- Eine Umstellung auf 100 % Stromeinspeisung und ausschließlichen Fremdstrombezug zur Eigenbedarfsdeckung erscheint bei NawaRo-Anlagen nach Wirtschaftlichkeitsprüfung und Betrachtung folgender Punkte sinnvoll:
  - Zusatzkosten für einen eigenen separaten Fremdstrombezugszähler
  - Zusatzkosten für die Umverdrahtung im BHKW- und Anlagenschaltschrank

## Empfehlungen an Anlagenhersteller

Auf Basis der Ergebnisse können abschließend folgende grundsätzlichen Empfehlungen ausgesprochen werden, die den Anlagenherstellern als Anregung dienen sollen:

- Vereinheitlichung der elektrische Niederspannungsverteilung im Anlagenbau
- Erfassung aller Verbraucher für die Ermittlung des Eigenstromverbrauchs
- Installation von separaten geeichten Eigenstromzählern in allen Anlagen
- Aufnahme des Eigenstromverbrauchs in das Anlagencontrolling
- Nennung von Praxiswerten für den Eigenstromverbrauch
- Installation von Wiegeeinrichtungen und Gaszählern
- Information der Kunden über die Vor- und Nachteile der Überstromeinspeisung bzw. einer Bruttostromeinspeisung und ausschließlichen Fremdstrombezug einschließlich zusätzlicher Kosten der beiden Schaltungsvarianten
- Durchführung von Versuchsreihen über verschiedene Rührwerkstechniken unter Variierung der täglichen Laufzeiten an zwei baugleichen, analog beschickten Fermentern (Aufzeichnung von Gasertrag, Bruttostromerzeugung, Eigenstromverbrauch, biologischen Prozessparametern)
- Nutzung eines natürlichen Gefälles zwischen Einbringung, Fermenter und Nachgärer, um Pumpenergie zu reduzieren

## Empfehlungen an Anlagenbetreiber

Auf Basis der Ergebnisse können abschließend folgende grundsätzlichen Empfehlungen ausgesprochen werden, die den Betreibern als Hilfestellung dienen sollen, um ihre Anlage zu optimieren:

- Kein Betrieb von elektrischen Verbrauchern, die nicht für den Betrieb der Anlage absolut notwendig sind
- Informationsanfrage von den Anlagenherstellern über elektrische Verschaltung des BHKW und Möglichkeiten der vollständigen Eigenverbrauchsmessung
- Installation von separaten, geeichten Eigenstromzählern
- Protokollierung der Bruttostromerzeugung des BHKW und regelmäßige Berechnung des Eigenstromanteils anhand der erzielten Stromeinspeisung
- Entscheidung über Art des Eigenstrombezugs bei NawaRo-Anlagen anhand einer Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Ermittlung der günstigsten Variante:
  - Reine Überschusseinspeisung ohne Fremdstrombezug aus dem EVU-Netz
  - Bruttostromeinspeisung und ausschließlicher Fremdstrombezug
  - Vorab Beratungsgespräch mit dem Hersteller über die Vor- und Nachteile der beiden Schaltungsvarianten
- Überprüfung und Optimierung der Funktionsweise der Temperaturregelung von Elektroantrieben (Lüftermotoren, Pumpen, Kühlventilatoren etc.)
- Analyse der Laufzeiten von Rührwerken und Einbringungssystemen und Anpassung an die eingebrachten Substratmengen ggf. durch die Nachrüstung zusätzlicher Messtechnik
- Nachrüstung einer Endlagerabdeckung mit Folienspeicher zur Erhöhung des Gasertrags- und -speichervolumens

## Wirtschaftliche Bewertung

Nachfolgend sollen exemplarisch die wirtschaftlichen Effekte von zwei Optimierungsmöglichkeiten anhand einer 500 kW NawaRo-Biogasanlage mit 7.500 Volllaststunden bewertet werden. Die Kosten für die Anlagenoptimierung werden nicht betrachtet, da diese anlagenspezifisch sehr unterschiedlich sein können.

### Einsparpotenzial durch Reduzierung des Eigenstromverbrauchs um 2 %-Punkte:

Eigenstromverbrauch:	10,3 %
Durchschnittl. Eigenstromverbrauch:	8,3 %
Jährliche Bruttostromerzeugung:	3.750 MWh <sub>el</sub> / a
Erzielbares Einsparpotenzial:	2,0 % bzw. 75 MWh <sub>el</sub> / a
Bei Fremdstrombezug (10 ct/kWh):	7.500 EUR / Jahr
Bei Eigenstrombezug (15 ct/kWh):	11.250 EUR / Jahr

### Kostensenkungspotenzial durch Umstellung von einer Überschusseinspeisung auf Bruttostromeinspeisung und ausschließlichem Fremdstrombezug zur Eigenbedarfsdeckung:

Eigenstromverbrauch:	10,0 %
Jährliche Bruttostromerzeugung:	3.750 MWh <sub>el</sub> / a
Jährliche Stromeinspeisung:	3.375 MWh <sub>el</sub> / a
Jährliche Stromvergütung (15 ct/kWh):	506.250 EUR / a

### Nach Umrüstung auf Fremdstrombezug und Bruttostromeinspeisung:

Eigenstromverbrauch:	10,0 %
Jährliche Bruttostromerzeugung:	3.750 MWh <sub>el</sub> / a
Jährliche Stromeinspeisung:	3.750 MWh <sub>el</sub> / a
Jährliche Stromvergütung (15 ct/kWh):	562.500 EUR / a
Jährliche Fremdstromkosten (10 ct/kWh):	37.500 EUR / a
Jährlicher Erlös auf der Stromseite:	525.000 EUR / a
Differenz zur Überschusseinspeisung:	18.750 EUR / a

## Technologietrends und zukünftige Entwicklungsperspektiven

Da die Biogaserzeugung ein relativ komplexes Zusammenspiel verschiedener Techniken ist, gibt es mehrere Ansatzpunkte für neue Entwicklungen. Ein Bereich ist die Beschleunigung des biologischen Prozesses durch Einflussnahme auf die Hydrolyse. Eine Entwicklungsrichtung zielt auf den Einsatz von Ultraschallbehandlung zum schnelleren Aufschluss von organischen Materialien, eine andere auf den Einsatz von hohem Druck und hoher Temperatur, um die Hydrolyse zu beschleunigen.

Bei den BHKW weisen Zündstrahlaggregate einen höheren Wirkungsgrad auf als reine Gasmotoren. Zur Beibehaltung einer 100 %-ig regenerativen Energieerzeugung sind erste Aggregate auf dem Markt, die anstatt des Diesels reines Pflanzenöl als Zündöl verwenden können. Eine andere Lösung, nämlich den Dieselmotor mit Zündkerzen zu versehen (Diesel mit Gas-Otto-Verfahren) und so jede bivalente Brennstoffzufuhr zu vermeiden, setzt sich aber zunehmend durch.

Im Zuge der zahlreichen Forschungen und Entwicklungen an Brennstoffzellen wird auch der Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen erprobt bzw. die jeweils erforderliche Vorbehandlung des Gases.

Parallel wird intensiv an Innovationen zur Reinigung von Biogas auf Erdgasqualität gearbeitet, um dieses „Green-Gas“ (auch Naturgas oder Bio-Methan genannt) in Erdgasnetze einzuspeisen und damit vom Zwang zur reinen Stromerzeugung wegzukommen. Wenn keine Gasnetze zur Verfügung stehen, bieten sich dezentrale Gastankstellen für Kraftfahrzeuge an.

Die Erhöhung der Energiedichte von Biogas zur Steigerung der Transportfähigkeit und Transportwürdigkeit sowie für den Einsatz als Flüssigkraftstoff für mobile Anwendungen durch Umwandlung in Methanol ist bislang erst im Versuchsstadium. Eine wirtschaftliche und auch energetische Bilanzierung steht noch aus.

Zukünftig kann weiterhin ein Trend zu NawaRo-Anlagen größerer Leistungsklasse erwartet werden, die mit höheren Trockensubstanzgehalten und höheren Automatisierungsgraden betrieben werden. Das Einsparpotenzial beim Eigenstromverbrauch wird damit zunehmend mehr Aufmerksamkeit gewinnen.

Auch die prognostizierte Preisentwicklung auf dem Energiemarkt wird in Zukunft den Einfluss eines hohen Eigenstromverbrauchs auf die Anlagenwirtschaftlichkeit weiter steigern.

## Auswertung einer Beispielanlage

	Anzahl	Komponente	Elektrische Bemessungsleistung	Phasen	Eigenbedarf Bezogen/ Erzeugt	Betriebsdauer	Wirkleistung gemessen
Rührwerke	1	Paddelrührwerk Fermenter 1	15 kW	3 ~	B	24 Min. / Std.	12,0 kW
	1	Tauchmotorrührwerk Nachgärer	15 kW	3 ~	B	4,5 Min. / Std.	12,0 kW 9,5 kW
Einbringung	1	Einbringschnecke	15 kW	3 ~	B	ca. 1 Min. / Std.	
	2	Auflöseschnecke	Je 1,5 kW	3 ~	B	ca. 20 Sek. / Std.	
BHKW (210 kW)	2	Notlüfter	Je 2,4 kW	3 ~	E	24 h	1,6 - 2,4 kW
	1	Gasverdichter	2,0 kW	3 ~	E	24 h	1,5 kW
	1	Heizwasserpumpe Fermenter 1	0,4 kW	3 ~	E	24 h	0,3 kW
	1	Heizwasserpumpe Nachgärer	0,4 kW	3 ~	E	24 h	0,2 kW
	1	Raumlüfter	0,5 kW	3 ~	E	24 h	0,4 kW
Sonstiges	1	Wangepumpe	7,5 kW	3 ~	B	100 Sek. / Std.	1,7 kW
	1	Überlaufpumpe	7,5 kW	3 ~	B		
	2	Fernwärmepumpe	Je 0,5 kW	1 ~	B	Nach Bedarf	Je 0,2 kW
	1	Kompressor für Entschwefelung	1,5 kW	1 ~	B	ca. 10 Min. / Std.	0,55 kW

Messtabelle zur Bestimmung der Wirkleistungsaufnahme der Einzelkomponenten:

	Zählerablesung	aus Messung
Bruttoerzeugung kWh/d	4.796	4.018
Σ EB in kWh/d	418	350
Eigenbedarfsanteil	8,7 %	8,7 %



## Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Bh	Betriebsstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
cw	Widerstandsbeiwert
CH <sub>4</sub>	Methan (chemische Formel)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid (chemische Formel)
CO	Kohlenmonoxid
d	Tag, Durchmesser
D	Durchmesser
dA	Flächenelement
dF	Widerstandskraft
EB	Eigenstrombedarf
EB-Anteil	Eigenstromanteil
EB <sub>erzeugt</sub>	Eigenstromanteil, der aus selbst erzeugtem Strom gedeckt wird
EB <sub>bezogen</sub>	Eigenstromanteil, der aus bezogenem Fremdstrom gedeckt wird
EB <sub>korr</sub>	Eigenstromanteil, der um den Energieinhalt des Zündöls bei Zündstrahl-BHKWs bereinigt wurde
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EVU	Energieversorgungsunternehmen
F <sub>r</sub>	Froude-Zahl
g	Erdbeschleunigung
h <sub>R</sub>	Rührblatthöhe
h	Stunde
H	Füllhöhe
H <sub>2</sub>	Wasserstoff (chemische Formel)
H <sub>2</sub> O	Wasser (chemische Formel)
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff (chemische Formel)
H <sub>o</sub>	Brennwert eines Energieträgers (früher: oberer Heizwert)
H <sub>u</sub>	Heizwert eines Energieträgers (früher: unterer Heizwert)
kW <sub>el</sub>	Kilowatt elektrisch
KWh	Kilowattstunde
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
MS	Mittelspannung
MW	Megawatt
MW <sub>el</sub>	Megawatt elektrisch
n	Drehfrequenz
N <sub>2</sub>	Stickstoff (chemische Formel)
Ne	Newton-Zahl
NH <sub>3</sub>	Ammoniak (chemische Formel)
NawaRos	Nachwachsende Rohstoffe
NfE	Stickstofffreie Extrakte
NS	Niederspannung
O <sub>2</sub>	Sauerstoff (chemische Formel)
oTS	Organischer Trockensubstanzgehalt
P	Rührleistung
PJ	Petajoule
P <sub>el</sub>	Elektrische Wirkleistung
P <sub>el, Brutto</sub>	Elektrische Wirkleistung Brutto
P <sub>el, Netto</sub>	Elektrische Wirkleistung Netto
P <sub>N</sub>	Elektrische Nennleistung bzw. Bemessungsleistung
Q <sub>Nutz</sub>	Nutzenergieinhalt
Q <sub>Primär</sub>	Primärenergieinhalt
Q <sub>Sek</sub>	Sekundärenergieinhalt
r	Radius
Re	Reinolds-Zahl des Rührers
RP	Rohprotein
RL	Verdauliches Fett
Rf	Rohfaser
TS	Trockensubstanz
TWh	Terawattstunde
u	Umfangsgeschwindigkeit
U/min	Umdrehungen pro Minute
VQ <sub>NfE</sub>	Verdauungsquotient stickstofffreier Extrakte
VQ <sub>RF</sub>	Verdauungsquotient Rohfaser
VQ <sub>RP</sub>	Verdauungsquotient Rohprotein
W <sub>el, Brutto</sub>	elektrische Arbeit Brutto
W <sub>el, Netto</sub>	elektrische Arbeit Netto

### Griechische Abkürzungen

$\eta, \eta_1, \eta_2$	dynamische Viskosität
$\nu$	kinematische Viskosität
$\rho$	Dichte

## Unterstützende Hersteller und Planungsbüros

Folgende Hersteller, Planungsbüros, Fachverbände und Energieversorger haben sich freundlicherweise bereit erklärt an der Studie teilzunehmen und die Autoren bei der Kontaktaufnahme zu den Biogas-anlagenbetreibern sowie bei der Datenerhebung unterstützt:

### Anlagenhersteller und Planungsbüros:

- Agrikomp GmbH
- Archea GmbH
- BioConstruct GmbH
- BIOGAS NORD GmbH
- Bio-System Selecta GmbH
- BTA GmbH & Co. KG
- Ingenieurbüro Dreyer&Bosse
- EnviTec Biogas GmbH
- E.U.R.O. Biogas Anlagenbau GmbH
- Hese Umwelt GmbH
- Hochreiter Johann GmbH
- INNOVAS Innovative Energie- und Umweltechnik
- Krieg & Fischer Ingenieure GmbH
- Lipp GmbH Anlagenbau + Umweltechnik
- Loick Bioenergie GmbH
- MT-Energie GmbH & Co. KG
- Novatech GmbH
- ÖKOBit GmbH
- OSMO-Anlagenbau GmbH & Co. KG
- PlanET-Biogastechnik GmbH
- Rückert Naturgas GmbH
- Schmack Biogas AG
- SCAUT Forschungsgesellschaft mbH
- UTS Umwelt-Technik-Süd GmbH
- WELtec BioPower GmbH

### BHKW-Hersteller und Packager:

- Köhler&Ziegler GmbH
- GE Jenbacher
- MDE Dezentrale Energiesysteme GmbH
- FIMAG Energiesysteme Finsterwalde
- ETW Energietechnik GmbH



## Impressum

### Herausgeber

Solarenergieförderverein Bayern e. V.  
Elisabethstr. 34  
80796 München  
Tel.: 0 89 / 27 81 34 28  
Fax: 0 89 / 2 71 01 56  
sev-bayern@eon-bayern.com  
www.sev-bayern.de

### Projektdurchführung

BASE TECHNOLOGIES GmbH  
Steinsdorfstr. 19  
80538 München  
Tel.: 0 89 / 21 31 94 - 40  
Fax: 0 89 / 21 31 94 - 41  
office@base-technologies.com  
www.base-technologies.com

in Kooperation mit  
Fachhochschule München

### Verfasser

Dipl.-Ing. Gregor Dachs  
(BASE TECHNOLOGIES GmbH)  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rehm  
(Fachhochschule München)

### Zuarbeiten

Stephanie Eberl, Gunter Horschak, Julia  
Schilling (BASE TECHNOLOGIES GmbH)

### Gestaltung

FP-Werbung F. Flade GmbH & Co. KG  
Realisation: Fabian Flade, M. A.  
fabian.flade@fp-werbung.com

### Copyright

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Jede Verwertung außerhalb der Grenzen  
des Urheberrechts ist ohne Zustimmung  
des Herausgebers unzulässig.

© 2006

Trotz sorgfältiger Prüfung kann keine  
Garantie hinsichtlich der Richtigkeit  
und Genauigkeit der Angaben gegeben  
werden.

11/2006



Am 19. November 1997 wurde auf der Messe München die damals weltweit größte Photovoltaik-Aufdachanlage in Betrieb genommen. Mit einer Spitzenleistung von 1.016 Kilowatt speist das Solardach München-Riem jährlich bis zu 1 Mio. Kilowattstunden in das Netz ein, die nach dem EEG vergütet werden.

Die Gesamtinvestition von rd. 7 Mio. EUR wurde zur Hälfte von E.ON Energie (damals Bayernwerk) getragen. Je 10 % kamen von Siemens, den Stadtwerken München und vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Das Bayerische Wirtschaftsministerium förderte 20 % des Projektes.

Die Anlage wird von den Stadtwerken München für die Solardach München-Riem GmbH (SMRG) betrieben.

Ein Großteil der Stromerlöse aus der Anlage (Betriebs- und sonstige Anlagekosten werden von der SMRG einbehalten) fließt dem Solarenergieförderverein Bayern e. V. zu, dem das Eigentum von E.ON Energie und Siemens an der Anlage übertragen wurde.

Mit dem Geld leistet der von E.ON Bayern betreute gemeinnützige Verein einen laufenden Beitrag zur Fortentwicklung und Markteinführung erneuerbarer Energien.