

Best Biogas Practise

Monitoring und Benchmarks zur Etablierung eines
Qualitätsstandards für die Verbesserung des Betriebs von
Biogasanlagen und Aufbau eines österreichweiten
Biogasnetzwerks

R. Schöftner et al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

45/2007

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Best Biogas Practise

Monitoring und Benchmarks zur Etablierung eines
Qualitätsstandards für die Verbesserung des Betriebs von
Biogasanlagen und Aufbau eines österreichweiten
Biogasnetzwerks

Projektleiter

DI Dr. Rainer Schöftner

ProjektmitarbeiterInnen

Mag. Dr. Klaus Valentin, DI Bernhard Schmiedinger,
DI (FH) Steven Trogisch, DI. Marianne Haberbauer,
DI (FH) Katharina Katzlinger,
DI Dr. Wolfgang Schnitzhofer, Mag. Nikolaus Weran

Profactor Produktionsforschungs GmbH

Steyr, Juni 2006

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. Sie wurde 2003 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT soll durch Forschung und Technologieentwicklung die Gesamteffizienz von zukünftigen Energiesystemen deutlich verbessert und eine Basis zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger geschaffen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und involvierten Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Mehrfache Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist, die Projektergebnisse – sei es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit leicht zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.ENERGIESYSTEMEderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
Abstract	2
Zusammenfassung	3
Summary	8
1. Ziele des Projekts	13
2. Inhalte und Ergebnisse des Projektteils Monitoring und Benchmarking	14
2.1 Einleitung Monitoring und Benchmarking	14
2.1.1 Begriffsdefinition und Begriffsinhalte	14
2.1.2 Monitoring von Biogasanlagen	14
2.1.3 Benchmarking	15
2.1.4 Begriffsdefinitionen rund um das Benchmarking	16
2.1.5 Aufgaben, Ziele und Ergebnisse von Benchmarking	17
2.1.6 Schlüsselfragen zum Benchmarkingprozess	18
2.1.7 Was kann alles gebenchmarkt werden?	19
2.1.8 Die spezifischen Arten von Benchmarking-Definition, Ziele, Vorteile, Nachteile	19
2.1.9 Die Stufen des Benchmarking-Prozesses	20
2.1.10 Schwierigkeiten und Fehler beim Benchmarking	22
2.2 Ziele von Biogas Monitoring und Benchmarking	24
2.3 Methodik des Biogas Monitoring und Benchmarking	24
2.3.1 Benchmarking von Biogasanlagen – Phasen der Durchführung	24
2.3.2 Beantwortung der Schlüsselfragen	24
2.3.3 Bestimmung, was „gebenchmarkt“ werden soll	26
2.3.4 Teambildung – Zusammensetzung und Funktionen	29
2.3.5 Partnersuche	30
2.3.6 Vorgehensweise bei der Informationssammlung und Analyse	31
2.3.7 Umsetzung und Kontrolle der Ergebnisse	32
2.4 Identifikation und Bewertung relevanter Parameter	32
2.4.1 Sammlung und Identifikation der charakteristischen Parameter	32
2.4.2 Bewertung der charakteristischen Parameter	33
2.5 Einführung von Kennzahlen	33
2.6 Datenerfassung und Auswertung	34
2.7 Ergebnisse Parametersammlung & Kennzahlenentwicklung	34
2.7.1 Stör- und Steuerquellen im Prozess	34
2.7.2 Identifikation und Bewertung relevanter Parameter	36
2.7.3 Einführung von Kennzahlen	37
2.7.4 Reihung und Bewertung der Kennzahlen	56
2.7.5 Fermentationsparameter-Tiefenmonitoring	63
2.8 Datenerhebung	69
2.9 Benchmarking-Tools	70
2.9.1 Entwicklung des Benchmarking-Tools	70
2.9.2 Implementierung des on-line Benchmarking-Tools	73
2.10 Best Biogas Practise Empfehlungen und Richtlinien	80

2.10.1	System-Parameter	80
2.10.2	„Vor-Ort“ Parameter	81
2.10.3	Kennzahlen und Benchmarks: Berechnung und Bedeutung	83
2.10.4	Vorschläge zur stabilen Betriebsführung von Biogasanlagen – Biologische Kennzahlen und Fermentationsparameter (Tiefenmonitoring)	102
2.10.5	Fallstudien Biogasanlagen – Auswertung anhand der 12 im Detail untersuchten Anlagen	107
3.	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen	114
3.1	Konkrete Ergebnisse am Ende des Projekts	114
3.1.1	„Benchmarking Tool“ – Webbasiertes Biogasanlagen Monitoring und Benchmarking Programm	114
3.1.2	„Best Biogas Practice“ Richtlinien	114
3.2	Schlussfolgerungen, Verwertung, Weiterverwendung, Ausblick und Empfehlungen ..	115
4.	Abbildungsverzeichnis	118
5.	Tabellenverzeichnis	120
6.	Anhänge	121

Kurzfassung

Das Österreichische Biogas Netzwerk wurde unter Anwendung der aktuellen Methoden und Instrumente der Bildung von Netzwerken entwickelt. Wesentliche Bestandteile sind dabei der Netzwerkaufbau und die Netzwerkentwicklung, die an den Bedürfnissen der zukünftigen Netzwerkmitglieder des Wertschöpfungssystems Biogas ausgerichtet sind.

Es wurden Vision und Mission ausgearbeitet und Ziele für das Österreichische Biogas Netzwerk formuliert. Zur Erreichung dieser Ziele wurde zusätzlich ein Maßnahmenkatalog ausgearbeitet und dokumentiert. Teile dieser Maßnahmen zur lang- und mittelfristigen Erreichung der Ziele wurden bereits in diesem Projekt umgesetzt, andere formuliert. Diese strategischen Zielsetzungen liegen in den folgenden Bereichen: Forschung & Entwicklung, Netzwerkattraktivität, Lobbying und Informations- und Wissenstransfer. Weiters wurden Veranstaltungen abgehalten, sowie Vorträge bei Veranstaltungen gehalten.

Auf der Homepage des Österreichischen Biogas Netzwerks wurden Kommunikationsplattformen, Tools zur Schaffung von Transparenz, Informationsplattformen eingerichtet und während der Projektdauer betrieben und gewartet. Durch die geleisteten Arbeiten sind die Rahmenbedingungen für einen dauerhaften Fortbestand des Netzwerks geschaffen.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Projekts war das Monitoring und Benchmarking. „Lernen von den Besten“ ist hier das Schlagwort. Die Herausforderung war es einerseits, die Performance von bestehenden, im Betrieb befindlichen Anlagen zu ermitteln, diese auf Kennzahlen umzulegen und Aussagen zu treffen, die den derzeitigen und zukünftigen Betreibern einen möglichst optimalen Betrieb von Biogasanlagen ermöglichen. Dabei lag der Fokus auf Anlagen, die nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) als Substrat verwenden. Nach einer umfassenden Parametersammlung (Kooperation mit „Gütesiegel Ökogas“) wurden die eine Biogasanlage charakterisierenden Parameter ausgewählt und daraus Kennzahlen abgeleitet und beschrieben. Nach einer Vorauswahl und Bewertung wurden 13 Kennzahlen in 3 Kategorien (biologische, energetische und ökonomische Effizienz) ausgewählt. Diese Kennzahlen erlauben einen weitgehend unabhängigen Vergleich unterschiedlicher Biogasanlagen, wenngleich angemerkt werden muss, dass Detailbeurteilungen auch entsprechend der Benchmarking Philosophie für jede einzelne Anlage für sich getätigt werden sollten, und das Benchmark als Indikator gesehen werden muss, der Aussagen über mögliche Schwachstellen bzw. Optimierungspotenziale zulässt. Zusätzlich wurde ein auf der Homepage des Österreichischen Biogas Netzwerks zugängliches Benchmarking-Tool entwickelt und implementiert, das die Berechnung der Kennzahlen und den Vergleich mit anderen Anlagen anonym ermöglicht.

Aus der Analyse von Daten aus 41 BGA (Kooperationsvereinbarung mit IFA-Tulln) und der Detailanalyse von 12 Anlagen wurden „Best Biogas Practice“ Richtlinien und Empfehlungen entwickelt. Diese sind ein für die Zielgruppe verständlicher, umsetzbarer Leitfaden, der zusätzlich Kennzahlen und Werte von mehr als 30 derzeit in Betrieb stehenden Anlagen beinhaltet sowie 12 ausgewählte Anlagen, die inklusive der Fermentationsparameter betrachtet wurden.

Entsprechend der Kooperationsvereinbarung mit dem Projekt „Gütesiegel Ökogas“ (IFA-Tulln), wird nach Vorliegen dieses Bewertungssystem ein auf einander abgestimmter gemeinsamer Standard veröffentlicht.

Abstract

The Austrian Biogas Network has been developed using state of the art methods and instruments for the formation of networks. Essential parts have been the network building and network development orientated on the needs and wants of future network members out of the value added system biogas.

Vision and mission has been developed, as well as strategic aims and objectives of the Austrian Biogas Network. Parts of these developed objectives have already been implemented during the project; others have been formulated, in order to fulfill the envisaged mid and long term goals. The strategic mid- and long term goals and objectives are within research and development, attractiveness of the network, lobbying and transfer of information and knowledge.

Additionally events have been held and the network has been presented to the public as organizer as well as service provider. On the homepage set up, a variety of communication platforms, tools for the creation of transparency and information platforms have been offered and maintained during the project duration. By the described work the framework for an ongoing network was created.

Another focus was biogas monitoring and benchmarking. Learning from the best – was the key word. The challenge was on the one hand the measurement of the performance of existing and running biogas plants, put this into key values and create benchmarks in order to assist current and future biogas plant planners and operators in carrying out an efficient operation of their plants. The focus was set on plants, using renewable resources as substrate.

After the extensive collection of parameters (cooperation with “Gütesiegel Ökogas”) characterizing parameters of a biogas plant have been selected, and out of these a variety of key values have been calculated and described. After a selection and assessment of key values final set of a total of 13 key values have been selected according the following areas of biological efficiency, energetic efficiency and economic efficiency. These key values allow a nearly independent comparison of different biogas plants, although it shall be noted, that detailed assessments according the benchmark philosophy for each plant has to be done separately, but the key-values are indicating where weak points or where potential for optimization can be found. In addition an on-line benchmarking tool was set up, accessible on the homepage of the Austrian Biogas Network, calculating the key-values and offering the anonymous comparison with other biogas plants.

Out of the analysis of a total of 41 investigated biogas plants (according to the cooperation agreement with IFA Tulln) and the detailed analysis of 12 biogas plants the Best Biogas Practise benchmarks and recommendations have been developed. This suggestion of the Best Biogas Practise Benchmarks and recommendations are a for the target group comprehensible, realizable guide, containing the key values of 30 currently biogas plants in operation, as well as 12 selected plants also showing and considering the fermentation parameters.

As stated in the cooperation agreement with the “Gütesiegel Ökogas” project (IFA Tulln), where also suggestions for a benchmarking system are worked out, both suggestions will be harmonized in order to publish only one standard.

Zusammenfassung

„Das Österreichische Biogasnetzwerk setzt sich aus den besten heimischen Kräften der Biogaszene in Industrie, Forschung und Anwendung zusammen und ist in Österreich der zentrale

- Ansprechpartner,*
- Vertreter,*
- Lobbyist,*
- Daten- & Faktenlieferant und*
- Promotor und die*
- allgemeine, anerkannte und akzeptierte Interessensvertretung,*

damit in Österreich das Potential von zwei Gigawatt erneuerbarer Energie genutzt werden kann.“

und

„Das Österreichische Biogasnetzwerk unterstützt für seine Partner aus dem Bereich Biogas und dem Biogas-Umfeld die Schaffung von Rahmenbedingungen, welche einen Beitrag zur Sicherung der nachhaltigen Lebensfähigkeit leisten. Eine gemeinsame Sprache, gemeinsame Ziele, Strategien und Aktivitäten sollen dazu wesentlich beitragen.“

lauten die in diesem Projekt entwickelte Vision und Mission des Österreichischen Biogas Netzwerks „ÖBN“.

Das Österreichische Biogas Netzwerk wurde mit den aktuellen Methoden und Instrumenten der Bildung von (Unternehmens)Netzwerken entwickelt.

Wesentliche Bestandteile sind dabei der Netzwerkaufbau und die Netzwerkentwicklung, die an den Bedürfnissen der zukünftigen Netzwerkmitglieder ausgerichtet sind. Dies erfolgte in einer Kerngruppe bestehend aus Vertretern des Wertschöpfungssystems Biogas.

Mit diesen wurden die oben dargestellte Vision und Mission in Workshops ausgearbeitet, und strategischen Ziele für das Österreichische Biogasnetzwerk formuliert.

Zur Erreichung dieser Ziele wurde zusätzlich ein Maßnahmenkatalog ausgearbeitet und dokumentiert. Teile dieser Maßnahmen zur lang- und mittelfristigen Erreichung der Ziele wurden bereits in diesem Projekt umgesetzt, andere formuliert.

Diese strategischen Zielsetzungen liegen in den folgenden Bereichen:

Forschung & Entwicklung

Im Bereich Forschung und Entwicklung sind die formulierten Ziele des Österreichischen Biogas Netzwerkes die Transparenz über die österreichische Forschungslandschaft in Bezug auf Kompetenzen, Projekte, Aktivitäten, Forschungsergebnisse und Zukunftsintentionen. Weiters sollte das ÖBN in der Lage sein, die aktuellen und notwendigen Forschungsthemen aufzuzeigen und eine Plattform für die Abstimmung der in Österreich durchgeführten F&E Aktivitäten zu sein und

internationale Kontakte zu Forschungs- und Entwicklungsnetzwerken bzw. -einrichtungen zu pflegen.

Umgesetzte Maßnahmen, die zu dieser Zielerreichung beitragen und in diesem Projekt umgesetzt wurden, sind die Erstellung einer Forschungsprojektdatenbank, die über 50 durchgeführte Forschungsprojekte aus den letzten 3 Jahren enthält, die Entwicklung eines Tools zur Darstellung und elektronischen Eingabe von Kompetenzprofilen der Netzwerkteilnehmer und Veröffentlichung auf der Homepage des ÖBN.

Netzwerkattraktivität

Um das Netzwerk für seine Teilnehmer und neue Teilnehmer attraktiv zu machen, muss das ÖBN in der Biogasszene klar positioniert und etabliert sein, Transparenz über die Akteure im Bereich Biogas und deren Aktivitäten vorhanden sein, die wesentlichen Biogasinitiativen in Österreich in das ÖBN eingebunden sein und es sollen Kontakte zu führenden internationalen Biogasnetzwerken vorhanden sein. Das bereits zuvor beschriebene Tool zur Erhebung der Kompetenzprofile kann nicht nur für Forschung und Entwicklung eingesetzt werden. Daher wurden für alle am Wertschöpfungssystem Biogas beteiligten Interessensgruppen entsprechende Vorlagen für Kompetenzprofile in Kategorien inklusive den entsprechenden Indikatoren entwickelt.

Lobbying

Das ÖBN soll die Plattform für die Zusammenarbeit der Akteure im Biogasbereich sein, das österreichische Sprachrohr für internationale Aktivitäten im Bereich Biogas, einen wesentlichen Beitrag zu österreichweit einheitlichen Genehmigungsverfahren leisten, Stimmung „Pro Biogas“ machen und politisches Lobbying betreiben. Weiters soll das ÖBN Presseforen etablieren und die zentrale Anlaufstelle für objektive biogasbezogene Informationen sein.

Im Bereich Lobbying wurde unter Bedachtnahme auf die Projektinhalte auf das aktive Durchführen von politischem Lobbying verzichtet. Dennoch wurde mit der Öffentlichkeitsarbeit, der Erstellung einer attraktiven Homepage und Logos eine Kommunikationsplattform errichtet, die zuträglich für die Pro-Biogas Stimmung ist. Eine international besuchte und mit internationalen Vortragenden besetzte Veranstaltung schaffte eine Basis für die Zusammenarbeit für Akteure aus dem Bereich Biogas. Aufgrund geänderter Rahmenbedingungen wurden intensive Abstimmungsgespräche mit während der Projektlaufzeit neu gestarteten, ähnliche oder teilweise identische Ziele verfolgenden Initiativen geführt.

Informations- und Wissenstransfer

Im Bereich Informations- und Wissenstransfer hat das Österreichische Biogasnetzwerk zum Ziel, die Rahmenbedingungen für einen effektiven Informationsaustausch zu schaffen, die zentrale Informationsplattform für den Biogasbereich in Österreich zu sein und Rahmenbedingungen für einen effektiven Erfahrungsaustausch zu schaffen. Als umgesetzte Maßnahmen, die diesen Zielsetzungen zuträglich sind, wurde die zuvor erwähnte Homepage (www.oebn.at) geschaffen, die unterschiedlichste Kommunikationsmöglichkeiten beinhaltet. Beispielhaft sind der Newsbereich, ein on-line Diskussionforum, aber auch ein Ideenpool oder die Möglichkeit, Erfahrungsberichte zu erstellen.

Weiters wurden Veranstaltungen, Workshops und Vorträge bei Veranstaltungen gehalten, bei denen einerseits das Netzwerk als Veranstalter aber auch als Dienstleister publik gemacht wurde.

Die Homepage des Österreichischen Biogasnetzwerks besticht durch die implementierte hohe Funktionalität. So wurden zum Beispiel eine Reihe von Kommunikationsplattformen eingerichtet, Tools zur Schaffung von Transparenz (Forum, Kompetenzprofile, Forschungsdatenbank), Informationsplattformen (Newsbereich, Up- und Downloadbereiche, Bildergalerie, Iddenpool usw.) eingerichtet und während der Projektdauer betrieben und gewartet.

Durch die geleisteten Arbeiten sind die Rahmenbedingungen für einen dauerhaften Fortbestand des Netzwerks geschaffen. Dies kann durch die fortgeführte Anwendung der übergebenen Methodik erreicht werden. Anzumerken ist jedoch, dass aufgrund der geänderten Rahmenbedingungen auf eine Kooperation mit anderen, über längere Zeiträume hinaus finanzierten Netzwerkaktivitäten (klima:aktiv PM bio:gas) gesetzt werden muss. Es ergibt keinen Sinn, zwei Aktivitäten mit sehr ähnlichen bzw. überschneidenden Zielen nebeneinander zu betreiben. Weiters wird der dauerhafte Fortbestand von einer andauernden Belegung der Aktivitäten entsprechend den vorliegenden strategischen Zielen und Maßnahmen abhängen, was direkt an eine weitere Finanzierung gekoppelt sein wird, die bereits während des Projekts und auch nach Projektende zu erreichen versucht wurde.

Ein weiterer Schwerpunkt der Projekts Best Biogas Practise war das „Biogas – Monitoring und Benchmarking“.

„Lernen von den Besten“ ist hier das Schlagwort. Die Herausforderung war es einerseits, die Performance von bestehenden, im Betrieb befindlichen Anlagen zu ermitteln, diese auf Kennzahlen umzulegen und Aussagen zu treffen, die den derzeitigen und zukünftigen Betreibern einen möglichst optimalen Betrieb von Biogasanlagen ermöglichen. Dabei lag der Fokus auf Anlagen, die Nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) als Substat verwenden.

Im ersten Schritt wurde dazu eine umfassende Sammlung von Parametern, die den Betrieb einer Biogasanlage beeinflussen, analysiert. Dabei wurden Parameter beginnend vom Pflanzenbau, über die Biogasanlage selbst bis hin zur Verwertung des erzeugten Biogases in Kooperation mit dem Projekt „Gütesiegel Ökogas“ (IFA Tulln als Werkvertragnehmer) durchgeführt. Hier wurden mehr als 200 Parameter (exclusive Sozio-ökonomischer Betrachtungen, die mit im Fokus des Projekts „Gütesiegel Ökogas“ stehen) ermittelt. Diese Parameter wurden in einem international besetzten zweitägigen Workshop vorgestellt und daraus die eine Biogasanlage charakterisierenden Parameter ausgewählt. Die Anzahl der charakterisierenden Parameter war mit 64 Parametern eine noch relative hohe, aber überschaubare Anzahl von Parametern.

Aus diesen charakterisierenden Parametern wurden in weiterer Folge eine Reihe von Kennzahlen abgeleitet und beschrieben. Dabei wurde zwischen Monitoring und Tiefenmonitoring unterschieden, wobei beim Tiefenmonitoring auf Fermentationsparameter insbesondere auf die Zusammensetzung des Gärsubstrats bzw. einzelne darin vorkommende Verbindungen bzw. Verbindungsklassen als Summenparameter geachtet wurde.

Es wurden im Rahmen der Kennzahlenentwicklung insgesamt 37 Kennzahlen ermittelt und beschrieben. Diese Kennzahlen wurden den Teilbereichen „Biologische Effizienz“, „Energetische Effizienz“ und „Ökonomische Effizienz“ zugeordnet. Unter der Voraussetzung, unterschiedliche Biogasanlagen zu betrachten, zu vergleichen und Empfehlungen und Richtlinien daraus zu entwickeln, war es nötig, Kennzahlen auszuwählen, die weitgehend unabhängig von Anlagen-Größen und teilweise -typen sind.

Es erfolgte die Vorauswahl von 18 Kennzahlen, die anschließend hinsichtlich Verständlichkeit für den jetzigen bzw. zukünftigen Biogasanlagenbetreiber – also dem Anwender –, der möglichen Messung, der Robustheit und der Eindeutigkeit von einem unabhängigen Biogasexperten evaluiert und mit Kommentaren versehen wurden.

Entsprechend dieser wurde eine Endauswahl von insgesamt 13 Kennzahlen hinsichtlich der folgenden Einteilung getroffen:

a) Biologische Kennzahlen

- Biogasproduktivität Q_B
- Hydraulische Verweilzeit HRT
- Raumbelastung BR
- oTS-Abbaugrad $\sigma_{TS, Abbau}$
- Heizwert des Biogases H_U beziehungsweise CH_4 -Gehalt

b) Energetische Kennzahlen

- Ausnutzung BHKW η_{BHKW} bzw. Volllaststunden BHKW
- Elektrischer Jahresnutzungsgrad der BGA η_{el}
- Thermischer Jahresnutzungsgrad der BGA η_{therm}
- Gesamtjahresnutzungsgrad der BGA η_{ges}

c) Ökonomische Kennzahlen

- Investitionssumme bez. auf elektrische Nennleistung
- Substratkosten bez. auf elektrische Jahresarbeit
- Betriebskosten bez. auf elektrische Jahresarbeit
- Stromgestehungskosten

Diese Kennzahlen erlauben einen weitgehend unabhängigen Vergleich unterschiedlicher Biogasanlagen, wenngleich angemerkt werden muss, dass Detailbeurteilungen auch entsprechend der Benchmarking Philosophie für jede einzelne Anlage für sich getätigt werden müssen, und das Benchmark als Indikator gesehen werden sollte, der Aussagen über mögliche Schwachstellen bzw. Optimierungspotenziale zulässt.

Auf Basis der charakterisierenden Parameter und der Kennzahlenentwicklung wurde ein on-line Tool erstellt, das auf der Homepage des Österreichischen Biogasnetzwerks zugänglich ist. Um der Seriosität und Vertraulichkeit der Informationen Rechnung zu tragen, wurde eine Anmeldeprozedur eingeführt, bei der die Vergabe von Accounts erfolgt. Da dieses Tool von der Benutzung lebt, kann der Benutzer entsprechend dem Eingabeaufwand, den er tragen will, zwischen 4 Ebenen wählen, die immer weiter in die Tiefe gehen. Es sollte jeder Benutzer entsprechend seiner Auswahl die eigene Biogasanlage eingeben und anschließend seine Anlage im Vergleich zu den anderen betrachten. Anschließend können die im Vergleich sich ergebenden, interessierenden Anlagen betrachtet werden. Dies passiert jetzt zu Beginn, anhand der 12 ebenfalls im Benchmarking Tool eingegebenen Anlagen und in weiterer Zukunft durch andere anonym eingegebene Anlagen.

Aus der Analyse von insgesamt 41 Anlagen, deren Daten entsprechend der Kooperationsvereinbarung mit IFA-Tulln zur Verfügung standen, und der Detailanalyse der beschriebenen 12 Anlagen wurden „Best Biogas Practice“ Richtlinien und Empfehlungen entwickelt.

Dieser Vorschlag der „Best Biogas Practice“ Richtlinien und Empfehlungen sind ein für die Zielgruppe verständlicher, umsetzbarer Leitfaden. Sie enthalten eine Liste der für eine Charakterisierung einer Biogasanlage relevanten Kennzahlen, die darin kurz erläutert, die Einflüsse auf den Prozess dargestellt und eine Messmethodik vorgeschlagen ist. Weiters sind Richtwerte bzw. Richtbereiche vorgeschlagen, die für einen optimalen Betrieb einer Biogasanlage im Regelfall repräsentativ sind. Dennoch wird es immer wieder Anlagen geben, die aufgrund spezieller Gegebenheiten aus diesem Bewertungsschema fallen.

Das Hauptaugenmerk wurde darauf gelegt, einerseits für bestehende Anlagenbetreiber umsetzbar zu sein, aber auch für zukünftige Anlagenerrichter und -betreiber Richtwerte bzw. Richtbereiche anzugeben, die einen von Beginn an stabilen und effizienten Betrieb gewährleisten.

Zusätzlich sind in diesen Richtlinien und Empfehlungen für diese Kennzahlen Werte von mehr als 30 derzeit in Betrieb stehenden Anlagen angegeben sowie 12 ausgewählte Anlagen, die inklusive der Fermentationsparameter betrachtet wurden.

Bei Erfüllung dieser Richtwerte bzw. Empfehlungen kann, wenn gewünscht, ein Qualitätszeichen verliehen werden, das auf Grund der umfassenden Betrachtungen aus Literatur und Realdaten für einen nachhaltigen Betrieb dieser Anlage indiziert.

Wie in der Kooperationsvereinbarung mit dem Projekt „Gütesiegel Ökogas“ (IFA-Tulln), in dem ebenfalls Vorschläge für ein weiteres Bewertungssystem erarbeitet werden, wird nach Vorliegen dieses weiteren Bewertungssystem, ein auf einander abgestimmter gemeinsamer Standard veröffentlicht.

Summary

“The Austrian Biogas Network” is a network of the major national stakeholders of the Biogas related industry, research and use and is within Austria the central

- *contact point*
- *representative*
- *lobbyist*
- *supplier for data and facts*
- *promoter*
- *established and accepted representation of interests*

that the potential of two gigawatts of renewable energy can be utilized in Austria.”

...and...

„The Austrian Biogas Network“ supports its partners within the field of biogas and the corresponding surroundings in terms of the creation of a framework ensuring the sustainable viability. The same wording, joint aims, strategies and activities contribute to these objectives.

... are the vision and mission of the Austrian Biogas Network, developed within this project.

The Austrian Biogas Network has been developed using state of the art methods and instruments for the formation of (company) networks.

Essential parts have been the network building and network development orientated on the needs and wants of future network members. This task was carried out with the help of a core group, consisting of representatives of the value added system biogas.

The above vision and mission was developed within several workshops together with this core group, as well as strategic aims and objectives for the Austrian Biogas Network. Parts of these developed objectives have already been implemented during the project, others have been formulated, in order to fulfill the envisaged mid and long term goals.

The strategic mid- and long term goals and objectives are within the following areas:

Research and development

Within the area of research and development, the aims of the Austrian Biogas Network are to reach a high degree of transparency about the Austrian research and development field in this area, with special respect to competencies, projects, activities, results from research and development as well as future directions of the research institutions.

Additionally the Austrian Biogas Network shall be able to point out actual and relevant research topics and shall be a platform for the cooperation and coordination of actual and future research and development work carried out, as well as keeping contact to international institutions and networks within this sector.

Actions carried out have been the set up of a database containing more than 50 research projects of the past three years. Another action was the development of a concept, and implementation of a competence database as a software tool on the homepage of the Austrian Biogas Network. This tool improves and contributes to the above mentioned transparency.

Attractiveness of the network

In order to be an attractive network, it has to be clearly positioned and established within the area of biogas in Austria. Transparency about all the players and their activities shall be given as well as the contact to other relevant national and international biogas activities.

The previously described tool for recording and evaluating the competence profiles is able for the description and use of all the network members. For this reason profiles have been worked out describing all the relevant categories including indicators for viewing and analyzing the competencies of the network members of all interest groups within the value added system of biogas.

Lobbying

The network shall be the platform for cooperation within biogas, the Austrian voice of biogas within international activities, shall make an important contribution to a future, national uniform procedure of approval for future biogas plants, shall promote a pro-biogas spirit and shall carry out political lobbying. In addition the network shall have established contacts to press and shall be the central contact point for biogas related informations.

Within this area, considering the contents and the scope of the project no political lobbying has been carried out. Nevertheless, within the public relation work an attractive homepage and logo was set up acting as communication platform, beneficial to the pro-biogas spirit in the public, by providing information and news. Additionally an internationally visited conference was organized including renowned national and international speakers. This event provides also one base for the cooperation of players within the value added system biogas.

In terms of a changing framework outside the project, cooperation meetings have been arranged with newly started activities following similar or partly identical objectives.

Transfer of information and knowledge

The mid and long term goal of the Austrian Biogas Network within this sector is the set up of a framework for efficient exchange of information, knowledge and experience. Within this objective, the homepage set up is one contribution in reaching the goal. The homepage www.oebn.at contains different possibilities of communication. The news area, online discussion forum, a pool of ideas or the possibility of creating reports of experience are examples of different possibilities for communication.

Additionally events, workshops and presentation have been organized, where the network has been presented to the public as organizer as well as service provider.

The homepage of the Austrian Biogas Network has a high amount of implemented functionality. For example a variety of communication platforms have been set up and maintained during the

project duration: tools for the creation of transparency (competence profiles, research and development database) information platforms (news-area, up- and down-load areas, picture gallery, pool of ideas).

By the described work the framework for an ongoing network was created. This can be maintained by applying and following the created methods, strategies and objectives. Nevertheless it is important to remark, that due to the changed framework of the environment a cooperation with longer financed networking activities (klima:aktiv PM bio:gas) is necessary. There is no sense to carry out two similar activities in parallel having quite similar, respectively cross cutting, goals. In addition the sustainable continuation of the network is also dependent of a continuous vitalization according the strategic aims and objectives as set out before. This is also related to an ongoing financing, where activities have been carried out during and after the project.

Another focus of the project "Best Biogas Practise" was the Biogas monitoring and benchmarking.

Learning from the best – was the key word. The challenge was on the one hand the measurement of the performance of existing and running biogas plants, put this into key values and create benchmarks in order to assist current and future biogas plant planners and operators in carrying out an efficient operation of their plants. The focus was set on plants, using renewable resources as substrate.

Within a first step, a collection of parameters has been carried out, reflecting the operation of a biogas plant. Within this task parameters have been evaluated beginning from cultivation of plants, the biogas plant up to the use of the Biogas. This work has been carried out in cooperation with the Project "Gütesiegel Ökogas" (IFA Tulln as subcontractor). More than 200 parameters (exclusively the socio-economic parameters, also dealing the Gütesiegel Ökogas project) have been found.

These parameters have been presented and discussed in workshop of two days duration, with international experts. 64 parameters have been evaluated as the characterizing parameters of a biogas plant.

Out of these parameters a variety of key values have been calculated and described. Within these key values there has been made a difference between "monitoring!" and "monitoring in depth". At the "monitoring in depth" special attention was paid to single parameters like chemical substances or sums of substance groups being important during the fermentation.

During the development of the key values a total of 37 key values have been determined and described. All these key values have been linked to one of the following areas: "Biological Efficiency", "Energy Efficiency" and "Economical Efficiency".

Considering the evaluation of different biogas plants it was necessary to choose key values as independent as possible from plant sizes and types.

After extracting 18 key values, these values have been investigated against comprehensibility for existing and future biogas plant operators (the user of the results of the project), possibility of measurement, robustness and clearness, also by an independent biogas expert.

Corresponding to this assessment a final set of a total of 13 key values have been found according the following areas:

a) Biological key-values

- biogas productivity Q_B
- hydraulic retention time HRT
- organic volume load BR
- degree of organic dry matter degradation $\sigma_{TS_{degr}}$
- heat value of biogas H_u (or CH_4 content of biogas)

b) Energetic key-values:

- full load hours of gas engine
- electrical yearly utilisation degree of the biogas plant η_{el}
- thermal yearly utilisation degree of the biogas plant η_{therm}
- total yearly utilisation degree of the biogas plant η_{ges}

c) Economic key-values:

- investment costs referred to nominal electric power
- substrate costs ref. to electric work per year
- operating costs ref. to electric work per year
- electricity emerging costs per kWh_{el}

These key values allow an nearly independent comparison of different biogas plants, although it shall be noted, that detailed assessments according the benchmark philosophy for each plant has to be done separately, but the key-value indicates a benchmark where weak points can be found or where potential for optimization can be found.

On the base of the characterizing parameters and the development and assessment of the key values, an on-line benchmarking tool was set up, accessible on the homepage of the Austrian Biogas Network. In order to ensure seriosity and confidentiality of the information given, a registration procedure was created, where an account name and an login including password is defined. The tool is living from the usage, meaning the range of data shall increase. For this reason four areas of benchmarking depth are given. The user can choose between these areas with increasing amount of information to put in and given back by the key-values. After entering the parameters the user can compare his key values with other plants – a benchmarking procedure. Currently there are 12 plants within the tool, increasing with the number of user entering data. Afterwards the user can also look up in the anonymous base data of the other biogas plants, in order to get knowledge about the design, substrates,... of these.

Out of the analysis of a total of 41 investigated biogas plants (data have been accessible anonymously according to the cooperation agreement with IFA Tulln) and the detailed analysis

of 12 biogas plants (out of these 41) the Best Biogas Practise Benchmarks and recommendations have been developed.

This suggestion of the Best Biogas Practise Benchmarks and recommendations are a for the target group comprehensible, realizable guide. A list is included in order to characterize a biogas plant using relevant key-values. These values are explained, the influences on the processes are explained and a measurement technique is suggested. Additionally Benchmark values or benchmark ranges are given, regularly indicating an efficient and optimum operation of a biogas plant. Nevertheless there always will be an outlier, in terms of a not fitting biogas plant due to special conditions.

The main focus was set to have an applicable handbook for existing and future plant planners and operators, including benchmarks promoting a stable and efficient operation.

Additionally within these benchmarks and recommendations, there are the key values of 30 currently operation biogas plants, as well as 12 selected plants also showing and considering the fermentation parameters. If wanted, biogas plants fulfilling these parameters can be labeled in terms of indicating an efficient and sustainable operation of the biogas plant.

As stated in the cooperation agreement with the "Gütesiegel Ökogas" project (IFA-Tulln), where also suggestions for a benchmarking system are worked out, both suggestions will be harmonized in order to publish only one standard.

1. Ziele des Projekts

Die beiden **Hauptziele** waren:

- Bildung eines österreichweiten Netzwerks der am Wertschöpfungssystem „Biogas“ beteiligten Akteure. Das in diesem Projekt aufgebaute Österreichische Biogasnetzwerk soll die zentrale Anlaufstelle für Biogas betreffende Fragen und Aktivitäten sein. Dies wird einerseits durch die Einbindung aller im Wertschöpfungssystem Biogas beteiligten Akteure, der bestehenden Arbeitsgemeinschaften, Subnetzwerke, Interessensvertretungen, öffentlichen Stellen und Forschungseinrichtungen gewährleistet. Andererseits ist der Aufbau des Biogasnetzwerks Österreich mit professionellen, dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechenden Methoden ein weiterer Garant für den dauerhaften Bestand dieses Netzwerks.
- Entwicklung und Etablierung von Richtlinien für den „Best Biogas Practice“-Standard mit besonderem Augenmerk auf Energiepflanzen. Diese Richtlinien enthalten Benchmarks (Kenndaten) aus dem durchgeführten Biogasanlagen Monitoring und gewährleisten den aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht optimalen Betrieb von Biogasanlagen. Das „Best Biogas Practice“-Qualitätszeichen kann vom Auftraggeber, oder einer von ihm benannten Stelle an Biogasanlagen verliehen werden, welche die in diesem Projekt erarbeiteten Empfehlungen und Richtlinien beachten und umsetzen.

Diese beiden Ziele tragen wesentlich zu einer kontinuierlichen Steigerung der Effizienz der nachhaltigen Energieproduktion am Sektor Biogas bei, in dem einerseits alle im System „Biogas“ Beteiligten an den Stand der Technik herangeführt werden und gleichzeitig das Gesamtniveau des „Wertschöpfungssystems Biogas“ gehoben wird.

In Anbetracht des am 1.1.2003 in Kraft getretenen Ökostromgesetzes, welches eine deutliche Steigerung der Neuerrichtung von Biogasanlagen mit dem Rohstoff Energiepflanze verursacht hat, leistet sowohl das gebildete Biogasnetzwerk Österreich, als auch der zu etablierende „Best Biogas Practice“ Standard einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Nutzung von Energiepflanzen in Biogasanlagen.

Im Folgenden werden jene Inhalte und Ergebnisse beschrieben, die den Projektteil Monitoring und Benchmarking betreffen.

2. Inhalte und Ergebnisse des Projektteils Monitoring und Benchmarking

2.1 Einleitung Monitoring und Benchmarking

2.1.1 Begriffsdefinition und Begriffsinhalte

Der Begriff "Monitoring" ist in vielen Bereichen vertreten. Unter „Monitoring“ fasst man alle Arten der Erfassung von Zuständen, eines Vorgangs oder Prozesses mittels technischer Hilfsmittel oder anderer Beobachtungssysteme zusammen. Mit welchen Hilfssystemen diese erfasst und dokumentiert werden, ist abhängig von der Art der darzustellenden Parameter. Diese können direkt messbaren Werten, subjektiven Wahrnehmungen oder anderen Arten der Visualisierung und Greifbarmachung eines Prozesses entsprechen.

Ein Vorteil eines Monitoringsystems liegt darin, dass angezeigt wird, wann Eingriffe in den Prozess erfolgen sollen, sofern sich abzeichnet, dass dieser nicht gewünschten Verlauf nimmt.

Monitoring ist ein Überbegriff und steht im Deutschen für drei Begriffsinhalte: **Beobachtung**, d.h. die Erfassung eines Zustandes, **Überwachung**, d.h. die verschärfte, besondere Beobachtung eines potentiell bzw. tatsächlich gefährlichen Objektes oder Sachverhalts, und **Kontrolle**, also ein Vergleich von Ist- und Soll-Zustand (*Wikipedia, 16.06.2005*).

2.1.2 Monitoring von Biogasanlagen

Die Definition von "Monitoring" reicht im Biogasbereich von einer Überwachung durch den Menschen bis zu komplexen, ausgereiften Beobachtungs-, Überwachungs-, und Kontrollsystemen. Dabei werden Bereiche überwacht und auf eventuelle Störungen, bzw. Abweichungen vom Soll-Wert-Bereich des Prozesses aufmerksam gemacht oder durch einen direkten Eingriff ins System korrigiert.

Ziele des Monitorings von Biogasanlagen können in folgenden Punkten fokussiert werden und heben auch den Zweck und Nutzen des Monitorings hervor:

- Optimaler Betrieb aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht (technisches, ökonomisches und ökologisches Monitoring)
- Laufende Betriebskontrolle
- Kontinuierliche Qualitätssicherung
- Feedback an den Betreiber: stellt dar, wo er im Vergleich zu anderen Biogasanlagen liegt.
- Direkte Rückkopplung an den Betreiber, Förderstelle und Anlagenplanung
- Anbieten einer Hilfestellung für den Biogasanlagenbetreiber
- Lernen über den Betrieb an Hand von greifbaren bzw. messbaren Größen
- Sicherstellung nachvollziehbarer Daten

- Öffentlich zugängliche Daten und Ergebnisse für die nächste Biogasgeneration
- Zufriedene Biogasanlagenbetreiber und gut funktionierende Anlagen

(in Anlehnung an die Diskussion des Biogas-Experten-Round-Tables der NOEST am 13. Juli 2004, Graz)

Durch die Aufnahme eines zeitlichen Verlaufs, also das Monitoring von Kenndaten, wird die Erstellung von Prognosen bzw. die Beurteilung der Ist-Situation unterstützt und dadurch ein präventives Eingreifen ermöglicht.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass Monitoring von Biogasanlagen sich nicht nur auf Einzelanlagen beziehen muss. Es fällt auch die Erfassung bzw. Durchführung eines Biogasanlagenvergleichs unter diesen Begriff. Auch die Erhebung, wo in Österreich welche BGA steht, ist „Monitoring“.

Zur besseren Abgrenzung werden die folgenden Begriffe unterschieden:

Betriebsmonitoring bezeichnet die Erfassung der Daten, die zur Beschreibung des Betriebes der Anlage nötig sind. Darunter sind nicht nur messbare, sondern auch beschreibende Parameter zusammengefasst, um ein Bild vom allgemeinen Status der Anlage zu geben.

Der Begriff **Tiefenmonitoring** der Biogasanlagen beschreibt die Erhebung von Parametern, z.B. einzelne Abläufe im Fermenter detailliert erfassbar zu machen. D.h. es wird die Erfassung und Analyse z.B. der Fermentationsdaten abgehandelt. Diese werden regelmäßig erhoben, um die derzeitigen Vorgänge im oft als „Black-Box-System“ betrachteten Fermenter transparenter und greifbar zu machen.

2.1.3 Benchmarking

Benchmarking ist ein relativ junges Managementwerkzeug, welches sich aus der Praxis heraus entwickelt hat. Als "Erfinder" des unternehmerischen Benchmarking gilt die amerikanische Firma Xerox, die in den Siebzigerjahren feststellen musste, dass japanische Konkurrenten Kopierer zu einem Preis anbieten konnten, der unter den Produktionskosten bei Xerox lag (Siebert u. Kempf 1998a, S. 9ff). Bis zu diesem Zeitpunkt hatte Xerox die quasi Monopolstellung auf dem Kopiererweltmarkt inne. Anfangs wurde vermutet, dass die Konkurrenz den Verkaufspreis unter dem Herstellerpreis angesetzt habe, um Marktanteile zu gewinnen. Doch Xerox-Ingenieure erbrachten den Beweis, dass die Konkurrenz effizienter arbeitete, und sich daraus der deutlich niedrigere Verkaufspreis ergab. Xerox startete ein rigoroses Benchmarking-Programm, indem sie ihre Arbeitsabläufe mit denen der Konkurrenz verglich. Die daraus gewonnenen Ergebnisse wurden von Xerox adaptiert. Diese Methode verhalf dem Unternehmen innerhalb kurzer Zeit, die Einzelfertigungskosten um die Hälfte und die Lagerkosten um 60 Prozent zu reduzieren. Der so erzielte Verkaufspreis hatte zur Konsequenz, dass Xerox seinen Anteil am Kopierermarkt wieder deutlich erhöhen konnte (Patterson 1996, S 20). Benchmarking ist heute bei Xerox ein ganzheitlicher Ansatz, der alle Funktionen und Prozesse umfasst und somit in das gesamte Unternehmen mit allen Bereichen eingebunden ist (Grunwald 1995, S146).

Betriebe können immer von anderen lernen. Ungeachtet aus welcher Branche und welchem Bereich die Information kommt (*Patterson 1996, S. 18*).

2.1.4 Begriffsdefinitionen rund um das Benchmarking

Siebert u. Kempf definieren in „Benchmarking: Leitfaden für die Praxis“ den Begriff Benchmarking wie folgt: „*Benchmarking ist der methodische Vergleich von Prozessen und Produkten mit, mittels Benchmarks als besser identifizierten, Vergleichspartnern. Die Vergleichspartner werden anhand von Ähnlichkeiten in der eigenen oder in anderen Organisationen gefunden. Ziel des Benchmarking ist es, die eigenen Prozesse und Produkte durch das Vorbild des Vergleichspartners entscheidend zu verbessern (Siebert u. Kempf 1998c, S. 17).*“

Für „individuelle“ Interpretationen des Begriffs „Benchmarking“ bietet Michael Spendolinis Benchmarking-Menü, welches Spendolini aus empirischen Erhebungen von unzähligen existierenden Definitionen entwickelte, die Möglichkeit, individuelle Definitionen zusammenzustellen. (*Spendolini 1992, S.11, Exhibit 1-1*).

Ursprünglich stammt das Wort „Benchmarking“ aus der Landvermessung, die ein Erkennungszeichen, welches auf einem Felsen, Gebäude oder an einer Mauer angebracht wurde, als Benchmark bezeichnete. In diesem Zusammenhang dienten die Benchmarks als Referenzpunkte für die Ermittlung der derzeitigen Position oder Höhe in topographischen Begutachtungen und Gezeitenbeobachtungen. Ein Benchmark ist also ursprünglich gesehen ein „Referenzpunkt“, von dem aus Messungen gemacht werden oder ein Standard, gegen den andere messen können (*Bogan u. English 1994, S. 3*).

Begriffe, die in der folgenden Arbeit immer wieder verwendet werden, sind unter Angabe der entsprechenden Literatur wie folgt definiert:

Ein **Benchmark** ist eine Bezugsgröße und Vergleichsstandard, der zeigt, welche Leistung bei einem Untersuchungsobjekt erreichbar ist. Benchmarks ermöglichen den kriteriengebundenen Vergleich, um vom "Besten" zu lernen (*Töpfer 1997, S. 3*).

„Ein Benchmark ist also ein Zeichen für etwas Messbares, ein Wert, an dem andere gemessen werden können“ (*Patterson 1996, S. 13*).

Das **Benchmarkingobjekt** ist der Gegenstand des Benchmarking. Die Einteilung erfolgt dabei in Produkte, Prozesse und Strategien.

Als **Benchmarkingelement** bezeichnet man jenen Bereich, Prozess, etc. des Benchmarking-Objekts, der im Fokus des Benchmarking steht.

Partner sind zwei Parteien, die Teilhaber oder Kollegen sind und in enger Zusammenarbeit auf Basis von gemeinsamen Rechten und Verantwortlichkeiten zueinander stehen (*Hopf 1996, S. 6*).

Eine **Benchmarkinglücke** („Benchmarking Gap“) stellt den Leistungsunterschied dar, der durch den Vergleich der Benchmarks der Benchmarking Partner aufgezeigt wird.

Als „**Best Practice**“ bezeichnet man, wenn ein Unternehmen, Prozess oder Methode in einem Teilbereich oder in der Gesamtheit, unter Einbeziehung der Beurteilung nach verschiedenen Gesichtspunkten (Ökonomie, Praxisnähe, Verfügbarkeit, Ökologie, etc.), außerordentlich gute Resultate erzielt und ein mustergültiges und praxisnahes Vorbild ist.

Mittels Benchmarking ist es möglich, die „Best Practice“ zu erheben. Um eine Abgrenzung zur „Best Available Technology“ (BAT), der besten erhältlichen Technologie zu schaffen, ist anzumerken, dass die BAT nicht erprobt oder wirtschaftlich tragbar sein muss (Hopf 1996, S. 5).

Eine hervorragende Prozessleistung innerhalb einer Industrie wird als **Best-in-Class**, also als Klassenbester, bezeichnet (Hopf 1996, S. 5).

2.1.5 Aufgaben, Ziele und Ergebnisse von Benchmarking

(Patterson 1996, S. 9–16; Spendolini 1992, S.23–28)

In Spendolinis „The benchmarking book“ wird die Frage „Wieso Benchmarking verwenden?“ mittels einer Abbildung (siehe Abbildung 1) sehr geradlinig verdeutlicht.

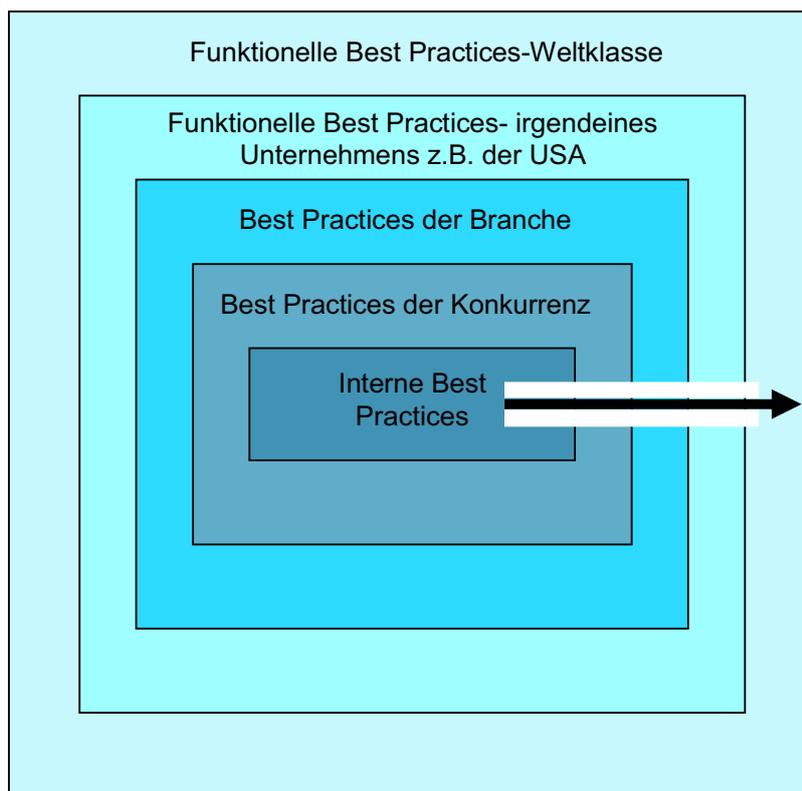


Abbildung 1: Thinking "out of the box" (Spendolini 1992, S. 23)

Die innere Box ist durch die eigene Erfahrung definiert. Man hat für sich gelernt, was es benötigt, um in der eigenen Box erfolgreich zu sein, und nun könnte man bequem in dieser kleinen Box verbleiben. Oder man wagt es, einen Blick nach draußen zu werfen, um zu sehen, was die Konkurrenz macht. Man kann nicht nur von der Konkurrenz lernen, man kann von allen lernen.

Deshalb sollte man sich an die Idee gewöhnen, einen Blick aus unserer "sicheren kleinen Box" zu werfen. Jede dieser Boxen repräsentiert einen unterschiedlichen Vergleich, wobei nach außen hin die Weiterentwicklung erfolgt, die einen immer größeren Optimierungsfortschritt bringt. Meist wird Benchmarking zum Erkennen der besten organisatorischen Methoden angewendet. Eine weitere Verwendung findet Benchmarking in der Nutzung zur Erkennung von Leistungspotentialen zur Performanceverbesserung. Dabei wird erfasst, über welchen Know-how-Pool die Konkurrenz verfügt, und wie rasch dieser erweitert wird.

Hauptaufgabe des Benchmarking ist es, die in der Praxis besten implementierten und angewandten Methoden zu identifizieren, zu durchleuchten und auf die eigenen Bedürfnisse abgestimmt umzusetzen. Weiters werden dadurch Stärken und Schwächen transparent gemacht, Kundenbedürfnisse ermittelt und bestmöglichst befriedigt. Benchmarking hilft, den Focus auf nachhaltige Verbesserungen zu richten, reale Ziele zu erkennen und bietet eine Möglichkeit, Qualität und effektivere Arbeitsabläufe sicherzustellen. Im Idealfall führt Benchmarking zu einer ständigen Verbesserung der gebenchmarkten Elemente durch entsprechende Änderungen mittels Adaptierung der Benchmarking-Ergebnisse.

Als Beispiele für Bereiche, welche typischerweise Verbesserungspotentiale aufweisen, werden folgende genannt:

- Strategische Planung bzw. Erarbeitung und Weiterentwicklung von Strategien wird unterstützt
- Prognosenerstellung (z.B.: hinsichtlich Marktentwicklung, Potentiale, Strategien anderer Wettbewerber, Marktveränderungen voraussehen, etc.)
- Quelle für neue kreative Ideen und Bewusstseins-schaffung von Potentialen
- Vergleich von Produkten und Prozessen
- Etablierung von Leistungszielen im Zusammenhang zum Stand der Technik

2.1.6 Schlüsselfragen zum Benchmarkingprozess

Abbildung 2 zeigt die Schlüsselfragen, die sich zum Benchmarkingprozess ergeben.

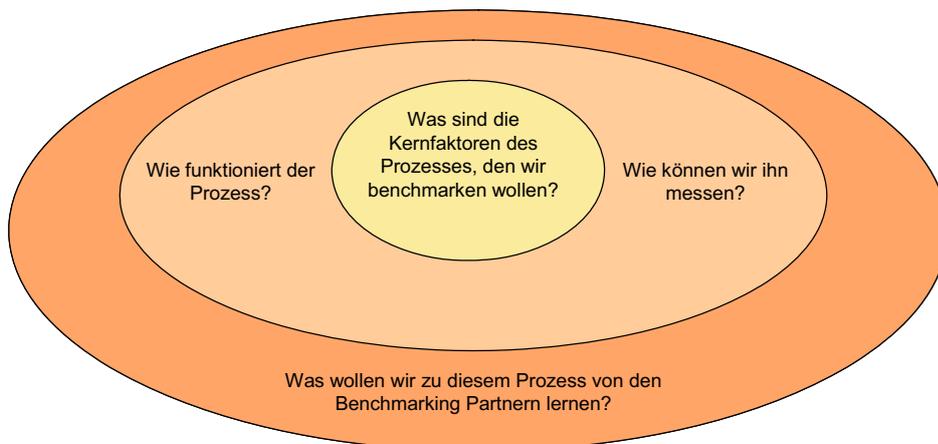


Abbildung 2: „Schlüsselfragen zum Benchmarkingprozess“ (Egger 1996, Vortragsunterlagen)

Die in Abbildung 2 dargestellten Schlüsselfragen werden zu Beginn des Benchmarking-Prozesses beantwortet. In weiterer Folge ist die Beantwortung und Umsetzung der aus diesen Fragen gewonnenen Erkenntnisse Voraussetzung für den erfolgreichen Ablauf eines Benchmarking-Projekts.

2.1.7 Was kann alles gebenchmarkt werden?

Grundsätzlich alles, was beobachtet oder gemessen werden kann, kann auch „gebenchmarkt“ werden. Die hier dargestellten Kategorien repräsentieren die begehrtesten Bereiche, die von Unternehmen im Zuge von Benchmarkingvorgängen betrachtet werden (Spendolini 1992, S. 28–31):

- Produkte und Dienstleistungen
- Arbeitsabläufe
- Unterstützende Funktionen (Finanzen, Humankapital, ...)
- Organisatorische Leistung (Kosten, Einnahmen, Produktionsindikatoren, Qualitätsindikatoren)
- Strategie (Short-term und Long-term Planung, der Planungsprozess selbst)

2.1.8 Die spezifischen Arten von Benchmarking-Definition, Ziele, Vorteile, Nachteile

Auf Grund der unterschiedlichen Art und Größe der Unternehmen, die Benchmarking durchführen, aber auch wegen der verschiedenen dabei beabsichtigten Zwecke, haben sich spezifische Arten von Benchmarking herauskristallisiert. Die Benchmarking-Typen werden in der Literatur unterschiedlich angegeben. Es lassen sich aber alle Einteilungen bezogen auf die Vergleichspartner auf die drei Basistypen internes, wettbewerbs-orientiertes und funktionales Benchmarking zurückführen.

Tabelle 1: „Benchmarking-Grundtypen – Definitionen und Ziele“ – Erstellung angelehnt an (Spendolini 1992, S.17)

Art	Definition	Ziele
Internes Benchmarking (innerhalb eines Unternehmens)	Ähnliche Tätigkeiten in verschiedenen Abteilungen, Standorten, Betriebseinheiten, etc.	Transparenz innerhalb des Unternehmens, Ausschöpfen und Erheben der internen Erfolgsfaktoren und Know-hows Motivation der Mitarbeiter
Wettbewerbsorientiertes Benchmarking	Direkte Konkurrenten, die an den gleichen Kundenstamm verkaufen.	Erkennen von Spitzenleistungen Informationsaustausch, um schwerpunktmäßig „Best Practices“ zu untersuchen
Funktionales Benchmarking (mit Branchenexternen)	Organisationen, welche über Produkte/ Dienstleistungen/ Prozesse verfügen, die als Standard-Technik anerkannt sind.	Von Organisationen zu lernen, die ähnliche Prozesse, die verbessert werden sollen, als Kernprozesse ausführen und folglich dort weiter entwickelt sind. Externes Benchmarking mit geringerem Vertraulichkeitsproblem, da hier keine direkte Konkurrenz besteht.

Tabelle 2: „Benchmarking-Grundtypen – Vorteile und Nachteile“ (Eversheim, Schuh, 1996)

Art	Vorteile	Nachteile
Internes Benchmarking (innerhalb eines Unternehmens)	Datenerfassung relativ einfach, gute Ergebnisse für diversifizierte, „herausragende“ Unternehmen	Begrenzter Blickwinkel, interne Vorurteile
Wettbewerbsorientiertes Benchmarking	Geschäftsrelevante Informationen Produkte/ Prozesse vergleichbar Relativ hohe Akzeptanz Eindeutige Positionierung im Wettbewerb	Schwierige Datenerfassung Gefahr branchenorientierter Nachahmung
Funktionales Benchmarking (mit Branchenexternen)	Relativ hohes Potential zum Finden innovativer Lösungen, Vergrößerung des Ideenspektrums	Relativ schwierige Transformation in das betriebliche Umfeld Gegenargument: Vergleichbarkeit, zeitaufwendige Analyse

Tabelle 2 stellt die Vor- und Nachteile der Benchmarking-Grundtypen gegenüber.

Die in Tabelle 1 und Tabelle 2 unterschiedenen spezifischen Arten von Benchmarking verwenden als Hauptunterscheidungskriterium, in welcher Beziehung die Benchmarkingpartner zueinander stehen.

Bei Schwerpunktlegung auf das Benchmarkingobjekt kann man Benchmarking nach folgenden Typen unterscheiden (Bogan, English 1994, S.7–8):

- **Strategisches Benchmarking:** Benchmarkingobjekte sind strategische Planungen und Ziele des Unternehmens.
- **Prozess-Benchmarking:** Herstellungsprozesse und Arbeitsabläufe liegen im Zentrum der Betrachtung.
- **Produkt-Benchmarking:** Produkte und Dienstleistungen werden verglichen.

2.1.9 Die Stufen des Benchmarking-Prozesses

Der prinzipielle Ablauf der unternehmerischen Benchmarkingprozesse folgt grundsätzlich dem in der Abbildung 3 dargestellten Modell. Die Detailabläufe werden jedoch zu meist auf die spezifischen Bedürfnisse der Unternehmungen abgestimmt. (So können z.B. dargestellte Stufen zusammengefasst, aber auch in mehrere Stufen geilt werden) (Spendolini 1992, S.4650)

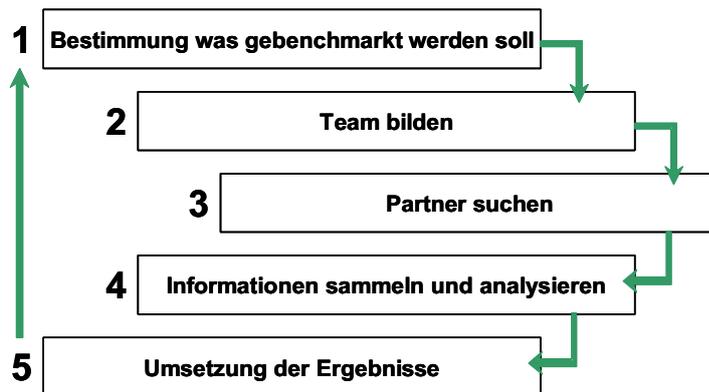


Abbildung 3: Stufen des Benchmarking-Prozesses (Spendolini 1992, S. 48)

Es werden stets vor dem Start des Benchmarking-Programms die zu erreichenden Ziele definiert. Dabei wird Klarheit darüber geschaffen, wieso man das Benchmarking durchführt und welche Abläufe man um wie viel verbessern will (Patterson 1996, S. 18). Dies wird auch in Abbildung 2 "Schlüsselfragen des Benchmarking" (Kapitel 2.1.6) durch die erste Frage "Was wollen wir zu diesem Prozess von unseren Benchmarking-Partnern lernen?" deutlich.

2.1.9.1 Bestimmung, was „gebenchmarkt“ werden soll

Im ersten Schritt werden die Zielgruppen der zu gewinnenden Benchmarking-Information und deren Bedürfnisse identifiziert. Dann werden die den Benchmarking-Elementen entsprechenden spezifischen Bereiche festgelegt. Dabei sollte man beim Benchmarking von Biogasanlagen folgende Kriterien berücksichtigen (Patterson 1996, S. 58):

1. Jenes mit dem größten Anteil an fixen und variablen Kosten
2. Alle Faktoren, die Qualität, Kosten und Durchlaufzeit beeinflussen
3. Wo liegt der größte Raum für Veränderungen?
4. Verbesserungspotentiale
5. Faktoren des Betriebserfolgs

Stehen die Benchmarking-Elemente und die Bedürfnisse der Zielgruppen fest, werden die benötigten Ressourcen (z.B. Zeit, Personen) identifiziert und gesichert, um die Benchmarking-Erhebung erfolgreich durchzuführen.

2.1.9.2 Teambildung

Obwohl Benchmarking von Einzelpersonen durchgeführt werden kann, sind die meisten Aufgaben, die sich bei einem Benchmarking-Projekt ergeben, Teamaktivitäten. Die Auswahl, Ausrichtung und das Management des Benchmarking-Teams, entspricht dem zweiten Hauptschritt im Benchmarking-Prozess. Den Team-Mitgliedern werden dabei unterschiedliche Aufgaben und Verantwortlichkeiten zugeteilt. Um abzusichern, dass die Zuweisungen jedem Projektbeteiligten klar sind und die wichtigsten Meilensteine identifiziert sind, werden entsprechende Projektmanagement-Werkzeuge eingesetzt.

2.1.9.3 Partnersuche

Im dritten Schritt wird die Identifikation der Informationsquellen, die zur Sammlung der Benchmarking-Information herangezogen werden, durchgeführt. Hier inkludiert sind auch Angestellte von Benchmarking-Organisationen, Berater, Analysten, Regierungsquellen, Geschäfts- und Handelsliteratur, Industriereporte und Datenbanken, um einige Informationsquellen zu nennen. In der dritten Stufe ebenfalls inkludiert ist die Identifikation der "Best Practice" der Industrie und Organisation.

2.1.9.4 Informationssammlung und Analyse

Im vierten Schritt werden spezifische Informations-Sammlungsmethoden ausgewählt. Die Benchmarking-Partner werden kontaktiert und es erfolgt die Erhebung der Daten nach einem festgelegten Protokoll. Die so erhaltenen Informationen werden für die Auswertung aufbereitet und zusammengefasst. In Abstimmung mit den Zielgruppenbedürfnissen erfolgt die Auswertungen der erhobenen Daten, mit anschließender Erstellung der Empfehlungen für die Umsetzung.

2.1.9.5 Umsetzung der Ergebnisse

Die Durchführung der letzten und fünften Stufe wird vor allem von den Zielgruppenbedürfnissen und dem ursprünglich vorgesehenen Gebrauch der Benchmarking-Ergebnisse geleitet. Die Umsetzung kann in Form eines Berichts oder einer Präsentation der Empfehlungen bis hin zur tatsächlichen Umsetzung mittels Veränderungen im oder am Prozess erfolgen. Weiters werden noch folgende Schritte identifiziert, in denen die Überprüfung der Ergebnisse und die Weiterführung des Benchmarking-Prozesses eingeschlossen sind (Spendolini 1992, S .48–49).

2.1.10 Schwierigkeiten und Fehler beim Benchmarking

(Spendolini 1992, S.33; Egger 1996, Vortragsunterlagen; Patterson 1996, S. 33, S.56, S.73–76)

Die nachstehend aufgelisteten Punkte betreffen nicht nur Schwierigkeiten und Fehler, sondern beinhalten auch Lösungsvorschläge und Tipps für die am häufigsten auftretenden Problemstellungen.

- Es ist ein Fehler zu glauben, Benchmarking ist ein einmaliger Event. Wie schon die Struktur des Benchmarking-Prozesses (Kapitel 2.1.9) zeigt, ist Benchmarking ein kontinuierlicher Vorgang.
- Ein weiterer zu vermeidender Irrglaube ist, dass Benchmarking selbst leicht und einfach sei, sowie einfache und klare Ergebnisse liefert. Es ist mehr als nur „Kopieren und Nachmachen“. Die Ergebnisse müssen tiefgehend analysiert und adaptiert werden.
- Stehen nicht genug Ressourcen, egal welcher Art, zur Verfügung, kann und wird sich dies negativ auf die Benchmarking-Ergebnisse auswirken. Dies kann durch eine ausgiebige Planungsphase vermieden werden, in der auch mögliche Widerstände und Hindernisse des Benchmarking-Projekts ermittelt werden, um ein Entgegenwirken zu ermöglichen.
- Hinderlich auf den Benchmarking-Prozess wirkt die Angst vor Transparenz, „eingefahrene Gleise“, fehlende Neugier und die Methode, neue Krisen mit alten Konzepten zu lösen. Um

sich zu verbessern und konkurrenzfähig zu bleiben, ist Offenheit für neue Ideen unumgänglich. Die Ablehnung, sich gute Ideen von anderen zu borgen, und Angst davor, anderen seine Schwächen preiszugeben, wirkt negativ auf den Benchmarking-Prozess.

- Sind die eigenen Abläufe nicht bekannt, so kann das durch Benchmarking Gelernte nicht adaptiert werden.
- Ein Überspringen der Hierarchiefolge (z.B. verursacht durch die Zusammenarbeit mit einer „Unterabteilung“ des Benchmarking-Partners, ohne die Erlaubnis des obersten Managements) kann Misstrauen des Benchmarking-Partners gegenüber dem Projekt hervorrufen.
- Mangelnde Unterstützung durch die Führungsebene: Es ist sicherzustellen, dass die Interessensgruppen den Prozess von Anfang an unterstützen und am Ball bleiben. Wichtig ist dabei, dass die Durchführung auf breite Akzeptanz gestellt wird. Es ist wesentlich, dass auch das Top-Management vom Benchmarking überzeugt ist.
- Auswahl der falschen Personen bei der Zusammenstellung des Benchmarking-Teams: Ideal ist, dass die Teammitglieder im Benchmarking-Element involviert sind, denn Experten aus der Praxis wissen aus erster Hand Bescheid. Um jedoch garantieren zu können, dass alle Interessensgruppen, wie im vorhergehenden Punkt schon erwähnt, am Ball bleiben, muss eine Grundmotivation und Überzeugung vom Projekt vorhanden sein. Jemanden zu zwingen bzw. überreden, am Benchmarking teilzunehmen, macht wenig Sinn.
- Zu viele Personen im Team erschweren die Kommunikation unter den Teammitgliedern. Ideal sind 6–8 Personen pro Team. Je nach Umfang und Art des Projekts ist es auch möglich, dass eine Einzelperson Benchmarking durchführt und/oder die Anzahl der Personen im Team von der Idealanzahl anderweitig abweicht. Bei einem zu großen Team können gravierende Leistungsunterschiede zwischen den einzelnen Teammitgliedern auftauchen und damit Spannungen innerhalb des Teams kreieren.
- Zu breit gestreute Themen werden in Angriff genommen: es ist wichtig dass die Auswahl der Benchmarking-Objekte bzw. -Elemente spezifisch erfolgt, sonst besteht die Gefahr, dass das Projekt nicht mehr zu bewältigen ist.
- Zu viele Daten werden erhoben: bei einer Menge von unnötigen Daten, verliert man leicht die Übersicht, es gilt daher das KISS-Prinzip („Keep It Smart and Simple“)
- Auswahl der falschen Benchmarking-Partner: Dieses Risiko kann durch ein gewissenhaftes Erarbeiten der Ziele, Anforderungen an die Partner etc. im Vorfeld des Projekts und eine wohlüberlegte Auswahl der Partner deutlich reduziert werden. Einer der schwerwiegendsten Fehler ist, wenn vor der Auswahl der Benchmarking-Partner die Ziele nicht oder nur mangelhaft festgelegt wurden.
- Jede Information, die man durch Benchmarking erhalten hat, muss vertraulich behandelt werden. Eine Veröffentlichung dieser kommt nur mit schriftlicher Erlaubnis der Partner in Frage.
- Änderungen, die aus Benchmarking-Ergebnissen resultieren, werden auf Grund mangelnder Nachbereitung und Weiterverfolgung nach dem Benchmarking-Projekt nicht identifiziert.

2.2 Ziele von Biogas Monitoring und Benchmarking

Die Anwendung von Monitoring und Benchmarking im Biogasbereich trägt wesentlich zu einer kontinuierlichen Steigerung der Effizienz der nachhaltigen Energieproduktion am Sektor Biogas bei, indem einerseits alle im System „Biogas“ Beteiligten an den Stand der Technik herangeführt werden und gleichzeitig das Gesamtniveau des „Wertschöpfungssystems Biogas“ gehoben wird.

Basierend auf den österreichweit erhobenen Daten aus Biogasanlagen erfolgt ein Vergleich mit Referenzanlagen auf den optimalen Betrieb. Dieser Vergleich ermöglicht es, anhand von verschiedenen Parametern die Optimierungspotentiale in den einzelnen Anlagen zu finden. So erfolgt eine Unterstützung des kontinuierlichen Lernprozesses zur Verbesserung des Betriebes und des Verständnisses der Prozesse der eigenen Anlagen. Durch den Vergleich mittels Benchmarking ergeben sich die effizientesten Lösungen in den Teilbereichen, welche angepasst und auf die eigene Anlage zugeschnitten umgesetzt werden können.

Durch die kontinuierliche Anpassung an die „optimalen Betriebsparameter“, die ebenfalls durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess optimiert werden, erfolgt eine ständige Hebung der Qualität des Biogasanlagenbetriebs und damit der Produktions-effizienz.

2.3 Methodik des Biogas Monitoring und Benchmarking

2.3.1 Benchmarking von Biogasanlagen – Phasen der Durchführung

Die im Kapitel 2.1.9 identifizierten Phasen des Benchmarking-Prozesses werden in diesem Kapitel hinsichtlich der methodischen Vorgangsweise beim Benchmarking von Biogasanlagen ausgeführt. Auf die wichtigsten Punkte des Benchmarking-Prozesses rund um Biogasanlagen wird in den nachfolgenden Kapiteln im Detail eingegangen.

2.3.2 Beantwortung der Schlüsselfragen

Die Beantwortung der schon in der Abbildung im Kapitel 2.1.6 dargestellten „Schlüsselfragen zum Benchmarkingprozess“ steht zu Beginn des Benchmarking-Projekts.

Ziel ist der möglichst optimale Betrieb der Biogasanlagen der beteiligten Benchmarking-Partner. Zudem soll die Frage „Wo befindet sich meine Anlage im Vergleich zu anderen (verschiedene Teilbereiche betreffend: biologische Effizienz, energetische Effizienz, ökonomische Effizienz)?“ beantwortet werden. Zusätzlich zu diesen Erkenntnissen, die zur Verbesserung des Betriebs der Anlage erhoben werden, wird die eigene Anlage genau „durchleuchtet“ und Informationen zu kritischen erfolgsrelevanten Prozessen ermittelt. Wichtig, um Benchmarking durchzuführen, ist die Identifizierung genau dieser kritischen Prozesse, Erfolgsfaktoren (Kennzahlen, an denen man den Erfolg der Anlage messen kann), und welche Messungen man durchführt, um diese Informationen zu erhalten.

Zielsetzung des „Biogas Benchmarking und Monitoring“ ist es, trotz ausgereifter Technologie eine Steigerung in Effizienz und Wirtschaftlichkeit durch Aufzeigen der Benchmarking-Gaps zu erreichen. Ohne eine Überwachung des Gesamtprozesses und der Teilprozesse fällt es schwer,

eventuell auftretende Störfälle zu erkennen. Dies kann die Biogasausbeute gravierend dezimieren und sogar bis zu einem Stillstand der Anlage führen. Wird das Potential der Anlage nur gering ausgeschöpft, wirkt sich dies, über einen längeren Zeitraum, gravierend auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage aus. Ein attraktiver Einspeisetarif alleine ist somit kein Garant für den ökonomischen Erfolg einer Anlage.

Der Biogasprozess ist in einzelne Teilbereiche mit den unterschiedlichsten Einflussfaktoren einzuteilen, woraus auch unterschiedliche Mess- und Bewertungsmethoden resultieren. Von der Art der Betrachtungsweise, d.h. den Gesichtspunkten der Art der Bewertung, sind folgende Punkte zu unterscheiden:

- Technisches Monitoring und Benchmarking
- Betrachtung energetische und ökonomische Effizienz
- Ökologische Bewertung
- Sozioökonomische Bewertung

Dieses Benchmarking-Projekt beinhaltet eine technische, energetische und ökonomische Betrachtung. Die Bewertung des Gesamtprozesses bzw. der Teilprozesse erfolgt durch die Erhebung bereichsspezifischer Parameter. Der Vergleich erfolgt über die Parameter direkt oder daraus entwickelte Kennzahlen. Diese Daten sind die Benchmarks des Biogasprozesses.

Die wichtigsten Einflussgrößen lassen sich über die identifizierten Störquellen (Kapitel 2.7.1) definieren. Wichtige Kenngrößen wurden in unterschiedlichen Veranstaltungen zu diesem Thema (Biogas-Experten Round Table, Minisymposium Sept. 2004 in Tulln und Benchmarking-Workshops von Biogasexperten) identifiziert und diskutiert. Diese Kenngrößen geben einen Einblick und ermöglichen eine Bewertung über die technische Ausführung der Anlage, die eingesetzten Substrate, den mikrobiologischen Prozess, den biogasseitigen Bereich der Anlage und die Gärgutqualität und -verwertung. Berücksichtigt wurden Input, Produkte, Produktionsprozesse und die technische Ausstattung der Biogasanlage. Abbildung 4 gibt dazu einen Überblick über einen Auszug der zu unterscheidenden Teilbereiche und Einflussfaktoren.

Bei der Einteilung hinsichtlich des Benchmarking-Objekts (siehe Kapitel 2.1.8) fällt dieses Benchmarking-Projekt in die Bereiche Prozess- und Produkt-Benchmarking.

Bezogen auf die Vergleichspartner (siehe Tabelle 1, Kapitel 2.1.8), handelt es sich um wettbewerbsorientiertes Benchmarking. Es werden Spitzenleistungen erkannt und der folgende Informationsaustausch dient schwerpunktmäßig dazu, „Best Practices“ zu untersuchen. Der Wettbewerb unter den BGA-Betreibern ist jedoch dadurch entschärft, dass keine direkte kommerzielle Konkurrenz besteht. Dies ist durch die Tatsache begründet, dass für die Energieversorger die Verpflichtung besteht, das Endprodukt „Ökostrom“ derzeit zu geregelten Bedingungen abzunehmen. Aus diesem Grund ist das Benchmarking von Biogasanlagen als „alternatives“ Wettbewerbs-Benchmarking zu betrachten (Patterson 1996, S.42).

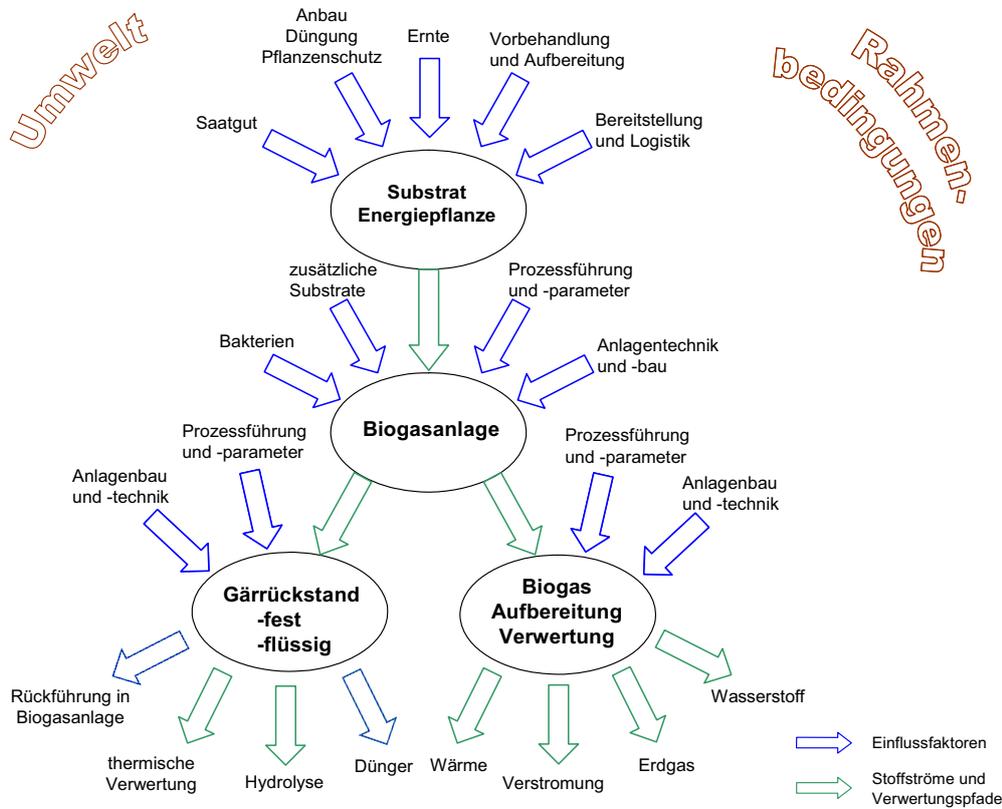


Abbildung 4: „Teilbereiche, Einflussfaktoren, Stoffströme und Verwertungspfade im System Biogas aus Energiepflanzen“

2.3.3 Bestimmung, was „gebenchmarkt“ werden soll

Die Zielgruppe der Ergebnisse aus diesem Benchmarking-Projekt sind primär die Benchmarking-Partner innerhalb der Gruppe der Biogasanlagenbetreiber, jedoch auch alle anderen Teilnehmer der Wertschöpfungskette „Biogas“.

Die identifizierten Benchmarking-Elemente müssen klar und eindeutig abgegrenzt werden. Unter Einbeziehung der Ziele und Zielgruppe ist diese in Abbildung 5 als hellblau hinterlegter Bereich dargestellt. Bei der Beurteilung der Qualität und Effizienz der Biogasanlage wurde auf diesem Wege eine klar definierte Abgrenzung getroffen. Bei der Menge der zu erhebenden Parameter ist eine derartige „örtliche“ Begrenzung empfehlenswert. Es ist klar, dass außerhalb dieser örtlichen Begrenzung (z.B. Fruchtfolge, Erntezeitpunkt, etc.) liegende Einflüsse nicht zu unterschätzen sind. Doch eine zu große Datenmenge geht zu Lasten der Transparenz und ist deshalb zu vermeiden. Neben dem Produktionsprozess von Biogas wird die Nutzung von Biogas durch Kraft-Wärme-Kopplung miteinbezogen, da diese Art der Verwertung derzeit praktisch überall eingesetzt wird und eine relativ leicht zugängliche Größe darstellt. Abbildung 5 zeigt die Prozesskette des Biogas-Benchmarking im Detail. Ausschlaggebend ist, wie viel Strom und somit Geld der Betreiber aus der Einspeisung von diesem erhält. Aus Idealismus alleine und zur Deckung des energetischen Eigenbedarfs baut und betreibt niemand eine Biogasanlage.

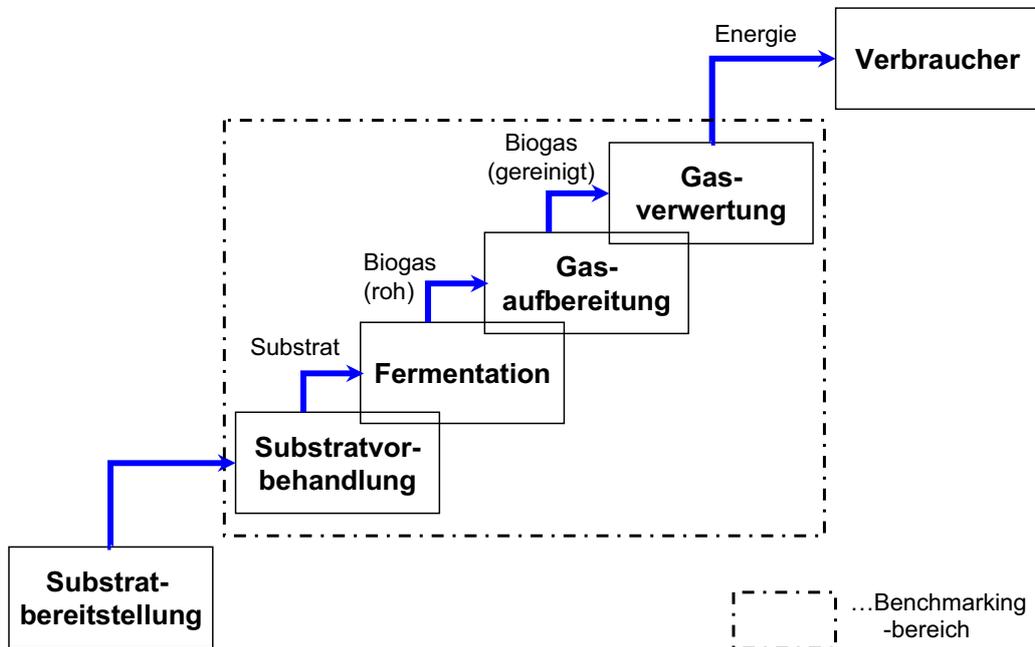


Abbildung 5: „Abgrenzung des Benchmarkingbereichs“

Um Doppelgleisigkeiten zu vermeiden und die Ressourcen optimal zu nutzen, sei an dieser Stelle auf die auch bereits in der Einleitung erwähnten Projekte im Rahmen der Programmlinie Energiesysteme der Zukunft verwiesen.

Im Zuge des Projekts „Gütesiegel Ökogas“, mit dem Best Biogas Practise im Bereich der Definition und Auswahl der eine Biogasanlage charakterisierenden Parameter und bei der Datenerhebung kooperiert hat, sollen zur Leistungsbeschreibung von Biogasanlagen geeignete, objektivierende Vergleichs- u. Beurteilungsparameter (Bewertungssystem) definiert werden. Bestehende und geplante Biogasanlagen sollen anhand festzulegender Kenndaten beurteilt und Maßnahmen zur Prozessoptimierung vorgeschlagen werden. Zur Standardisierung wird ein Gütesiegel Ökogas eingeführt. Die erzielten Ergebnisse und Erfahrungen aus erfolgreichen Praxisanlagen („Best Practice“) sollen bestmöglich verbreitet werden. Dadurch sollen häufig zu Beginn einer Technologieentwicklung bzw. -praxisumsetzung auftretende Fehlentwicklungen bzw. Fehlinvestitionen vermieden werden.

Als Grundlage hierfür müssen zunächst alle über entsprechende Biogasanlagen bestehenden bzw. aus verschiedenen Quellen erudierbaren Informationen zusammengeführt und strukturiert ausgewertet werden. Dabei werden alle Teilschritte in der Herstellungskette von Biogas aus Energiepflanzen von der Landwirtschaft über die biotechnologische Verfahrenstechnik bis zur Biogasverwertung betrachtet.

(Quelle: www.energiesystemederzukunft.at)

Unter anderem liegt ein weiterer Focus des Projekts „Gütesiegel Ökogas“ auf der sozio-ökonomischen Bewertung in und rund um Biogasanlagen, das in Best Biogas Practise nicht abgedeckt ist.

In einem weiteren Projekt der Programmlinie EdZ, dem Projekt „Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem“ werden verschiedene Sorten der Energiepflanzen Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen, Triticale in Landessortenversuchen angebaut, zu jeweils fünf verschiedenen Zeitpunkten im Verlaufe der Vegetation geerntet und als Silage konserviert. Der Stoff- und Energiewechsel während der Vergärung der Silagen wird im Labor basierend auf DIN 38414 gemessen. Aus den Untersuchungen lassen sich die wesentlichen Einflüsse auf die Methanbildung und die Biogasqualität ableiten: Sorte, Erntezeitpunkt, Nährstoffzusammensetzung, Vorbehandlung und Tonmineralzusatz. Das neue Methanenergiewertsystem wird für Sonnenblumen, Wiesengras, Weizen und Triticale entwickelt. Es berechnet das Methanbildungsvermögen der Energiepflanzen anhand ihrer Inhaltsstoffe. Die Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter kann durch die „Futterzusammensetzung“ optimiert werden – ähnlich wie dies bereits seit Jahren in der Wiederkäuerfütterung geschieht. Eine Berechnung der Leistung von Biogasanlagen in Abhängigkeit von Art, Menge und Qualität der verfügbaren Energiepflanzen wird möglich. Methanhektarerträge von Fruchtfolgen können standortspezifisch kalkuliert werden.

Aus den Ergebnissen werden Leitfäden für die optimale Biogaserzeugung aus Energiepflanzen erarbeitet und in die Praxis verbreitet. Sie behandeln folgende Themen:

- Anbau, Ernte, Konservierung, Aufbereitung und Bereitstellung qualitativ hochwertiger Biomasse von Energiepflanzen für die anaerobe Vergärung in Biogasanlagen
- Bedarfsgerechte „Fütterung“ des Fermenters für einen sicheren Verlauf der Methangärung mit hohem Methanertrag
- Möglichkeiten der Biogasnutzung und Anforderungen der verschiedenen Techniken (Aufbereitung, Verstromung in stationären Blockheizkraftwerken und Brennstoffzellen, Mikrogasturbinen, Anwendung in mobilen Motoren, Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz). Die Machbarkeit, Voraussetzungen und Umweltwirkungen der verschiedenen Biogasaufbereitungs- und Energienutzungskonzepte werden anhand von Kosten, Technik und Technikverfügbarkeit dargestellt.
- Effiziente kulturspezifische Düngung mit dem Gärrückstand vergorener Energiepflanzen zum weitgehenden Schließen von Stoff- und Energiekreisläufen.

(Quelle: www.energiesystemederzukunft.at)

Im Projekt „Bewertungstool für die regionale Akzeptanz von Biogasanlagen sowie Eignung und Verfügbarkeit von Energiepflanzen“, ist das Ziel die Erarbeitung eines Werkzeuges zur Bewertung der regionalen Akzeptanz von Biogasanlagen sowie die Sicherstellung der nachhaltigen regionalen Bedarfsdeckung der Versorgung mit Energiepflanzen als Gärsubstrat. Letzterer Bestandteil beinhaltet die Verfügbarkeit der Energiepflanzen in der ausgewählten Region (ein statischer Faktor, der von den klimatischen Bedingungen und den geographischen Verhältnissen abhängig ist), die Eignung unterschiedlicher Energiepflanzen für den anaeroben Fermentationsprozess (Biogasertrag, notwendige Anlagentechnik, Kosten der Bereitstellung) und schließ-

lich die Akzeptanz von Energiepflanzen in der regionalen Landwirtschaft (ein stark dynamischer Faktor, der regionalen, politischen und gesellschaftlichen Einflüssen unterliegt).

Das Ergebnis ist ein Werkzeug zur Feststellung der Akzeptanz und Bedarfsdeckung einer mit Energiepflanzen betriebenen Biogasanlage in einer bestimmten Region. Es handelt sich dabei um ein Hilfsmittel zur Förderung der Markteinführung solcher Biogasanlagen und richtet sich vor allem an zukünftige Betreiber von derartigen Anlagen sowohl im landwirtschaftlichen als auch im gewerblichen Maßstab. Das Werkzeug wird an einem konkreten bereits initiierten Vorhaben zur Errichtung einer Biogasanlage getestet und das Ergebnis so evaluiert, dass das Werkzeug auf ganz Österreich übertragbar ist.

(Quelle: www.energiesystemederzukunft.at)

2.3.4 Teambildung – Zusammensetzung und Funktionen

Die Auswahl der Mitglieder des Benchmarking-Teams (Abbildung 6) erfolgte zum Teil aus den Mitgliedern und Partnern des Projektteams des vorliegenden Projekts „Best-Biogas (Energiesysteme der Zukunft“-Projektnummer: 807741) als auch dem Projektteam des EdZ-Projekts „Gütesiegel Ökogas“ (Energiesysteme der Zukunft“-Projektnummer: 807742) sowie internationalen Experten im Rahmen eines Workshops im Bereich der Parameter und Kennzahlenentwicklung.

Die Zusammenstellung des Benchmarking-Teams erfolgte nach relevanten wissenschaftlichen und technischen Kompetenzen. D.h. bei der Auswahl des Werkvertragnehmers und Subauftragnehmers wurde neben der fachlichen Qualifikation auch die technische Ausstattung miteinbezogen. Im laufenden Projekt wurden Nutzer- und Interessensgruppen identifiziert und in den einzelnen Phasen aktiv eingebunden. Dies erfolgte durch gezielte Befragungen von Experten und Forschern, aber jedoch auch von BGA-Betreibern.

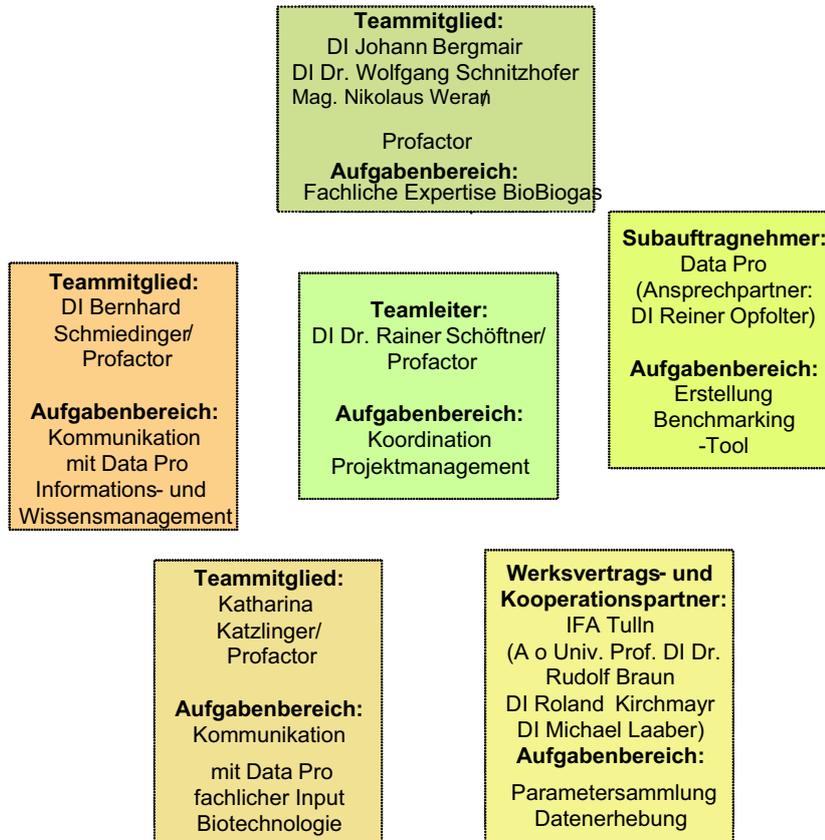


Abbildung 6: „Biogas-Benchmarking-Team“

2.3.5 Partnersuche

Bei diesem Benchmarking-Projekt ist kein Anlagenbetreiber im Kernteam des Benchmarking-Teams. Der Benchmarking-Partner-Pool für das Referenz-Benchmarking wurde nach im vor hinein definierten Kriterien ausgewählt und kontaktiert. Es wurde dabei ein klarer Fokus auf Biogasanlagen mit Einsatz nachwachsender Rohstoffe als Substrat gelegt. Mit Referenz-Benchmarking ist eine repräsentative Auswertung von zwölf ausgesuchten Biogasanlagen gemeint. Es handelt sich dabei um eine österreichweite Benchmarkingstudie, bei der eine repräsentative Selektion von Anlagen durch eine Einteilung in vier verschiedene „Typen“ (Referenzanlagen, Standardanlagen, Up-grade Anlagen, Neuanlagen) und eine gezielte Auswahl von mindestens drei Anlagen eines jeden „Typs“ erfolgte.

Referenzanlagen verfügen über die ausgeprägte technische Ausstattung bzw. zeichnen bereits alle oder einen Großteil der relevanten Parameter auf. Sie sind die Messtechnik und Prozesskontrolle betreffend als „Best Practice“ zu bezeichnen

Standard Anlagen verfügen über eine konventionelle Prozesskontrolle der einzelnen Einflussfaktoren und sind noch nicht bereit oder in der Lage, in die technische Ausstattung zu investieren

Up-grade Anlagen verfügen über eine erweiterte Prozesskontrolle, d.h. ein Teil der Parameter wurde bereits vorher erhoben (entspricht einer konventionellen Prozesskontrolle), aber es erfolgte eine Erweiterung des Prozessmonitorings (z.B.: Einbau eines Gasanalysegerätes). Für diese Anlagenbetreiber war im Projekt Budget vorgesehen, um die Installation zusätzlicher Messeinrichtungen finanziell zu unterstützen. Als Gegenleistung verpflichtet sich der Anlagenbetreiber, am Monitoring und Benchmarking teilzunehmen und Daten zur Verfügung zu stellen.

Neuanlagen sind Anlagen, die innerhalb des Jahres 2005 in Betrieb gegangen sind und über eine mit einer Up-Grade oder Referenzanlage vergleichbare Prozesskontrolle verfügen.

Neben einem repräsentativen Schnitt durch diese Einteilung, wurde auch darauf geachtet, das derzeitig vorhandene Leistungs- und Anlagenspektrum miteinzubeziehen. Es wurden beispielsweise Anlagen mit einer elektrischen Nennleistung zwischen 99 und 500 kW sowie Fermentervolumen von 885 bis 7450 m³ miteinbezogen. Mit den Anlagenbetreibern wurde persönlicher Kontakt durch das Benchmarking-Team aufgenommen. In dieser Phase erfolgte auch eine Literaturrecherche und Identifikation ausgewählter relevanter Informationsquellen.

2.3.6 Vorgehensweise bei der Informationssammlung und Analyse

Grundlage für die eindeutige Identifikation der für eine umfassende Charakterisierung nötigen Parameter ist eine systematische Sammlung der Einflussfaktoren, Stör- und Steuerquellen. Die dabei betrachteten Bereiche sind Substrat (klarer Fokus auf Energiepflanzen), Biogasanlage, Gärückstand sowie Biogasaufbereitung und -verwertung. Im Kapitel 2.3.2 werden unterschiedliche Einflussfaktoren dieser Teilbereiche behandelt. Die Parametersammlung und die Identifizierung der für eine Biogasanlagencharakterisierung relevanten Parameter (siehe Kapitel 2.4) erfolgte vom Benchmarking-Team auf Expertenebene. Es wurden auch so genannte Soft-Facts, die nicht in Zahlen gefasst werden können, in diese Charakterisierung aufgenommen, um diese anschließend in einer Datenbank abzubilden. An Hand einer Analyse und der Bewertung auf internationaler Expertenebene erfolgte die Identifikation der für eine Charakterisierung einer Biogasanlage relevanten Daten. Zeitgleich mit der Erstellung des Benchmarking-Tools (Kapitel 2.9), welches zukünftig zur Datenauswertung verwendet wird, wurden die Daten der charakterisierenden Parameter für das Referenz-Monitoring der vorgesehenen 12 Anlagen erfasst. Die erhobenen Messwerte mussten vor der Eingabe über das Benchmarking-Tool in die Datenbank allerdings analysiert und aufbereitet werden. Das Benchmarking-Tool ist online (www.oebn.at) über das Internet zugänglich, um eine einfache Datenerfassung zusätzlicher Anlagen oder Messungen zu ermöglichen.

Der Vergleich der Kennzahlen und Parameter sollte ursprünglich über das Benchmarking-Tool abgewickelt werden. Durch die größere vorhandene Funktionalität (einfache und schnelle Berechnungsmöglichkeiten) sowie besseren Darstellungsmöglichkeiten wurde Microsoft-Excel für die Auswertungen im vorliegenden Endbericht herangezogen. Die Analyse der Ergebnisse der Benchmarking-Studie wurde wiederum auf Expertenebene durchgeführt. In Workshops und

Diskussionen wurden aus diesen Ergebnissen Empfehlungen zur Verbesserung des Betriebs der Anlagen hinsichtlich Qualität und Effizienz erarbeitet.

2.3.7 Umsetzung und Kontrolle der Ergebnisse

Die Umsetzung der Ergebnisse erfolgt durch der Erstellung von Empfehlungen, welche den Ziel- bzw. Interessensgruppen durch Publizierung auf der Homepage des Österreichischen Biogas Netzwerks (www.oebn.at), durch einen Newsletter und andere Publikationen weitergegeben werden.

In einem Vergleich mehrerer Biogasanlagen mittels ausgewählter Kennzahlen und der erhobenen Fermentationsparameter wurde eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Der zusätzliche, anonymisiert zur Verfügung stehende Datenpool von 28 Biogasanlagen ermöglicht es, die Auswertungen und getätigten Aussagen zu bestätigen oder zu relativieren.

Zusätzlich sollten die charakterisierenden Parameter, die auch zur Berechnung und Entwicklung der Benchmarks herangezogen wurden nach 1–2 Jahren im Benchmarking-Tool analysiert werden, um das Ergebnis von Biogasanlagenbetreibern gesetzter Maßnahmen zu sehen. Bei erfolgreicher Anwendung der Empfehlungen und Richtlinien sowie des Benchmarking-Tools sollte ein genereller Aufwärtstrend in den Kennzahlen beobachtbar sein, bzw. neu errichtete Anlagen besser liegen.

2.4 Identifikation und Bewertung relevanter Parameter

2.4.1 Sammlung und Identifikation der charakteristischen Parameter

Vor der erstellten, sehr umfassenden Parametersammlung wurde ein Schema (Kapitel 2.3.2) generiert, das einen Ausschnitt der Einflüsse auf den Gesamt- und die Teilprozesse darstellt. Es erfolgte eine ausführliche Recherche aller Einflüsse auf die Teilprozesse und die Summe aller Teilprozesse einer Biogasanlage. Im September 2004 wurden vom IFA-Tulln zwei Expertenworkshops zur intensiven Diskussion dieser Einflüsse und der damit verbundenen Identifikation der Parameter abgehalten. An den Workshops nahmen 14 ausgewählte Experten aus den verschiedensten Bereichen (von Biogas über Statistik bis zu Sozioökonomie), die zur Erstellung dieser Parameterliste relevant sind, teil. Die Ergebnisse dieser Workshops wurden am 15. September 2004 im Rahmen eines Minisymposiums präsentiert und bei der Endversion der Parameterliste berücksichtigt.

Auszug aus der Teilnehmerliste der Diskussionsrunde:

Dr. Werner Edelmann, arbi; Dr. Reinhard Madlener, ETH Zürich; Prof. Dr.-Ing. Peter Weiland, FAL; Univ.-Prof. DI Dr Rudolf Braun, IFA-Tulln; DI Roland Kirchmayer, IFA-Tulln; DI Michael Laaber, IFA-Tulln; Dr. Guido A. Reinhardt, IFEU; DI Johann Bergmair, Profactor; DI Dr. Rainer Schöftner, Profactor; Katharina Katzlinger, Profactor; Dr. Arthur Wellinger, NOVA Energie, usw.

Neben der Identifikation der Parameter war eine Strukturierung dieser unbedingt notwendig. Im Folgenden wird die Einteilung und Umfang der Parametersammlung dargestellt.

Allgemein erfolgt eine Unterscheidung zwischen Parametern der technisch funktionellen Anlagenbeschreibung und den messbaren Parametern. Eine systematische Sammlung der Einflussfaktoren war Ausgangspunkt dieser umfangreichen Parametersammlung, die wiederum die Basis für die Auswahl der charakterisierenden Parameter bot.

In die Parametersammlung integriert waren auch sozio-ökonomische Betrachtungen einer Biogasanlage. Diese flossen jedoch nicht in Monitoring und Benchmarking des vorliegenden Projekts „Best Biogas Practise“ ein und werden deshalb im Folgenden nicht mehr explizit berücksichtigt.

2.4.2 Bewertung der charakteristischen Parameter

Die gesammelten Parameter wurden in enger Kooperation mit den Werkvertragspartnern nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft analysiert und bewertet. Diese Bewertung berücksichtigte Ursache und Wirkung jedes einzelnen Parameters und wurde ebenfalls im Zuge der oben genannten dreitägigen Expertentagung im September in Tulln besprochen.

Neben den charakterisierenden, technischen Parametern wurden auch unter den „Soft-Facts“ relevante Parameter identifiziert, die ebenfalls zur Maximierung der wirtschaftlichen und ökologischen Effizienz beitragen, bzw. zur Beschreibung der Anlage dienen. Begleitend dazu wurde für jeden relevanten Parameter die Möglichkeit der Messung bzw. die Art und Weise der Dokumentation (z.B. Messfrequenz) ermittelt und festgelegt. Dabei wurde speziell auf die ökonomische Sinnhaftigkeit der Messung und das Ausmaß der Auswirkung jedes relevanten Parameters geachtet. Den Parametern wurde teilweise ein Sollwert bzw. Optimaler Bereich zugeordnet, der aus dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik bekannt ist. Um die Entscheidung, welcher Messaufwand für das Monitoring und Benchmarking betrieben werden muss, beim Anlagenbetreiber zu belassen, wurden unterschiedliche Monitoring-Ebenen entwickelt.

Neben der Abgrenzung gegenüber einer sozio-ökonomischen wurde auch gegenüber einer ökologischen Bewertung abgegrenzt. Es wurden zwar Daten aufgenommen, die eine Beurteilung der Anlage nach ökologischen Kriterien ermöglichen, aber diese fließen nur indirekt in die Bewertungskriterien ein.

2.5 Einführung von Kennzahlen

Ein allgegenwärtiges Problem im Benchmarking ist die Vergleichbarkeit von Anlagen entgegen bautechnischen und verfahrenstechnischen Unterschieden. Mit dem Einsatz von Kennzahlen zum Vergleich unterschiedlicher Anlagen soll diesem Problem entgegengewirkt werden. Aus dem gezielt erhobenen Parameterpool werden Kennwerte (Benchmarks) abgeleitet. Diese beinhalten einerseits in der Biogastechnologie etablierte Kennzahlen (z.B. hydraulische Verweilzeit, Raumbelastung, Investitionssumme etc.), andererseits werden typische Kennzahlen auf zusätzliche Parameter wie Investitionssumme, Faulraumvolumen, etc. bezogen.

2.6 Datenerfassung und Auswertung

Parallel zur Parameteridentifikation wurde das Benchmarking-Werkzeug erstellt. Dieses Werkzeug bietet für die österreichweit beteiligten Benutzer die Dateneingabe über das Internet, ein aussagekräftiges Präsentationsdesign, und ermöglicht einfaches und effizientes Ablesen der aktuellen Benchmarking-Ergebnisse. Der durchgeführte permanente Biogasanlagenvergleich erfolgt einerseits durch Vergleich von Parametern (z.B. Betriebsparameter, Aufbereitungsparameter etc.), welche nicht nur metrisch sind, andererseits auch durch die im Kapitel 2.7.3 ausführlich beschriebenen für den Betrieb der Anlage aussagekräftigen Kennzahlen. Auf diesem Weg erhalten die Biogasanlagenbetreiber wertvolle Informationen über Betriebsparameter und Richtwerte, sowie mögliche Verbesserungspotentiale durch Ursachenforschung hinter den einzelnen Parametern und Kennzahlen.

Der Vergleich dieser Daten erfolgt basierend auf österreichweit erhobenen Daten von Biogasanlagen. Die Daten für das Referenzmonitoring der zwölf Anlagen wurden nicht über das Online-Tool, sondern durch persönlichen Kontakt und Befragung mit den Anlagenbetreibern, durch den Werkvertragspartner IFA-Tulln erfasst. Dabei erfolgte die Erhebung der einzelnen Prozessgrößen einerseits über spezifische Messungen, die teilweise direkt über Analysegeräte vor Ort oder durch Probennahme und Analysen im IFA-Tulln Labor durchgeführt wurden. Die aufbereiteten Daten wurden anschließend in das Benchmarking-Tool eingegeben. Damit ist gewährleistet, dass die Dateneingabe kontrolliert vor sich geht. Denn die Daten dieser Anlagen wurden auch dazu verwendet, das Benchmarking zu validieren.

Die Nutzer des Tools, die nicht am Referenz-Monitoring teilnehmen, haben über den Online-Zugang via Internet eine bequeme und simple Möglichkeit, Biogas-Monitoring und -Benchmarking durchzuführen. Die Daten konnten dabei vom Nutzer unter Verwendung des erstellten Eingabewerkzeugs online eingegeben werden. Dabei wurde ein Teil der Daten (z.B. verfahrenstechnische Charakteristika) einmalig erhoben, während über die Zeit hin veränderliche Daten kontinuierlich erfasst werden können. Dabei wurden diese nach der Eingabe durch den Anlagenbetreiber auf Plausibilität geprüft, in die Datenbank aufgenommen und bei erfolgreicher Beendigung der Eingabeprozedur als Response sofort ein Vergleich zu den anderen Benchmarkanlagen gegeben. Dieser Vergleich ermöglicht es, anhand von verschiedenen Parametern die Optimierungspotentiale in den einzelnen Anlagen zu finden. Durch die kontinuierliche Anpassung an die „optimalen Betriebsparameter“, die ebenfalls durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess optimiert werden, kann eine ständige Hebung der Qualität des Biogasanlagenbetriebs und damit eine Steigerung der Produktionseffizienz erfolgen.

2.7 Ergebnisse Parametersammlung & Kennzahlenentwicklung

2.7.1 Stör- und Steuerquellen im Prozess

Die Bewusstseins-schaffung für die Stör- und Steuergrößen im Prozess ist ein wesentlicher Schritt in Richtung Potentialerkennung und Potentialnutzung während des Betriebs von Biogasanlagen. Die identifizierten Stör- und Steuerquellen dienen dazu, immer den Umfang der Einflüsse, aber auch der Potentiale, übersichtlich darzustellen und zu verdeutlichen.

Störquellen und Steuerungsmöglichkeiten in der Biogasferzeugung

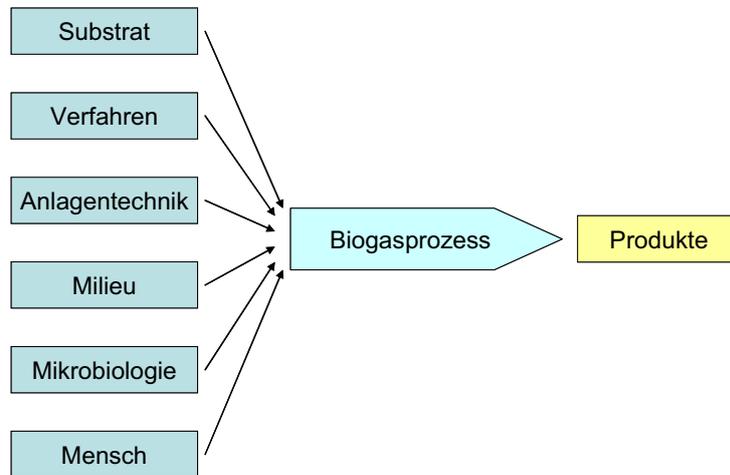


Abbildung 7: Störquellen und Ansatzpunkte für die Steuerung der Biogasferzeugung

In Abbildung 7 ist die Vielfalt der Stör-, aber auch gleichzeitig Steuerquellen beim Betrieb einer Biogasanlage dargestellt.

Das **Substrat** ist ein sehr einflussreicher Faktor. Das eingesetzte Inputmaterial kann eine schlechte Qualität aufweisen z.B. Hemmstoffe beinhalten. Ein weiterer Einfluss ist hier auch die Verfügbarkeit des Substrates, d.h. gibt es Engpässe bei der Substratbereitstellung, können diese durch logistische Maßnahmen überbrückt werden, in Abhängigkeit von bereitgestellter Menge und Logistik, u.v.a.

Die angewendete **Verfahrenstechnik** hat einen großen Einfluss auf die Qualität und die Quantität des Outputs und weist somit auch einen Störquellencharakter auf. Die Verfahrenstechnik sollte vor allem auf das Substrat (Substratart, Substratmenge) abgestimmt sein. Tritt hier eine Störung auf, so ist die Behebung dieser meist mit sehr hohen Kosten und auch einem Stillstand der Anlage verbunden. Eine gründliche Planung der Anlage (des Betriebs, der Substratverfügbarkeit, etc.) ist somit ein Muss vor dem Bau einer Biogasanlage, sowie die Einhaltung der Planungsgrundlagen.

Störungen in der **Steuer- und Anlagentechnik**, z.B. im Überwachungssystem der Biogasanlage, können verheerende Auswirkungen haben (z.B. Ausfall des Rührwerks und Bildung einer Schwimmschicht). Das beim Bau der Anlage eingesetzte Material beeinflusst den Prozess, beispielsweise über die dazugehörige Wärmeleitfähigkeit, Neigung zur Korrosion, Belastbarkeit oder Abnutzung, u.v.a.

Das **Milieu** inkludiert alle Umgebungseinflüsse und Milieubedingungen der BGA von der Außentemperatur bis zur Akzeptanz durch Anrainer.

Ist die **Mikrobiologie** unbalanciert, hat dies gravierende Auswirkungen auf den Biogasprozess. Dies bietet einen guten und kosteneffizienten Ansatzpunkt zur Anlagenoptimierung, da hier nichtbauliche Maßnahmen zu einer Steigerung der Biogasproduktion führen können.

Der **Mensch** kann Störfaktoren frühzeitig erkennen und entschärfen. Durch falsche Handhabung der Anlage (z.B. „Überfütterung“ etc.) kann er jedoch den Biogasprozess auch stören und stellt somit auch selbst eine Stör- bzw. Steuerquelle dar.

2.7.2 Identifikation und Bewertung relevanter Parameter

Wie die Einteilung in Parameter der technisch funktionellen Anlagenbeschreibung und messbaren Parameter erfolgt ist, wird im Folgenden erklärt. Wobei anzumerken ist, dass die Definitionsgrenzen dabei nicht hundertprozentig festzulegen sind. Die Endversion der Parameterliste ist sehr umfangreich, aber sicherlich noch ergänzbar.

2.7.2.1 Technisch funktionelle Anlagenbeschreibung

Diese beinhalten Daten metrischer Natur sowie auch so genannte „Soft Facts“ und beschreiben den technischen als auch funktionelle Teile einer Biogasanlage. Zusätzlich werden hier die Stoffströme nachvollziehbar dargestellt.

Um eine Biogasanlage umfassend zu beschreiben, ist es im ersten Schritt notwendig, eine Sammlung von Daten zu erheben, die sowohl Technik als auch Funktion beschreiben, sowie Stoffströme nachvollziehbar machen. Diese Parameter ändern sich nur signifikant, wenn ein Umbau der Anlage, eine Input-Änderung oder sonstige wesentliche Eingriffe erfolgen.

Die Parameter der technisch funktionellen Anlagenbeschreibung wurden thematisch folgendermaßen kategorisiert:

- Substrat (Art des Substrats, Transport Substrat, Vorbehandlung)
- Biogasanlage (Planung, Bauausführung, Investitionssumme, Substrateinbringung, Fermenterbauweise, Rührwerk- bzw. Mischtechnik, Prozesskontrolle/Sicherheit)
- Gärgut (Gärgutlagerung, Gärgutnutzung)
- Biogasverwertung (Biogasmessung, Biogasspeicher, Biogasaufbereitung, Biogasnutzung im BHKW, Wärmenutzung)

Um die thematische Zuordnung der Parameter in die Teilbereiche (Substrat, Biogasanlage, Gärgut, Biogasverwertung, Sozioökonomisches Umfeld) festzulegen, wurden für jeden Teilbereich Schnittstellen festgelegt. Diese Schnittstellen beschreiben den Beginn und das Ende des jeweiligen Teilbereichs.

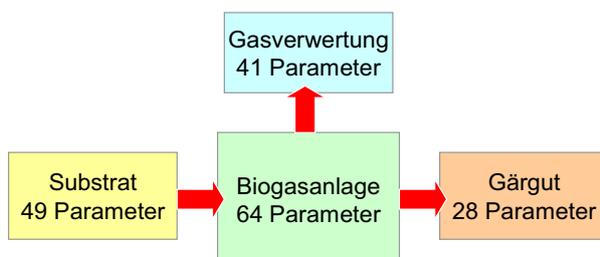


Abbildung 8: Anzahl der identifizierten charakterisierenden Parameter der technisch funktionellen Anlagenbeschreibung

In Abbildung 8 sind die Kategorien der Parameter der technisch funktionellen Anlagenbeschreibung mit der jeweiligen Anzahl der identifizierten Parameter. Insgesamt wurden 196 technisch funktionelle Parameter (ohne jene der sozio-ökonomischen Betrachtung) identifiziert. Die technisch funktionellen Parameter werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch als Grunddaten bezeichnet.

2.7.2.2 Messbare Parameter

Messgrößen zur Charakterisierung des Substrates, des Prozesses, der Fermentation, des Gärrests, sowie des gewonnenen Biogases wurden unter dem Begriff „messbare Parameter“ zusammengefasst. Da der Biogasprozess durch komplexe Teilprozesse beeinflusst wird, schwanken diese Messwerte. Durch aus der Literatur, Erfahrungen und Messungen aus der Vergangenheit bekannte Sollwertbereiche, einer Betrachtung des zeitlichen Verlaufes dieser Messwerte, sowie dem Vergleich der Messwerte und der sich daraus ergebenden Kennzahlen, wird die Basis für ein technisches Monitoring und Benchmarking geschaffen. Dadurch kann auch die Qualität und Effizienz des Betriebs der Anlage beurteilt werden. Die messbaren Parameter wurden thematisch in die folgenden Kategorien unterteilt.

- Substratcharakterisierung je Substrat
- Fermentationsparameter
- Qualität des Gärrests
- Zusammensetzung des Biogases

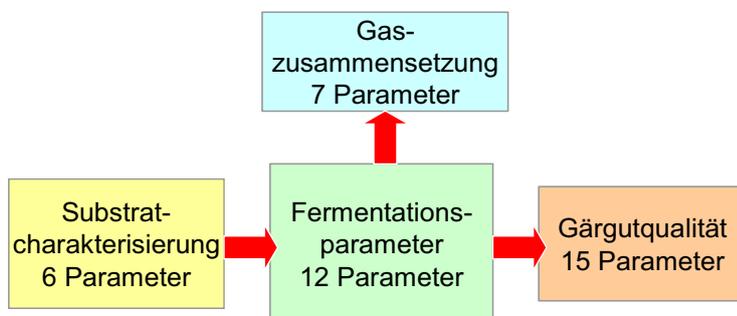


Abbildung 9: Anzahl der identifizierten messbaren Parameter

Abbildung 9 gibt einen zahlenmäßigen Überblick der 40 identifizierten messbaren Parameter.

2.7.3 Einführung von Kennzahlen

Tabelle 3 gibt eine Übersicht der aus den Parametern berechneten Kennzahlen. Zu den einzelnen Kennzahlen sind Kurzbeschreibung, Abkürzung so wie die dazugehörige Einheit dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung dieser Kennzahlen ist in den folgenden Abschnitten (Kapitel 2.7.3.1–2.7.3.4) zu finden.

Tabelle 3: Biogasanlagen-Kennzahlenliste

Kennzahl	Beschreibung	Abkürzung	Einheit
Technisches Monitoring und Benchmarking			
Kennzahlen zur Charakterisierung der Fermentation und Verfahrenstechnik			
Jährliche Substratmenge	Gesamte zugeführte Substratmenge pro Jahr (exkl. Wasser)	Q_0	$t_{\text{Substrat}} \cdot a^{-1}$
Hydraulische Verweilzeit	Täglich zugeführte Substratmenge durch das Faulraumvolumen (inkl. Wasser!)	HRT	$m^3_{\text{FR}} \cdot m^{-3}_{\text{Substrat}} \cdot d$; d
Raumbelastung	täglich zugeführte Menge an oTS pro m^3 Faulraum	BR	$kg_{\text{oTS}} \cdot m^{-3}_{\text{FR}} \cdot d^{-1}$
Jährliche zugeführte oTS-Menge	oTS-Belastung, gesamte zugeführte organische Trockensubstanz pro Jahr	Q_{oTSzu}	$t_{\text{oTS}} \cdot a^{-1}$
C/N-Verhältnis	C:N-Verhältnis im Gärgut	C:N	$g \cdot g^{-1}$
Kennzahlen zur Charakterisierung der Ausbeute			
Jährliche Biogasmenge	Gesamte erzeugte Biogasmenge pro Jahr	Q_{BG}	$Nm^3_{\text{Biogas}} \cdot a^{-1}$
Biogasertrag, Biogasproduktivität, Biogasbildungsrate	Nm^3 Biogas pro Tag und m^3 Faulraum	Q_{B}	$Nm^3_{\text{Biogas}} \cdot m^{-3}_{\text{FR}} \cdot d^{-1}$
oTS Abbaugrad	Verhältnis von im Ablauf enthaltenem OTS zu zugeführtem OTS	oTS_{Abbau}	%
Durchschnittliche Biogausbeute (bezogen auf Input-oTS)	Nm^3 Biogas pro kg zugeführte oTS	y_{B}	$Nm^3_{\text{Biogas}} \cdot kg_{\text{oTS}}^{-1}$
Heizwert des Biogases	durchschnittlicher Heizwert des Biogases	H_u	$kWh \cdot Nm^3_{\text{Biogas}}$
Kennzahlen zur Charakterisierung der energetischen Effizienz			
Brennstoffenergie	Jährlich zugeführte Energiemenge	W_{Brenn}	$kWh \cdot a^{-1}$
Jahresarbeit el. (elektrisch)	Gesamtmenge an erzeugter elektrischer Energie pro Jahr	W_{el}	$kWh_{\text{el}} \cdot a^{-1}$

Tabelle 3: Biogasanlagen-Kennzahlenliste-Fortsetzung

Kennzahl	Beschreibung	Abkürzung	Einheit
Technisches Monitoring und Benchmarking			
Kennzahlen zur Charakterisierung der energetischen Effizienz-Fortsetzung			
Nettostromproduktion	Jahresarbeit elektrisch abzgl. des elektrischen Eigenbedarfs	$W_{elnetto}$	$kWh_{el} \cdot a^{-1}$; kW
Jahresarbeit thermisch	Gesamtmenge an erzeugter Wärmeenergie pro Jahr	$W_{thermetto}$	$kWh_{therm} \cdot a^{-1}$; kW
Wärmenutzung	externe Wärmenutzung (exkl. therm. Eigenbedarf!)	Q_{nutz}	$kWh_{therm} \cdot a^{-1}$; kW
Ausnutzung der elektrischen Energie	Verhältnis der Nettostromproduktion zur elektrischen Jahresarbeit	W_{elnutz}	%
Ausnutzung der thermischen Energie	Verhältnis der Wärmenutzung zur thermischen Jahresarbeit	$W_{thermNUTZ}$	%
Volllaststunden	Volllaststunden des BHKW pro Jahr	TaN	h
Ausnutzung der BHKW	Verhältnis tatsächlich erbrachter durchschnittlicher el. Leistung zu installierter el. Leistung	η_{BHKW}	%; $h \cdot a^{-1}$
Stromeigenbedarf bez. auf die el. Jahresarbeit	Stromeigenbedarf der BGA bezogen auf die el. Jahresarbeit	I_{PE} ; W_{el}	%
el. Jahresnutzungsgrad der BGA	Nettostromproduktion bezogen auf die im Brennstoff enthaltene Energie	η_{el}	%
Therm. Jahresnutzungsgrad der BGA	Wärmenutzung bezogen auf die im Brennstoff enthaltene Energie	η_{therm}	%
Gesamtjahresnutzungsgrad der BGA	Summe el. und therm. Wirkungsgrad (Gesamtausnutzung der im Brennstoff enthaltene Energie)	η_{ges}	%
Kennzahlen zur Charakterisierung der ökonomische Effizienz			
Investitionssumme	Gesamtinvestitionssumme	K_{ges}	€
Investitionssumme bez. (bezogen) auf el. Jahresarbeit	Gesamtinvestitionssumme bezogen auf die Gesamtmenge an erzeugter elektrischer Energie pro Jahr	K_{ges} ; W_{el}	€Cent. kWh_{el}^{-1}
Investitionskosten bez. auf el. Nennleistung	Gesamtinvestitionssumme bez. auf die el. Nennleistung der BGA	K_{ges} ; PN	€.kW $_{el}^{-1}$

Tabelle 3: Biogasanlagen-Kennzahlenliste-Fortsetzung

Kennzahl	Beschreibung	Abkürzung	Einheit
Kennzahlen zur Charakterisierung der ökonomische Effizienz-Fortsetzung			
Investitionssumme bez. auf Fermentervolumen	Gesamtinvestitionssumme bezogen auf das Fermentervolumen	$K_{ges}; V_R$	$€ \cdot m^3_{FR}$
Investitionssumme bez. auf oTS-Belastung	Gesamtinvestitionssumme bezogen auf die jährliche oTS-Belastung	$K_{ges}; Q_{oTSzu}$	$€Cent.kg_{oTS}^{-1} \cdot a$
Substratkosten	jährlicher Gesamtaufwand für Substratbeschaffung	K_S	$€ \cdot a^{-1}$
Substratkosten bez. auf die el. Jahresarbeit	Substratkosten bez. auf die el. Jahresarbeit	$K_S; W_{el}$	$€Cent.kWh_{el}^{-1}$
Betriebskosten	sonstige Betriebskosten (exkl. Substratkosten)	K_B	$€ \cdot a^{-1}$
Betriebskosten bez. auf die el. Jahresarbeit	Betriebskosten bez. auf die el. Jahresarbeit	$K_B; W_{el}$	$€Cent.kWh_{el}^{-1}$
Betriebskosten bez. auf oTS-Belastung	Betriebskosten bezogen auf die jährl. oTS-Belastung	$K_B; Q_{oTSzu}$	$€Cent.kg_{oTS}^{-1}$
Betriebskosten bez. auf abgebaute oTS-Menge	Betriebskosten bezogen auf die tatsächlich abgebaute Substratmenge	$K_B; Q_{oTSzu}^-$ Q_{oTSab}	$€Cent.kg_{oTS}^{-1}$
Stromgestehungskosten	beinhaltet sämtliche Aufwendungen	$K_{W_{el}}$	$€Cent.kWh_{el}^{-1}$
El. Jahresarbeit bez. auf Fermentervolumen	Wieviel kWh_{el} werden pro m^3 Faulraumvolumen erhalten?	$W_{el}; V_R$	$kWh_{el} \cdot m^3_{FR}$
el. Jahresarbeit bez. auf oTS-Belastung	Wieviel kWh_{el} werden pro kg organischer Trockensubstanz erhalten?	$W_{el}; Q_{oTSzu}$	$kWh_{el} \cdot kg_{oTS}^{-1}$

2.7.3.1 Kennzahlen zur Charakterisierung der Fermentation & Verfahrenstechnik

a) **Jährliche Substratmenge; Q_0 ; [$t a^{-1}$; $m^3 a^{-1}$]**

Definition: „Ist die Gesamtmenge an Substrat in Kubikmeter oder Tonnen, die pro Jahr in den Fermenter eingebracht wird.“

Einheit: $t_{Substrat} \cdot a^{-1}$, $m^3_{Substrat} \cdot a^{-1}$

Gängige Abkürzungen und Bezeichnungen: M oder V, zugeführte Substratmenge Q_0

Berechnung: $Q_0 \cdot a^{-1} = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_n) \cdot a^{-1}$, Substratmenge Q_0 [m³] oder [t] pro Jahr ergibt sich aus der Summe der Mengen der über ein Jahr hindurch zugegebenen Einzelsubstrate.

Anmerkungen: Zur Vermeidung einer Überlastung und Temperaturabsenkung in der Zone des Substrateintrages hat die Substratzufuhr gleichmäßig und in kurzen Abständen zu erfolgen. Durch die Installation entsprechender Wiegeeinrichtungen (z.B.: mit Drucksensoren ausgestattete Vorlagebehälter, mit Wiegeeinrichtungen ausgestattete Radlager), wird ein geregelter Feststoffeintrag ermöglicht. Bei pumpfähigem Substrat ist es eine mengenmäßige Erfassung über eine Durchflussmengenmessung möglich. Dabei werden überwiegend induktive und kapazitive Messgeräte, jedoch vereinzelt auch Ultraschall- und Wärmeleitfähigkeitsverfahren eingesetzt.

Zur Volumenbestimmung der zugegebenen Substratmenge ist es auch möglich, das Volumen eines Behälters zu verwenden (z.B. das Fassvermögen einer Radladerladung). Die Umrechnung der Volumen in die entsprechenden Massen (und umgekehrt) ist über die Dichte möglich. Dabei sollte die Dichte jedoch experimentell bestimmt werden. Werte die aus der Literatur herangezogen werden, sind, sofern die exakten Randbedingungen nicht angegeben sind, sehr ungenau. Insbesondere bei Feststoffen (z.B. Maissilage) hängt die Dichte von der Pressung, der Teilchengröße, etc. ab. (Schulz u. Eder 2001, S. 20; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 78)

Richtwerte: Für die jährlich zugegebene Substratmenge selbst gibt es auf Grund der verfahrens-, und leistungstechnischen Unterschiede der Anlagen keinen direkten Richtwert.

Es existieren jedoch Soll- und Grenzwerte bzw. -bereiche, für die andere Kennzahlen gelten, die direkt von Q_0 beeinflusst werden (Raumbelastung, Verweilzeit, etc.).

b) Hydraulische Verweilzeit; HRT; [d]

Definition: „Die hydraulische Verweilzeit ist die Zeitdauer, die ein zugeführtes Substrat im Mittel vom Eintrag bis zu seinem Austrag im Fermenter verbleibt (Kaltschmitt u. Hartmann 2001).“

Einheit: d, m³_{FR} · d · m⁻³_{Substrat}

Gängige Abkürzungen und Bezeichnungen: hydraulische Verweilzeit t_{vi} , HRT (Hydraulic Retention Time), mittlere hydraulische Verweilzeit t_m

Berechnung: $HRT = V_R \cdot Q_0^{-1}$, Reaktorvolumen V_R [m³] im Verhältnis zur zugeführte Substratmenge Q_0 [m³ d⁻¹].

Anmerkungen: Unter dem Fermentervolumen fasst man alle Fermentervolumina zusammen, d.h. es wird die Summe aus Haupt und Nachfermenter verwendet.

Bei der Substratmenge in m³ pro Tag muss das Schüttraumvolumen bzw. das Porenvolumen der Substrate berücksichtigt werden.

Durch die Verkürzung der Verweilzeit des Substrats im Reaktor sind bis zu einer gewissen Raumbelastungsgrenze eine Steigerung der Biogasrate und eine höhere Auslastung der Reaktorkapazität möglich. Es verringert sich dabei jedoch die Biogasausbeute und es treten Ände-

rungen der Zusammensetzung des Biogases zu Lasten des Methangehaltes auf. Dies kann einen erhöhten Reinigungsaufwand und geringeren Energiegehalt mit sich bringen.

Die mittlere hydraulische Verweilzeit hat im Zusammenhang mit der Fermentertemperatur einen großen Einfluss auf den Abbaugrad und den Biogasertrag. Es ist wichtig, die Verweilzeit an die spezifischen Abbaugeschwindigkeiten der eingesetzten Substrate anzupassen. Weiters sollte sie so gewählt sein, dass die Bakterienpopulation durch Ausspülen nicht reduziert wird. Mit fortschreitender mittlerer hydraulischer Verweilzeit wird mehr und mehr Methan freigesetzt und somit der Heizwert des Gasmisches gesteigert (Schulz u. Eder 2001, S. 22; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 29-33).

Richtwerte: Die mittlere hydraulische Verweilzeit des Substratgemisches soll lt. Schulz und Eder mindestens 30 Tage betragen.

Wie zuvor angedeutet, hängt die optimale HRT auch stark von der Prozesstemperatur ab. In Tabelle 4 sind die empfohlenen mittleren hydraulischen Verweilzeiten in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. (Schulz u. Eder 2001, S. 22; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 127).

Zusätzlich besteht eine Abhängigkeit der von der „Zielsetzung“ des Anlagenbetriebs. So wird in einem Extrem ein Abfälle vergärender Betrieb (lukriert vorwiegend Einnahmen aus der Annahme und Verarbeitung von Abfällen) danach trachten, möglichst hohen Durchsatz zu erreichen, d.h. eine geringe Verweilzeit, während ein Betreiber, der die Substrate erwerben muss (z.B. NAWA-RO Anlage), danach trachten wird, das erworbene Substrat möglichst effizient zu nutzen, d.h. eine tendenziell höhere Verweilzeit (auch in Abhängigkeit des Substrates) aufweisen.

Tabelle 4: Verweilzeitbereiche in Abhängigkeit mit der Prozesstemperatur

Prozesstemperatur	Verweilzeitbereiche
20–25 °C	60–80 d
30–35 °C	30–50 d
45–55 °C	15–25 d

c) Raumbelastung; B_R ; [$\text{kg}_{\text{OTS}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{FR}} \cdot \text{d}^{-1}$]

Definition: „Die Raumbelastung ist der organische Anteil des in den Fermenter eingebrachten Gutes, bezogen auf das nutzbare Fermenterraumvolumen pro Zeiteinheit (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S.19).“

Im Vergleich dazu die Definition der Raumbelastung/Faulraumbelastung nach Schulz u. Eder (Schulz u. Eder 2001, S. 20): „Die so genannte Faulraumbelastung gibt an, welche Menge an organischer Trockensubstanz je m^3 Faulraum und Tag dem Fermenter maximal zugeführt werden kann, ohne dass die Bakterien überlastet werden und der Prozess kippt.“

Einheit: $\text{kg}_{\text{OTS}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{FR}} \cdot \text{d}^{-1}$

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: Faulraumbelastung, B_R

Berechnung: $B_R = c_{O_2} \cdot Q_0 \cdot V_R^{-1}$, das Produkt aus Gehalt an organischer Substanz c_{O_2} in [%] und zugeführter Substratmenge Q_0 [m^3] pro Tag im Verhältnis zum Reaktorvolumen V_R [m^3].

Anmerkungen: Die Raumbelastung soll in der Phase des Hochfahrens der Anlage nur langsam erhöht werden, um den Aufbau der Bakterienpopulation, die für den Abbau des organischen Materials verantwortlich ist, nicht durch Überlastung zu gefährden.

Die Raumbelastung ist eng mit der hydraulischen Verweilzeit verbunden. Wird die hydraulische Verweilzeit verringert, so steigt die Raumbelastung. Die Raumbelastung ist neben der Verweilzeit vor allem vom Temperaturniveau und dem oTS-Gehalt des Substrates abhängig.

In seltenen Fällen ist die Raumbelastung auf den CSB-Wert bezogen und nicht auf den oTS-Gehalt. In solchen Fällen wird von $B_{R,CSB}$ gesprochen. Zusätzlich ist die Konversion von CSB und oTS möglich, da diese korrelieren.

Weiters muss darauf geachtet werden, ob der oTS-Wert in % den Anteil an der Substratmenge oder am TS-Gehalt angibt. Bei der anteilmäßigen Darstellung am TS-Gehalt kann dies durch den Zusatz „% oTS an TS“ ausgedrückt sein (Schulz u. Eder 2001, S. 20; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 29).

Richtwerte: Für B_R sind in der Literatur unterschiedliche Werte angegeben. Laut FNR e.V. soll eine Raumbelastung von $3,5 \text{ kg}_{oTS} \cdot m^{-3}_{FR} \cdot d^{-1}$ eingehalten werden (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 127).

Nach Schulz u. Eder liegt B_R üblicherweise zwischen $0,5$ bis $1,5 \text{ kg}_{oTS} \cdot m^{-3}_{FR} \cdot d^{-1}$.

Durch Optimierung können Werte bis $3 \text{ kg}_{oTS} \cdot m^{-3}_{FR} \cdot d^{-1}$ erreicht werden, bei $5 \text{ kg}_{oTS} \cdot m^{-3}_{FR} \cdot d^{-1}$ liegt jedoch die absolute Obergrenze (Schulz u. Eder 2001, S. 20).

d) Jährliche oTS-Menge; Q_{oTSzu} ; [$t \cdot a^{-1}$; $kg \cdot a^{-1}$]

Definition: Die jährliche oTS-Menge ist die um den Wasseranteil und die anorganische Substanz reduzierter Anteil der jährlich zugegebenen Substratmenge.

Der oTS-Gehalt wird in der Regel durch Trocknung bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ und nachfolgendem Glühen bei $550 \text{ }^\circ\text{C}$ ermittelt (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 19). Aus der so ermittelten Massendifferenz wird der oTS-Gehalt ermittelt.

Einheit: $\text{kg}_{oTS} \cdot a^{-1}$

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: Q_{oTS} , oTS-Belastung

Berechnung: Produkt aus dem durchschnittlichen oTS-Anteil am Substrat [%] und der jährlich zugegebenen Substratmenge Q_0 . Es kann jedoch eine Berechnung über die Einzelsubstrate erfolgen, indem die Produkte des spezifischen oTS-Anteils der Einzelsubstrate und die zugeführte Menge des spezifischen Substrates ($Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_n$) addiert werden.

Anmerkungen: Wird der oTS-Wert des Substrates nicht gemessen, so sollte dieser zumindest über eine Trockensubstanz-Bestimmung (TS) und aus für das spezifische Substrat von vorhergehenden Messungen, bzw. aus Literaturwerten bekannte oTS-TS-Verhältnis berechnet werden. Denn das Verhältnis von oTS zu TS eines spezifischen Substrates unterliegt oft nur geringfügigen, vernachlässigbaren Schwankungen. Der TS-Gehalt des eingesetzten Substrates, der vom Erntezeitpunkt, Kulturort, Lagerung, etc. abhängig ist, variiert zu stark.

Richtwerte: Für die jährlich zugegebene oTS-Menge selbst gibt es auf Grund der Abhängigkeit von der zugegebenen Substratmenge keinen direkten Richtwert. Es existieren jedoch Sollwerte und Grenzwerte bzw. -bereiche, die für andere Kennzahlen gelten, welche von der jährlich zugegebenen oTS-Menge beeinflusst werden (Raumbelastung, Verweilzeit, etc.).

e) C/N-Verhältnis im Gärgut; C:N; [$g \cdot g^{-1}$]

Definition: Das C/N-Verhältnis ist der Quotient der Kohlenstoff- zur Stickstoffmenge (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 18)

Einheit: dimensionslos

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: C:N-Verhältnis, C:N

Berechnung: Der Kohlenstoffanteil des Gärrests, also des ausgegorenen Substrates, wird in Relation zum Stickstoffanteil desselben gesetzt.

Anmerkungen: Das C/N-Verhältnis lässt eine Aussage über die Stickstoffverfügbarkeit für die Nutzung des Gärguts als Dünger zu.

Das C/N-Verhältnis stellt auch einen Richtwert für das Ausgangsmaterial (Substrat) dar. Das C/N-Verhältnis im zu vergärenden Gut ist eine wichtige Kennzahl für den optimalen Vergärungsprozess. Mit der Optimierung des C/N-Verhältnisses wird einem N-Mangel und einer NH_3 -Hemmung entgegengewirkt.

Ist zu viel C und zu wenig N vorhanden, so kommt es zu einer unvollständigen Umsetzung des Kohlenstoffs und somit zu einer unvollständigen Ausnutzung des Methanpotentials.

Beim umgekehrten Fall kann es zur Bildung von NH_3 kommen, welcher bereits in geringen Konzentrationen das Bakterienwachstum hemmt und im schlimmsten Falle zu einem Zusammenbruch der gesamten Bakterienpopulation führt (Schulz u. Eder 2001, S. 122; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 18 u. 27).

Richtwert: Als Richtwert für das C/N-Verhältnis im Substrat wurde folgendes recherchiert: Die FNR gibt das ideale C/N-Verhältnis mit 13/30 an (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 18). Der Bereich, in dem sich das C/N-Verhältnis des Ausgangsmaterials bewegen soll, reicht laut Schulz und Eder von 20 bis 40 (Schulz u. Eder 2001, S. 25), laut FNR von 10 bis 30 (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S.27).

Als idealer Wert für das C/N-Verhältnis im durch Vergärung aufgewerteten oder gewonnenen Dünger wurde vom FNR mit 13 angegeben (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 18).

2.7.3.2 Kennzahlen zur Charakterisierung der Ausbeute

a) **Jährliche Biogasmenge; Q_{BG} ; [$Nm^3 a^{-1}$]**

Definition: „Die jährliche Biogasmenge ist das in der BGA über einen Zeitraum von einem Jahr produzierte Volumen an Biogas unter Normbedingungen (0°C; 1013 mbar).“

Einheit: $Nm^3_{Biogas} \cdot a^{-1}$, m^3_{Biogas} (i.N.). a^{-1}

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: Q_{BG}

Berechnung:

Die folgenden Berechnungsmöglichkeiten sind grundsätzlich gegeben:

1. gemessene und mittels allgemeiner Gasgleichung ($p \cdot V = n \cdot R \cdot T$) auf Nm^3 umgerechnete Biogas-Menge
2. über oTS-Abbau und Biogaszusammensetzung
3. über Wirkungsgrad BHKW, Jahresarbeit el. und CH_4 -Gehalt

Anmerkungen: Gasmessungen erweisen sich immer wieder als schwierig, da oft keine Messeinrichtung vorhanden oder diese fehleranfällig sind, da keine realen Volumina gemessen werden. Insbesondere ist darauf zu achten, dass die Messgeräte (speziell wenn sie auf dem Messprinzip der Wärmeleitfähigkeit beruhen) auf Biogas (Mischung aus Methan CH_4 und Kohlendioxid CO_2) kalibriert sind.

Die Darstellung erfolgt in Nm^3 , um vergleichbare Werte zu erhalten. (Definition: „1 Nm^3 , ist die Menge, die 1 m^3 Gas bei einem Druck von 1,01325 bar, einer von 0 % (Trockenes Gas) und einer Temperatur von 0°C entspricht (nach DIN 1343, 1990)).

Unter <http://www.ifl.bayern.de/ilb/technik/03039/> befindet sich ein Umrechnungsprogramm, mit dem nach Eingabe von Gasvolumen, -temperatur, Luftdruck und relativer Gasfeuchte die Biogasmenge bei Normbedingungen berechnet wird.

b) **Biogasproduktivität, Biogasertrag; Biogasbildungsrate Q_B ; [$Nm^3 m^{-3}_{FR} d^{-1}$]**

Definition: „Der Biogasertrag ist die täglich produzierte Biogasmenge bezogen auf das Faulraumvolumen.“

Einheit: $Nm^3_{Biogas} \cdot d^{-1} \cdot m^{-3}_{FR}$

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: Q_B

Berechnung: Die täglich produzierte Biogasmenge wird durch das Fermentervolumen (V_R) dividiert.

Anmerkungen: Der Begriff Biogasertrag wird nicht nur im Zusammenhang mit dem Faulraumvolumen verwendet, sondern auch dann, wenn die erhaltene Biogasmenge auf das eingesetzte Substrat (Frischmasse), oder z.B. auf die zugeführte oTS-Menge bezogen wird. Ein hoher

Biogasertrag kann z.B. aus hoher Rührleistung bzw. feiner Vorzerkleinerung entstehen. Beides erhöht jedoch den Eigenstrombedarf der Anlage und es muss ermittelt werden, ob sich dies rentiert.

Richtwerte (Sedlmeier o.A., S. 1): Für die Wirtschaftlichkeit ist ein Biogasertrag von $>1 \text{ m}^3 \text{ Bio- gas pro m}^3_{\text{FR}}$ wünschenswert.

c) oTS – Abbaugrad; $\text{oTS}_{\text{Abbau}}$; [%]

Definition: Der oTS-Abbaugrad gibt an, wie viel Prozent der organischen Trockensubstanz unter den gegebenen Bedingungen abgebaut wurden.

Einheit: %

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: $\text{oTS}_{\text{Abbau}}$

Berechnung: $(Q_{\text{oTSzu}} - Q_{\text{oTSab}}) \cdot Q_{\text{oTSzu}}^{-1}$

Anmerkungen: Ein vollständiger Abbau bis hin zur Mineralisierung ist nur theoretisch möglich, wenn das Substrat nicht ligninhaltig ist. Lignin kann ja bekannter Weise kaum von den CH_4 -Bakterien abgebaut werden (Schulz u. Eder 2001, S. 21).

In der vorliegenden Arbeit wurde aus Praktikabilitätsgründen der oTS-Abbaugrad auf Jahreswerte bezogen, und nicht, wie oft beschrieben, auf die Verweilzeit.

Richtwerte: Laut Thomé-Komiensky gehen etwa 92 % des Kohlenstoffs ins Biogas (Thomé-Komiensky 1989, S.15). Der oTS-Abbaugrad schwankt jedoch von Anlage zu Anlage (abhängig vom eingesetzten Substrat, der Verweilzeit, Prozesstemperatur, verfahrenstechnischer Aspekte, etc.). Generell ist zu sagen, je höher der oTS-Abbaugrad, desto besser. Hierbei ist jedoch das CH_4 - CO_2 -Verhältnis im Biogas nicht zu vernachlässigen.

d) Durchschnittliche Biogasausbeute (bezogen auf oTS) ; y_B ; [$\text{Nm}^3 \text{ kg}^{-1}$]

Definition: Die durchschnittliche Biogasausbeute bezgl. oTS ist der in Nm^3 angegebene Biogasertrag einer zugeführter oTS-Menge von 1 kg.

Einheit: $\text{Nm}^3_{\text{Biogas}} \cdot \text{kg}_{\text{oTS}}^{-1}$

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: y_B

Berechnung: $y_B = Q_B \cdot Q_0^{-1} \cdot c_0^{-1}$; Die durchschnittliche Biogasausbeute ist der Biogasertrag (Q_B) bezogen auf das Produkt aus der zugeführten Substratgesamtmenge (Q_0) und der Konzentration an oTS (c_0).

Anmerkungen: Die Biogasausbeute soll natürlich möglichst hoch sein.

Bei kurzer Verweilzeit wird ein guter Substratdurchsatz erreicht. Der Biogasertrag kann durch die kurze Aufenthaltsdauer des Substrates im Fermenter unzureichend sein. TS- bzw. oTS-Gehalt beeinflussen die Biogasausbeute in zweierlei Hinsicht. Bei hohen TS-Gehalten können

sich die Bakterien nur schlecht bewegen und bauen somit das Substrat nur innerhalb ihres dezimierten Bewegungsradius ab.

Ist der TS-Gehalt zu hoch, so steht den Bakterien für ihr Wachstum zu wenig Feuchtigkeit zur Verfügung und der Abbauprozess kann völlig zum Erliegen kommen. Zusätzlich erhöht ein hoher TS- bzw. oTS-Gehalt auch das Risiko, dass es während des Gärprozesses zu Problemen mit Hemmstoffen kommt, da diese in einem solchen Fall in konzentrierter Form vorliegen können (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 29-31).

e) Heizwert des Biogases; H_u ; [$\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$]; [$\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$]

Definition: Der Heizwert beschreibt den Energieinhalt eines Stoffes, der bei der thermischen Verwertung eines Stoffes genutzt werden kann (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. I-21).

Einheit: $\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}_{\text{Biogas}}$, $\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: H_u , H_i

Berechnung: Der untere Heizwert kann entweder aus den verschiedenen Massenanteilen in % (Kohlenstoff, Wasserstoff, Schwefel, Stickstoff, Sauerstoff, Wasser) oder Volumenanteilen der verschiedenen Biogasbestandteile berechnet werden. Detaillierte Informationen zur Berechnung dazu sind im folgenden pdf-Dokument online im Internet zu finden:

- Energetische Nutzung Nachwachsender Rohstoffe:
www.umweltdaten.de/luft/EB_d_110703.pdf, S28

Die Umrechnung von $\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$ auf $\text{MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$ ist wie folgt: $1 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3} = 0,27778 \text{ kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$, bzw. $1 \text{ kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$ entspricht $3,6 \text{ MJ}\cdot\text{Nm}^{-3}$.

Da der Heizwert proportional zum CH_4 -Gehalt ist, so kann dieser durch die Bestimmung des CH_4 -Gehaltes ermittelt werden (*Waerdt u. Willenbrink, S. 7*).

Heizwert (Biogas) [$\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$] = CH_4 -Gehalt in [%] / 10,13 bzw.

Heizwert (Biogas) [$\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$] = $0,098717 \cdot \text{CH}_4$ -Gehalt in [%]

Anmerkungen: Das Hauptkriterium der Biogasqualität ist vor allem der CH_4 -Anteil, der in Korrelation zum Heizwert (H_i) vom Biogas steht. Ist also der CH_4 -Gehalt bekannt, kann der H_i daraus berechnet werden.

Im Gegensatz zum unteren Heizwert ist beim sog. Brennwert, dem oberen Heizwert (H_s), die Kondensationswärme des bei der Verbrennung gebildeten Wassers inkludiert.

Richtwerte: Für Biogas mit 60 % CH_4 -Anteil wird ein Heizwert von $6,078 \text{ kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$ angegeben (*Waerdt u. Willenbrink, S. 7*).

2.7.3.3 Kennzahlen zur Charakterisierung der energetischen Effizienz

a) **Brennstoffenergie; W_{Brenn} ; [kW, kWh a⁻¹]**

Definition: Die Brennstoffenergie des Brennstoffes gibt die jährliche Energiemenge an, die er beinhaltet (entsprechend der jährlichen Menge).

Einheit: kWh.a⁻¹

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: W_{Brenn}

Berechnung: Heizwert des Biogases [kWh.Nm⁻³_{Biogas}] multipliziert mit der gesamten über ein Jahr erzeugten Biogasmenge [Nm³Biogas.a⁻¹]

Anmerkungen: Wird die so ermittelte Brennstoffenergie des produzierten Biogases in Relation mit der vom BHKW abgegebenen Nutzenergie (Strom und Wärme) gesetzt, entspricht dies dem Gesamtwirkungsgrad des BHKW und kann zum Effizienzvergleich herangezogen werden. Bezieht man die erhaltene elektrische Energie anteilmäßig auf die eingesetzte Brennstoffenergie, so entspricht dieser Wert dem elektrischen Wirkungsgrad des BHKWs.

b) **Jahresarbeit elektrisch; W_{el} ; [kW, kWh a⁻¹]**

Definition: Die elektrische Jahresarbeit ist die Gesamtmenge an erzeugter elektrischer Energie pro Jahr. Diese Bruttostromproduktion wird als elektrische Jahresarbeit bezeichnet.

Einheit: kWh_{el}.a⁻¹

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: W_{el} , Jahresstromerzeugung, jährliche Bruttostromproduktion, Stromertrag

Berechnung: Kann aus der elektrischen Leistung und dem Anlagenwirkungsgrad ermittelt werden. Wird jedoch meist über Messungen bestimmt.

Anmerkungen: Dieser Wert spiegelt die gesamte elektrische Energie wider, die von der BGA über ein Jahr hindurch produziert wurde. Reduziert man diesen Wert um den jährlichen Eigenstromverbrauch, so entspricht dies der Nettostromproduktion, also der Menge an elektrischer Energie, die maximal eingespeist werden kann (siehe Kapitel c)) und für ökonomische Vergleiche herangezogen wird.

c) **Nettostromproduktion; $W_{\text{el,netto}}$; [kW, kWh a⁻¹]**

Definition: Unter der Nettostromproduktion versteht man die um den elektrischen Eigenverbrauch der Anlage verminderte elektrische Jahresarbeit (Bruttostromerzeugung).

Einheit: kWh_{el}.a⁻¹

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: $W_{\text{el,netto}}$, AP_{el} Jahresstrom-erzeugung

Berechnung: Wird über Messungen bestimmt.

Anmerkungen: Reduziert man diesen Wert um den jährlichen Eigenstromverbrauch der Anlage, so entspricht dies der jährlich eingespeisten Biogasmenge (Nettostromproduktion), welche für ökonomische Vergleiche herangezogen wird.

d) Jahresarbeit thermisch; $W_{therm\ netto}$; [kW, kWh a⁻¹]

Definition: Gesamtmenge an erzeugter Wärmeenergie pro Jahr wird als thermische Jahresarbeit bezeichnet.

Einheit: kWh_{therm}·a⁻¹

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: $W_{therm,netto}$, Q die Jahreswärme, jährliche Motorabwärme

Berechnung: Thermische Nennleistung des BHKW [kWh_{therm}] mal Volllaststunden des BHKW pro Jahr [h·a⁻¹] ergibt einen Richtwert für die thermische Jahresarbeit.

Anmerkungen: Eine Messung der produzierten Wärmemenge liegt in der Regel nur vor, wenn diese extern genutzt wird.

e) Wärmenutzung; Q_{Nutz} ; [kW, kWh a⁻¹]

Definition: Unter der Wärmenutzung versteht man die Gesamtmenge an extern genutzter Wärmeenergie pro Jahr, d.h. exklusive des thermischen Eigenenergiebedarfs.

Einheit: kWh_{therm}·a⁻¹

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: Nutzwärme, Q_{nutz}

Berechnung: Die Wärmenutzung errechnet sich aus der Gesamtmenge an genutzter Wärmeenergie pro Jahr, reduziert um den thermischen Eigenenergiebedarf.

Anmerkungen: Die entstehende Abwärme kann in verschiedensten Bereichen eingesetzt werden, z.B. zur Holz- oder Getreidetrocknung, Erzeugung von Dörrobst, Einspeisung ins Fernwärmenetz, etc.

In den Sommermonaten herrscht meist ein geringer Wärmebedarf. In dieser Zeit kann die Wärme jedoch mittels der so genannten Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) in Kälte umgewandelt und so genutzt werden.

In Österreich wird die Wärmenutzung in Zukunft gesetzlich von den Landesbehörden festgelegt. Durch derartige Vorschriften gestaltet sich die Standortsuche für eine BGA oftmals schwierig, da in den seltensten Fällen permanente Abnehmer für diese Wärmemengen vorhanden sind.

f) Ausnutzung der elektrischen Energie; $W_{el,Nutz}$; [%]

Definition: Die Ausnutzung der elektrischen Energie ist das Verhältnis der Nettostromproduktion zur elektrischen Jahresarbeit. Sie gibt an wie viele % der Gesamtstromproduktion genutzt werden können.

Einheit: %

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: $W_{el,nutz}$

Berechnung: Dieser Wert wird durch Division der Nettostromproduktion durch die elektrische Jahresarbeit und die Darstellung in % berechnet.

g) Ausnutzung der thermischen Energie; $W_{therm,Nutz}$; [%]

Definition: Die Ausnutzung der therm. Energie wird durch das Verhältnis der Wärmenutzung zur therm. Jahresarbeit festgelegt.

Einheit: %

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: $W_{therm,nutz}$

Berechnung: Dieser Wert wird durch Division der Wärmenutzung [$\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1}$] durch die therm. Jahresarbeit und die Darstellung in % berechnet.

Anmerkungen: Wird die Wärme nicht genutzt, so wirkt sich das stark auf den energetischen Gesamtwirkungsgrad der Biogasanlage aus.

h) Volllaststunden; T_{aN} ; [h]

Definition (VDI 4661 2003, S.21): Ist gleich dem Quotienten aus der abgegebenen Energiemenge in einer Zeitspanne und der Nennleistung der betrachteten Anlage.

Einheit: h, $\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: Ausnutzungsdauer T_{aN} , Volllaststundenzahl

Berechnung: Abgegebene Energiemenge pro Jahr im Verhältnis zur Nennleistung der betrachteten Anlage. $T_{aN} = W_{el} \cdot PN^{-1}$

Anmerkungen (VDI 4661 2003 S.21): Die Volllaststunden sind nicht mit den Betriebsstunden zu verwechseln. Darunter versteht man die Anzahl der Stunden, welche eine Anlage pro Jahr in Betrieb ist. Für die elektrische Nennleistung PN gilt nach Definition in der genannten VDI-Richtlinie: Nennleistung PN in Watt ist die höchste abgegebene Dauerleistung einer Erzeugungs- bzw. Verbrauchsanlage, für die sie (gemäß den jeweiligen Liefervereinbarungen) bestellt und installiert ist.

i) Ausnutzung der BHKW; η_{BHKW} ; [%]

Definition: Entspricht dem Verhältnis installierter elektrischer Leistung zur tatsächlich erbrachten durchschnittlichen elektrischen Leistung.

Einheit: %

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: η_{BHKW}

Berechnung: Bildet man den Quotient aus den in [$\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$] angegebenen Volllaststunden und 8760 [$\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$] (entspricht der Umrechnung Jahr in Stunden) und stellt dieses Verhältnis prozentuell dar, so entspricht dies der „Ausnutzung des BHKWs“. Zum Anlagenvergleich ist deshalb nur einer dieser Kennwerte notwendig, da zwischen ihnen eine direkte Proportionalität herrscht.

j) Stromeigenbedarf bez. auf die el. Jahresarbeit; I_{PE} , W_{el} ; [%]

Definition: Stellt das Verhältnis des Stromeigenbedarfs der BGA zur el. Jahresarbeit dar.

Einheit: %

Berechnung: Entspricht dem Quotienten aus Stromeigenbedarf [$\text{kWh}_{el}\cdot\text{a}^{-1}$] und der el. Jahresarbeit [$\text{kWh}_{el}\cdot\text{a}^{-1}$].

k) Elektrische Jahresnutzungsgrad der BGA; η_{el} ; [%]

Definition: Der elektrische Jahresnutzungsgrad gibt das Verhältnis der nutzbar abgegebenen elektrischen Energie zur gesamten erzeugten Brennstoffenergie an.

Einheit: %

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: η_{el}

Berechnung: Der el. Jahresnutzungsgrad entspricht dem Quotient der jährlichen Nettostromproduktion und der in dieser Zeit im zugeführten Brennstoff enthaltenen Energie.

Anmerkungen: Eine Änderung von η_{el} wirkt wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage.

l) Thermische Jahresnutzungsgrad der BGA; η_{therm} ; [%]

Definition: Der thermische Jahresnutzungsgrad beschreibt das Verhältnis der therm. nutzbar abgegebenen Energie zur gesamten zugeführten Brennstoffenergie in einem Zeitraum von einem Kalenderjahr (in diesem Fall ist der Brennstoff Biogas, da die zugeführte Brennstoffenergie des Substrats nicht bekannt ist).

Einheit: %

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: η_{therm}

Berechnung: Berechnet wird η_{therm} aus dem Quotienten der jährlichen Wärmenutzung und der im Brennstoff enthaltenen Energie, die innerhalb dieses Zeitraumes dem BHKW zugeführt wurde.

Anmerkungen: In der Praxis ist der thermische Wirkungsgrad, falls die Wärme überhaupt extern genutzt wird, stark von der Wartung z.B. Reinigung der Wärmetauscher, abhängig.

m) Gesamtjahresnutzungsgrad der BGA; η_{ges} ; [%]

Definition: Der Gesamtwirkungsgrad der Anlage repräsentiert die Gesamtausnutzung der im Brennstoff enthaltenen Energie. Dies inkludiert den thermischen und elektrischen Jahresnutzungsgrad.

Einheit: %

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: η_{ges}

Berechnung: Der Gesamtjahresnutzungsgrad entspricht der Summe des therm. und el. Jahresnutzungsgrades ($\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{therm}$).

Anmerkungen: Für den Gesamtjahresnutzungsgrad einer BGA ist die optimale Abwärmenutzung und eine Temperaturregelung während des Gärprozesses ausschlaggebend, da dies den Gärprozess optimiert und somit zu höheren Ausbeuten führt.

2.7.3.4 Kennzahlen zur Charakterisierung der ökonomischen Effizienz

a) Investitionssumme; K_{ges} ; [€]

Definition: Die Gesamtinvestition einer Biogasanlage inkludiert neben den Anschaffungskosten für bauliche und technische Einrichtungen die Kosten für die Planung und Genehmigung, den Netzanschluss, die Vorrichtungen zur Lagerung der Substrate und das Gärrestlager (Keymer 2004, S.72).

Einheit: €

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: $K_{G,G}$

Berechnung: Die Investitionssumme ist die Summe aus den Anschaffungskosten für bauliche und technische Einrichtungen sowie die Kosten für Planung und Genehmigung, den Netzanschluss, die Vorrichtungen für die Lagerung der Substrate und das Gärrestlager.

Anmerkungen: Bei einem Probetrieb ist zu beachten, dass diese Kosten anteilig auch monatelangen Probetriebes auf die Investitionssumme und damit auf die Kosten des Anlagenkäufers umgelegt werden sollten. Die Festlegung des Zeitraumes erfolgt individuell. Der Zeitraum ist Gegenstand des vereinbarten Vertrages mit dem Anlagenhersteller.

Richtwerte: In Abhängigkeit zur Nennleistung sind die in der Tabelle 5 dargestellten Investitionssummen üblich, die selbstverständlich von Bauweise, Ausstattung usw. abhängen. (Gers-Grapperhaus, S.6)

Tabelle 5: Durchschnittliche Investitionskosten von Biogasanlagen (Gers-Grapperhaus, S.6)

Anlagengröße (el. Nennleistung)	Investitionssumme	Ø-Kosten pro kW_{el}
70–100 kW	400.000–500.000 €	4.500 €
200–250 kW	700.000–850.000 €	3.500 €
450–500 kW	1.400.000–1.700.000 €	3.200 €
1.000 kW	2.900.000–3.100.000 €	3.000 €

b) Investitionssumme bez. auf el. Jahresarbeit; $K_{ges, W_{el}}$; [$\text{€} \cdot \text{kWh}_{el}^{-1}$]

Definition: Entspricht der Gesamtinvestitionssumme bezogen auf die Gesamtmenge an erzeugter elektrischer Energie pro Jahr.

Einheit: $\text{€Cent} \cdot \text{kWh}_{el}^{-1} \cdot \text{a}$

Berechnung: Ist Quotient aus der Gesamtinvestitionssumme und der elektrischen Jahresarbeit ($K_{ges} \cdot W_{el}^{-1}$).

c) Investitionssumme bez. auf el. Nennleistung ; $K_{ges, PN}$; [$\text{€} \cdot \text{kW}^{-1}$]

Definition: Ist die Gesamtinvestitionssumme bezogen auf die el Nennleistung PN in Watt.

Einheit: $\text{€} \cdot \text{kW}_{el}^{-1}$

Berechnung: Quotient aus der Gesamtinvestitionssumme und der abgegebenen el. Dauerleistung der BGA, für die sie (gemäß den jeweiligen Liefervereinbarungen) bestellt und installiert ist ($K_{ges} \cdot \text{PN}^{-1}$)

Anmerkungen: Diese Kennzahl wird zum groben Abschätzen der Investitionskosten von BGA-Hersteller angegeben. Und auch dazu, verschiedene Systeme investitionstechnisch zu vergleichen.

Richtwerte: Die Höhe der Investitionskosten wird vor allem von der Art und Größe der Anlage und den dazu notwendigen technischen Voraussetzungen bestimmt. Die Investitionskosten je kW_{el} betragen je nach Bautyp, Größe und Ausstattung zwischen 2.900 und 6.200 $\text{€}/\text{kW}_{el}$. (Gers-Grapperhaus , S.6).

d) Investitionssumme bez. auf Fermentervolumen ; K_{ges, V_R} ; [$\text{€} \cdot \text{m}^{-3}$]

Definition: Gesamtinvestitionssumme bezogen auf das Fermentervolumen.

Einheit: $\text{€} \cdot \text{m}^{-3}_{FR}$

Berechnung: Quotient aus der Gesamtinvestitionssumme und dem Fermentervolumen ($K_{ges} \cdot V_R^{-1}$)

Anmerkungen: Es ist besser, wie bei der Kennzahl „Investitionssumme bez. auf el. Nennleistung“ (Kapitel c)) die Investitionssumme auf die el. Nennleistung zu beziehen, da diese von den BGA-Herstellern meist für eine Grobabschätzung der Kosten der BGA angegeben wird.

e) Investitionssumme bez. auf oTS-Belastung; $K_{ges, Q_{oTSzu}}$; [$\text{€} \cdot \text{kW}^{-1}$]

Definition: Gesamtinvestitionssumme bezogen auf die jährlich zugeführte oTS-Menge

Einheit: $\text{€Cent} \cdot \text{kg}_{oTS}^{-1} \cdot \text{a}$

Berechnung: Quotient aus der Gesamtinvestitionssumme und der jährlich zugeführten oTS-Menge ($K_{ges} \cdot Q_{oTS}^{-1}$)

Anmerkungen: Beide Kennzahlen, aus denen sich diese Kennzahl zusammensetzt, werden maßgeblich von der Anlagengröße und dem eingesetzten Substrat beeinflusst. Eine reine Na-waRo-Anlage hat höhere Investitionskosten. Diese kombinierte Kennzahl kann einen guten Indikator für einen Verfahrensvergleich darstellen. Wobei man vorher eine Einteilung der Anlagen durchführen sollte. Im Vergleich z.B. nur Anlagen, die für ihre biologischen und energetisch-ökonomischen Möglichkeiten gut laufen. Das bedeutet, die Ausbeute steht dem eingesetzten System entsprechend in einem guten Verhältnis zum Input.

f) Jährliche Substratkosten; K_S ; [€ a^{-1}]

Definition: Die Substratkosten bestehen aus Einnahmen durch bzw. Ausgaben für Annahme und Zukauf von Substraten inklusive den Transportkosten innerhalb eines Kalenderjahres.

Einheit: € a^{-1}

Gängige Abkürzungen und zusätzliche Bezeichnungen: Rohstoffkosten

Berechnung: Summe aus den Einnahmen für Annahme bzw. Ausgaben für Zukauf von Substraten, den Kosten für den Transport und (falls Frischwasser zum Erreichen der gewünschten TS-Konzentration zugegeben wird) aus den Ausgaben für den Zukauf von Wasser. Die Ausgaben sind natürlich mit einem negativen Vorzeichen versehen. ($K_S = K_{S1} + K_{S2} + K_{Sx}$)

Anmerkungen: Bei diesem Kennwert, wurden Einnahmen und Ausgaben gegengerechnet. Eine Aufschlüsselung und Gegenüberstellung dieser ist sicher sinnvoll, wurde aber bei diesem Benchmarking-Projekt nicht durchgeführt, da dies eine zu große Datenmenge generiert hätte.

g) Substratkosten bez. auf el. Jahresarbeit; $K_{S, \text{el}}$; [€Cent kWh^{-1}]

Definition: Aus den jährlichen Substratkosten und der el. Jahresarbeit wird der Quotient gebildet.

Einheit: $\text{€Cent kWh}_{\text{el}}^{-1}$

Berechnung: Der Quotient aus den jährlichen Substratkosten in [€Cent a^{-1}] und der el. Jahresarbeit [$\text{kWh}_{\text{el}} \cdot \text{a}^{-1}$] ergibt diese Kennzahl. ($K_S \cdot W_{\text{el}}^{-1}$)

h) Jährliche Betriebskosten; K_B ; [€ a^{-1}]

Definition: Die Betriebskosten K_B umfassen alle Kosten, die entstehen, um eine Anlage zu betreiben. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. I-128)

Einheit: € a^{-1}

Berechnung: Kosten für Wartung, Reparaturen, Instandhaltung sowie der Betriebsmittel (Prozessenergie, Motoren- u. Schmieröl, Zündöl, etc.), Personal, Versicherungen.

Anmerkungen: Die Substratkosten wurden nicht zu den Betriebskosten gerechnet. Beides wird jedoch in den Stromgestehungskosten berücksichtigt.

Richtwerte: Die Betriebskosten betreffend wurde Folgendes von Gers-Grapperhaus (Gers-Grapperhaus, S.6) aus Daten bestehender Anlagen in Deutschland ermittelt: Bzgl. Wartungs-

und Reparaturkosten ist bei baulichen Einrichtungen 1 % der Investitionssumme zu rechnen. Im Gegensatz dazu ist bei den technischen Einrichtungen mit den fünffachen Kosten zu rechnen. Für die Wartung des BHKW ist mit ca. 1,3–2,0 €Cent pro kWh_{el} produzierter el. Energie zu rechnen.

Die Betriebskosten inkludieren natürlich die Aufwendungen für Versicherungen (ca. 0,5–1% der Investitionssumme). Beim Einsatz von Zündstrahlmotoren ist zu berücksichtigen, dass die Aufwendungen für das Zündöl eine beträchtliche Summe ausmachen. Auch die von der „Verwaltung“ und biologischen Betreuung der Anlage verursachten Kosten zählen zu den Betriebskosten.

i) Jährl. Betriebskosten bezogen el. Jahresarbeit; $K_{B, Wel}$; [€Cent kWh_{el}⁻¹]

Definition: Die über den Zeitraum eines Jahres anfallenden Betriebskosten werden bei dieser Kennzahl auf die el. Jahresarbeit bezogen.

Einheit: €Cent.kWh_{el}⁻¹

Berechnung: Quotient aus den jährlichen Betriebskosten in [€Cent·a⁻¹] und der elektrischen Jahresarbeit [kWh_{el}·a⁻¹] entspricht dieser Kennzahl. ($K_B \cdot W_{el}^{-1}$)

j) Betriebskosten bez. auf oTS-Belastung; $K_{B, Q_{oTSzu}}$; [€Cent kg⁻¹]

Definition: Bei dieser Kennzahl werden die im Zeitraum eines Jahres anfallenden Betriebskosten auf die zugeführte jährlich zugeführte oTS-Menge bezogen.

Einheit: €Cent kg_{oTS}⁻¹

Berechnung: Quotient aus den jährlichen Betriebskosten und der jährlich zugeführten oTS-Menge ($K_B \cdot Q_{oTS}^{-1}$)

k) Betriebskosten bez. auf abgebaute Substratmenge; $K_B(Q_{oTSzu} - Q_{oTSab})^{-1}$; [€Cent kg⁻¹]

Definition: Die jährlichen Betriebskosten werden bei dieser Kennzahl auf die tatsächlich abgebaute oTS-Menge bezogen.

Einheit: €Cent kg_{oTS}⁻¹

Berechnung: Quotient aus den jährlichen Betriebskosten und der Differenz aus der jährlich zugeführten oTS-Menge und der jährlichen oTS-Menge im Gärrest. ($K_B \cdot (Q_{oTSzu} - Q_{oTSab})^{-1}$) oder ($K_B \cdot Q_{oTSzu} \cdot C_{Nutz}$)

l) Stromgestehungskosten; K_{Wel} ; [€Cent kWh⁻¹]

Definition: Sämtliche Aufwendungen (Betriebskosten und Substratkosten) werden in Relation zur el. Jahresarbeit gesetzt.

Einheit: €Cent kWh_{el}⁻¹

Berechnung: Summe aus Betriebskosten [$\text{€Cent}\cdot\text{a}^{-1}$] und Substratkosten [$\text{€Cent}\cdot\text{a}^{-1}$] wird gebildet und diese in Relation zur produzierten el. Jahresarbeit gesetzt.

Anmerkungen: Diese Kennzahl eignet sich hervorragend zum ökonomischen Vergleich der Anlagen untereinander. Weiters kann über diese Zahl der Vergleich mit anderen Methoden zur Erzeugung el. Energie (z.B.: Windkraft, Wasserkraft, thermische Verwertung von Biomasse, etc.) gezogen werden. Bei einem solchen Vergleich ist jedoch unbedingt auf den Kontext der Betrachtung zu achten.

m) Elektrischer Energieertrag pro m^3 Faulraum; Elektrische Jahresarbeit bezogen auf das Fermentervolumen; $W_{el,FR}$; [$\text{kWh}_{el}\cdot\text{m}^{-3}_{FR}\cdot\text{a}^{-1}$]

Definition: Die elektrische Jahresarbeit bezogen auf das Fermentervolumen gibt den el. Energieertrag pro m^3 Faulraumvolumen an.

Einheit: $\text{kWh}_{el}\cdot\text{m}^{-3}_{FR}\cdot\text{a}^{-1}$

Berechnung: Quotient aus der elektrischen Jahresarbeit und Fermentervolumen ($W_{el}\cdot V_R^{-1}$)

Anmerkungen: Diese Kennzahl gibt an, wie viele kWh_{el} man pro m^3 Faulraumvolumen erhält. Besser ist es, dies nicht auf das Faulraumvolumen, sondern auf die zugeführte oTS-Menge zu beziehen. Da dieser Wert sehr vom verwendeten Verfahren abhängt, macht es nur Sinn, gleiche oder ähnliche Systeme an Hand dieser Kennzahl zu vergleichen.

n) El. Jahresarbeit bezogen auf die oTS-Belastung; $W_{el,oTS}$; [$\text{kWh}\cdot\text{kg}_{oTS}^{-1}$]

Definition: Gibt den el. Energieertrag pro kg_{oTS} an.

Einheit: $\text{kWh}_{el}\cdot\text{kg}_{oTS}^{-1}$

Berechnung: Quotient aus der el. Jahresarbeit und der jährlich zugegebenen oTS-Menge ($W_{el}\cdot Q_{oTSzu}^{-1}$)

Anmerkungen: Diese Kennzahl gibt an, wie viele kWh_{el} man pro kg zugeführter oTS erhält. Anhand dieser Kennzahl vergleicht man den Input an organischem Material und der daraus gewonnenen el. Energie. Es ist also auch die Effizienz der Mikrobiologie, der Verfahrenstechnik und des BHKW in dieser Kennzahl inkludiert.

2.7.4 Reihung und Bewertung der Kennzahlen

Im Zuge eines Workshops des Benchmarking-Teams, wurden diese Kennzahlen (Kapitel 2.7.3) diskutiert und in eine Systematik eingeteilt. Dabei wurden folgende drei Bereiche identifiziert, festgelegt und den Kennzahlen zugeteilt:

- Biologische Effizienz
- Energetische Effizienz
- Ökonomische Effizienz

Alle 37 Kennzahlen (Kapitel 2.7.3) wurden Vergleichsanalysen unterzogen. Die im Folgenden aufgelisteten Kennzahlen wurden ausgewählt, den drei Bereichen „Biologie, Energie und Öko-

nomie“ zugeteilt und detaillierter betrachtet. Die Reduktion der Kennzahlenliste ergab sich z.B. daraus, dass die jährlich zugeführte Substratmenge eher als Bezugsgröße von Nutzen ist als als direkte Kennzahl.

Zusätzlich wurde in die Kennzahlenauswahl miteinbezogen, dass zu jedem der drei Bereiche (biologische, energetische und wirtschaftliche Effizienz) eine etwa gleiche Anzahl an aussagekräftige Kennzahlen verwendet wird.

Eine Reihung und Bewertung dieser ergab Schwerpunkte auf folgende Kennzahlen, welche dann als Benchmarks verwendet wurden:

Biologische Effizienz:

- Hydraulische Verweilzeit HRT
- Raumbelastung BR
- Biogasertrag Q_B
- OTS-Abbaugrad C_{Nutz}
- durchschnittliche Biogasausbeute y_B
- Heizwert Biogas H_u

Energetische Effizienz:

- Ausnutzung therm. Energie $W_{therm,Nutz}$
- Ausnutzung BHKW η_{BHKW}
- Stromeigenbedarf bez. auf die el. Jahresarbeit
- el. Jahresnutzungsgrad der BGA η_{el}
- therm. Jahresnutzungsgrad der BGA η_{therm}
- Gesamtjahresnutzungsgrad der BGA η_{ges}
- el. Jahresarbeit bez. auf oTS-Belastung

Ökonomische Effizienz

- Investitionssumme bez. auf el. Jahresarbeit
- Investitionssumme bez. auf el. Nennleistung
- Substratkosten bez. auf die el. Jahresarbeit
- Betriebskosten bez. auf el. Jahresarbeit
- Stromgestehungskosten K_{WeI}

Um die getätigten Überlegungen und getroffene Auswahl dieser Kennzahlen auch abzusichern, wurde ein Gutachten von einem weiteren Biogasexperten (Technisches Büro DI Dr. Walter Somitsch) eingeholt betreffend die Verständlichkeit hinsichtlich Anwendung und Aussagekraft, die Berechnung aus Parametern, ob deren Ermittlung dem Anwender im Rahmen eines vertretbaren Aufwandes zugemutet werden kann, ob die den Parametern zugrunde liegenden Ermittlungsverfahren robust im Sinne einer niedrigen Anfälligkeit für systematische Fehler und zufällige Fehler (Streuung) sind, und ob Eindeutigkeit der Kennzahlen bzw. gebildeten Sets gegeben ist, d.h. Vermeidung von Bezügen zu Parametern, die außerhalb dieser Sets liegen.

Tabelle 6: Beurteilung der Kennzahlen zur Biologischen Effizienz

	HRT	BR	Q_B	oTS_{Abbau}	Y_B	H_u
Verständlichkeit	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i> Für die Ermittlung der Biogas- und oTS-Mengen müssen gleiche Zeiträume betrachtet werden.	<i>sehr gut</i>
Messung	<i>einfach</i>	<i>einfach</i>	<i>einfach</i>	<i>einfach</i>	<i>einfach</i>	<i>einfach</i> aber genaue Messung teuer
Robustheit	<i>gut</i> Fehlermöglichkeiten liegen in der Ermittlung des effektiven Faulraumvolumens ¹	<i>gut</i> Fehlermöglichkeiten liegen in der Ermittlung des effektiven Faulraumvolumens ¹	<i>genügend</i> Fehlermöglichkeiten liegen in der Ermittlung des effektiven Faulraumvolumens ¹ und der Ermittlung der Biogasmengen unter Normbedingungen ²	<i>befriedigend</i> Fehlermöglichkeiten liegen in der Ermittlung des effektiven Faulraumvolumens ¹ und der Ablauf-oTS durch nicht-repräsentative Proben (Schwimm- und Sinkschichten)	<i>genügend</i> Systematische Fehler sind möglich in der Ermittlung der Biogasmengen unter Normbedingungen ²	<i>genügend</i> Systematische Fehler sind möglich in der Ermittlung der Biogasmengen unter Normbedingungen ²
Eindeutigkeit	<i>befriedigend</i> Beurteilung ist abhängig von Reaktorgeometrie, Durchmischung, Substratart	<i>befriedigend</i> Beurteilung ist abhängig von Substratart, d.h. Anteil der vergärbaren oTS und dem Anteil der flüchtigen vergärbaren Substanz im Substrat	<i>sehr gut</i>	<i>befriedigend</i> Beurteilung ist abhängig vom Anteil der vergärbaren oTS der gewählten Substratart	<i>genügend</i> Beurteilung ist ausschließlich abhängig vom Biogasbildungspotenzial der Substratart.	<i>sehr gut</i>

Anmerkungen zu den in Tabelle 6 angegebenen Kennzahlen

¹Errechnung des Faulraumvolumens: Füllstandsmessung notwendig, ebenso kann totes bodennahes Volumen durch Ablagerungen zu verfälschten Ergebnissen führen.

²Ermittlung der Gasmengen unter Normbedingungen, d. h. 0°C, 1013 mbar, trockenes Gas (DIN 1343). Die Gasmengenzähler sollten daher Druck- und Temperaturabgleich besitzen. Üblicherweise werden nur Betriebsvolumina Biogas gemessen. Schwankungen der Betriebsvolumina Biogas sind oft durch klima- und wetterbedingte Temperaturschwankungen, denen Biogasspeicher ausgesetzt sind, hervorgerufen.

Durchschnittliche Biogasausbeute (bezogen auf Input-oTS) y_B : Der Bezug dieser Kennzahl auf die Substratart ist unerlässlich. Um den Vergleich mit Literaturdaten zu erleichtern, wird vorgeschlagen, anstatt von y_B alternativ die durchschnittliche Methanausbeute heranzuziehen.

Anmerkungen zu den in Tabelle 7 angegebenen Kennzahlen:

Ausnutzung der therm. Energie $W_{\text{therm Nutz}}$: Die Kennzahl liefert ungenaue Werte, ist aber von hohem Wert für die Beurteilung der energetischen Effizienz.

Ausnutzung BHKW η_{BHKW} : Diese Kennzahl muss in erster Linie ökonomisch gesehen werden. Wirtschaftlich relevant sind die BHKW-Kosten und die tarifliche Vergütung für die installierte Leistung. Sie ist aber auch ein Maß für das Erweiterungspotenzial der BGA. Eine in der Praxis häufiger verwendete Kennzahl ist „Volllastbetriebsstunden pro Jahr“. Es wird empfohlen, diese Kennzahl einzuführen.

Stromeigenbedarf im Verhältnis zur Jahresarbeit elektrisch: Diese Kennzahl ist aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht sehr wichtig.

el. Jahresnutzungsgrad der BGA η_{el} : Die meist ungenauen Messungen reduzieren stark den Informationsgehalt dieser Kennzahl. Die von den Herstellern ermittelten optimalen Wirkungsgrade werden in der Praxis kaum erreicht.

therm. Jahresnutzungsgrad der BGA η_{therm} : Diese Kennzahl ist nur dann nicht redundant mit $W_{\text{therm Nutz}}$, wenn die gesamte Wärmenutzung (intern und extern) in die Berechnung eingeht. In diesem Fall ist sie wichtig, da sie mit og. Kennzahl eine Beurteilung der Effizienz der Wärmetauscher ermöglicht.

Gesamtjahresnutzungsgrad der BGA η_{ges} : Diese Kennzahl ist dann entbehrlich, wenn η_{el} und η_{therm} angegeben werden.

el. Jahresarbeit bezogen auf oTS-Belastung: Diese Kennzahl ist entbehrlich, da sie keinerlei Hilfe für eine Verbesserung der Anlageneffizienz liefert.

¹ (Volllast = höherer Wirkungsgrad). Schwankende Biogasqualität führt zu großer Streuung

Tabelle 7: Beurteilung zur Auswahl der Kennzahlen für die Energetische Effizienz

	$W_{\text{therm Nutz}}$	η_{BHKW}	Stromeigenbedarf / Jahresarbeit elektrisch	η_{el}	η_{therm}	η_{ges}	el. Jahresarbeit / oTS-Belastung
Verständlichkeit	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>Gut</i> da nicht weit verbreitet
Messung	<i>aufwändig</i> da die therm. Jahresarbeit bestimmt werden muss	<i>einfach</i>	<i>mäßig</i>	<i>aufwändig</i> wegen Ermittlung von H_u	<i>aufwändig</i>	<i>einfach</i> wenn die Ermittlung aus η_{el} und η_{therm} erfolgt	<i>Aufwändig</i> bei schwankender Substratmenge und -qualität
Robustheit	<i>Befriedigend</i> da infolge schwankender Biogasqualität und Wirkungsgrad größere Streuungen zu erwarten sind	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>genügend</i> Systematische Fehler möglich bei Ermittlung von H_u . η_{el} ist abhängig von der Auslastung des BHKW	<i>befriedigend</i> da infolge schwankender Biogasqualität und Wirkungsgrad größere Streuungen zu erwarten sind. 807741	<i>befriedigend</i> infolge Ungenauigkeit der Parameter.	<i>befriedigend</i> da große Streuung bei Berechnung der oTS-Belastung erwartet werden kann.
Eindeutigkeit	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>gut</i> Beurteilung ist abhängig von Standzeit und Größe des BHKW ¹	<i>gut</i>	<i>nicht genügend</i> da der el. und der therm. Wirkungsgrad unterschiedlich bewertet werden, und ihre Anteile nicht ersichtlich sind.	<i>genügend</i> da abhängig von vielen Faktoren (z.B. Substratart, durchschnittliche Biogasausbeute, Heizwert, el. Wirkungsgrad).

Tabelle 8: Beurteilung zur Auswahl der Kennzahlen für die Ökonomische Effizienz

	Investitionssumme bez. auf el. Jahresarbeit	Investitionssumme bez. auf el. Nennleistung	Substratkosten bez. auf el. Jahresarbeit	Betriebskosten bez. auf el. Jahresarbeit	Stromgestehungskosten
Verständlichkeit	<i>gut</i> Der Investitions-zeitraum muss bezogen auf den Zeitraum der Berechnung der el. Jahresarbeit definiert werden.	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>
Messung	<i>einfach</i>	<i>einfach</i>	<i>einfach</i>	<i>einfach</i>	<i>einfach</i>
Robustheit	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>
Eindeutigkeit	<i>gut</i> Die Kennzahl ist abhängig vom Alter der Biogasanlage.	<i>gut</i> Die Kennzahl ist abhängig von der installierten el. Leistung	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>

Anmerkungen zu den in Tabelle 8 angegebenen Kennzahlen

Investitionssumme bez. auf el. Jahresarbeit: Diese Kennzahl verliert mit zunehmendem Alter der Biogasanlagen an Aussagefähigkeit. Die Aussage ist verschwommen, eine genaue Definition ist wünschenswert.

Substratkosten bez. auf el. Jahresarbeit: Die Substratkosten sollten jedenfalls alle substratspezifischen Kosten und Erlöse umfassen: Produktkosten, Transport, Vorbehandlungs- und Nachbehandlungskosten, Entsorgung.

Stromgestehungskosten: Eine der wichtigsten Kennzahlen zum wirtschaftlichen Vergleich.

Das Resumee dieser Beurteilung war, dass neben der Einzelbewertungen der Kennzahlen die vorgeschlagenen Kennzahlen unter Berücksichtigung der im Text angeführten Einschränkungen und Ergänzungen als sinnvoll und ausreichend für die allgemeine Beurteilung der Effizienz von Biogasanlagen angesehen werden.

Für Auswahlmengen von Biogasanlagen nach Substratart (Nawaro, Kofermentierer) oder Verfahrenstechnik (Naß-, Trockenvergärung) oder anderen Kriterien können weitere, spezifische Kennzahlen sinnvoll sein.

Eine Weiterführung der Kennzahlenentwicklung in Richtung dimensionslose Kennzahlen mit Hilfe der Dimensionsanalyse ist zu empfehlen, da hier vollständige Kennzahlensets gewonnen werden können.

Des Weiteren wird künftig auch eine sozio-ökonomische Bewertung von Biogasanlagen notwendig sein, die eventuell mit Kennzahlen durchführbar ist. Beispiele wichtiger Themen sind: Akzeptanz in der Bevölkerung, Emissionen, regionale Nachhaltigkeit.

Für den Fördergeber möglicherweise von Bedeutung sind Kennzahlen wie Dauer bzw. Kosten von Genehmigungsverfahren.

Die Zielsetzungen des Monitorings und Benchmarkings betrachtet, wurden Versuche unternommen, eine wie vorgeschlagen dimensionslose Kennzahl (insbes. für die biologische Effizienz) zu ermitteln, die jedoch zu keinem eindeutigen Ergebnis führten.

Bei der Energetischen Effizienz handelt es sich größtenteils um dimensionslose Kennzahlen (Wirkungsgrade). Die ökonomischen Kennzahlen sollten in dieser Form auch bei den Betreibern im Sinne einer Kostenrechnung bekannt sein, bzw. für zukünftige Errichter und Betreiber stellen diese Kennzahlen gute Richtwerte dar.

Die **ausgewählten Kennzahlen**, die im **Benchmarking** verwendet werden, sind:

a) Auswahl biologische Kennzahlen:

1. Biogasproduktivität Q_B
2. Hydraulische Verweilzeit HRT
3. Raumbelastung BR
4. oTS-Abbaugrad $\text{oTS}_{\text{Abbau}}$
5. Heizwert des Biogases H_U beziehungsweise CH_4 -Gehalt

b) Auswahl energetische Kennzahlen:

1. Ausnutzung BHKW η_{BHKW} bzw. Volllaststunden BHKW
2. elektrischer Jahresnutzungsgrad der BGA η_{el}
3. thermischer Jahresnutzungsgrad der BGA η_{therm}
4. Gesamtjahresnutzungsgrad der BGA η_{ges}

c) Auswahl ökonomische Kennzahlen:

1. Investitionssumme bez. auf elektrische Nennleistung
2. Substratkosten bez. auf elektrische Jahresarbeit
3. Betriebskosten bez. auf elektrische Jahresarbeit
4. Stromgestehungskosten

2.7.5 Fermentationsparameter-Tiefenmonitoring

Um Informationen über den Zustand der Fermentation zu erhalten, wurden je Anlage jeweils drei Datensätze folgender Fermentationsparameter aufgenommen und bewertet.

- pH-Wert (pH)
- Trockensubstanz (TS)
- Organische Trockensubstanz (oTS)
- Gesamtstickstoff (TKN)
- Ammoniumstickstoff (NH_4^+)
- undissoziierter Anteil des Ammoniumstickstoffes (UAN)
- Essigsäure (Essigsre.)
- Propionsäure (Propionsre.)
- i-Buttersäure (i-Busre.)
- Buttersäure (Busre.)
- i-Valeriansäure (i-Valsre.)
- Valeriansäure (Valsre.)
- freie flüchtige Fettsäuren gesamt (VFA ges.)
- undissoziierter Anteil der freien flüchtigen Fettsäuren (UVA)

Diese wurden vom Werkvertragspartner IFA-Tulln erhoben und entsprechend der Kooperationsvereinbarung zwischen den Projekten „Gutesiegel Ökogas“ und „Best Biogas Practise“, von beiden Projekten verwendet.

Einerseits wurden diese dazu verwendet, um eine aktuelle Bewertung der Fermentationsparameter durchzuführen, was sehr hilfreich bei der Beurteilung des Zustandes der Biologie im Rahmen der gebenchmarkten Anlagen war.

Die Bewertung dabei erfolgte in Anlehnung an das vom IFA-Tulln erstellte „Infoblatt zu den Fermentationsparametern – Version 2005“ (Anhang II), das Beschreibungen der Parameter sowie Sollwertbereichsangaben enthält.

Im Anhang befindet sich ebenfalls die aktualisierte Version des Jahres 2006 (IFA-Tulln 2006). In den folgenden Tabellen wurden die Zahlenwerte an die aktuelle Version angepasst, die Bezeichnung der Fermenterzustände entsprechend den Farbcodes der Version aus dem Jahre

2005 (IFA-Tulln 2005) jedoch beibehalten, um die Durchgängigkeit der textuellen Beschreibungen zu bewahren.

Die Fermentationsparameter geben Auskunft darüber, was in der „Blackbox“ der BGA, dem Fermenter, für Bedingungen herrschen. Ihre Aufnahme in regelmäßig wiederkehrenden Abständen und graphische Darstellung ist eine brauchbare Grundlage zum Monitoring der mikrobiologischen Vorgänge im Fermenter.

Der absolute Wert besitzt hierbei meist eine nicht so große Aussagekraft wie die Überwachung der Abweichung vom je Anlage unterschiedlichen Mittelwert im Laufe des Betriebes.

Bei den Richtwerten wurden Werte aus dem aktuellen Infoblatt Fermentationsparameter des IFA-Tulln herangezogen (2006). Diese Wertebereiche stammen aus statistischen Auswertungen von Fermenteranalysen über die in den letzten Jahren durchgeführten Analysen. Um die Wertebereiche übersichtlich darzustellen, wurde folgende optische Unterscheidung eingeführt:

Grün markierte Werte entsprechen einem günstigen Zustand der Fermentation. Der tolerable Wertebereich, der erste Anzeichen von Stress bei den Mikroorganismen kennzeichnet, ist gelb markiert und die orange markierten Wertebereiche repräsentieren einen hoch belasteten Fermenter (IFA-Tulln 2005). Dies bedeutet, dass die Stoffwechselprodukte nicht mehr in einer ausreichenden Geschwindigkeit von den Mikroorganismen abgebaut werden können und deshalb die Gefahr einer Übersäuerung des Fermenterinhaltens besteht. Es ist anzumerken, dass sich die Mikroorganismen an diese Bedingungen anpassen können und ihre Abbauarbeiten im Fermenter wie unter „Normalbedingungen“ verrichten (IFA Tulln, 2005).

Es ist jedoch zu beachten, dass bei den Fermentationsparametern stets auf die Substrat-/Anlagenkombination Rücksicht genommen werden muss, z.B. ist der Einfluss von Konzentrationen flüchtiger Fettsäuren in Fermentern auf die biologische Aktivität von Faktoren wie z.B. Adaptationszeit, pH und mikrobielle Zusammensetzung abhängig und allenfalls für spezifische Substrat-/Anlagenkonfigurationen aussagekräftig.

2.7.5.1 pH-Wert (pH)

Beschreibung: Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Protonenkonzentration.

Der pH-Wert stellt sich innerhalb des Systems meist automatisch durch die alkalischen und sauren Stoffwechselprodukte ein. Dies ist jedoch ein empfindliches Gleichgewicht. Der pH-Wert wirkt jedoch weniger hemmend auf die Aktivität der Mikroorganismen als die Summe der VFA. Durch die Pufferwirkung werden Störungen in der Mikrobiologie nicht direkt, sondern zeitverzögert an den pH-Wert weitergegeben. Störungen dieser Art sind durch das Monitoring der Fettsäuren besser und schneller zu erkennen. Dadurch kann z.B. durch Unterbrechen der Substratzufuhr eine Versäuerung im Fermenter verhindert werden. Die Methanbakterien können ansonsten durch eine Anreicherung saurer Abbauprodukte der Hydrolyse gehemmt werden (*Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 27; Scherer 2001, S. 59*).

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich	hoch belasteter Fermenter
7,5–8,1	7,1–7,5	< 7,1; > 8,1

(IFA-Tulln 2005, IFA-Tulln 2006)

Das Optimum für hydrolysierende und fermentative Bakterien liegt bei pH 5,2 bis 6,3.

Das Optimum für Methan produzierende Bakterien liegt bei pH 6,8 bis 7,2 (Komiensky 1989, S.6). Aus diesen unterschiedlichen Richtwertbereichen geht hervor, wie unterschiedlich die optimalen Milieubedingungen in der Literatur angegeben sind. Liegt der pH-Wert außerhalb dieser Bereiche, geht die Ausbeute zurück.

2.7.5.2 Trockensubstanz (TS)

Beschreibung: Die Trockensubstanz ist jener Teil der Probe, der nach dem thermischen Abzug des Rohwassers, durch Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C verbleibt. Dieser Rückstand enthält organische und anorganische Bestandteile (VDI 4630 2004, S. 6, Schulz, Eder 2001, S. 60).

Einheit: %

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich	hoch belasteter Fermenter
4–8 %	< 4 %; 8–9 %	> 9 %

(IFA-Tulln 2005, aktualisierte Zahlenwerte IFA-Tulln 2006)

2.7.5.3 Organische Trockensubstanz (oTS)

Beschreibung: Die organische Trockensubstanz entspricht dem auf die Ausgangsmasse bezogenen Gewichtsverlust der Probe durch Trocknung der Probe bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C, und anschließendem Veraschen bei 550 °C. Der dabei resultierende Gewichtsverlust wird ausschließlich von organischen Bestandteilen der Probe verursacht (VDI 4630 2004, S. 6).

Einheit: %

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich	hoch belasteter Fermenter
3–6 %	< 3 %; 6–7 %	> 7 %

(IFA-Tulln 2005, aktualisierte Zahlenwerte IFA-Tulln 2006)

2.7.5.4 Gesamtstickstoff(TKN)

Beschreibung: Der Gesamtstickstoff nach Kjeldahl stellt die die Summe aus Ammoniumstickstoff und gebundenem Stickstoff dar (*Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 154*).

Durch das Biogasverfahren wird der Stickstoffgehalt in Summe nicht reduziert, sondern erhöht sich leicht durch die Reduktion der Trockensubstanz und damit verbunden des Gesamtvolumens. Ein hoher Gehalt an gebundenem Stickstoff ist ein Hinweis auf unabgebaute Proteine.

Einheit: g.l⁻¹

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich
< 6 g.l ⁻¹	> 6 g.l ⁻¹

(*IFA-Tulln 2005, IFA-Tulln 2006*)

2.7.5.5 Ammoniumstickstoff (NH₄⁺-N)

Beschreibung (*Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005, S. 28 u. 32*): Der Ammoniumstickstoff repräsentiert den abgebauten Anteil an Proteinen und wird vor allem beim Einsatz von eiweißreichem Substrat freigesetzt. Die NH₄⁺-Konzentration steht in Abhängigkeit des pH-Wertes im Gleichgewicht mit dem undissoziierten Anteil des Ammoniumstickstoffes (Ammoniak NH₃), welcher schon in geringen Konzentrationen eine hemmende Wirkung auf die Mikroorganismen hat.

$$[\text{NH}_4^+] = 10^{(\text{pK}_A - \text{pH})} \cdot [\text{NH}_3] \dots \text{ bei Konzentrationen in mol/l} \quad \text{bzw.}$$

$$[\text{NH}_4^+] = 1,059 \cdot 10^{(\text{pK}_A - \text{pH})} \cdot [\text{NH}_3] \dots \text{ bei Konzentrationen in g/l}$$

[NH₄⁺] ... Konzentration Ammonium Stickstoff (NH₄⁺-N) [mol/l bzw. g/l]

[NH₃] ... Kontentration Ammoniak (= undissoziierter Anteil des Ammoniumstickstoff - UAN) [mol/l bzw. g/l]

pK_A ... Dissoziationskonstante der Säure (Ammonium)

pH ... pH-Wert; pK_A (NH₄⁺/NH₃) bei 25°C = 9,25

Einheit: g.l⁻¹

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich
< 5 g.l ⁻¹	> 5 g.l ⁻¹

(*IFA-Tulln 2005, IFA-Tulln 2006*)

2.7.5.6 Undissoziierter Anteil des Ammoniumstickstoffes (UAN)

Beschreibung: Charakterisiert den undissoziierten Anteil des Ammoniumstickstoffes, welcher abhängig vom pH-Wert in einem Gleichgewicht mit NH_4^+ steht und bereits in geringen Konzentrationen eine hemmende Wirkung auf die Mikroorganismen ausübt.

$$[\text{NH}_3] = 10^{(\text{pH}-\text{pK}_A)} \cdot [\text{NH}_4^+] \dots \text{ bei Konzentrationen in mol/l} \quad \text{bzw.}$$

$$[\text{NH}_3] = 0,944 \cdot 10^{(\text{pH}-\text{pK}_A)} \cdot [\text{NH}_4^+] \dots \text{ bei Konzentrationen in g/l}$$

$[\text{NH}_4^+]$... Konzentration Ammonium Stickstoff (NH_4^+ -N) [mol/l bzw. g/l]

$[\text{NH}_3]$... Konzentration Ammoniak (= undissoziierter Anteil des Ammoniumstickstoffs – UAN) [mol/l bzw. g/l]

pK_A ... Dissoziationskonstante der Säure (Ammonium)

pH ... pH-Wert; $\text{pK}_A (\text{NH}_4^+/\text{NH}_3)$ bei 25°C = 9,25

Einheit: $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$

Achtung: das Ergebnis der o.g. Berechnung ist in g/l, muss also für mg/l mit 1000 multipliziert werden !

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich	hoch belasteter Fermenter
< 600 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	600–800 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	> 800 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$

(IFA-Tulln 2005, IFA-Tulln 2006)

2.7.5.7 Essigsäure (Essigsre.)

Beschreibung: Essigsäure (Ethansäure, CH_3COOH)

Dieser Säure kommt neben der Propionsäure die größte Bedeutung bei der Beurteilung des Prozesszustandes zu. Buttersäure und Valeriansäure kommen in vergleichsweise geringen Konzentrationen vor und haben einen dementsprechend geringeren Anteil an der Gesamtfettsäurekonzentration und geringeren Einfluss auf die prozesshemmende Wirkung. Bei eingeschränkter Aktivität der säureempfindlichen Methanbakterien wird die Essigsäure nicht weiter zu Methan abgebaut, sondern reichert sich im Fermenter an. Die Hemmwirkung flüchtiger Fettsäuren steigt mit sinkendem pH-Wert.

Einheit: $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich	hoch belasteter Fermenter
0–1000 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	1000–3000 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	> 3000 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$

(IFA-Tulln 2005, IFA-Tulln 2006)

2.7.5.8 Propionsäure(Propionsre.)

Beschreibung: Propionsäure (Propansäure, C₃H₆O₂)

Der anaerobe Abbau der Propionsäure ist aus Sicht der Thermodynamik ungünstiger als jener der anderen Fettsäuren. Denn bei steigender Produktkonzentration (H₂) und sinkender Substratkonzentration (Propionat) kommt es zu einer negativen Beeinflussung des Abbaus aus thermodynamischer Sicht. Das "energetische Fenster" des Propionatabbaus ist schmaler als das des Acetat- und Ethanolabbaus. Dies bedeutet, dass die Milieubedingungen des Propionatabbaus sehr streng begrenzt sind. Deshalb kommt der Propionsäure eine hohe Bedeutung bei der Bewertung des mikrobiellen Gleichgewichtes zu. Da die Bedingungen für einen Abbau in einem engen Rahmen liegen, gilt Propionat als kritisches Zwischenprodukt für die störungsfreie nachfolgende Methanbildung. Propionat wirkt bei zu hoher Konzentration toxisch auf die Mikroorganismen (Scherer 2001, S. 54–57).

Einheit: mg·l⁻¹

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich	hoch belasteter Fermenter
0–250 mg·l ⁻¹	250–1000 mg·l ⁻¹	> 1000 mg·l ⁻¹

(IFA-Tulln 2005, IFA-Tulln 2006)

2.7.5.9 Höhere Fettsäuren

Isobuttersäure (i-Buttersre.), Buttersäure (Buttersre.), Isovaleriansäure (i-Valeriansre.) und Valeriansäure (Valeriansre.) kommen im Vergleich zu Essig- und Propionsäure in geringen Konzentrationen vor. Sie haben einen dementsprechend geringen Anteil an der Gesamtfettsäurekonzentration und wenig Einfluss auf die prozesshemmende Wirkung. Aus diesem Grund werden die oben genannten höheren Fettsäuren in dieser Arbeit nicht näher behandelt.

2.7.5.10 Freie flüchtige Fettsäuren gesamt (VFA ges)

Beschreibung: Freie flüchtige Fettsäuren (Volatile Fatty Acids): sind Intermediärmetaboliten des Biogasprozesses. Sie dienen der Überwachung der Prozessstabilität und sind ein Indikator für zu hohe Raumbelastung oder eine allgemeine Hemmung der methanbildenden Bakterien. Tritt eine Hemmung der methanogenen Aktivität auf, so werden die im Prozess entstehenden Fettsäuren nicht weiter zu Methan abgebaut und es kommt zu einer Anreicherung im Fermenter.

Einheit: $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich	hoch belasteter Fermenter
0–1500 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	1500–4500 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	> 4500 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$

(IFA-Tulln 2005, IFA-Tulln 2006)

2.7.5.11 Undissoziierter Anteil der freien flüchtigen Fettsäuren (UVA)

Beschreibung: Der undissoziierte Anteil freier flüchtiger Fettsäuren, welcher vom pH-Wert abhängt und bereits in geringer Konzentration toxisch auf Methanbakterien wirkt. Der UVA-Anteil wird als Essigsäureäquivalent angegeben.

Bei einer Temperatur von 25 °C (pK_A Essigsäure = 4,75) gilt folgender Zusammenhang:

$$UVA = VFAGes \cdot \frac{10^{(\text{pK}_A - \text{pH})}}{1 + 10^{(\text{pK}_A - \text{pH})}}$$

UVA ... Konzentration undissoziierter Anteil freier flüchtiger Fettsäuren (als Essigsäure)

VFAGes ... Freie flüchtige Fettsäuren gesamt (als Essigsäure)

pK_A ... Dissoziationskonstante der Essigsäure; pK_A (25°C) = 4,75; pK_A (38°C) = 4,8

pH ... pH-Wert;

Einheit: $\text{mg}_{\text{HAc}}\cdot\text{l}^{-1}$

Richtwerte:

günstiger Zustand des Fermenters	tolerabler Wertebereich	hoch belasteter Fermenter
0–2,5 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	2,5–20 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$	> 20 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$

(IFA-Tulln 2005, IFA-Tulln 2006)

2.8 Datenerhebung

Die Datenerhebung für das vorliegende Projekt wurde vom Werkvertragspartner IFA-Tulln, Kooperation mit Projekt „Gütesiegel Ökogas“, durchgeführt.

Entsprechend den 4 Anlagentypen wurden vom Werkvertrags- und Kooperationspartner IFA-Tulln einerseits die charakterisierenden Parameter erhoben, sowie die Parameter des Tiefenmonitorings von 12 Anlagen, entsprechend der getätigten Kategorisierung in die 4 Anlagentypen. Zusätzlich wurden aus den Parametern die Kennzahlen berechnet.

Parallel wurden weitere 28 Anlagen von IFA-Tulln, im Rahmen des Projekts „Gütesiegel Ökogas“ erhoben, und diese Daten ebenfalls in anonymisierter Form zur Verfügung gestellt. Diese beinhalten jedoch keine Fermentationsparameter, sondern „lediglich“ die charakterisierenden Parameter. Zusätzlich wurden seitens IFA-Tulln für das Projekt „Gütesiegel Ökogas“ sozio-ökonomische Parameter erhoben.

Die Datenerhebung erfolgte größtenteils durch persönliche Interviews unter Zuhilfenahme durch Erhebungsbogen.

Es wurden von IFA-Tulln bereits die Kennzahlen aller 41 Anlagen berechnet und zur Verfügung gestellt.

Die von IFA-Tulln erhobenen Daten bzw. Kennzahlen (der 12 Biogasanlagen) befinden sich in anonymisierter Form in Anhang III.

Anhand dieser Werte und Kennzahlen wurde das Benchmarking durchgeführt.

2.9 Benchmarking-Tools

2.9.1 Entwicklung des Benchmarking-Tools

Bei der Strukturierung und dem Aufbau des Benchmarking-Tools war vor allem die Benutzerfreundlichkeit das zentrale Entscheidungskriterium. Trotz umfangreicher Parametereingabe sollte das Tool übersichtlich und einfach zu bedienen sein.

Ausschlaggebend bei der Positionierung des Tools war die öffentliche Zugänglichkeit. D.h. es soll für jeden Anlagenbetreiber zugänglich sein. Aus diesem Grund wurde das Bewertungssystem im öffentlichen Bereich der Homepage des österreichischen Biogasnetzwerks (www.oebn.at) implementiert. Um Kontrolle über die Dateneingabe zu erhalten, wurde ein festgelegtes Anmeldeprozedere entwickelt. Der Zugang zum Benchmarking erfolgt über eine Identitäts-Nummer und ein Passwort, die dem Anwender nach einer elektronischen Anmeldung zugewiesen werden. Diese Passwortzuweisung erfolgt nicht automatisch, sondern ein dafür zuständiger Administrator legt einen neuen User an und teilt die Identitätsnummern und Passwörter zu. Dies soll es erschweren, dass ein User zum Testen mehrere Benutzer anlegt. Dies würde mehr Administrationsaufwand bringen, als eine Anmeldung per E-Mail und eine Zuweisung von Usernamen und Passwort.

Dem Nutzer bzw. Interessenten steht eine Beschreibung zur Verfügung, wie das Monitoring und Benchmarking abläuft. In einer Kurzfassung und einer detaillierten Version, in der jeder einzelner Parameter bzw. die Gesamtheit der beim Benchmarking verwendeten Kennzahlen erklärt werden.

Die den Aufbau beschreibenden Daten werden nur einmalig erfasst, da sie sich, außer durch einen Umbau bzw. eine Erweiterung der Anlage, nicht ändern. Diese Daten werden unter dem Begriff „Grunddaten“ zusammengefasst.

Auf Wunsch des Anwenders besteht auch die Möglichkeit, diese neu anzulegen bzw. Änderungen vorzunehmen. Die Grunddaten dienen, wie oben schon erwähnt, der Anlagenbeschreibung, d.h. auf Basis dieser Daten ist es möglich, sich ein gutes Bild über die Anlage zu machen. Man erhält so Informationen über das Verfahrensgrundkonzept, den Reaktortyp, die Gärrestverwertung, Wärmenutzung, Messvorrichtungen, etc.

Abbildung 10 zeigt den Ablauf der Online-Daten-Eingabe des Biogas-Monitorings und Benchmarkings.

Nach der Eingabe der Kontaktdaten, welche anonym bleiben, werden die Grunddaten der Anlage eingegeben. Anschließend werden die Parameter der Anlage eingegeben, aus denen die Kennzahlen berechnet werden. Alle diese Daten werden in einer Datenbank gespeichert.

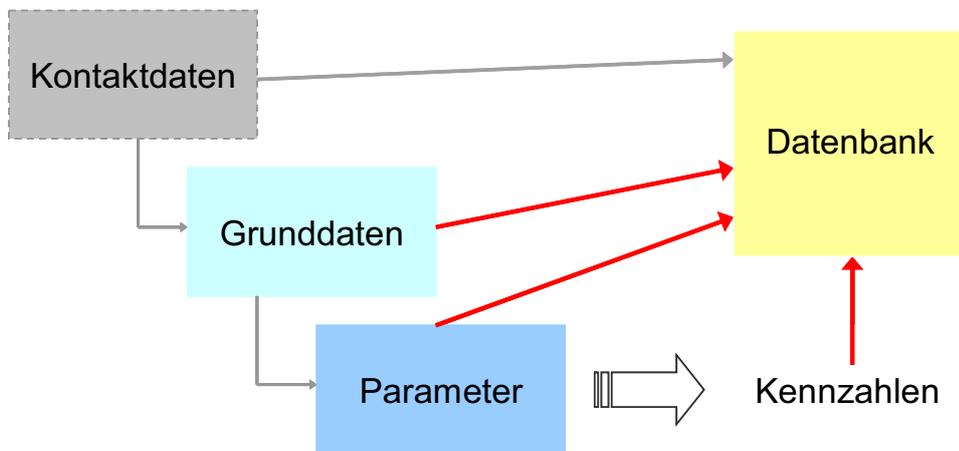


Abbildung 10: Ablauf der Online-Eingabe der Daten

Die vier Ebenen des Biogas-Benchmarkings und Monitorings

Vor der Eingabe der Grunddaten entscheidet der Anwender, in welcher Tiefe das Monitoring durchgeführt werden soll. Zu diesem Zweck wurde das Monitoring und Benchmarking in vier Ebenen eingeteilt. Die Ebenen kann man sich folgendermaßen vorstellen: Nach der Eingabe der Grunddaten kann man über die Ebenenauswahl entscheiden, in welcher Tiefe man das Monitoring und Benchmarking durchführen möchte. Je Ebene erfolgt eine Erweiterung um zusätzliche Kennzahlen und zieht damit eine immer ausführlichere und detailliertere Erhebung der Parameter mit sich. Mit jeder Ebene steigt jedoch auch der Aufwand der Datenerfassung und Dateneingabe für den Benutzer. Als Gegenleistung erhält der Benutzer auch eine detailliertere und umfassendere Auskunft.

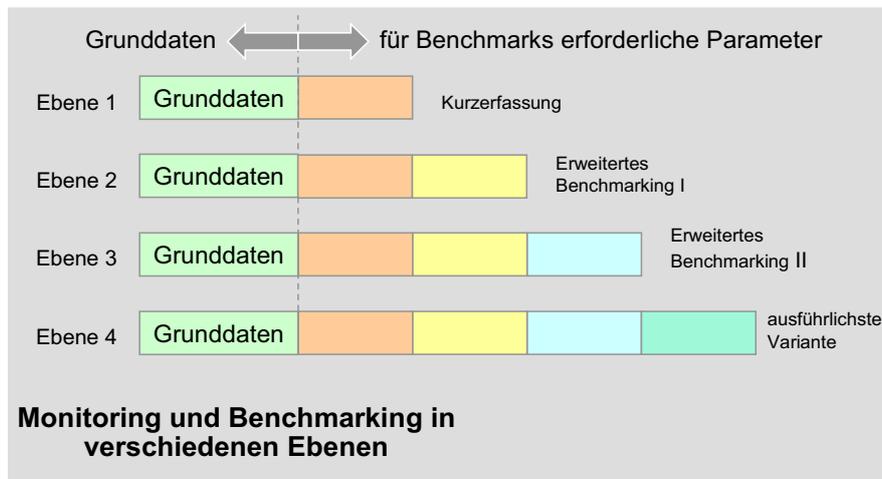


Abbildung 11: Monitoring und Benchmarking in verschiedenen Ebenen

Die Einteilung in verschiedene Ebenen, die in Abbildung 11 dargestellt ist, erhöht die Motivation der Anlagenbetreiber. Eine lange Liste senkt die Bereitschaft der Anwender, Daten einzugeben. So kann der Benutzer selbst die Tiefe des Monitorings der eigenen Anlage bestimmen. Auch mit wenig Aufwand (5 Minuten) erhält man zum Beispiel in der ersten Ebene wichtige Kennzahlen der Anlage und erhält schnell einen Vergleich mit anderen Anlagen. Die Parameter der ersten Ebene wurden so gewählt, dass jeder Biogasanlagenbetreiber diese Daten aus dem "Stegreif" eingeben kann.

Das Referenz-Monitoring und Benchmarking wird natürlich in der vierten, und detailliertesten Ebene durchgeführt.

Die Ermittlung der Performance einer Biogasanlage erfolgt über Kennzahlen. Neben den „typischen“ Kennzahlen wie z.B. hydraulische Verweilzeit und Raumbelastung wurden speziell für dieses Benchmarking-System weitere Kennzahlen entwickelt. Diese wurden aus den typischen Kennzahlen berechnet, indem diese auf einen weiteren Wert/Parameter (wie z.B. Investitionssumme, elektrische Leistung der Anlage etc.) bezogen wurden, um den Vergleich, unabhängig von verfahrens- und bautechnischen Unterschieden zu ermöglichen. Die Kennzahlen, die sich aus den Parametern berechnen, ermöglichen den Vergleich der Anlagen-Performance aus mehreren Gesichtspunkten.

Ausgabe der Parameter und Kennzahlen:

Die Ausgabe der Ergebnisse des Benchmarkings erfolgt in mehreren Varianten. Einerseits werden Zahlenwerte der Kennzahlen zur Prozessbeurteilung in einer Auflistung übersichtlich dargestellt. Andererseits erfolgt eine graphische Darstellung der Resultate. Der graphische Vergleich mit anderen Anlagen erfolgt anonym durch die Angabe der Identitätsnummer. Zur Identifizierung der Kennzahlen der eigenen Anlage werden diese sowohl farblich hervorgehoben als auch die Identitätsnummer angegeben.

Es wurde eine Berechnungsmöglichkeit für die Skalierung der Ausgabediagramme entwickelt und somit das Problem der unterschiedlichen Wertebereiche gelöst. Die Skala wird dadurch automatisch angepasst, indem vom Maximalwert der Minimalwert abgezogen wird.

Weiters existiert die Option einer Auflistung aller für diese Anlage berechneten Kennzahlen.

Durch die Strukturierung des Benchmarking-Tools und der Ausgabe behält der Anwender trotz der Fülle von erhobenen Messwerten und berechneten Kennzahlen den Überblick.

Auf die Parameter, Grunddaten und Kennzahlen haben die Anwender untereinander eine anonymisierte Einsicht, um direkte Vergleiche durchzuführen und Rückschlüsse zu ziehen.

2.9.2 Implementierung des on-line Benchmarking-Tools

Auf der Homepage des Österreichischen Biogasnetzwerks befindet sich der Link zum hier beschriebenen Benchmarking-Tool. Klickt man unter www.oebn.at auf BENCHMARKING, so erscheint eine Aufforderung zum Login bzw. zur Registrierung. Die Registrierung erfolgt via e-mail Benachrichtigung, der zufolge ein Zugangsname und ein Passwort vergeben wird, mit dem man sich anschließend anmelden kann.

Nach der Anmeldung bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

Einerseits können die bereits eingegebenen Anlagen anonym begutachtet werden, Kennzahlen dieser Anlagen berechnet und verglichen werden (Abbildung 12), oder aber man kann die Daten der eigenen Biogasanlage eingeben. Dazu wird der Link DATENERFASSUNG gedrückt. Nach Abschluss der Eingabe kann dann die eigene Anlage und deren Kennzahlen angezeigt und verglichen werden.

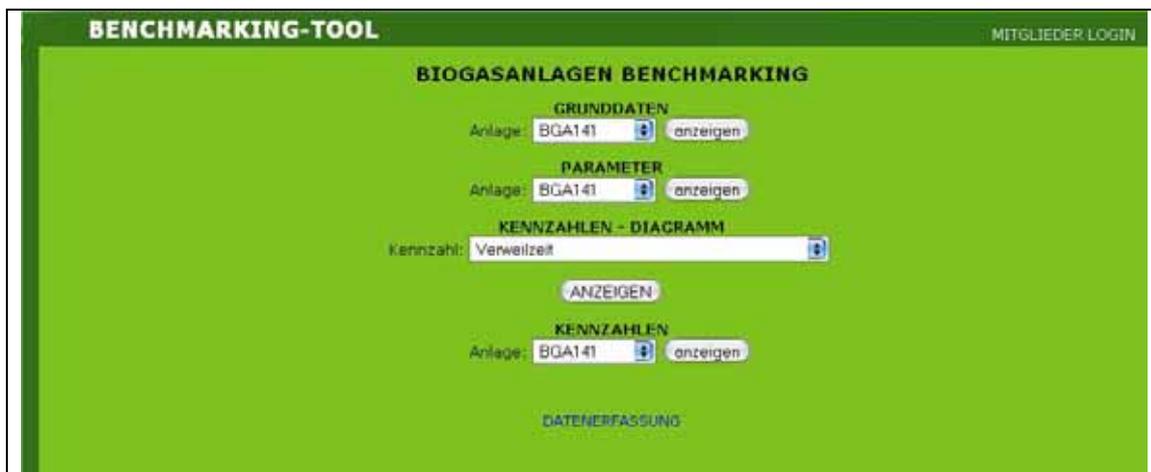


Abbildung 12: Bildschirmdialog nach Eingabe von Login und Passwort: Auswahlfelder zur Anlagenbeurteilung bzw. Kennzahlenberechnung und Kennzahlenvergleich

Nach dem Drücken der DATENERFASSUNG wird der log-in abgefragt. Anschließend wählt man entweder die Eingabe der sog. Grunddaten oder die Parametereingabe für regelmäßige Eingaben.



Abbildung 13: Bildschirmdialoge zur Eingabe der Grunddaten einer Biogasanlage (Ebene4)

In einem ersten Schritt sollten die Grunddaten eingegeben werden. Hier hat man die Möglichkeit zwischen 4 Ebenen, von sehr kurz (die nur wenige Kennzahlen berechnet) bis sehr ausführlich, wo nach korrekter Eingabe der relevanten Daten alle Kennzahlen berechnet werden. Bei der Vollständigen Erhebung durchwandert man systematisch die Biogasanlage, beginnend von allgemeinen Grunddaten, über Substrat, Fermenter, Gärrest, BHKW, ökonomische bis hin zu

sozioökonomischen Angaben, auf insgesamt 7 Seiten. Es existieren dabei keine Mussfelder, da beim Weglassen von Eingaben Kennzahlen einfach nicht berechnet werden. Einige exemplarisch dargestellte Bildschirmdialoge sind in Abbildung 13 rechts und Abbildung 14 dargestellt.

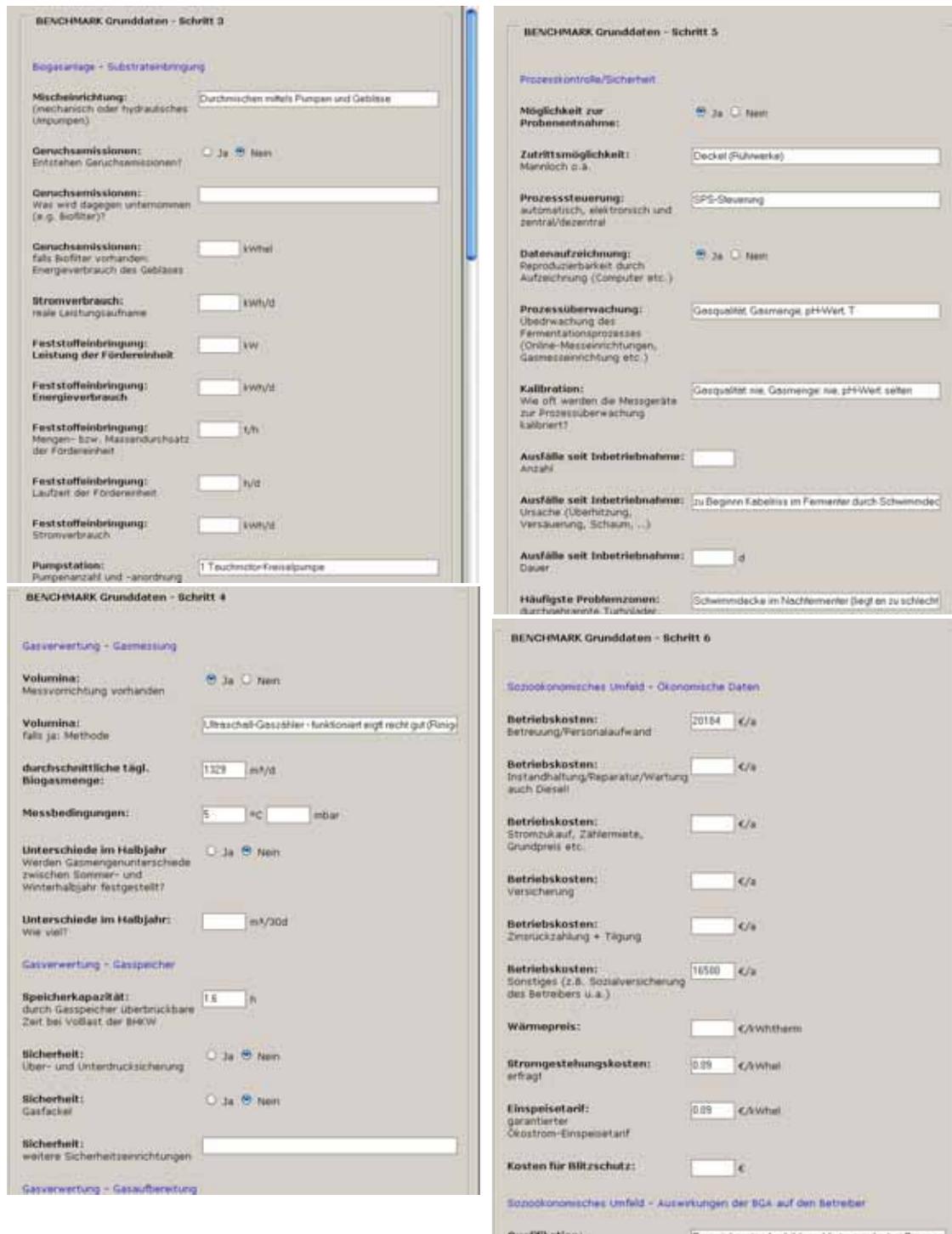


Abbildung 14: Bildschirmdialoge zur Eingabe der Grunddaten

Essentiell zur Berechnung einiger Kenndaten ist die Kenntnis über die Substrate, die auf der letzten Seite der Eingabe abgefragt werden. Dabei müssen im einfachsten Fall nur die jährlichen Mengen der jeweiligen Substrate eingegeben werden. Zur Berechnung der organischen Trockensubstanz und des chemischen Sauerstoffbedarfs sind bereits die aus der Literatur bekannten (Durchschnitts)Werte angegeben. Kennt man diese Kennwerte von den eigenen Substraten, können die vorgeschlagenen leicht und unkompliziert überschrieben werden (Abbildung 15, links).

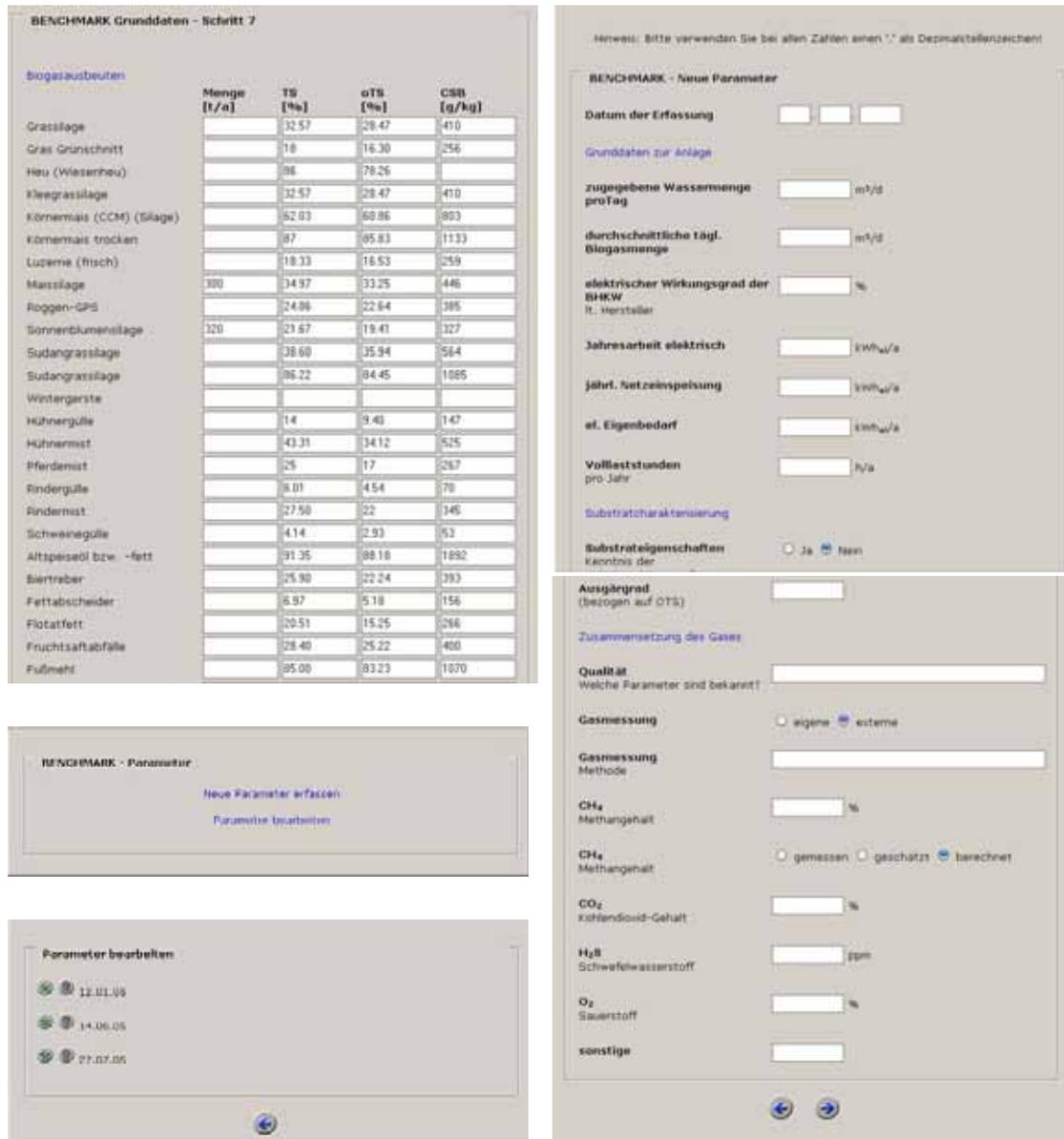


Abbildung 15: Bildschirmdialoge zur Eingabe der Grunddaten und Anlagenparameter

Hat man die Eingabe der Grunddaten abgeschlossen, können bereits nahezu alle Kennzahlen berechnet werden.

Zusätzlich kann man jedoch noch aktuelle Werte, die sich über die Zeit ändern, bei der Eingabe der „Anlagenparameter“ erfassen (Abbildung 15). Bei der Eingabe der Parameter kann man einerseits einen bestehenden Satz ändern oder einen neuen anlegen.

Wieder zurück auf der Benchmarking Homepage kann nun (bereits auch schon direkt nach Eingabe der Anlagengrunddaten) mit der Ansicht der Kennzahlen begonnen werden (Abbildung 16).

Man wählt dabei im pull-down-Menü entweder die eigene Anlage aus oder aber auch eine andere, anonyme Anlage von Interesse, drückt auf Kennzahlen „Anzeigen“, und erhält sofort alle berechneten Kennzahlen (Beispiel siehe Abbildung 16).



Abbildung 16: Ergebnisdialog Kennzahlen der Biogasanlagen

Möchte man nun seine Anlage im Vergleich mit den anderen Anlagen sehen, wählt man im pull-down-Menü „Kennzahlen Diagramm“ die entsprechende Kennzahl aus, und man erhält eine graphische Darstellung der Kennzahlen aller eingegebenen Anlagen, wobei die eigene Anlage farblich herausgehoben ist (Abbildung 17). Die Skalierung erfolgt automatisch, um die Unterschiede maximal sichtbar zu machen. Unter dem jeweiligen Datenpunkt ist immer der anonyme Anlagencode angegeben, um dem Nutzer die Möglichkeit zu bieten, gezielt von den Besten zu lernen. Dies kann geschehen, indem einerseits ein Gesamtüberblick über alle verfügbaren Kennzahlen von der interessierenden Anlage angegeben ist, sowie die Anlagengrunddaten und die Anlagenparameter sichtbar sind. Hier kann dann ganz spezifisch mit den Werten der eigenen Anlage verglichen werden.

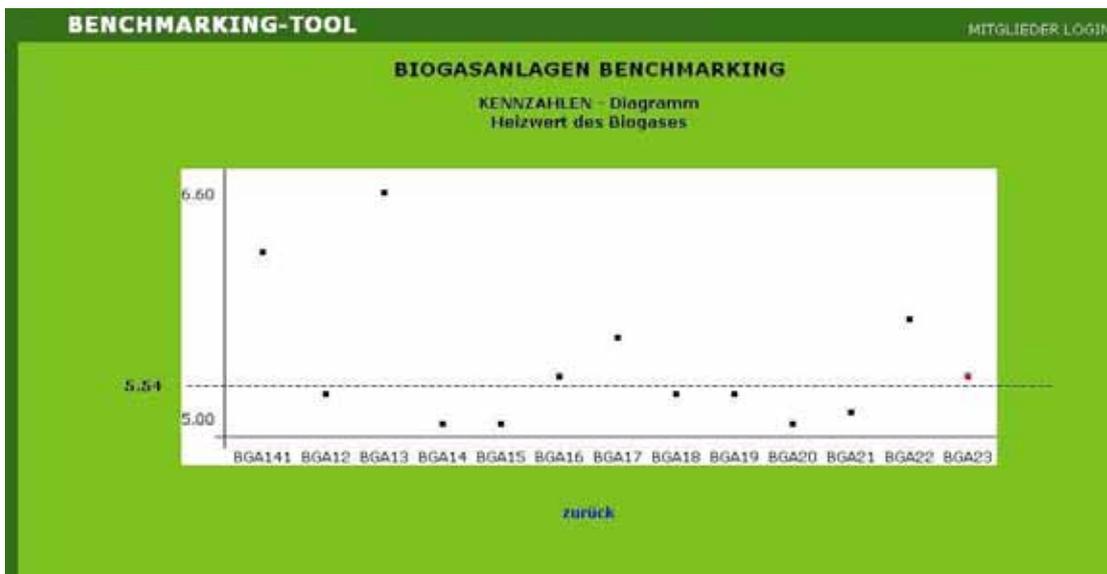
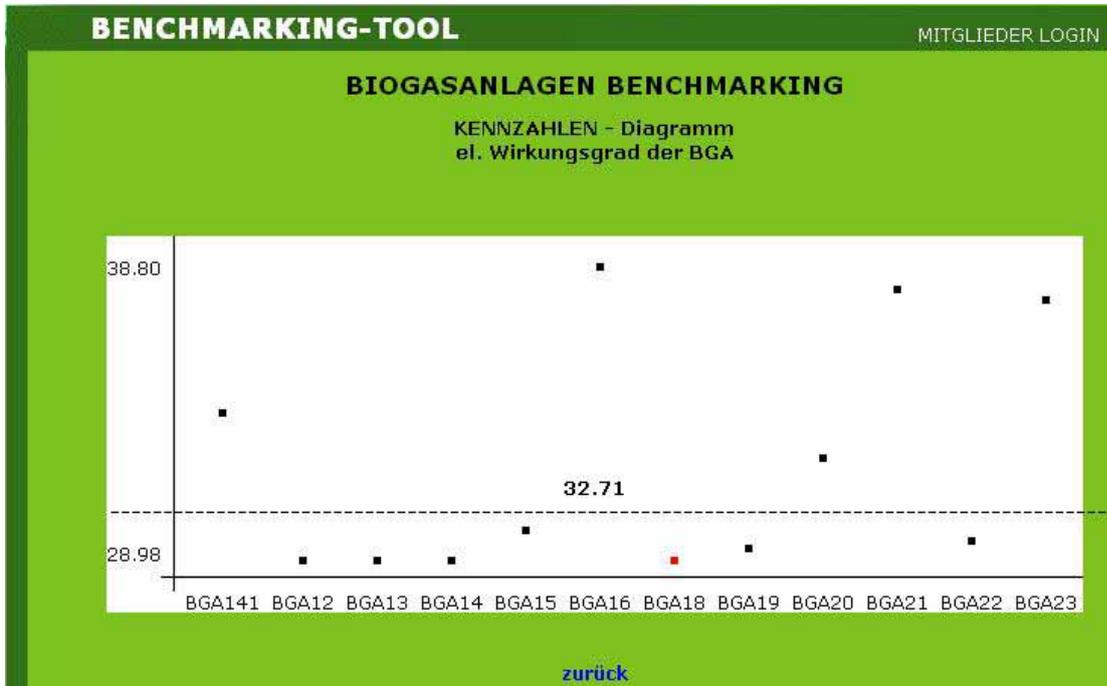


Abbildung 17: Beispiele für Biogasanlagenvergleich anhand von Kennzahlen

Die Darstellung der Anlagengrunddaten und der Anlagenparameter befindet sich in Abbildung 18.

Dabei werden die entsprechend eingegebenen Daten angezeigt. Die bereits in dieses Tool eingetragenen 12 Biogasanlagen ergeben bereits einen guten Querschnitt für Vergleiche.



Abbildung 18: Beispiele für die Darstellung der Grunddaten und Parameter von einer interessierenden Biogasanlage (Auszugsweise)

2.10 Best Biogas Practise Empfehlungen und Richtlinien

Entsprechend der Kooperationsvereinbarung zwischen IFA-Tulln und Profactor wurden die vorliegenden Empfehlungen und Richtlinien abgeglichen. Dies erfolgte auf Basis der beiden Seiten zur Verfügung stehenden Datensätze, die einerseits innerhalb eines Werkvertrages von IFA-Tulln erhoben wurden (12 BGA), andererseits entsprechend Kooperationsvereinbarung von IFA Tulln kostenlos zur Verfügung gestellt wurden.

Diese Abstimmung erfolgte vor der Veröffentlichung der „Best Biogas Practise Empfehlungen und Richtlinien“ von Profactor. Somit liegen nun die Best Biogas Practise Empfehlungen und Richtlinien vor, die mit dem gegenwärtigen Stand des laufenden Energiesysteme der Zukunft Projekts „Gütesiegel Ökogas“ am IFA-Tulln abgestimmt sind.

Diese Zusammenstellung von Werten¹ basiert auf der Auswahl von 34² österreichischen Biogasanlagen deren Betriebsführung als, dem derzeitigen Stand der Technik entsprechend, sehr gut bewertet werden kann. Von 12 dieser Anlagen wurden auch die chemischen Parameter erfasst.

Um in Zukunft Fehler in der Planung gleich am Reißbrett zu vermeiden, sind hier einige der wichtigsten Parameter und deren Richtwerte aufgelistet.

Um den wirtschaftlichen und möglichst effizienten Betrieb einer Biogasanlage garantieren zu können, ist es notwendig, die wichtigsten Parameter der Anlage in einem Betreiberhandbuch festzuhalten. Damit können eventuelle Störungen nachvollzogen und in Zukunft vermieden werden. Diese Parameter stellen die Grundlage für die Berechnung von Kennzahlen dar, wobei die Einstufung des Prozesses hinsichtlich biologischer, energetischer und wirtschaftlicher Effizienz erfolgt.

Die Auswahl der Kennzahlensets zielt auf einfache Handhabbarkeit unter Berücksichtigung einer möglichst umfassenden und reduzierten Darstellung aller relevanten Kriterien ab.

2.10.1 System-Parameter

2.10.1.1 Fermenterdimensionierung: Faulraumvolumen [m^3_{FR}]

Prinzipiell sei an dieser Stelle angemerkt, dass die vorgeschlagenen Richtwerte sich auf Anlagen mit homogen durchmischten Reaktoren beziehen, da diese Bauweise in Österreich vorherrschend ist.

Das betrachtete Faulraumvolumen ist immer das Flüssigkeitsvolumen! (oder Arbeitsvolumen $V = \pi \cdot d^2 / 4 \cdot h$, wobei d...Durchmesser und h...Füllstandshöhe, aber nicht die Fermenterhöhe)

¹ Diese Zusammenstellung erhebt in keinem Fall Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll rein als Unterstützung gesehen werden.

² Aus einem ursprünglichen Datenpool von 41 Anlagen, die im Zuge eines Monitorings der IFA Tulln befragt wurden, wurden 34 Anlagen ausgewählt, wobei auf kleine, bzw. alte Anlagen unter 99 kW elektrische Leistung verzichtet wurde.

2.10.1.2 Substratart

An diesem Punkt erfolgt die erste Trennung der Anlagen in diejenigen, die nachwachsende Rohstoffe in Form von Energiepflanzen vergären (in weiterer Folge NaWaRo-Anlagen genannt) und diejenigen, die biogene Reststoffe als Substrate vergären (in Folge Kofermentierungsanlagen genannt).

Für die Auswahl der Substrate der ersten Gruppe ist die Homepage www.biogasakzeptanz.at, die aus dem geförderten EdZ-Projekt „Bewertungstool für die regionale Akzeptanz von Biogasanlagen sowie Eignung und Verfügbarkeit von Energiepflanzen“ hervorgegangen ist, zu empfehlen.

Die Angabe der Substratart(en) ist notwendig, um die Vergleichbarkeit der Kennzahlen zu gewährleisten.

2.10.1.3 Stromeigenbedarf

Der Stromeigenbedarf ist im Detail nicht einfach zu erheben, da sämtliche Geräte, Apparaturen und Anlagenteile hinsichtlich Leistung und Betriebsstunden erfasst werden müssen. Oftmals ist man auf Annahmen angewiesen.

2.10.1.4 Wärmeeigenbedarf

Mit dem Wärmeeigenbedarf verhält es sich wie mit dem Stromeigenbedarf. Genaue rechnerische Werte sind meist nicht verfügbar, so daß oftmals auf Schätzungen bzw. Annahmen getätigt werden müssen.

2.10.2 „Vor-Ort“ Parameter

Die ‚Vor-Ort‘ Parameter sind jene Parameter, aus denen die Kennzahlen berechnet werden. Diese sind in regelmäßigen Abständen, im besten Fall täglich, aufzuzeichnen.

2.10.2.1 Substratmenge täglich [t]

Definition:

Die Gesamtmenge an Substrat (flüssig und fest) in Tonnen, die pro Tag in den Fermenter eingebracht wird.

Ermittlung:

Die Bestimmung dieses Wertes erfolgt über eine Waage (Futtermischwagen auf Waage gelagert) bzw. bei Gülle über die Durchflussmessung.

Eine Abschätzung des Volumens und der Berechnung der Tonnen an Substratmenge über die Dichte gestaltet sich als schwierig. Bei Feststoffen, wie z. B. Maissilage hängt die Dichte von der Pressung, der Teilchengröße, etc. ab. (Schulz u. Eder, 2001)

Empfehlungen und Richtwerte:

Für die Menge an Substraten können keine direkten allgemein gültigen Richtwerte angegeben werden, da sich diese an den baulichen Gegebenheiten orientieren. Prinzipiell ist die Substratmenge der direkte Einflussparameter für die Raumbelastung.

2.10.2.2 Biogasmenge pro Tag [m³/d]**Definition:**

Die tägliche Biogasmenge ist das in der Biogasanlage über einen Zeitraum von einem Tag produzierte Volumen an Biogas unter Normbedingungen (0°C; 1013 mbar).

Ermittlung:

Die Ermittlung kann und soll z. B. über Gaszähler oder Gasuhren ermittelt werden. Insbesondere bei Altanlagen findet häufig überhaupt keine Gasmessung statt. In diesen Fällen ist dieser Parameter sowie alle daraus abgeleiteten Kennzahlen nicht ermittelbar.

2.10.2.3 Biogasqualität

Folgende Messparameter werden ermittelt:

- *Methan Gehalt: CH₄ [%]*
Wertebereich 50–70%
< 48 % können Probleme bei der Verbrennung in BHKWs auftreten.
Am Markt sind durchaus Motoren, die mit niedrigeren CH₄-Konzentrationen betrieben werden können. Hier sei auf die Spezifikation und die Richtlinien des BHKW Herstellers verwiesen.
- *Schwefelwasserstoff H₂S [ppm]*
Die Konzentration des stark korrosiven und toxischen Gases sollte unter der vom Motorenhersteller vorgeschriebenen Maximalkonzentration liegen, da bei Überschreiten dieses Wertes die Gewährleistung des Motorenherstellers verfällt (Richtwert 300 ppm; direkt anfragen!).

Darüber hinaus treten Korrosionen in den Gasleitungen und im BHKW auf.

- *Sauerstoff O₂ [%]*
Dieser Wert ist vor allem wichtig zur Steuerung der biologischen Entschwefelung über Luft einblasen.

Die in der Literatur als hemmend angegebenen Werte (0,1mg/l Weiland, 1 ppm Thomé-Kozmiensky 1989) des O₂-Gehalts in der flüssigen Phase errechnen sich nach Henry für die Gleichgewichtskonzentration im Gasraum bei 38 °C auf 0,25 bzw. 2,5 % O₂, bei 50 °C auf 0,28 bzw. 2,8 % O₂ im Gasraum.

- *Siloxane [mg/m³]*
Siloxane sind vor allem in Wasch- und Putzmitteln, aber auch in Toilette- und kosmetischen Artikeln enthalten und stellen so vor allem bei Klär- und Deponiegasanlagen ein

Problem dar. Die organischen Siliziumverbindungen werden bei der Verbrennung des Biogases im Motor zu SiO_2 (Quarz) oxidiert. Dieses Mineral wirkt stark abrasiv auf alle beweglichen Teile im Motorblock. Grenzwerte dafür sind beim Motorenhersteller direkt anzufragen.

2.10.2.4 Temperatur [°C]

Die Temperatur ist einer der entscheidendsten Faktoren bei einem biologischen Prozess. Die Mikroorganismen leben in einem bestimmten Temperaturbereich, der ihren optimalen Stoffumsatz beeinflusst. Bei einer Fermentation ist es notwendig, die Temperatur konstant zu halten. Weiters wirken sich bestimmte chemische Parameter bei höheren Temperaturen gravierender aus (z. B. $\text{NH}_4\text{-N}$ wird bei höherer Temperatur giftiger)

In der Literatur werden zwei Temperaturbereiche genannt, die von der Definition her für den überwiegenden Großteil der Biogasanlagen zutreffend sind³. (Schlegl 1992)

- mesophil: Bereich von 20–42 °C
 Optimum 37–40 °C

- thermophil: Bereich von > 40–70 °C
 Optimum 53–55 °C

2.10.3 Kennzahlen und Benchmarks: Berechnung und Bedeutung

Aus einer Reihe von etablierten Kennzahlen wurden jene ausgewählt, die eine möglichst vollständige und komprimierte Betrachtung ermöglichen.

Die Kennzahlen werden im Nachfolgenden alleine für sich behandelt. Für eine Bewertung von Biogasanlagen ist jedoch immer die Gesamtheit aller Kennzahlen zu sehen, nur so bieten diese eine gute Möglichkeit, die Leistung der Anlage zu ermitteln bzw. eine bessere Betriebsführung zu erreichen.

³ Auf den extrem thermophilen Bereich (> 65°C) wird hier nicht eingegangen, da in Österreich bislang keine derartige Anlage realisiert wurde.

2.10.3.1 Kennzahlen biologische Effizienz

In Tabelle 9 und Tabelle 10 sind die Kennzahlen und Benchmarks, die aus diesem Projekt hervorgegangen sind, für NaWaRo und Kofermentationsanlagen angegeben.

Tabelle 9: Kennzahlen und empfohlene Richtwerte für NaWaRo Anlagen

Kennzahl	Richtwert		Parameter		
	von	bis	Min	Max	Mittel
Durchschnittliche Biogasausbeute/kg oTS [Nm ³ /kg _{oTS}]	0,5	0,8	0,52	0,78	0,65
Biogasproduktivität [Nm ³ /m ³ _{FR} d]	1,0	1,5	0,45	2,11	1,08
Raumbelastung [kg _{oTS} /m ³ _{FR} d]	3	5	2,08	6,20	3,78
Hydraulische Verweilzeit ⁴ [d]	60	150	44	319	144
oTS Abbaugrad [%]	80	90	61,5	92,9	82,2
CH ₄ Gehalt [%]	50	55	49,7	59,8	53,9

Tabelle 10: Kennzahlen und empfohlene Richtwerte für Kofermentierungsanlagen

Kennzahl	Richtwert		Parameter		
	von	bis	Min	Max	Mittel
Durchschnittliche Biogasausbeute/kg oTS [Nm ³ /kg _{oTS}]	0,5	0,8	0,59	0,88	0,75
Biogasproduktivität [Nm ³ /m ³ _{FR} d]	1,0	1,5	0,37	2,17	1,23
Raumbelastung [kg _{oTS} /m ³ _{FR} d]	3	5	3,11	7,97	4,91
Hydraulische Verweilzeit ⁵ [d]	50	80	69	483	84
oTS Abbaugrad [%]	80	90	73,3	96,8	86,6
CH ₄ Gehalt [%]	50	60	55,4	65,6	61,4

⁴ Zur Berechnung der mittleren hydraulischen Verweilzeit wurde der Median herangezogen, um eine Ausreißerbereinigung zu erzielen.

⁵ Zur Berechnung der mittleren hydraulischen Verweilzeit wurde der Median herangezogen, um eine Ausreißerbereinigung zu erzielen.

a) Durchschnittliche Biogasausbeute bezogen auf oTS [$\text{Nm}^3/\text{kg oTS}$]

Definition:

Die durchschnittliche Biogasausbeute bezüglich oTS ist der in Nm^3 angegebene Biogasertrag einer zugeführten oTS-Menge von 1 kg.

Ermittlung:

Die durchschnittliche Biogasausbeute ist der Biogasertrag (Q_B) bezogen auf das Produkt aus der zugeführten Substratgesamtmenge (Q_0) der Konzentration an oTS (c_0).

Empfehlungen und Richtwerte:

Aus den Ergebnissen der beobachteten Anlagen liegt die Biogasausbeute zwischen 0,5 bis 0,8 $\text{Nm}^3/\text{kg}_{\text{oTS}}$.

Um den Vergleich zu Literaturdaten zu ermöglichen, ist der Bezug zur jeweiligen Substratart unerlässlich.

Maßnahmen:

Die Biogasausbeute ist vorwiegend substratabhängig. Nach der Kontrolle des Fermentationsprozesses sollte dieser ggf. verbessert werden – siehe Fermentationsparameter; deuten diese auf einen stabilen Zustand hin und der Gasertrag ist niedriger als für das verwendete Substrat zu erwarten, sollte überlegt werden, die Substratmischung zu optimieren, bzw. andere oder zusätzliche Substrate einzusetzen.

b) Durchschnittliche spezifische Biogasausbeute bezogen auf Fermentervolumen [$\text{Nm}^3/\text{m}^3\text{FR d}$] (Biogasproduktivität, Biogasertrag; Biogasbildungsrate)

Definition:

Die spezifische Biogasausbeute bzw. Biogasproduktivität ist die täglich produzierte Biogasmenge bezogen auf das Faulraumvolumen.

Ermittlung:

Die täglich produzierte Biogasmenge wird durch das Fermentervolumen (V_{FR}) dividiert.

Empfehlungen und Richtwerte:

Bei einer gut funktionierenden Fermentation soll die durchschnittliche spezifische Biogasausbeute bei 1–1,5 $\text{Nm}^3/\text{m}^3_{\text{FR}} \text{d}$ liegen. (Sedlmeier o.A.)

Ein hoher Biogasertrag kann z. B. durch die Steigerung der Rührleistung, um gelöstes Biogas auszutreiben bzw. feiner Vorzerkleinerung, um einen besseren Aufschluss zu gewährleisten, entstehen. Beides erhöht aber den Eigenstrombedarf der Anlage und es muss ermittelt werden, ob sich dies rentiert.

c) Raumbelastung BR [kg oTS/m³FR d]**Definition:**

Die Raumbelastung ist der organische Anteil des in den Fermenter eingebrachten Gärgutes, bezogen auf das nutzbare Fermenterraum-Volumen pro Zeiteinheit.

Ermittlung:

$B_R = c_O Q_0 V_{FR}^{-1}$, das Produkt aus Gehalt an organischer Substanz c_O in [%] und zugeführter Substratmenge Q_0 [m³] pro Tag im Verhältnis zum Reaktorvolumen V_{FR} [m³].

Empfehlungen und Richtwerte:

Laut FNR e. V. soll eine Raumbelastung von 3,5 kg oTS/m³FR d eingehalten werden. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2005)

Bei 80 % der beprobten Anlagen liegt die Raumbelastung zwischen 3 und 5 kg oTS/ m³FR d.

Liegt die Raumbelastung unter 3, ist der Faulraum zu groß definiert und es könnte durch höhere Belastung mehr Biogas produziert werden. Liegt die Raumbelastung über 5, kann das Substrat nicht mehr optimal gemischt werden und es treten lokale Versäuerungen auf, die eine Hemmung der Methanogenese zur Folge haben. Somit wird unvergorenes Substrat in das Endlager abtransportiert, das zum einen der Energieproduktion verloren geht und zum anderen beim Ausbringen des Gärrests auf die Felder aller Wahrscheinlichkeit Geruchsprobleme nach sich zieht. Darüber hinaus ist die Leistungsaufnahme der Rührwerksmotoren unverhältnismäßig groß und somit auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten abzulehnen.

Maßnahmen:

Bei zu niedriger Raumbelastung kann Substratzufuhr erhöht werden, bei zu hoher Raumbelastung Substratzufuhr drosseln.

d) Hydraulische Verweilzeit HRT [d]**Definition:**

Zeitdauer, die ein zugeführtes Substrat im Mittel vom Eintrag bis zu seinem Austrag im Fermenter verbleibt.

Ermittlung:

Zur Berechnung wird das gesamt zur Verfügung stehende Arbeitsvolumen herangezogen, d. h. Hauptfermenter mit Nachfermenter und falls vorhanden abgedecktes Endlager (offene Endlager oder Güllelagunen werden zur Berechnung nicht herangezogen).

$HRT = V_{FR} Q_0^{-1}$, Reaktorvolumen V_{FR} [m³] im Verhältnis zur zugeführten Substratmenge Q_0 [t/d]

Anmerkung: Die zugeführte Substratmenge wird hier nicht wie zuvor in m³/d angegeben, da bei der Angabe der Beschickung der Biogasanlage in m³ Substrat das Schüttraumvolumen berücksichtigt werden muss.

Allerdings kann bei Silagen die Dichte (abzgl. des Porenvolumens) näherungsweise mit 1 kg/l angenommen werden. Helffrich (Helffrich, 2005)⁶ hat in Untersuchungen nachgewiesen, dass in den Fermenterinhalt eingerührte NAWAROs von der Dichte 1 kg/l um höchstens 4 % abweichen, und somit ist die Verwendung der Masse pro Tag, in Tonnen, anstatt des Volumens in m³ (unter Berücksichtigung des Schüttraumgewichts bzw. Porenvolumens) eine zulässige Vereinfachung.

Empfehlungen und Richtwerte:

Die hydraulische Verweilzeit wird in erster Linie durch die Größe der Fermenter und erst in zweiter Linie durch die Menge an Substraten definiert, denn diese ist noch durch die Raumbelastung limitiert.

Generell ist es nicht sehr sinnvoll, übergroße Fermenter zu bauen, da diese nur die Gesamtinvestition in die Höhe treiben, ohne einen wirklichen Nutzen zu liefern.

Wichtig ist es, die Verweilzeit an die spezifischen Abbaugeschwindigkeiten der einzelnen Substrate anzupassen. Weiters sollte sie so gewählt werden, dass die Bakterienpopulation nicht ausgewaschen wird. (Schulz u. Eder, 2001). Bei Methanogenen geht man von einer Verdopplungszeit von bis zu sieben Tagen aus.

Bei mesophilen NAWAROs Anlagen soll die hydraulische Verweilzeit 30 Tage nicht unterschreiten, da der vollständige Abbau der Substrate nicht gewährleistet ist (sinnvoller Wertebereich 60–150 Tage) (Schulz u. Eder, 2001). Für Kofermentierungsanlagen, deren Intention es ist, mehr Substrate durch die Anlage zu schleusen, die noch dazu schnell abbaubar sind, ist es sinnvoll, die Verweilzeit nicht zu hoch zu wählen. Empfehlenswert ist deshalb ein Bereich zwischen 50 und 80 Tagen. Im thermophilen Bereich ist die Substratabbaugeschwindigkeit größer, so dass sich die Verweilzeit entsprechend verkürzen kann.

In der Praxis zeigt es sich, dass die hydraulische Verweilzeit bislang nie unterschritten, dafür um ein Vielfaches überschritten wird.

Maßnahmen:

Die Verweilzeit ist ein ausgesprochener Optimierungsparameter, abhängig von der Anlage und deren Konzeption (Reaktorgeometrie, Mischsysteme), sowie von den eingesetzten Substraten (Art und Größe).

Fermentationsprozess verbessern – siehe Fermentationsparameter, ev. Einsatz anderer Substrate bzw. Substratmischung optimieren.

⁶ Helffrich, D. *Fermentertechnik zur Vergärung von NAWAROs – Eintragsysteme, Rührwerke, Massenströme und Biologie*. Beitrag im Tagungsband „BioBiogas – Optimale Gewinnung und innovative Verwertung“. Veranstaltung des österreichischen Biogasnetzwerks, 16. März 2005, Steyr

e) oTS-Abbaugrad [%]**Definition:**

Der oTS-Abbaugrad gibt an, wie viel Prozent der organischen Trockensubstanz unter den gegebenen Bedingungen abgebaut wurden.

Ermittlung:

Die Errechnung dieses Parameters erfolgt nach der Formel: $(Q_{oTS_{zu}} - Q_{oTS_{ab}}) \cdot Q_{oTS_{zu}}^{-1}$.

Es sei angemerkt, dass ein vollständiger Abbau bis hin zur Mineralisierung nur theoretisch möglich ist, wenn das Substrat nicht ligninhaltig ist. Lignin kann anaerob nur sehr langsam abgebaut werden.

Empfehlungen und Richtwerte:

Der oTS-Abbaugrad schwankt von Anlage zu Anlage (abh. vom eingesetzten Substrat, der Verweildauer, Prozesstemperatur, verfahrenstechnischer Aspekte, Verholungsgrad der Pflanzen, etc.). Generell ist zu sagen, je höher der oTS Abbaugrad, desto besser. Je nach eingesetztem Substrat können die Werte zwischen 50 und 95 % Abbaugrad schwanken (Bischofsberger et. al. 2005, Seite 386).

Weiters wird in der Literatur angegeben, dass rund 92 % des Kohlenstoffs zu Biogas umgewandelt werden (Thomé-Kozmiensky, 1989).

Maßnahmen:

Verweilzeit verlängern; Fermentationsprozess verbessern – siehe Fermentationsparameter, ev. Einsatz anderer Substrate bzw. Substratmischung optimieren.

f) Heizwert [$kWh \cdot Nm^{-3}_{Biogas}$]**Definition:**

Energieinhalt eines Stoffes, der bei der thermischen Verwertung eines Stoffes genutzt werden kann.

Ermittlung:

Der Heizwert ist proportional zum CH_4 -Gehalt und kann durch die Bestimmung desselben ermittelt werden (Waerdt u. Willenbrink).

Heizwert (Biogas) = CH_4 -Gehalt in [%] $\cdot 0,1013^{-1}$

Empfehlungen und Richtwerte:

Das Hauptkriterium der Biogasqualität ist der CH_4 -Anteil, der in Korrelation zum Heizwert (H_i) vom Biogas steht. Für Biogas mit 60 % CH_4 -Anteil wird ein Heizwert von $6,078 kWh \cdot Nm^{-3}$ angegeben. (Waerdt u. Willenbrink)

Maßnahmen:

Fermentationsprozess verbessern – siehe Fermentationsparameter, ev. Einsatz anderer Substrate bzw. Substratmischung optimieren.

g) Anmerkungen und Darstellungen für die biologische Effizienz – Kennzahlen und Benchmarks anhand der untersuchten Anlagen

Die Auswertung der erhobenen Biogasanlagen zeigt deutlich, wie die hydraulische Verweilzeit, die Raumbelastung und die spezifische Biogasausbeute/Gasertrag zusammenhängen (vgl. Abbildung 19). Eine lange Verweilzeit bei den NAWARO Anlagen, bedingt durch den Bau zu großer Fermenter, ist kein Garant für eine hohe Biogasausbeute.

Bei Kofermentierungsanlagen zeigt es sich, dass bei einer Raumbelastung zwischen 4 und 5 und bei Verweilzeiten unter 100 Tagen die Biogaserträge im optimalen Bereich zwischen 1,5 und 2 Nm³/m³_{FR.d} liegen (vgl. Abbildung 20). Bei der Vergärung von biogenen Reststoffen werden Substrate wie Fettabscheiderrückstände oder Speisereste sehr schnell von den Organismen zu Biogas umgesetzt. (Bischofsberger et. al. 2005, Seite 386)

Eine lange hydraulische Verweilzeit (> 200 d, speziell bei NAWARO Anlagen) hat einen geringen Einfluss auf den oTS-Abbaugrad (vgl. Abbildung 21). Anaerob sehr schwer verdauliche Stoffe wie z. B. Lignin werden auch durch lange Lagerung äußerst langsam von den anaeroben Organismen umgesetzt, und als „Ballast“ im Faulraum belassen.

Bezogen auf die Kofermentierungsanlagen hat die Betrachtung gezeigt, dass es auch bei einer hohen Raumbelastung von mehr als 7 kg oTS/m³_{FR.d} möglich ist, einen oTS-Abbaugrad von 88 % zu erreichen (vgl. BGA28, Abbildung 22).

Der Methangehalt bei jenen Anlagen, die nachwachsende Rohstoffe vergären, ist bedingt durch den Energiegehalt geringer als bei der Vergärung von biogenen Reststoffen und liegt im Durchschnitt bei 54 % CH₄. (vgl. Abbildung 23). Hier zeigt es sich, dass lange Verweilzeiten keinen Einfluss, weder positiv noch negativ, auf den CH₄-Gehalt haben. Ebenso verhält es sich mit der durchschnittlichen Biogasausbeute. Auch bei den Kofermentierungsanlagen streuen die Ergebnisse um einen Wert von 0,8 Nm³_{Biogas}/kg_{oTS}. Somit ist es eine wirtschaftliche Betrachtung, wie groß die Anlage ausgelegt werden soll.

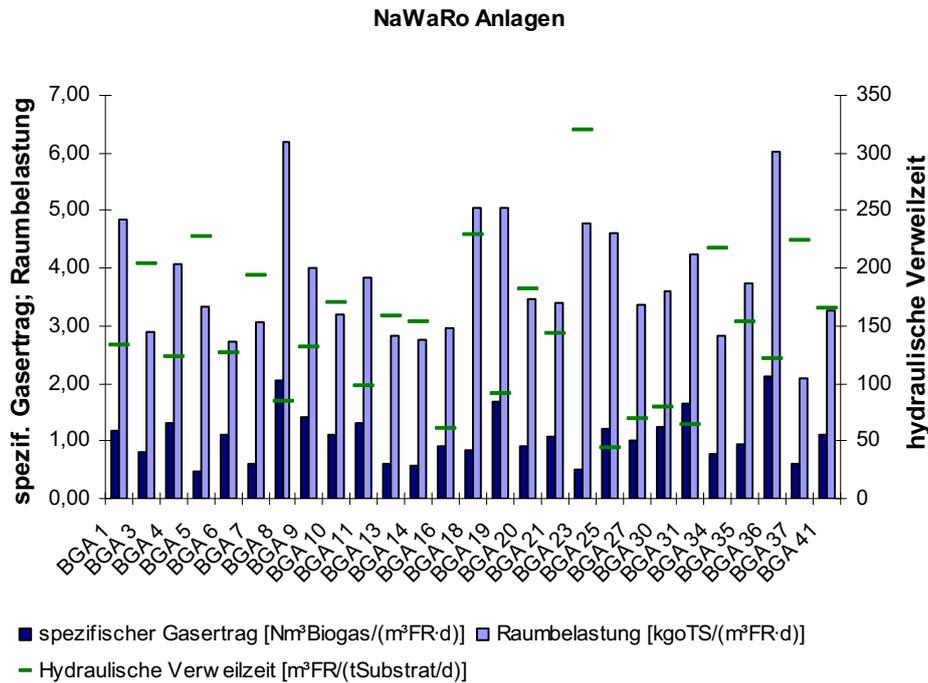


Abbildung 19: Biogas-Produktivität (spezifischer Biogasertrag), Raumbelastung und hydraulische Verweilzeit der NaWaRo Anlagen

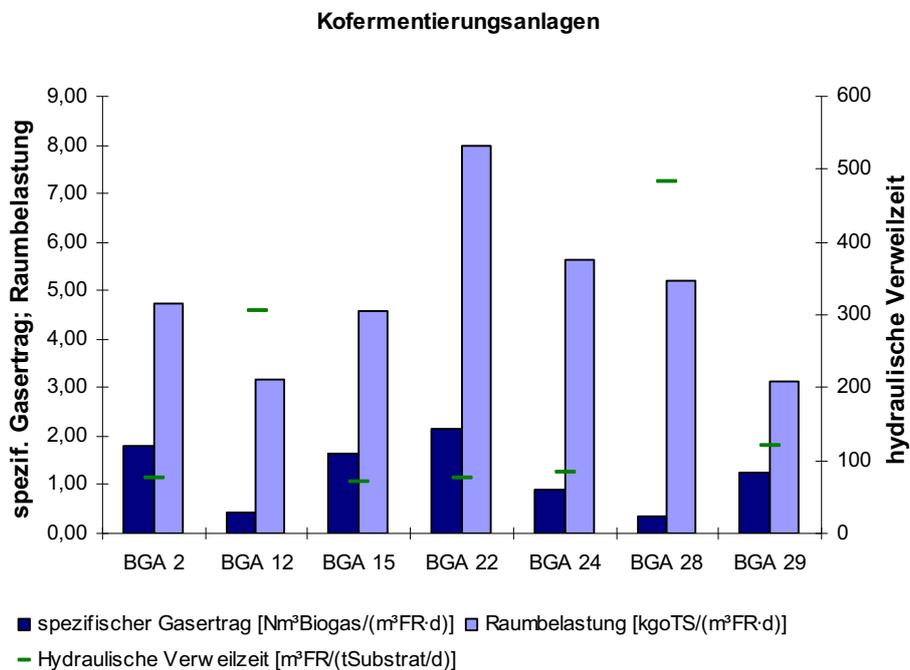


Abbildung 20: Biogas-Produktivität (bzw. spezifischer Biogasertrag), Raumbelastung und hydraulische Verweilzeit der Kofermentierungsanlagen

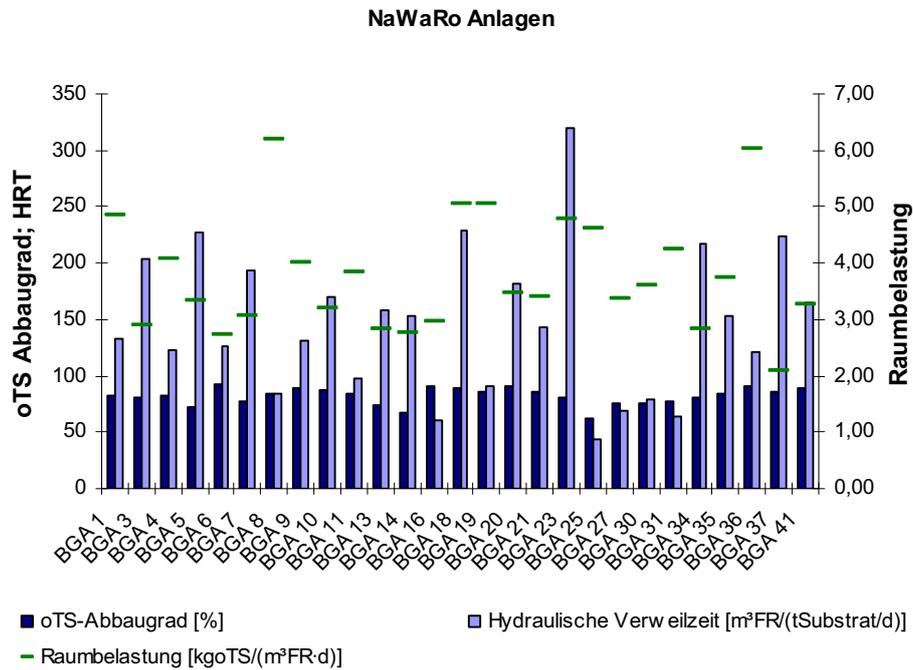


Abbildung 21: oTS-Abbaugrad, hydraulische Verweilzeit und Raumbelastung der NAWARO Anlagen

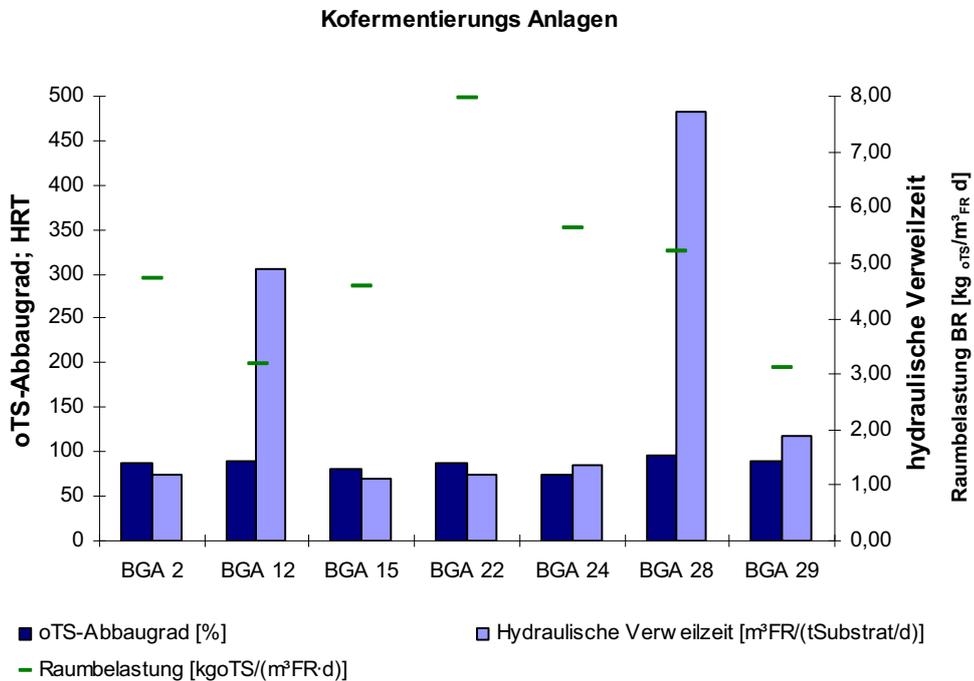


Abbildung 22: oTS-Abbaugrad, hydraulische Verweilzeit und Raumbelastung der Kofermentierungsanlagen

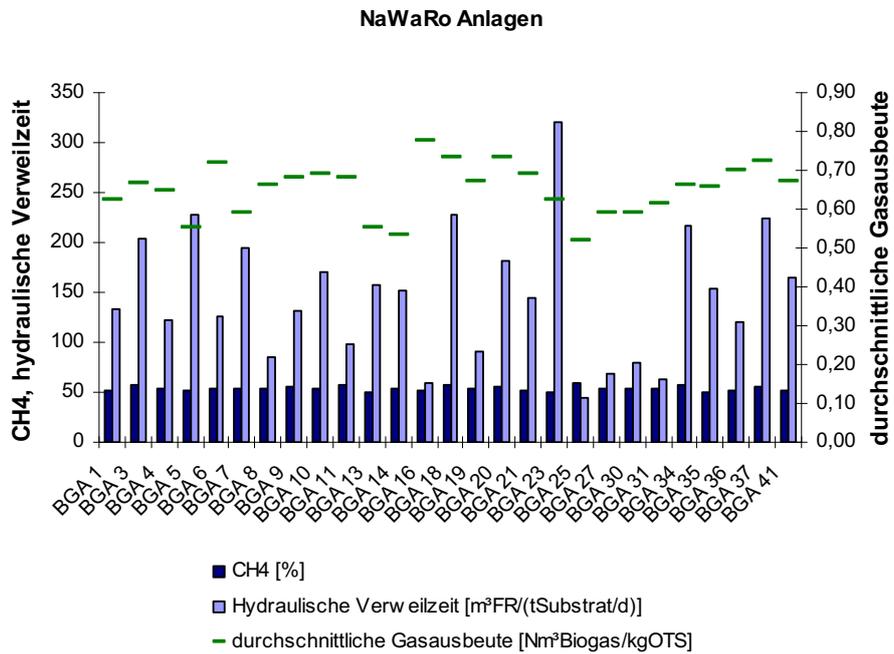


Abbildung 23: Methangehalt, hydraulische Verweilzeit und durchschnittliche Biogausausbeute der NaWaRo Anlagen

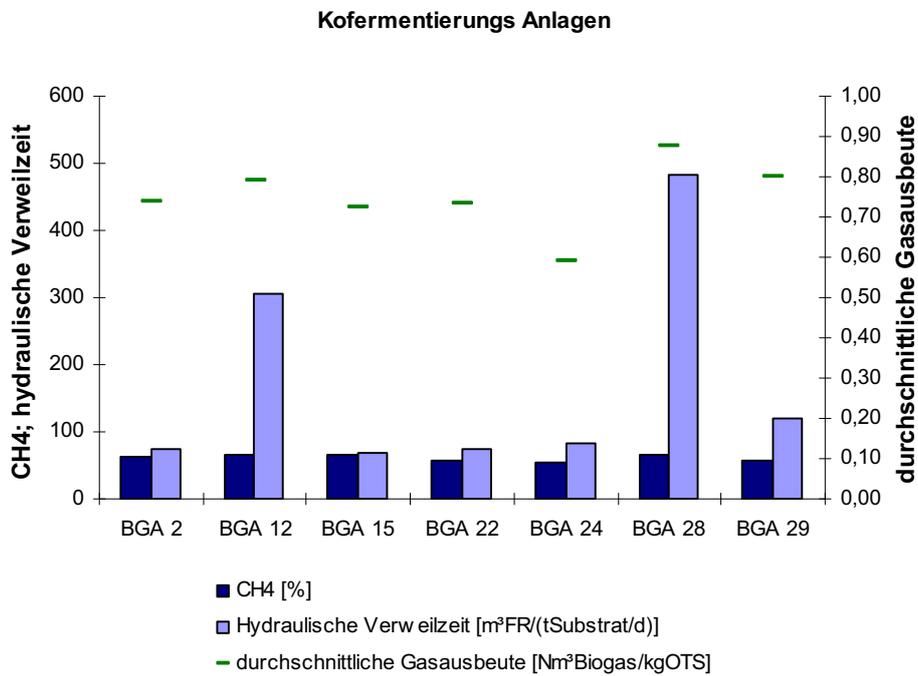


Abbildung 24: Methangehalt, hydraulische Verweilzeit und durchschnittliche Biogausausbeute der Kofermentierungsanlagen

2.10.3.2 Kennzahlen energetische Effizienz

Als Zusammenfassung sind die Übersichten für Kennzahlen und Benchmarks für Kofermentierungs- und NaWaRo-Anlagen in Tabelle 11 und Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 11: Übersicht der Kennzahlen der energetischen Effizienz für NaWaRo Anlagen

Kennzahl / Benchmark	Einheit	Min	Max	Mittel
Thermischer Jahresnutzungsgrad	[%]	0	39,2	12,4
Elektrischer Jahresnutzungsgrad	[%]	28,9	39,2	32,4
Gesamtjahresnutzungsgrad	[%]	30,5	68,4	44,8

Tabelle 12: Übersicht der Kennzahlen der energetischen Effizienz für Kofermentierungs-anlagen

Kennzahl / Benchmark	Einheit	Min	Max	Mittel
Thermischer Jahresnutzungsgrad	[%]	1,9	70,3	41,1
Elektrischer Jahresnutzungsgrad	[%]	29,7	36,3	32,8
Gesamtjahresnutzungsgrad	[%]	36,9	72,3	54,7

a) *Thermischer Jahresnutzungsgrad η_{therm} [%]*

Definition:

Der thermische Jahresnutzungsgrad beschreibt das Verhältnis der thermisch nutzbar abgegebenen Energie zur gesamten erzeugten Brennstoffenergie in einem Zeitraum von einem Kalenderjahr (in diesem Fall ist der Brennstoff Biogas, da die zugeführte Brennstoffenergie des Substrates nicht bekannt ist).

Ermittlung:

Quotient der jährlichen Wärmenutzung und der im Brennstoff Biogas enthaltenen Energie, die innerhalb dieses Zeitraumes erzeugt wurde.

Empfehlungen und Richtwerte:

In der Praxis ist der thermische Jahresnutzungsgrad, falls die Wärme überhaupt extern genutzt wird, stark von der Wartung z.B. Reinigung der Wärmetauscher, abhängig. Mit dem Blockheizkraftwerk können ca. 55–60% der eingesetzten Brennstoffenergie in nutzbare Wärme umgewandelt werden.

Niedrige Werte ergeben sich durch ein fehlendes Wärmeabnahmekonzept.

Maßnahmen:

Wärmeabnahmekonzept verbessern bzw. entwickeln, ev. Umwandlung in Kälte als Alternative überlegen.

b) Elektrischer Jahresnutzungsgrad η_{el} [%]**Definition:**

Der elektrische Jahresnutzungsgrad gibt das Verhältnis der nutzbar abgegebenen elektrischen Energie zur gesamten erzeugten Brennstoffenergie an.

Ermittlung:

Der el. Wirkungsgrad (Jahresnutzungsgrad) entspricht dem Quotienten der jährlichen Nettostromproduktion und der in dieser Zeit im erzeugten Brennstoff (Biogas) enthaltenen Energie.

Empfehlungen und Richtwerte:

Eine Änderung von η_{el} wirkt sich wesentlich auf die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage aus. Mit dem Blockheizkraftwerk werden in den besten Fällen knapp unter 40 %, normalerweise ca. 30–35% der eingesetzten Brennstoffenergie in Strom umgewandelt. Niedrige Werte ergeben sich durch schlechte Konversion zu elektrischer Energie.

Maßnahmen:

BHKW tunen bzw. erneuern, ev. Einsatz von Gasturbinen, Fermentationsprozess verbessern – siehe Fermentationsparameter

c) Gesamtjahresnutzungsgrad der BGA [%]

Der Gesamtjahresnutzungsgrad ergibt sich aus thermischem und elektrischem Jahresnutzungsgrad und lässt eine generelle Beurteilung hinsichtlich energetischer Effizienz zu. Er dient daher lediglich als Gesamtparameter zur schnellen Beurteilung, lässt aber keine Detailaussage zu.

Weiters sind weder in diesem noch in den einzelnen Jahresnutzungsgraden Stillstandszeiten der Biogasproduktion inkludiert (Brennstoff wird nicht erzeugt). Diese Stillstandszeiten schlagen sich jedoch in den ökonomischen Kennzahlen nieder.

d) Anmerkungen und Darstellungen für die energetische Effizienz – Kennzahlen und Benchmarks anhand der untersuchten Anlagen

Die Vergleiche der Kenndaten der energetischen Effizienz der Stichprobe der Anlagen in Österreich führt deutlich vor Augen, wie wichtig eine thermische Nutzung zusätzlich zur elektrischen Verwertung ist (vgl. Abbildung 25 bis Abbildung 28). Eine Steigerung des Gesamtjahresnutzungsgrades kann durch Wärmenutzungskonzepte erzielt werden. Dieser Punkt sollte in die Projektierung von Neuanlagen unbedingt einfließen.

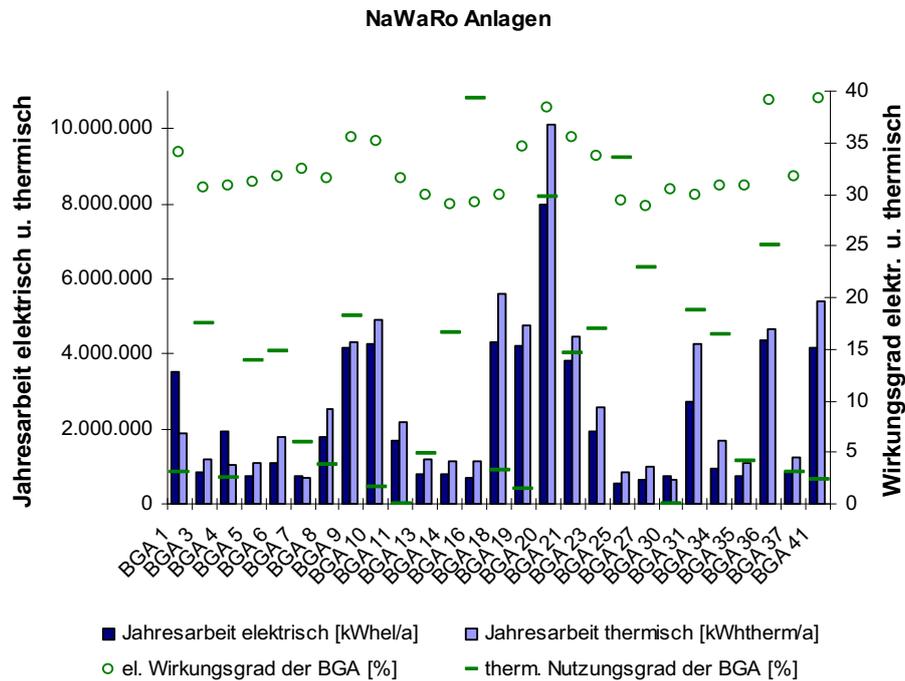


Abbildung 25: Jahresarbeit elektrisch und thermisch, elektrischer und thermischer Wirkungsgrad (=Jahresnutzungsgrad) der Biogasanlage NaWaRo Anlagen

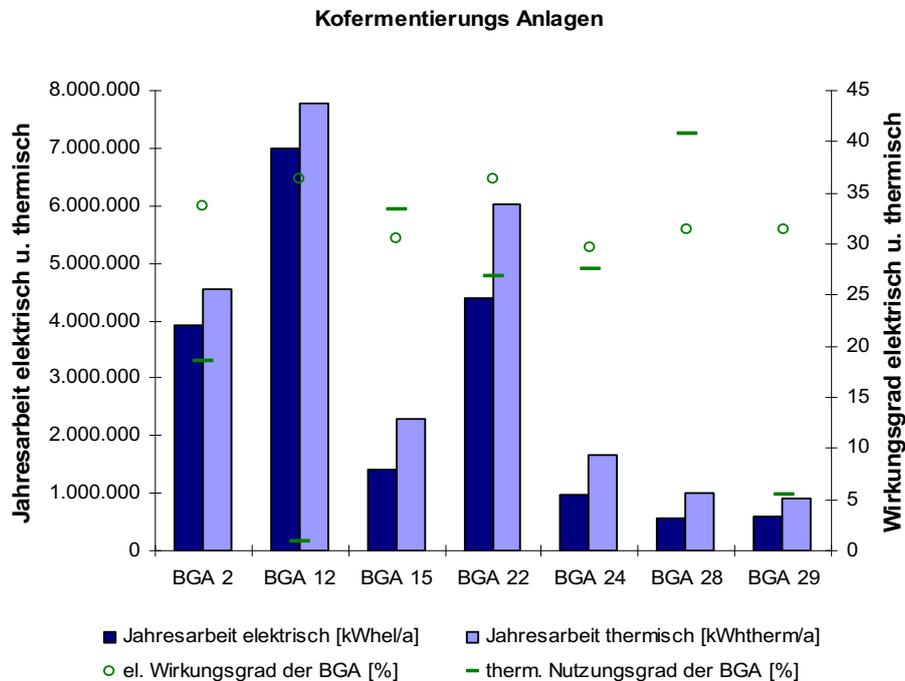


Abbildung 26: Jahresarbeit elektrisch und thermisch, elektrischer und thermischer Wirkungsgrad (=Jahresnutzungsgrad) der Biogasanlage Kofermentierungsanlagen

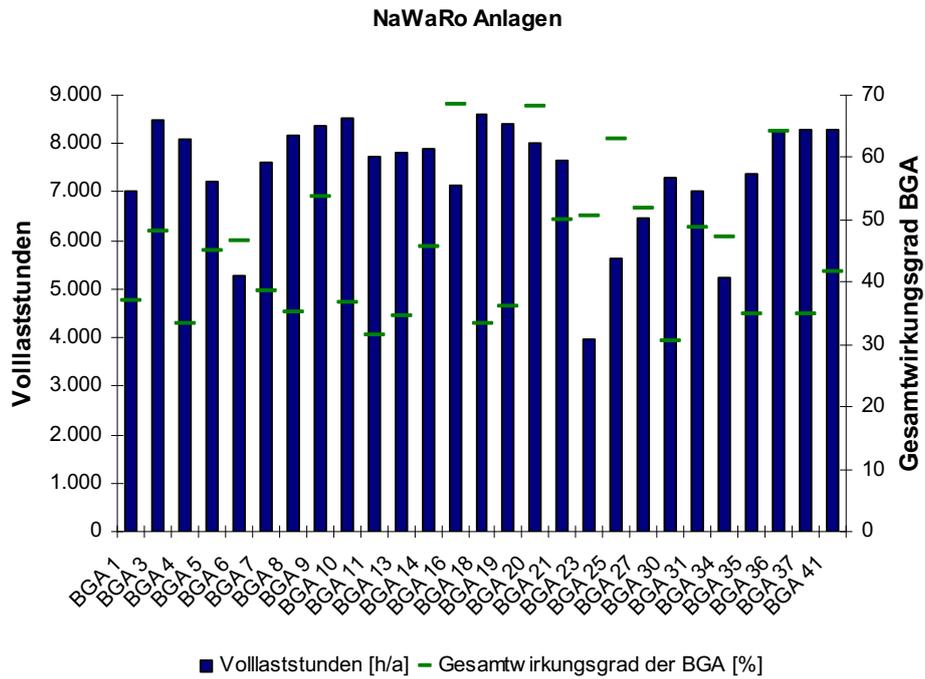


Abbildung 27: Volllaststunden und Gesamtwirkungsgrad (=Gesamtjahresnutzungsgrad) NaWaRo Anlagen

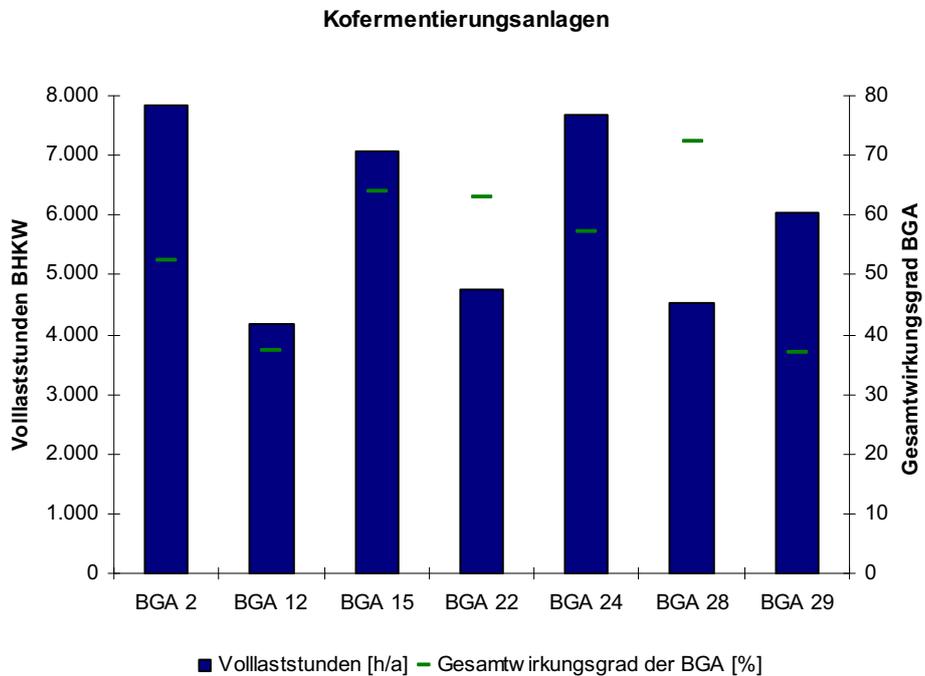


Abbildung 28: Volllaststunden und Gesamtwirkungsgrad (=Gesamtjahresnutzungsgrad) Kofermentierungsanlagen

2.10.3.3 Kennzahlen wirtschaftliche Effizienz

In Tabelle 13 und Tabelle 14 sind die Kennzahlen und Benchmarks für NaWaRo und Kofermentationsanlagen angegeben.

Tabelle 13: Übersicht über die Kennzahlen der wirtschaftlichen Parameter der NaWaRo-Anlagen

Kennzahl / Benchmark	Einheit	Min	Max	Mittel
Stromgestehungskosten	[€Cent.kWh _{el} ⁻¹]	1,59	12,50	8,24
Investitionskosten bezogen auf die elektrische Nennleistung	[€ .kWh _{el} ⁻¹]	2627	8080	4294
Betriebskosten bezogen auf die elektrische Jahresarbeit	[€Cent.kWh _{el} ⁻¹]	0,01	0,07	0,03
Substratkosten bezogen auf die elektrische Jahresarbeit	[€Cent.kWh _{el} ⁻¹]	0,01	0,08	0,05

Tabelle 14: Übersicht über die Kennzahlen der wirtschaftlichen Parameter der Kofermentierungsanlagen

Kennzahl / Benchmark	Einheit	Min	Max	Mittel
Stromgestehungskosten	[€Cent.kWh _{el} ⁻¹]	-1,41	8,50	4,84
Investitionskosten bezogen auf die elektrische Nennleistung	[€ .kWh _{el} ⁻¹]	2315	6450	4168
Betriebskosten bezogen auf die elektrische Jahresarbeit	[€Cent.kWh _{el} ⁻¹]	0,04	0,05	0,04
Substratkosten bezogen auf die elektrische Jahresarbeit	[€Cent.kWh _{el} ⁻¹]	-0,05	0,05	0,00

a) **Stromgestehungskosten**

Die Stromgestehungskosten umfassen alle jährlichen Kosten und werden in Bezug zur jährlichen Energieproduktion in kWh_{el} gesetzt. Als anfallende Kosten werden die Investitionssumme für die Anlage sowie die Substratkosten und die Betriebskosten (inkl. Wartungsaufwand) berücksichtigt.

Als wirtschaftlicher Richtwert wird aufgrund der zum Zeitpunkt der Erhebung gültigen Mindestförderung für Ökostromanlagen 8 €cent/kWh_{el} gesetzt.

Die Stromgestehungskosten sind als variabel anzusehen, da sie stark vom Markt beeinflusst werden. Dies umfasst die Kosten für die Substrate ebenso wie den Wartungsaufwand (außer fixe Wartungsverträge).

Diese Kennzahl lässt eine direkte Abschätzung der Wirtschaftlichkeit zu. Der Wert sollte jedenfalls unter dem erzielten Vergütungstarif für den eingespeisten Strom liegen, um den wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten.

Bei zu hohen Kosten ist nach Einsparungspotentialen (siehe Betriebskosten) zu suchen oder die Betriebsführung so weit zu verbessern, um die Wirtschaftlichkeit wieder zu erreichen.

Maßnahmen:

Maßnahmen liegen oftmals im Bereich der Planung, Einsparungspotentiale nutzen, Substratkosten reduzieren, Betriebskosten minimieren.

b) Investitionskosten bezogen auf die elektrische Nennleistung [$\text{€} \cdot \text{kW}_{\text{el}}^{-1}$]**Definition:**

Gesamtinvestitionssumme bezogen auf die elektrische Nennleistung PN in Kilowatt

Ermittlung:

Quotient aus der Gesamtinvestitionssumme und der abgegebenen el. Dauerleistung der BGA, für die sie (gemäß den jeweiligen Liefervereinbarungen) bestellt und installiert ist ($K_{\text{ges}} \cdot \text{PN}^{-1}$).

Empfehlungen und Richtwerte:

Diese Kennzahl dient zum groben Abschätzen der Investitionskosten und zum Vergleich verschiedener Systeme.

Die Höhe der Investitionskosten wird vor allem von der Art und Größe der Anlage und den dazu notwendigen technischen Voraussetzungen bestimmt. Die Investitionskosten je kW_{el} betragen je nach Bautyp, Größe und Ausstattung zwischen 2.900 und 6.200 $\text{€}/\text{kW}_{\text{el}}$.

Maßnahmen:

Maßnahmen liegen im Bereich der Planung

c) Betriebskosten bezogen auf die elektrische Jahresarbeit [$\text{€Cent} \cdot \text{kWh}_{\text{el}}^{-1}$]**Definition:**

Quotient aus den anfallenden Betriebskosten und der el. Jahresarbeit

Ermittlung:

Quotient aus den jährlichen Betriebskosten in [$\text{€Cent} \cdot \text{a}^{-1}$] und der elektrischen Jahresarbeit [$\text{kWh}_{\text{el}} \cdot \text{a}^{-1}$] entspricht dieser Kennzahl ($K_{\text{B}} \cdot W_{\text{el}}^{-1}$).

Maßnahmen:

Maßnahmen liegen oftmals im Bereich der Planung, Betriebskosten minimieren

d) Substratkosten bezogen auf die elektrische Jahresarbeit [$\text{€Cent} \cdot \text{kWh}_{\text{el}}^{-1}$]**Definition:**

Quotient aus den jährlichen Substratkosten und der el. Jahresarbeit

Ermittlung:

Quotient aus den jährlichen Substratkosten in [€Cent.a⁻¹] und der el. Jahresarbeit [kWh_{el}.a⁻¹] ergibt diese Kennzahl ($K_S \cdot W_{el}^{-1}$).

Empfehlungen und Richtwerte:

Die Substratkosten enthalten alle spezifischen Kosten und Erlöse, wie Produktionskosten, Transport, Vorbehandlungs- und Nachbehandlungskosten, sowie Entsorgungsbeiträge (Einnahmen).

Maßnahmen:

Substratkosten reduzieren, Substratmischung optimieren

e) Anmerkungen und Darstellungen für die wirtschaftlichen Effizienz-Kennzahlen und Benchmarks anhand der untersuchten Anlagen

Die Vergleiche der Kenndaten der wirtschaftlichen Effizienz der beschriebenen Stichprobe der Anlagen sind Abbildung 29 bis Abbildung 32 dargestellt.

Da die Stromgestehungskosten über eine sehr große Bandbreite streuen, ist es sehr schwierig, darüber eine Aussage zu treffen. Generell zeigt es sich, dass unter den gegebenen Förderbedingungen der Betrieb einer Biogasanlage in Österreich durchaus wirtschaftlich machbar ist. Große Diskrepanzen zeigen die Betriebs- und Substratkosten pro Jahresarbeit. Dies ist bei NaWaRo Anlagen vor allem durch die Bewertung des Eigenanbaus der Feldfrüchte zu erklären.

Weiters spielen die Transportkosten der Substrate und des Gärrests, sowohl bei NAWAROs als auch bei Kofermentierungsanlagen eine entscheidende Rolle. Es muss deshalb darauf geachtet werden, die Transportwege so kurz wie möglich zu halten. Dies sollte auch die Intention eines Energielandwirtes sein.

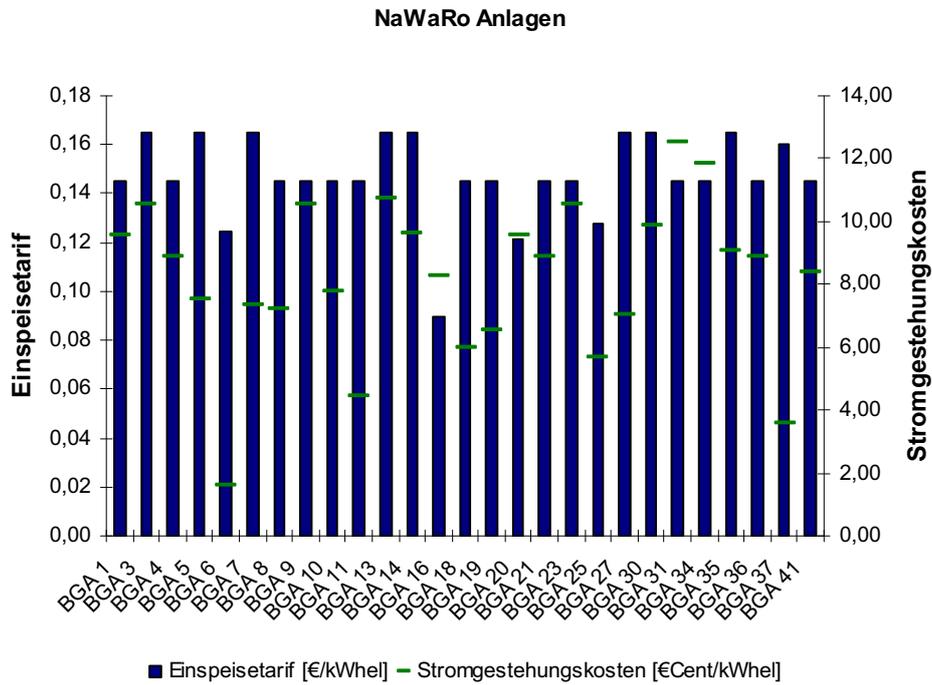


Abbildung 29: Einspeisetarif und Stromgestehungskosten NaWaRo Anlagen

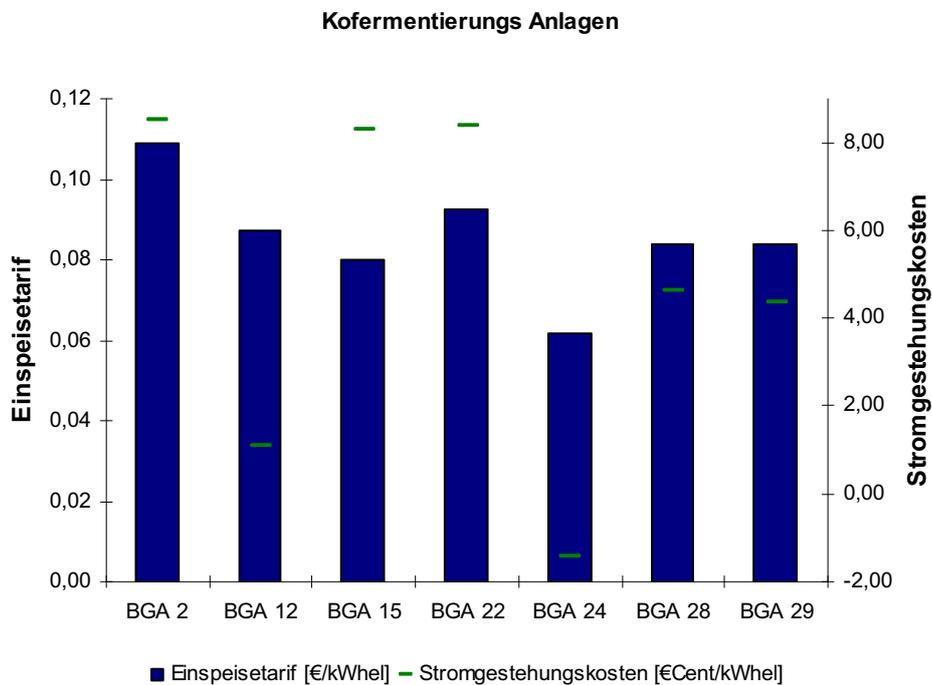


Abbildung 30: Einspeisetarif und Stromgestehungskosten Kofermentierungsanlagen

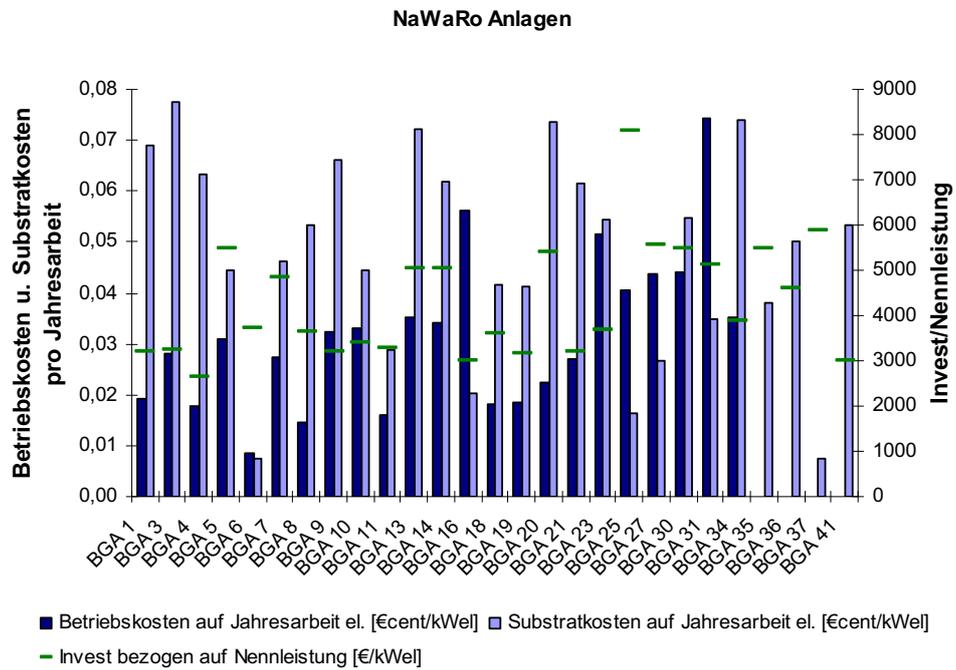


Abbildung 31: Betriebskosten, Substratkosten bezogen auf elektrische Jahresarbeit und Investitionskosten bezogen auf Nennleistung NaWaRo Anlagen

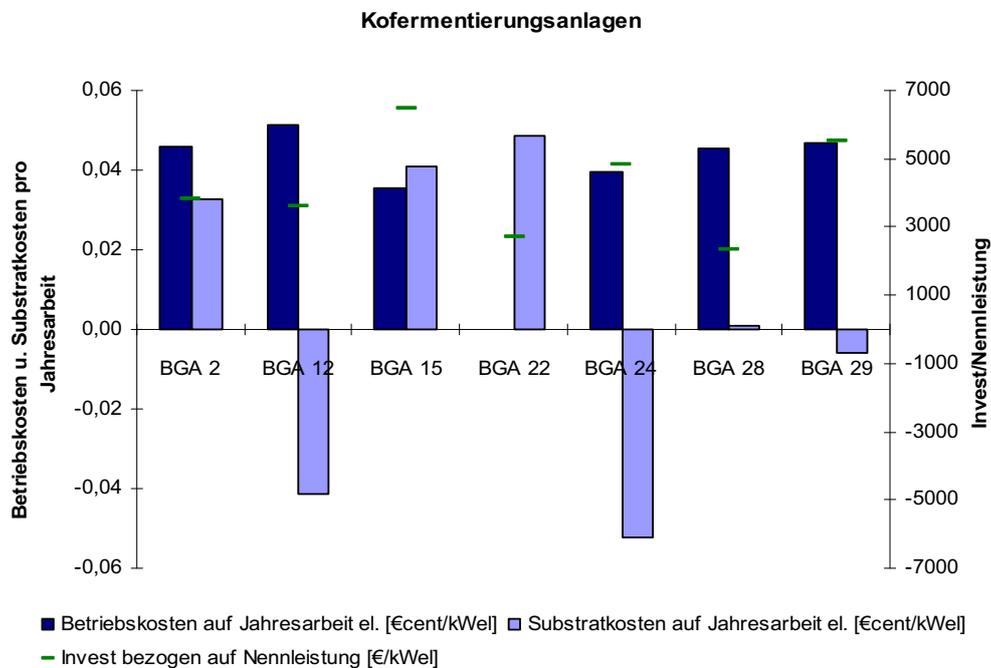


Abbildung 32: Betriebskosten, Substratkosten bezogen auf elektrische Jahresarbeit und Investitionskosten bezogen auf Nennleistung Kofermentierungsanlagen

2.10.4 Vorschläge zur stabilen Betriebsführung von Biogasanlagen – Biologische Kennzahlen und Fermentationsparameter (Tiefenmonitoring)

Für den stabilen Betrieb einer Biogasanlage ist in erster Linie eine stabile Biologie notwendig, daher wird der Betrachtung der biologischen Kennzahlen in Kombination mit den Fermentationsparametern ein eigenes Kapitel gewidmet.

2.10.4.1 Methode zur Beurteilung des Anlagenzustandes über Raumbelastung und Biogasertrag

Zum Zwecke einer schnellen Abschätzung des Anlagenzustandes kann eine Grobeinteilung der beiden Kennzahlen (siehe unten) hilfreich sein (Momentanbeurteilung). Die Einteilung ist stark von der Substratart und Zusammensetzung abhängig, so dass die Wertebereiche im Wesentlichen auf der Erfahrung des Betreibers beruhen.

Berechnung der Raumbelastung (B_R) – kg oTS/m³_{FR} d

$$B_R = \frac{c_0 \cdot Q_0}{V_R}$$

c_0 ... oTS [bzw. TS] des Substrates in %

Q_0 ... Substratzugabe in [kg FM/d]

V_{FR} ... Fermentervolumen in [m³]

Anhand der Berechnungsergebnisse erfolgt eine grobe Einteilung in Schwach-, Mittel- oder Hochlast unter Zuhilfenahme von Tabelle 15..

Berechnung des Biogasproduktivität, Biogasertrag; Biogasbildungsrate (G_B) – Nm³ m_{FR}⁻³ d⁻¹

$$G_B = \frac{Q_B}{V_R}$$

Q_B ... Biogasproduktion [Nm³/d]

V_{FR} ... Fermentervolumen in [m³]

Anhand der Berechnungsergebnisse erfolgt eine, auf der Erfahrung der Autoren beruhende, grobe Einteilung in niedrig, mittel oder hoch unter Zuhilfenahme von Tabelle 15.

Tabelle 15: Einteilung der Raumbelastung und des Biogasertrags

Einteilung	Raumbelastung		Einteilung	Biogasertrag
Schwachlast	kleiner 3		niedrig	kleiner 0,5
Mittellast	Bereich um 3,5		mittel	Bereich um 1
Hochlast	größer 5		hoch	größer 1,5

Tabelle 16: Erklärungsschema für verschiedene Belastungszustände

Raumbelastung	Biogasertrag	Erklärung / mögliche Maßnahme
niedrig	hoch	Energierreiches Substrat wird verwendet, unter Umständen vermehrt Substrat zusetzen, um Raumbelastung zu erhöhen.
niedrig	niedrig	Anlage durch Zugabe von mehr Substrat höher belasten.
hoch	niedrig	Anlage entweder überlastet, oder zu energiearmes Substrat (z. B.: Grünschnitt) zugesetzt. Kontrolle chemischer Parameter
hoch	hoch	Anlage ist hoch belastet, bei Aufrechterhaltung dieses Zustandes ist jedoch die vermehrte Kontrolle dieser und der chemischen Parameter ratsam.

Eine kurze Beschreibung, was zum jeweiligen Zustand geführt hat, bzw. was bei diesem Zustand mögliche, sinnvolle Maßnahmen sind, findet sich in Tabelle 16. Diese ist als Schnellhilfe im Bedarfsfall anzusehen und soll bei der richtigen Entscheidung, welche Massnahme zu treffen ist, unterstützend wirken.

2.10.4.2 Beurteilung des biologischen Prozesses

Für eine Detailbeurteilung des biologischen Prozesses müssen die Fermentationsparameter überprüft werden.

Je nach Wertebereich kann eine Einteilung des biologischen Prozesses in stabil – kritisch – instabil bzw. im schlimmsten Fall abgestürzt getroffen werden, wobei die empfohlenen Maßnahmen entsprechend unterschiedlich sind. Die Angaben der Wertebereiche sind Anhaltspunkte, wenn eine Anlage plötzlich nicht mehr funktioniert.

In der Praxis zeigt es sich immer wieder, dass Biogasanlagen äußerst stabil laufen, auch wenn ein oder mehrere Werte über einen längeren Zeitraum höher als die Richtwerte sind. Dies ist kein Grund zur Besorgnis, sondern liegt an der Anpassungsfähigkeit der Mikroorganismen an die Umgebung. Die angeführten Maßnahmen sind als Soforthilfe im Bedarfsfall zu verstehen und nicht als die direkte Anleitung zur Prozessführung.

Neben den angeführten Parametern spielt auch die Kenntnis der Belastungsgrenzen der Anlage und der ständigen Kontrolle der „vor Ort“-Parameter eine wichtige Rolle. Anzeichen für eine Überlastung des Fermenters können so früh erkannt werden und durch rechtzeitige Reaktion können Stillstände leicht vermieden werden. Als solche Anzeichen seien die Bildung von feinporigem, kompaktem Schaum genannt (Quelle Schaum: Bischofsberger et. al. 2005, Seite 271), wobei diese Beobachtung und Beurteilung Erfahrung bedarf, sowie die Kontrolle des CH₄-

Gehalts. Angehende Versäuerungen und eine damit verbundene Hemmung der Methanogenese zeichnen sich über diesen Messwert recht schnell ab.

Tabelle 17: Ausgewählte Fermentationsparameter und ihre Wertebereiche (Quelle: Infoblatt Fermentationsparameter IFA-Tulln 2005, aktualisierte Version IFA-Tulln 2006)

Zustand	pH	NH ₄ ⁺	Gesamt-VFA
stabil	7,2–8,1	< 5 g/l	< 1500 mg/l
kritisch	7,0–7,2 oder 8,1–9,0	5–6 g/l	1500–4500 mg/l
Instabil werdend / gravierende Pro- zessstörung	ein od. mehrere Parameter liegen weit außerhalb der Bereiche – wenig bis keine Biogasproduktion hoch belasteter Fermenter – instabiler Betriebszustand		

Es ist schwierig, den komplexen Reaktionsablauf unter Verwendung unterschiedlichster Substrate in einer komprimierten Weise darzustellen, dennoch sind in Tabelle 17 die notwendigsten Parameter und deren Richtwerte angeführt. Dies soll eine Unterstützung beim Fermentationsprozess sein.

Mögliche Vorgehensweise – Empfehlungen

Stabiler Zustand:

Unterteilung des stabilen Zustandes nach Anlageneinteilung in niedrig – mittel – hoch Raumbelastet:

- a.) niedrig belastet: Erhöhung von B_R, Änderung der Substratzusammensetzung
- b.) mittel belastet: Betriebsweise weiterführen, keine Änderung der Substratzusammensetzung
- c.) hoch belastet: Betriebsweise nur mit vermehrter Analyse der Gesamt-VFA, pH und NH₄ weiterführen

Kritischer Zustand:

Bei Werten von **NH₄ 5–6 g/l (bzw. >), pH > 8,1 und Gesamt-VFA < 700 mg/l** kann eine *Hemmung durch undissoziiertes Ammoniak* vorliegen (Abbildung 33).

Vorgehensweise:

1. Fermenterinhalt mit Wasser verdünnen (ca. Hälfte), abgepumpte Biogasgülle zwischenslagern
2. Umstellen der Substratzusammensetzung (weniger Stickstoff/Protein; max. NH₄ Konz. 4 g/l)

Bei Werten von **NH₄ < 5 g/l und Gesamt-VFA 1500–4500 mg/l** kann eine *Hemmung durch undissoziierte VFA (UFA)* vorliegen (Abbildung 34).

Vorgehensweise:

1. Wenn die Summe der VFA im obersten Bereich ($> 4,5$ g/l) und $\text{pH} < 7$ ist die schnellste Maßnahme die Zugabe von Kalkmilch
2. Substratzufuhr stoppen
3. Biogasertrag und Methanqualität beobachten
4. Analyse der VFA mind. 1x pro Woche
5. Substratzugabe erst wieder aufnehmen, wenn $\sum \text{VFA} < 1$ g/l
6. Ursache der hohen VFA beseitigen (Substratumstellung)

Gravierende Prozessstörung:

1. Substratzufuhr stoppen
2. Prozess einige Tage (mind. 4) weiter betreiben (ohne Substrat) um sicher zu gehen, dass sich der methanogene Prozess nicht doch erholt.
3. Fermenterinhalt in Endlager pumpen, Prozess neu starten und im stabilen Betrieb die Biogasgülle des abgestürzten Fermenters wieder langsam zur Substratzufuhr zudosieren

Die oben genannten Maßnahmen spiegeln die Erfahrung der Verfasser wider, und es kann weder Garantie für die positive Beeinflussung des Prozesses noch Haftung für Ausfälle, Schäden oder Folgeschäden übernommen werden.

Erklärungen zu Abbildung 33 und Abbildung 34:

Einerseits können mit diesen Grafiken die Konzentration an undiss. Ammoniak bzw. undissoziierten Fettsäuren aus pH-Wert und $\text{NH}_4\text{-N}$ bzw. Gesamt-VFA abgeschätzt werden.

An den Achsen, sowie in der Grafik sind die stabilen Prozessbedingungen entsprechend den zitierten Angaben in grün dargestellt. Kritische Wertebereiche sind in gelb, gravierende Prozessstörungen bzw. beginnende Instabilität in rot dargestellt.

Die Ermittlung der Betriebspunkte erfolgt durch das Einzeichnen der jeweiligen Werte an den Achsen (waagrechte Linie entlang des gemessenen pH-Werts und senkrechte Linie entlang des gemessenen $\text{NH}_4\text{-N}$ bzw. Gesamt-VFA Wertes), Bestimmung der Farbe am Schnittpunkt der Linien und Vergleich mit der nebenstehenden Farbskala ergibt den jeweiligen undissoziierten Ammoniak bzw. VFA.

Betrachtet man nun den Betriebspunkt in Abhängigkeit aller eingezeichneten Farbcodes, lässt sich die Qualität Betriebszustände graphisch ablesen. Optimalerweise sollten die Schnittpunkte in der Schnittmenge aller grünen Flächen liegen.

Befindet man sich innerhalb gelber und roter Bereiche, kann es sein, dass oben beschriebene Hemmungen vorliegen, und Verbesserungspotential im Betriebspunkt besteht.

Auch hier gilt, dass erst eine Beobachtung über die Zeit aussagekräftige Erkenntnisse zulassen.

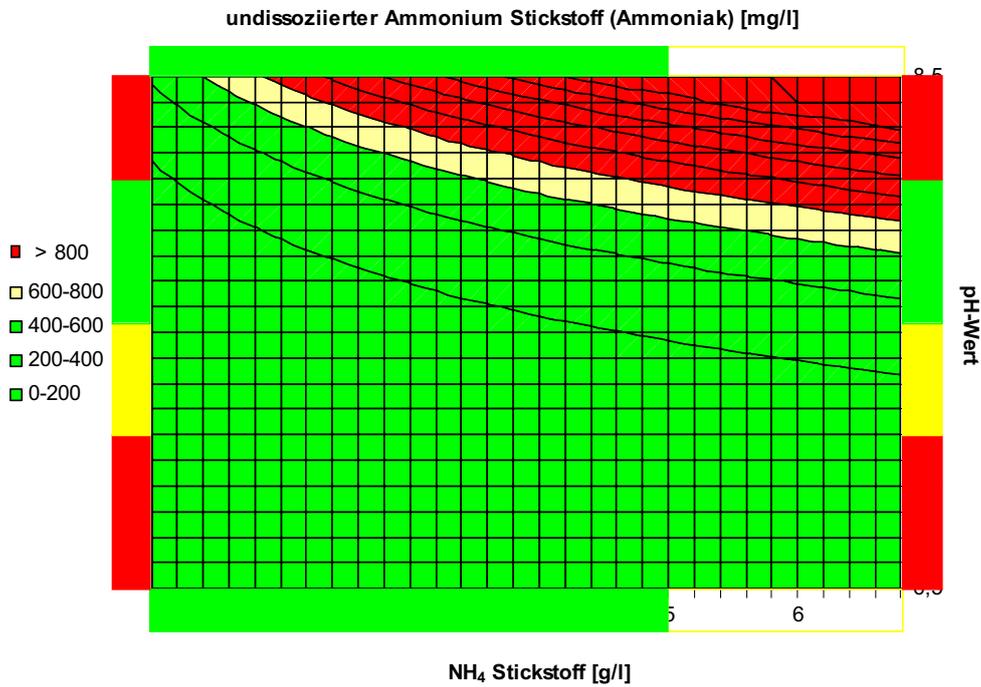


Abbildung 33: Darstellung der Wertebereiche für die Hemmung durch undissoziierten Stickstoff (Berechnet für 38°C $pK_A(\text{NH}_3)=8,87$) – rot, grün, gelb entsprechend Anhang II

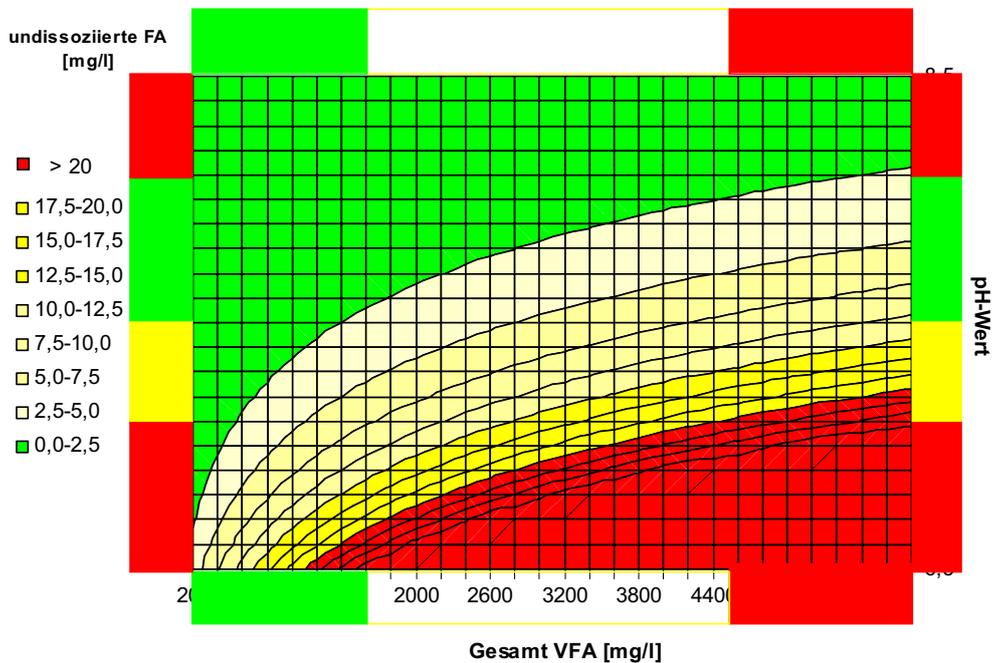


Abbildung 34: Darstellung der Wertebereiche für die Hemmung durch undissoziierte Fettsäuren (als Essigsäure Äquivalente bei 25°C) – rot, grün, gelb entsprechend Anhang II

2.10.5 Fallstudien Biogasanlagen – Auswertung anhand der 12 im Detail untersuchten Anlagen

2.10.5.1 Biologische Kennzahlen und Fermentationsparameter

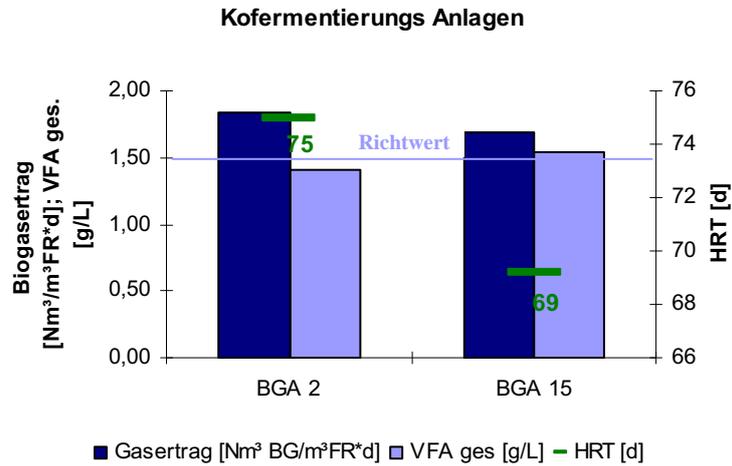


Abbildung 35: Biogasertrag, Fettsäuren und Verweilzeit von ausgewählten Kofermentierungs-anlagen

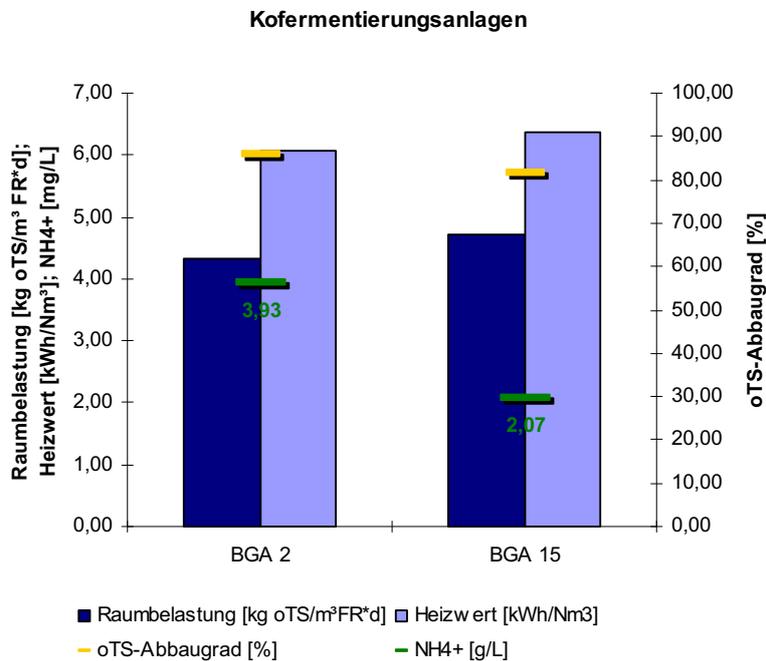


Abbildung 36: Raumbelastung, Heizwert, oTS-Abbaugrad und Ammoniumgehalt von ausgewählten Kofermentierungsanlagen

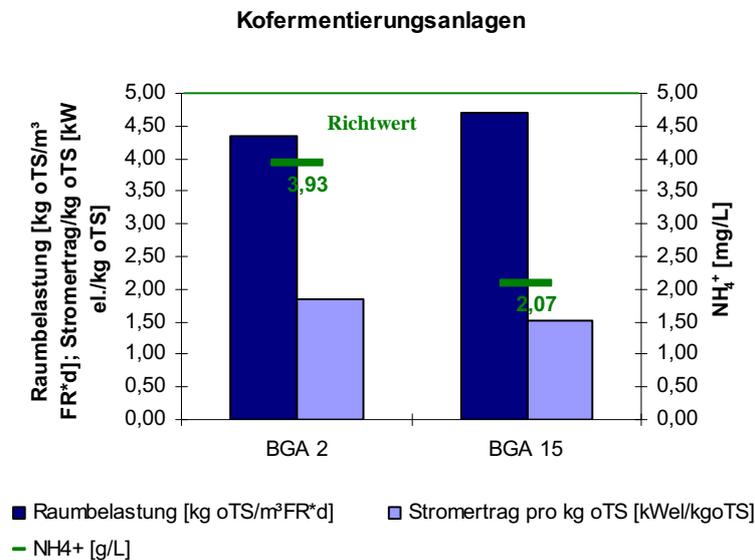


Abbildung 37: Raumbelastung, Stromertrag und Ammoniumgehalt von ausgewählten Kofermentierungsanlagen

Die beiden optimal funktionierenden Kofermentationsanlagen (BGA 2 und BGA 15 - Abbildung 35 und Abbildung 37) werden im oberen Belastungsbereich zwischen Mittel- und Hochlast (vgl. Tabelle 15), der für Kofermentierungsanlagen zu empfehlen ist, betrieben. Da aber speziell die NH_4^+ Werte, im Speziellen für Kofermentierungsanlagen, niedrig sind, ist die Belastung für die Mikroorganismen im Fermenter noch verträglich.

Die beiden Kofermentierungsanlagen (BGA 2 und BGA 15) werden in einem für derartige Anlagen relativ hohen Belastungsbereich betrieben. Da der oTS-Abbau gut funktioniert und der hohe Heizwert die gute Biogasqualität widerspiegelt (Abbildung 36), kann davon ausgegangen werden, dass es sich hier um gut funktionierende Anlagen handelt. Die NH_4^+ Werte sind im Speziellen für Kofermentierungsanlagen relativ niedrig (Abbildung 37).

Jedoch ist eine Anzahl von zwei Anlagen zu wenig, um eine signifikante und schon gar nicht eine allgemein gültige Aussage treffen zu können.

Die untersuchten NaWaRo-Anlagen, deren hydraulische Verweilzeit im optimalen Bereich (zwischen 60 bis 150 Tage) liegt, zeigen auch optimale Werte beim Biogasertrag und bei der Gesamtsumme der flüchtigen Fettsäuren (Abbildung 38).

Jene Anlagen, deren hydraulische Verweilzeit weit über dem empfohlenen Wert (150 Tage) liegt, weisen zwar sehr niedrige Fettsäurewerte, aber auch einen dementsprechend niedrigen Biogasertrag auf.

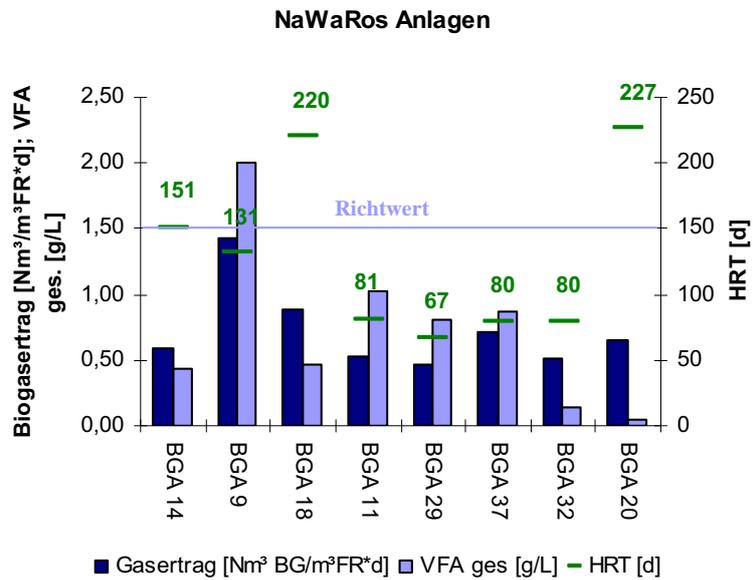


Abbildung 38: Biogasertrag, Fettsäuren und Verweilzeit von ausgewählten NaWaRos-Anlagen

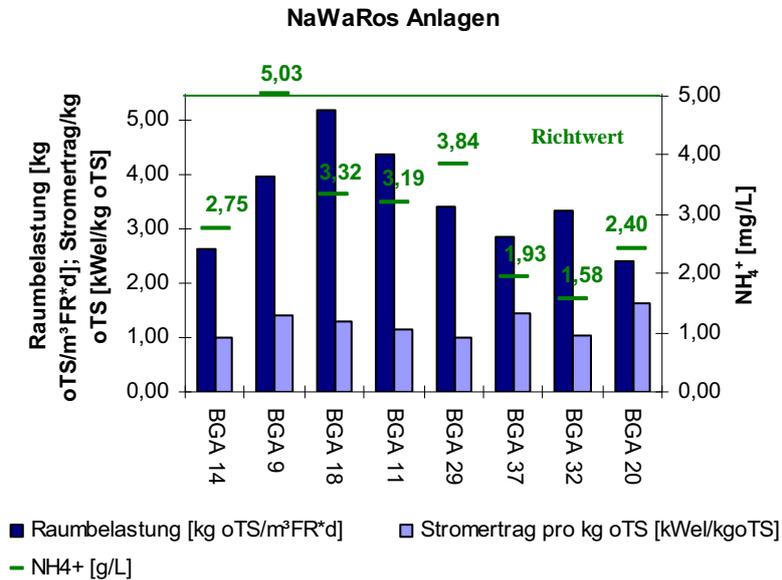


Abbildung 39: Raumbelastung, Stromertrag und Ammoniumgehalt von ausgewählten NaWaRos-Anlagen

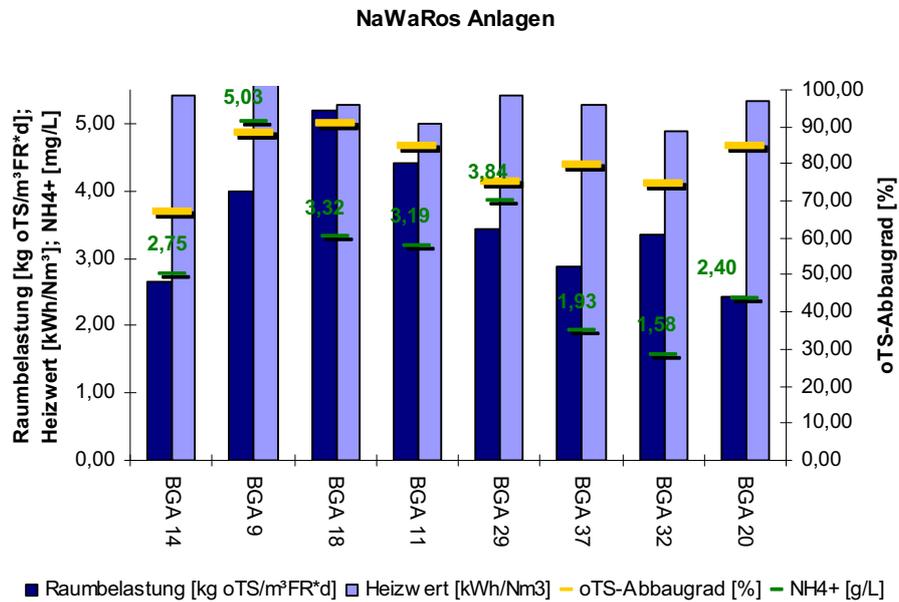


Abbildung 40: Raumbelastung, Heizwert, oTS-Abbaugrad und NH₄-Gehalt ausgewählter NaWaRos-Anlagen

Die Auswertung der erhobenen Daten zeigt, dass die meisten der analysierten Anlagen mit zu geringer Faulraumbelastung fahren. Die Anlagen 9, 18 und 11 sind hinsichtlich der Raumbelastung im optimalen Bereich einer NaWaRo Anlage (Abbildung 40). Allein der NH₄⁺ Wert ist bei Anlage 9 leicht erhöht (Abbildung 39 bzw. Abbildung 40).

Aus den anderen Anlagen ließe sich bei weitem mehr Biogas produzieren, würden die Fermenter höher belastet werden.

2.10.5.2 Energetische Kennzahlen

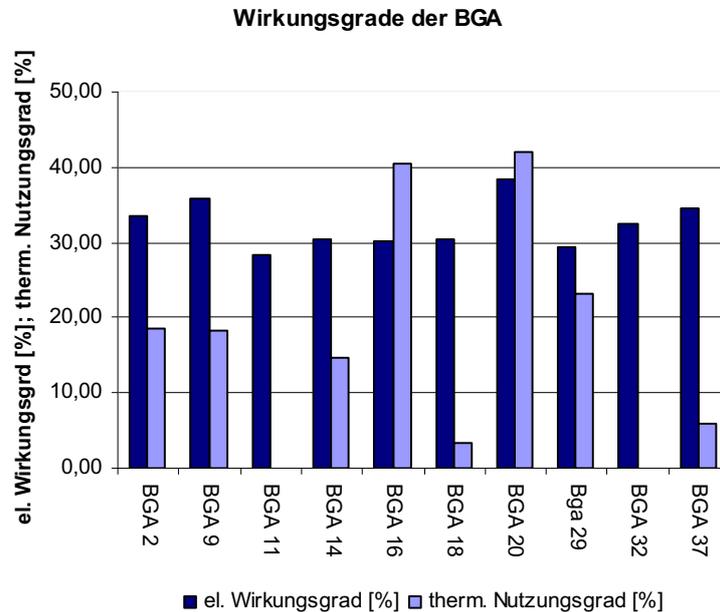


Abbildung 41: Elektrischer und thermischer Jahresnutzungsgrad von ausgewählten Anlagen mit eingezeichnetem minimalen elektrischem Jahresnutzungsgrad

Betrachtet man die elektrischen Wirkungsgrade der untersuchten BGA, wird eine Variation in einer relativ geringen Bandbreite sichtbar (Abbildung 41 und Abbildung 42). Im Gegensatz dazu streuen die thermischen Jahresnutzungsgrade erheblich (0–40 %).

Abbildung 41 und Abbildung 42 zeigen beim thermischen Jahresnutzungsgrad, dass die Wärmenutzungskonzepte teilweise stark verbesserungswürdig sind. Ebenso sind die Volllaststunden einer relativ großen Streubreite unterworfen, die von knapp über 5000 h/a bis hin zu mehr als 8500 h/a reicht (Abbildung 42).

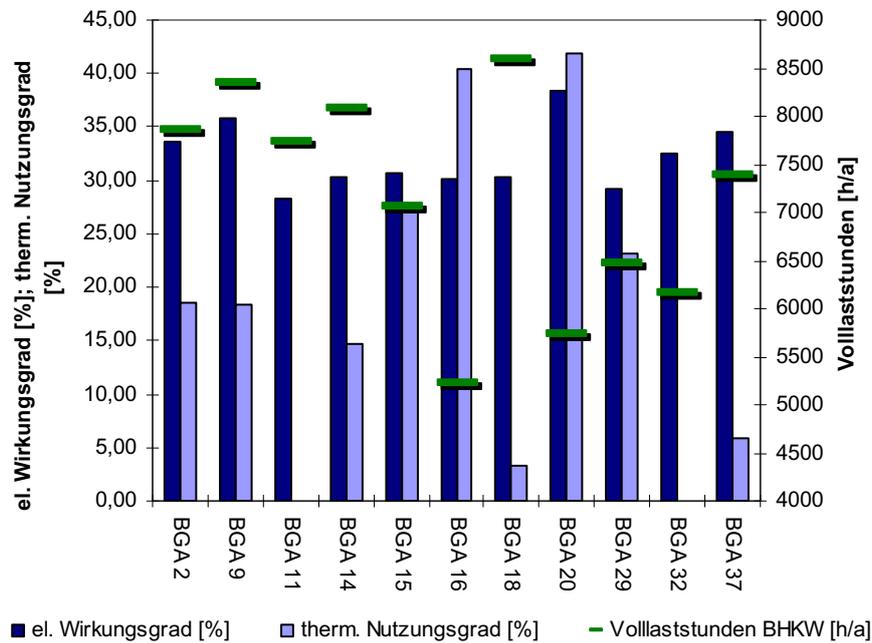


Abbildung 42: Elektrischer, thermischer Jahresnutzungsgrad und Volllaststunden der Referenzanlagen

2.10.5.3 Wirtschaftliche Kennzahlen

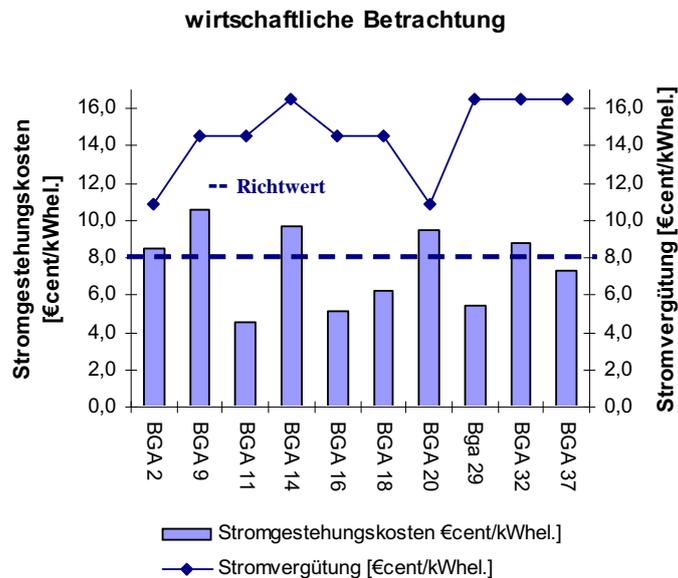


Abbildung 43: Stromgestehungskosten von ausgewählten Anlagen im Vergleich zur Stromvergütung mit eingezeichnetem wirtschaftlichem Richtwert

Hinsichtlich Stromgestehungskosten (Abbildung 43) hält der Großteil der betrachteten Anlagen zum Zeitpunkt der Erhebung den Richtwert optimal ein, bzw. unterschreiten ihn deutlich. Drei Anlagen liegen deutlich über dem gesetzten wirtschaftlichen Richtwert, hier ist noch Optimierungsbedarf gegeben.

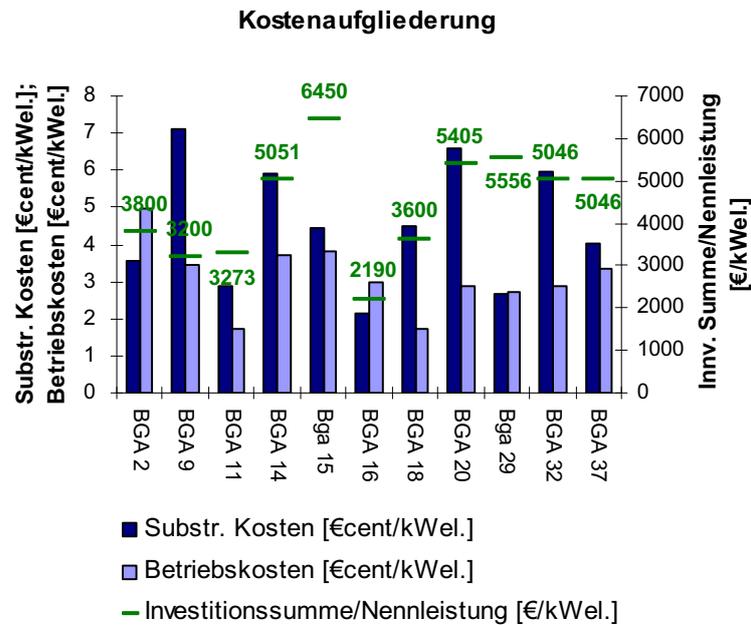


Abbildung 44: Kostenaufschlüsselung in Investitions-, Substrat- und Betriebskosten bezogen auf elektrische Jahresarbeit bzw. Nennleistung von ausgewählten Anlagen im Vergleich

Die aufgeschlüsselten wirtschaftlichen Kennzahlen (Abbildung 44) zeigen relativ große Schwankungen zwischen den Biogasanlagen Substrat-, Betriebs- und Investitionskosten betreffend. Diese Aufstellung der Kosten gibt Orientierungswerte vor und zeigt mögliche Einsparungspotentiale auf.

3. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

3.1 Konkrete Ergebnisse am Ende des Projekts

3.1.1 „Benchmarking Tool“ – Webbasiertes Biogasanlagen Monitoring und Benchmarking Programm

Das in diesem erstellte Benchmarking-Tool erlaubt bei entsprechender Eingabe der Parameter die Berechnung der in den „Best Biogas Practice“ Richtlinien beschriebenen Kennzahlen. Zusätzlich können auch weitere relevante Kennzahlen automatisch berechnet werden.

Die Darstellung erfolgt im anonymisierten Vergleich zu den entsprechenden Kennzahlen anderer eingegebener Anlagen.

Neben dem grafischen Vergleich können die entsprechenden Zahlenwerte der Kennzahlen, Grunddaten und Parameter einerseits für die eigene Anlage ausgegeben werden, aber auch anonymisiert für andere, frei auswählbare Vergleichsanlagen. Auf diese Weise können einerseits Eigenheiten bzw. Besonderheiten von Anlagen aufgrund der technischen charakterisierenden Parameter gefunden werden.

Derzeit sind 12 untersuchte Anlagen zum Vergleich eingegeben.

Durch die Vorbereitung und Eingabemöglichkeit einer Reihe zusätzlicher Parameter ist das Tool auch für zukünftige, weiterführende Vergleiche gerüstet.

Da dieses Tool auf einer SQL-Datenbank beruht, können diese Daten auch von Experten in z.B. Excel-Format ausgelesen werden.

Nach Projektablauf kann das Tool entweder vom Auftraggeber oder dem Österreichischen Biogasnetzwerk weiter betrieben werden, und den Biogasanlagenbetreibern zur Verfügung gestellt werden. Damit kann das Monitoring und Benchmarking fortgeführt werden, und Steigerungen in der Effizienz bzw. Trends über längere Zeiträume beobachtet werden.

3.1.2 „Best Biogas Practice“ Richtlinien

Die „Best Biogas Practice“ Richtlinien sind ein für die Zielgruppe verständlicher, umsetzbarer Leitfaden. Sie enthalten eine Liste der für eine Charakterisierung einer Biogasanlage relevanten Kennzahlen. Diese sind darin kurz erläutert, seine Einflüsse auf den Prozess dargestellt, eine Messmethodik vorgeschlagen Richtwerte bzw. -bereiche für einen optimalen Betrieb einer Biogasanlage angegeben. Das Hauptaugenmerk wurde darauf gelegt, einerseits für bestehende Anlagenbetreiber umsetzbar zu sein, aber auch für zukünftige Anlagenerrichter und -betreiber Richtwerte bzw. Richtbereiche anzugeben, die einen von Beginn an stabilen und effizienten Betrieb gewährleisten.

Zusätzlich sind für diese Kennzahlen Werte von mehr als 30 derzeit in Betrieb stehenden Anlagen angegeben. 12 ausgewählte Anlagen wurden inklusive der Fermentationsparameter betrachtet.

Bei Erfüllung dieser Richtwerte bzw. Empfehlungen kann ein Qualitätszeichen verliehen werden, das aufgrund der umfassenden Betrachtungen aus Literatur und Realdaten für einen nachhaltigen Betrieb dieser indiziert.

3.2 Schlussfolgerungen, Verwertung, Weiterverwendung, Ausblick und Empfehlungen

Der Vorschlag für die „Best Biogas Practise“ Empfehlungen und Richtlinien, sowie die Arbeiten des und für das Österreichische Biogasnetzwerk stellen die wesentlichsten Ergebnisse des Projektes dar.

Die „Best Biogas Practise“ Empfehlungen und Richtlinien (nach gemeinsamer Abstimmung auf einen Standard mit dem Projekt „Gütesiegel Ökogas 2) können zu einem Qualitätszeichen bzw. Qualitätsstandard weiterentwickelt werden, der dann vom Auftraggeber, oder einer von ihm benannte Stelle an Biogasanlagen verliehen werden kann, welche die in diesem Projekt erarbeiteten Empfehlungen und Richtlinien beachten und umsetzen.

Allenfalls können die erarbeiteten Vorschläge (unter entsprechender Erfüllung der Kooperationsvereinbarung) als Handbuch oder Leitfaden für bestehende und zukünftige Biogasanlagenbetreiber verwendet und veröffentlicht werden. Mit diesem vorliegenden Abschlussbericht liegen weiters eine Fülle wertvoller Kennzahlen und Daten (wenn auch aus Datenschutzgründen in anonymisierter Form) vor, die sicher in Zukunft noch weiteren Berechnungen und Analysen oder zukünftigen Vergleichen für die Beschreibung von Entwicklungen dienen können.

Das Benchmarking-Tool als Grundlage für das „Lernen von den Besten“ hat sich in seiner Grundidee in vielen Fällen sehr gut bewährt. Vorauszuschicken ist allerdings, dass ein Benchmarking nur so gut sein kann wie die zugrunde liegenden Daten. Die ermittelten Parameter rund um den Betrieb einer Biogasanlage sind beim Benchmarking in das Biogas- Benchmarking und Monitoring eingeflossen. Der generelle Ansatz wurde auf die technische und ökonomische Effizienz begrenzt. Benchmarking und Monitoring sollte auch auf andere Bereiche (ökologische Effizienz und Sozioökonomie) ausgeweitet werden. Wobei die existierende Parametersammlung als wertvolle Grundlage dienen kann.

Es ist im Rahmen dieses Projekts gelungen, Kennzahlen zu entwerfen und ermitteln, die sehr gut für einen Systemvergleich herangezogen werden können. Die verfahrens- und bautechnischen Unterschiede der Einzelanlagen können jedoch keinesfalls vernachlässigt werden, sondern sind bei Beurteilungen immer mit einzubeziehen. Durch die vergleichende Darstellung der Kennzahlen werden Unterschiede aufgedeckt, transparent gemacht und der Anlagenbetreiber bekommt Auskunft darüber, wo seine Anlage in einer kategorisierten, systematischen Gegenüberstellung liegt. Die ausgewählten Kennzahlen werden als sinnvoll und ausreichend für die allgemeine Beurteilung der Effizienz einer Biogasanlage erachtet. Dennoch macht es die Konsultierung von Experten nicht unumgänglich. Eben diesen dient das Tool als zusätzliche Grund-

lage für weiterführende Betrachtungen über das Optimierungspotential am Sektor Biogas. Davor war die Erhebung – sogar die Definition – der relevanten Parameter sehr zeitaufwendig und bis dato nicht wirklich standardisiert. Nun können mit Hilfe des Benchmarkingtools und der Unterstützung der Anlagenbetreiber, denen diese Informationen wiederum dienen sollten, in einer viel kürzeren Zeit und mit weit geringerem Aufwand ausgehoben werden.

Um sinnvolle Optimierungen, sei es an der eigenen Anlage, durch den Betreiber, oder durch standardisierte Richtlinien der Experten durchzuführen, bedarf es aktueller und fundierter Ist-Parameter von realen Anlagen. Dies setzt eine periodische Eingabe der einzelnen Fermentationsparameter voraus. Das Benchmarkingtool kann nur dann als sinnvoll erachtet werden, wenn es als sich selbstständig von Betreibern aktualisierte, dynamische Datenbank verstanden wird. Das setzt einiges an Verantwortung gegenüber den Benutzern voraus. Als Dank für den pfleglichen Umgang mit dem Tool ermöglicht es ein Monitoring des Zustandes jeder Einzelanlage.

Eine wichtige Basis für den Erfolg einer Biogasanlage ist und bleibt das Engagement und die Motivation des Betreibers. Um sich zu verbessern und konkurrenzfähig zu bleiben, muss dieser offen für das Lernen von Besten sein. Darüber hinaus kann jeder einzelne mit seinem Wissensstand mithelfen, zukünftige Anlagenbetreiber vor eventuellen Fehlern in der Planung, der Fermentation, der Auswahl der Substrate, etc. zu bewahren.

Eine sorgfältige Planung im Vorfeld des Baus der Anlage ist sehr wichtig. Neben der sorgfältigen Arbeit im Vorfeld und während des Baus der Anlage, muss der Betrieb der Anlage ständig optimiert werden. Was dabei der durch die österreichische und deutsche Ökostromverordnung ausgelöste Biogasanlagen-Boom, neben einer Preissteigerung durch erhöhte Nachfrage, bezüglich Qualität der Planungsarbeit für Auswirkungen hat, ist jetzt noch nicht zu beurteilen. In Verbindung mit der Arbeit an dem generierten Benchmarktool wurden durch das Zusammenstellen und Auswerten der wichtigsten Parameter erste Richtlinien und Standards ermittelt. Diese werden in einem eigenen Richtlinienkatalog zusammengefasst und veröffentlicht.

Vorab kann bemerkt werden, dass es noch ein großes Optimierungspotential am Biogassektor gibt. Es fehlen leider einheitliche und verbindliche Verordnungen seitens der Gesetzgeber. Derzeit werden Sicherheitsstandards bei Biogasanlagen auf Länderebene verordnet und exekutiert. Weiters gibt es z.B. keine bundesweite Verordnung hinsichtlich der Wärmenutzung. In einer gesamtheitlichen energetischen Betrachtungsweise – und das sollte Sinn des Wortes „Nachhaltigkeit“ sein – kann eine Nutzung der anfallenden Wärme nicht außer Acht gelassen werden. Alternative Nutzungsformen von Biogas (z. B. Einspeisung in das Erdgasnetz, Biogastankstellen) wurden bislang in Diskussionen um Fördergelder in Form eines Einspeisegesetzes völlig vernachlässigt.

Weiters werden die zukünftigen Betreiber von Ökostromanlagen mit maßgeblichen Entscheidungen wie z.B.: welcher Fermentertyp ist für welche Anwendung am geeignetsten, welche Auslegungsgrößen machen Sinn, ob und welche Messeinrichtungen sind sinnvoll, allein dem Wissen und der Verantwortung des Planers überlassen.

All diese offenen Fragen können im Rahmen von Benchmarking, bestehend aus Wissen in Form von Anwendungserfahrung, beantwortet werden. Denn durch laufend durchgeführte Auswertun-

gen des Benchmarkingtools wird die Basis für die Erstellung von Richtlinien für einen qualitativ hochwertigen und effizienten Betrieb von Biogasanlagen geschaffen.

Benchmarking trägt sicherlich dazu bei, die Leistungsfähigkeit und Effektivität einer Biogasanlage zu verbessern.

4. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Thinking "out of the box" (Spendolini 1992, S. 23).....	17
Abbildung 2: „Schlüselfragen zum Benchmarkingprozess“ (Egger 1996, Vortragsunterlagen).....	18
Abbildung 3: Stufen des Benchmarking-Prozesses (Spendolini 1992, S. 48)	21
Abbildung 4: „Teilbereiche, Einflussfaktoren, Stoffströme und Verwertungspfade im System Biogas aus Energiepflanzen“	26
Abbildung 5: „Abgrenzung des Benchmarkingbereichs“	27
Abbildung 6: „Biogas-Benchmarking-Team“	30
Abbildung 7: Störquellen und Ansatzpunkte für die Steuerung der Biogaserzeugung	35
Abbildung 8: Anzahl der identifizierten charakterisierenden Parameter der technisch funktionellen Anlagenbeschreibung.....	36
Abbildung 9: Anzahl der identifizierten messbaren Parameter	37
Abbildung 10: Ablauf der Online-Eingabe der Daten	71
Abbildung 11: Monitoring und Benchmarking in verschiedenen Ebenen.....	72
Abbildung 12: Bildschirmdialog nach Eingabe von Login und Passwort: Auswahlfelder zur Anlagenbetrachtung bzw. Kennzahlenberechnung und Kennzahlenvergleich.....	73
Abbildung 13: Bildschirmdialoge zur Eingabe der Grunddaten einer Biogasanlage (Ebene4).....	74
Abbildung 14: Bildschirmdialoge zur Eingabe der Grunddaten.....	75
Abbildung 15: Bildschirmdialoge zur Eingabe der Grunddaten und Anlagenparamter.....	76
Abbildung 16: Ergebnisdialog Kennzahlen der Biogasanlagen	77
Abbildung 17: Beispiele für Biogasanlagenvergleich anhand von Kennzahlen	78
Abbildung 18: Beispiele für die Darstellung der Grunddaten und Parameter von einer interessierenden Biogasanlage (Auszugsweise)	79
Abbildung 19: Biogas-Produktivität (spezifischer Biogasertrag), Raumbelastung und hydraulische Verweilzeit der NaWaRo Anlagen	90
Abbildung 20: Biogas-Produktivität (bzw. spezifischer Biogasertrag), Raumbelastung und hydraulische Verweilzeit der Kofermentierungsanlagen	90
Abbildung 21: oTS-Abbaugrad, hydraulische Verweilzeit und Raumbelastung der NAWARO Anlagen	91
Abbildung 22: oTS-Abbaugrad, hydraulische Verweilzeit und Raumbelastung der Kofermentierungsanlagen	91
Abbildung 23: Methangehalt, hydraulische Verweilzeit und durchschnittliche Biogasausbeute der NaWaRo Anlagen	92
Abbildung 24: Methangehalt, hydraulische Verweilzeit und durchschnittliche Biogasausbeute der Kofermentierungsanlagen	92
Abbildung 25: Jahresarbeit elektrisch und thermisch, elektrischer und thermischer Wirkungsgrad (=Jahresnutzungsgrad) der Biogasanlage NaWaRo Anlagen	95

Abbildung 26: Jahresarbeit elektrisch und thermisch, elektrischer und thermischer Wirkungsgrad (=Jahresnutzungsgrad) der Biogasanlage Kofermentierungsanlagen.....	95
Abbildung 27: Volllaststunden und Gesamtwirkungsgrad (=Gesamtjahresnutzungsgrad) NaWaRo Anlagen	96
Abbildung 28: Volllaststunden und Gesamtwirkungsgrad (=Gesamtjahresnutzungsgrad) Kofermentierungsanlagen	96
Abbildung 29: Einspeisetarif und Stromgestehungskosten NaWaRo Anlagen.....	100
Abbildung 30: Einspeisetarif und Stromgestehungskosten Kofermentierungsanlagen	100
Abbildung 31: Betriebskosten, Substratkosten bezogen auf elektrische Jahresarbeit und Investitionskosten bezogen auf Nennleistung NaWaRo Anlagen.....	101
Abbildung 32: Betriebskosten, Substratkosten bezogen auf elektrische Jahresarbeit und Investitionskosten bezogen auf Nennleistung Kofermentierungsanlagen	101
Abbildung 33: Darstellung der Wertebereiche für die Hemmung durch undissoziierten Stickstoff (Berechnet für 38°C $pK_A(\text{NH}_3)=8,87$) – rot, grün, gelb entsprechend Anhang II	106
Abbildung 34: Darstellung der Wertebereiche für die Hemmung durch undissoziierte Fettsäuren (als Essigsäure Equivalente bei 25°C) – rot, grün, gelb entsprechend Anhang II.....	106
Abbildung 35: Biogasertrag, Fettsäuren und Verweilzeit von ausgewählten Kofermentierungs-anlagen	107
Abbildung 36: Raumbelastung, Heizwert, oTS-Abbaugrad und Ammoniumgehalt von ausgewählten Kofermentierungsanlagen	107
Abbildung 37: Raumbelastung, Stromertrag und Ammoniumgehalt von ausgewählten Kofermentierungsanlagen	108
Abbildung 38: Biogasertrag, Fettsäuren und Verweilzeit von ausgewählten NaWaRos-Anlagen	109
Abbildung 39: Raumbelastung, Stromertrag und Ammoniumgehalt von ausgewählten NaWaRos-Anlagen	109
Abbildung 40: Raumbelastung, Heizwert, oTS-Abbaugrad und NH_4 -Gehalt ausgewählter NaWaRos- Anlagen	110
Abbildung 41: Elektrischer und thermischer Jahresnutzungsgrad von ausgewählten Anlagen mit eingezeichnetem minimalen elektrischem Jahresnutzungsgrad.....	111
Abbildung 42: Elektrischer, thermischer Jahresnutzungsgrad und Volllaststunden der Referenzanlagen	112
Abbildung 43: Stromgestehungskosten von ausgewählten Anlagen im Vergleich zur Stromvergütung mit eingezeichnetem wirtschaftlichem Richtwert	112
Abbildung 44: Kostenaufschlüsselung in Investitions-, Substrat- und Betriebskosten bezogen auf elektrische Jahresarbeit bzw. Nennleistung von ausgewählten Anlagen im Vergleich	113

5. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	„Benchmarking-Grundtypen – Definitionen und Ziele“ – Erstellung angelehnt an (Spendolini 1992, S.17).....	19
Tabelle 2:	„Benchmarking- Grundtypen- Vorteile und Nachteile“ (Eversheim, Schuh, 1996)	20
Tabelle 3:	Biogasanlagen-Kennzahlenliste	38
Tabelle 4:	Verweilzeitbereiche in Abhängigkeit mit der Prozesstemperatur.....	42
Tabelle 5:	Durchschnittliche Investitionskosten von Biogasanlagen (Gers-Grapperhaus , S.6)	52
Tabelle 6:	Berurteilung der Kennzahlen zur Biologischen Effizienz	58
Tabelle 7:	Beurteilung zur Auswahl der Kennzahlen für die Energetische Effizienz	60
Tabelle 8:	Beurteilung zur Auswahl der Kennzahlen für die Ökonomische Effizienz	61
Tabelle 9:	Kennzahlen und empfohlene Richtwerte für NaWaRo Anlagen	84
Tabelle 10:	Kennzahlen und empfohlene Richtwerte für Kofermentierungsanlagen.....	84
Tabelle 11:	Übersicht der Kennzahlen der energetischen Effizienz für NaWaRo Anlagen	93
Tabelle 12:	Übersicht der Kennzahlen der energetischen Effizienz für Kofermentierungs-anlagen	93
Tabelle 13:	Übersicht über die Kennzahlen der wirtschaftlichen Parameter der NaWaRo-Anlagen.....	97
Tabelle 14:	Übersicht über die Kennzahlen der wirtschaftlichen Parameter der Kofermentierungsanlagen	97
Tabelle 15:	Einteilung der Raumbelastung und des Biogasertrags	102
Tabelle 16:	Erklärungsschema für verschiedene Belastungszustände	103
Tabelle 17:	Ausgewählte Fermentationsparameter und ihre Wertebereiche (Quelle: Infoblatt Fermentationsparameter IFA-Tulln 2005, aktualisierte Version IFA-Tulln 2006).....	104

6. Anhänge

Anhang I. Literatur

Bogan, English, 1994

Bogan C.E, English M.J., Benchmarking for Best Practices: Winning Through Innovative Adaption, R.R. Donnelley Sons Company, 1994

DIN 1343, 1990

Hrsg.: Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 1343, „Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte“, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1990

E-Control, 2005

online im WWW unter URL: www.e-control.at [09.08.2005]

Egger, 1996

Egger P., Einführung von Benchmarking im Personalwesen bei Volkswagen , Wolfsburg, 1996

Eversheim, Schuh, 1996

Hrsg.: Eversheim W., Schuh, G., Taschenbuch für Betriebsingenieure , Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1994

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2005

Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Biosystemtechnik und dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V., Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung, Leipzig, 2005.

Gers-Grapperhaus, o.A.

Gers-Grapperhaus C., Was gibt's neues bei Biogas, Fachbereich Landtechnik, Landwirtschaftskammer Weser-Ems, online im WWW unter URL: <http://www.lwk-we.de/pdf/33BeitragBiogas260505.pdf> [30.06.2005]

Grunwald, 1995

Grunwald B., Der Weg zurück zur Nummer eins, Hrsg.: Mertins K., Siebert G., Kempf S., Benchmarking - Praxis in deutschen Unternehmen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995

Gugele, Rigler, Ritter, 2003

Gugele B., Rigler E., Ritter M., Hrsg.: Umweltbundesamt, Kyoto Fortschrittsbericht 1990-2003, Datenstand 2005, Wien, Umweltbundesamt GmbH 2005

Hopf, 1996

Hopf H., Verzeichnis von Benchmarking - Ausdrücken, Ergänzungsblatt zu Kap. 2 Wie erreichen Sie Spitzenleistungen durch Benchmarking? , Revision: 11.10.1996, Benchmarking Seminar im Zentrum für Unternehmensführung vom 15. -16. April 1997, Zürich

IFA Tulln, 2005

Interuniversitäres Department für Agrarbiotechnologie IFA-Tulln, Institut für Umweltbiotechnologie, Infoblatt Fermentationsparameter, 2005, Tulln

Kaltschmitt, Hartmann, 2001

Kaltschmitt M., Hartmann H., Energie aus Biomasse- Grundlagen, Techniken und Verfahren; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2001

Keymer, 2004

Keymer U., Wirtschaftlichkeit ländlicher Biogasanlagen, Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Tagungsband „Biogas in Bayern“, Rosenheim, 2004

Lombriser, Abplanalp, 1997

Lombriser R., Abplanalp P.A., Strategisches Management, Versus Verlag AG, Zürich, 1997

Patterson, 1996

Patterson J.G., Grundlagen des Benchmarking.-.die Suche nach der besten Lösung, Ueberreuter, 1996

Pötsch, 2005

Pötsch E., Biogas- Optimale Erzeugung und innovative Verwertung, Stoffliche Zusammensetzung, Hygienestatus und Ausbringungseigenschaften von Fermentationsrückständen aus Biogasanlagen, Steyr, 2005

Scherer, 2001

Scherer P.A., Mikrobiologie von festen Abfallstoffen, Hrsg.: Kämpfer P., Weißenfels W.D., Biologische Behandlung organischer Abfälle, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 2001

Schulz, Eder, 2001

Schulz H., Eder B., Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Staufen bei Freiburg, ökobuch Verlag, 1996, 2. Auflage 2001

Sedlmeier,o.A.

Sedlmeier J., Nachwachsende Rohstoffe in Biogasanlagen, Artikel an die Regierung von Niederbayern

Siebert, Kempf, 1998

Siebert G., Kempf S., Benchmarking: Leitfaden für die Praxis, München, Wien: Hanser, 1998a

Spendolini, 1992

Spendolini M. J., The benchmarking book, AMACOM a division of American Management Association, New York, 1992

Thomé-Kozmiensky, 1989

Hrsg.: Thomé-Kozmiensky K.J., Biogas-Anaerobtechnik in der Abfallwirtschaft, Berlin, EF-Verlag für Energie- und Umweltschutz, 1989

Töpfer, Mann, 1997

Töpfer A., Mann A., Benchmarking: Lernen von den Besten. Hrsg.: Töpfer, A., Benchmarking - Der Weg zu Best Practice. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1997 Abfallwirtschaft, Berlin, EF-Verlag für Energie- und Umweltschutz, 1989

VDI 4630, 2004

Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure ,VDI-Richtlinie 4630 (Entwurf) „Vergärung organischer Stoffe“, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2004

VDI 4661, 2003

Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure ,VDI-Richtlinie 4661 „Energiekennwerte Definitionen - Begriffe - Methodik“, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2003

Waerdts u. Willenbrink, 2003

Waerdts S., Willenbrink B., „Micro-Gasturbinen neue Wege und Varianten bei der Nutzung regenerativer Gase“, Stuttgart, 2003

Endbericht

Energiesysteme der Zukunft; 1. Ausschreibung

Projekt 807741 – Best Biogas Practise

Weiland, 2001

Weiland P., Verfahrenstechnik der anaeroben Behandlung organischer Abfälle Hrsg.: Kämpfer P., Weißenfels W., Biologische Behandlung organischer Abfälle, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2001

Wikipedia, 2005

online im WWW unter URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Monitoring> [16.06.2005]

Wöhe, 1990

Wöhe G., Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 17. überarbeitete Auflage; Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 1989

Anhang II. Infoblatt zu Fermentationsparametern IFA-Tulln 2005 und 2006



Universität für Bodenkultur Wien
 Interuniversitäres Department für Agrarbiotechnologie, IFA-Tulln
 Konrad-Lorenz-Str. 20 – A-3430 Tulln – Austria

Institut für Umweltbiotechnologie
 Tel. +43 2272 86280-502 – Fax +43 2272 86280-503 – mail: officeuf@boku.ac.at
 Leiter: Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Rudolf Braun



INFOBLATT FERMENTATIONSPARAMETER

Bei den hier vorliegenden Wertebereichen handelt es sich um eine statistische Auswertung von Fermentationsparameter aus Biogasanlagen. Für die Einteilung in die verschiedenen Wertebereiche wurden sämtliche Analysen des IFA-Tulln aus der Praxis zwischen Dezember 2003 und Jänner 2005 herangezogen. Betrachtet wurden jene Fermenter, welche direkt beschickt wurden. Hoch belastete Anlagen wurden dabei ebenso berücksichtigt wie niedrig belastete.

Die Einteilung in Wertebereiche soll dem Betreiber einer Biogasanlage einen Anhaltspunkt für die Bewertung des Fermenterzustands geben.

Der rote Wertebereich entstand aufgrund von Analysen jener Anlagen, die gravierende Prozessstörungen aufwiesen. Allerdings gilt nicht der Umkehrschluss: Eine Überschreitung der Werte in einem Punkt bedeutet nicht notwendigerweise eine drohende Überlastung des Fermenters: Mikroorganismen können sich an die Umgebung adaptieren, d.h., sie können sich auf das jeweilige Umfeld bis zu einem bestimmten Grad einstellen. Dadurch ist jede Anlage gesondert zu bewerten.

Liegen allerdings mehrere Werte im roten Bereich, so wird dringend empfohlen, mit Experten Kontakt aufzunehmen, um gemeinsam die Betriebsweise zu besprechen und falls notwendig geeignete Maßnahmen zu treffen, damit ein sicherer Anlagenbetrieb gewährleistet werden kann.

Generell ist festzuhalten, dass eine Einzelanalyse nur eine geringe Aussagekraft besitzt. Für eine richtige Bewertung von Analyseergebnissen ist die Kenntnis der Substratzufuhr und die Entwicklung der Fermentationsparameter über einen längeren Zeitraum notwendig.

Bitte beachten Sie die Hinweise auf der Rückseite!

Tabelle: Fermentationsparameter aus Biogasanlagen (Quelle: Labor IFA-Tulln/UT; n = 167)

	Einheit	Wertebereiche		
		Grün	Gelb	Rot
pH	[-]	7,5 – 8,1	7,1 – 7,5	< 7,1; > 8,1
CSB	[g/kg]	40 – 90	< 40; 90 - 110	> 110
TS	[%]	3 – 8	< 3; 8 – 9	> 9
OTS	[%]	2,4 – 6	< 2,4; 6 – 7	> 7
TKN	[g/l]	< 6	> 6	-
NH ₄ -N	[g/l]	< 5	> 5	-
UAN *	[mg/l]	< 600	600 – 800	> 800
Essigsäure	[mg/l]	0 – 1.000	1.000 – 3.000	> 3.000
Propionsäure	[mg/l]	0 – 250	250 – 1.000	> 1.000
i-Buttersäure	[mg/l]	0 – 50	50 – 300	> 300
Buttersäure	[mg/l]	0 – 50	50 – 100	> 100
i-Valeriansäure	[mg/l]	0 – 50	50 – 150	> 150
Valeriansäure	[mg/l]	0 – 20	20 – 100	> 100
VFA gesamt	[mg/l]	0 – 1.500	1.500 – 4.500	> 4.500
UFA gesamt **	[mg _{HAc} /l]	0 – 2,5	2,5 – 20	> 20

* abhängig von der Konzentration von NH₄-N und dem pH-Wert
 ** abhängig von der Gesamtsäurekonzentration VFA und dem pH-Wert

„Grün“: Werte aus diesem Bereich kennzeichnen einen günstigen Fermenterzustand. Ein Fermenter, welcher sich in diesem Wertebereich befindet und mit annähernd gleicher Substratzufuhr beschickt wird, ist nur einem geringen Risiko ausgesetzt und bedarf in der Regel keiner häufigen Überwachung.

„Gelb“: Diese Spalte beschreibt einen tolerablen Wertebereich der Fermentation, allerdings treten erste Anzeichen von Stress bei den Mikroorganismen auf. Es liegt im Interesse des Betreibers, die Betriebsweise so zu wählen, um wieder in den grünen Bereich zu kommen.

„Rot“: Diese Spalte beschreibt einen hoch belasteten Fermenter. Der Betriebszustand ist instabil, die Mikroorganismen weisen zunehmende Anzeichen von Stress auf. Stoffwechselzwischenprodukte können nicht mehr ausreichend schnell abgebaut werden und es besteht die Gefahr der Übersäuerung. Derart hohe Konzentrationen sollten in Absprache mit dem IFA-Tulln zu Änderungen der Substratzufuhr und/oder Reaktionsbedingungen führen. Der Fermenter sollte regelmäßig untersucht werden.

Die Angaben sind nicht verbindlich und spiegeln lediglich die Erfahrung der Verfasser wider. Die Verfasser übernehmen keinerlei Haftung für Ausfälle, Schäden oder Folgeschäden.

Glossar

CSB Chemischer Sauerstoffbedarf, Einheit [g/kg]; aufgrund der Kenntnis des CSB des Faulschlammes lässt sich der Abbaugrad abschätzen. Zu hohe CSB-Werte können auf einen geringen Abbau oder auf einen hohen Rohfaseranteil im Fermenter hinweisen. Hoch belastete Anlagen haben meist auch einen höheren oTS-Gehalt.

TS Trockensubstanz, Einheit [%]; der TS-Gehalt ist bedeutsam für die Durchmischbarkeit, somit auch für einen homogenen Fermentationsverlauf und auch für die Rührenergie.

oTS organische Trockensubstanz, Einheit [%]; der oTS gibt Auskunft über den bereits abgebauten organischen Anteil; steht in direktem Zusammenhang mit dem CSB. Hoch belastete Anlagen haben meist auch einen höheren oTS-Gehalt.

TKN Gesamtstickstoff nach Kjeldahl, Einheit [g/l]; der TKN erfasst die Gesamtmenge an Stickstoff in der Probe (organisch gebunden und Ammonium-N). Viel gebundener N weist auf unabgebaute Proteine hin.

NH₄-N Ammoniumstickstoff, Einheit [g/l]; charakterisiert den abgebauten Anteil an Proteinen; erhöhte Konzentrationen können in Abhängigkeit vom pH-Wert auf Mikroorganismen toxisch wirken (→ UAN).

UAN Undissoziierter Ammoniumstickstoff (NH₃), Einheit [mg/l]; der undissoziierte Anteil des NH₄-N ist vom pH-Wert abhängig und wirkt mit zunehmender Konzentration toxisch auf Mikroorganismen (Hemmung des Gärprozesses).

Freie Flüchtige Fettsäuren VFA Einheit [mg/l]; Diese Säuren sind Stoffwechselzwischenprodukte der Mikroorganismen. Eine Konzentrationssteigerung kann ein Ungleichgewicht in der mikrobiologischen Abbaukette anzeigen. Erhöhte Konz. wirken toxisch auf Mikroorganismen und hemmen den Gärprozess (→ UFA).

UFA Undissoziierte VFA, Einheit [mg-H₂O/l]; der undissoziierte Anteil der VFA ist wie der Ammoniumstickstoff vom pH-Wert abhängig und wirkt mit zunehmender Konzentration toxisch auf Mikroorganismen (Hemmung des Gärprozesses).

Infoblatt zu Fermentationsparametern IFA-Tulln 2006



Universität für Bodenkultur Wien
 Interuniversitäres Department für Agrarbiotechnologie, IFA-Tulln
 Konrad-Lorenz-Str. 20 - A-3430 Tulln - Austria
 Institut für Umweltbiotechnologie
 Tel +43 2272 66280-602 - Fax +43 227 2 66280-603 - mail: office ifa@boku.ac.at
 Leiter: Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Rüdiger Braker



INFOBLATT FERMENTATIONSPARAMETER

Um dem Anlagenbetreiber einen Anhaltspunkt zur Interpretation der Analyseergebnisse zu geben, sind im Folgenden Wertebereiche angeführt, denen die festgestellten Analyseergebnisse nach einem Ampelsystem (grün-gelb-rot) zugeteilt werden können.

Diese Wertebereiche sind dabei als Orientierungshilfe zu verstehen: es liegen zwar die meisten stabilen Anlagen im grünen Bereich, eine Überschreitung in manchen Punkten bedeutet aber nicht notwendigerweise eine drohende Überlastung des Fermenters. Dadurch, dass sich Mikroorganismen bis zu einem gewissen Grad an Milieueränderungen anpassen können, kann auch im roten Wertebereich ein stabiler Fermentationsbetrieb möglich sein. Dennoch wird in diesem Bereich der Fermenterzustand zunehmend instabiler. Im Allgemeinen ist jedes Analyseergebnis unter Berücksichtigung der bisherigen Geschichte des Fermenters bzw. der Biogasanlage separat zu bewerten.

Generell ist festzuhalten, dass viel wichtiger, als die Lage einer Einzelanalyse in einem Wertebereich, der zeitliche Verlauf der Konzentrationen ist. Der Informationsgehalt einer Einzelanalyse kann zwar durchaus hoch sein, hat aber dennoch nur eine begrenzte Aussagekraft: Eine Einzelanalyse stellt nur einen Punkt auf einer Zeitskala dar, ohne deren Verlauf zu kennen. Es lässt sich daraus nicht ableiten, ob sich ein Fermenter gerade erholt oder zunehmend instabil wird. Auch eine mögliche Adaption der Mikroorganismen an das jeweilige Milieu kann nicht abgeleitet werden.

Tabelle: Fermentationsparameter aus Biogasanlagen (Quelle: Labor IFA-Tulln/UT; n = 487)

	Einheit	Wertebereiche		
		Grün	Gelb	Rot
pH	[-]	7,5 – 8,1	7,1 – 7,5	< 7,1; > 8,1
CSB	[g/kg]	40 – 90	< 40; 90 – 110	> 110
TS	[%]	4 – 8	< 4; 8 – 9	> 9
OTS	[%]	3 – 6	< 3; 6 – 7	> 7
TKN	[g/kg]	< 6	> 6	-
NH ₄ -N	[g/kg]	< 5	> 5	-
UAN*	[mg/l]	< 600	600 – 800	> 800
Essigsäure	[mg/l]	< 1.000	1.000 – 3.000	> 3.000
Propionsäure	[mg/l]	< 250	250 – 1.000	> 1.000
i-Buttersäure	[mg/l]	< 60	60 – 200	> 200
Buttersäure	[mg/l]	< 50	50 – 100	> 100
i-Valeriansäure	[mg/l]	< 50	50 – 100	> 150
Valeriansäure	[mg/l]	< 50	50 – 100	> 150
VFA gesamt	[mg/l]	< 1.500	1.500 – 4.500	> 4.500
UFA gesamt**	[mg _{H₂O} /l]	< 2,5	2,5 – 20	> 20

* abhängig von der Konzentration von NH₄-N und dem pH-Wert
 ** abhängig von der Gesamtkonzentration von VFA und dem pH-Wert

Bitte beachten Sie die Hinweise auf der Rückseite!

„Grün“: Werte aus diesem Bereich kennzeichnen einen günstigen Fermenterzustand. Ein Fermenter, welcher sich in diesem Wertebereich befindet, ist im Falle der Beibehaltung der Betriebsbedingungen (Substrat, Raumbelastung, Temperatur) nur einem geringen Risiko von Instabilität ausgesetzt und bedarf in der Regel keiner häufigen analytischen Untersuchung.

„Gelb“: Diese Spalte beschreibt den Überlappungsbereich von „stabilen“ und „instabilen“ Anlagen; aufgrund einer Einzelanalyse ist keine weitere Interpretation möglich.

„Rot“: Der Wertebereich kennzeichnet einen hoch belasteten Fermenter, dessen Zustand mit zunehmenden Messwerten instabiler wird. Die Mikroorganismen weisen bereits deutliche Anzeichen von Störungen auf, Stoffwechselzwischenprodukte können nicht mehr ausreichend schnell abgebaut werden. Es besteht die Gefahr der Übersäuerung. Fermenter sollten in diesem Bereich nur unter regelmäßiger Prozesskontrolle betrieben werden. Ist dies nicht möglich, sollten die Substratzufuhr und/oder Reaktionsbedingungen geändert werden, um eine drohende Versäuerung zu vermeiden.

Die Angaben sind nicht verbindlich und spiegeln lediglich die Erfahrung der Verfasser wider. Die Verfasser übernehmen keinerlei Haftung für Ausfälle, Schäden oder Folgeschäden.

Glossar

CSB Chemischer Sauerstoffbedarf, Einheit [g/kg]; aufgrund der Kenntnis des CSB des Faulschlammes lässt sich der Abbaugrad abschätzen. Zu hohe CSB-Werte können auf einen geringen Abbau oder auf einen hohen Rohfaseranteil im Fermenter hinweisen. Hoch belastete Anlagen haben meist einen erhöhten CSB-Wert.

TS Trockensubstanz, Einheit [%]; der TS-Gehalt ist bedeutsam für die Durchmischbarkeit, somit auch für einen homogenen Fermentationsverlauf und auch für die Rührenergie.

oTS organische Trockensubstanz, Einheit [%]; der oTS-Gehalt gibt Auskunft über den bereits abgebauten organischen Anteil; steht in direktem Zusammenhang mit dem CSB. Hoch belastete Anlagen haben meist auch einen höheren oTS-Gehalt.

TKN Gesamtstickstoff nach Kjeldahl, Einheit [g/l]; der TKN erfasst die Gesamtmenge an Stickstoff in der Probe (organisch gebunden und Ammonium-N). Viel gebundener N weist auf unabgebaute Proteine hin.

NH₄-N Ammoniumstickstoff, Einheit [g/l]; charakterisiert den abgebauten Anteil an Proteinen, abhängig von pH-Wert und Temperatur; erhöhte Konzentrationen können auf Mikroorganismen toxisch wirken (→ UAN).

UAN Undissoziierter Ammoniumstickstoff (NH₃), Einheit [mg/l]; der undissoziierte Anteil des NH₄-N wirkt mit zunehmender Konzentration toxisch auf Mikroorganismen (Hemmung des Gärprozesses).

VFA Freie flüchtige Fettsäuren, Einheit [mg/l]; diese Säuren sind Stoffwechselzwischenprodukte der Mikroorganismen. Eine Konzentrationssteigerung kann ein Ungleichgewicht in der mikrobiologischen Abbaukette anzeigen. Erhöhte Konz. wirken toxisch auf Mikroorganismen und hemmen den Gärprozess (→ UFA).

UFA Undissoziierte freie flüchtige Fettsäuren, Einheit [mg_{HAc}/l]; der undissoziierte Anteil der VFA ist wie der Ammoniumstickstoff vom pH-Wert abhängig und wirkt mit zunehmender Konzentration toxisch auf Mikroorganismen (Hemmung des Gärprozesses).

Anhang III. Endbericht Datenerhebung IFA-Tulln (Daten)

3.2. Fermenteranalysen

Die Ergebnisse der Fermenteranalysen sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst dargestellt:

Ergebnisse aus den Fermenteranalysen I																	
Referenzanlagen																	
Anlage	Interviewpartner	Datum	Probencode	pH	TS	oTS	TKN	NH ₄ ⁺	UAN	Essigsre	Propionsre	i-Busre	Busre	i-Valisre	Valisre	VFA ges.	UFA
					[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[mg/kg]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
		8.8.2005	25.7.2005	17.12.2004	9.11.2004	27.5.2004	26.1.2005	16.11.2004	2.6.2004	11.2.2004							
		50516	50488	40595	40500	40169	50044	40515	40178	40036							
		7,95	7,63	7,93	7,87	7,64	7,92	7,82	8,00	7,63							
		8,68	7,57	7,91	8,12	7,56	7,79	6,58	6,10	6,17							
		6,40	5,55	5,97	6,20	5,93	5,83	5,05	4,77	4,71							
		4,99	4,48	4,10	8,75	6,42	8,64	7,38	6,66	5,52							
		3,07	2,78	2,41	5,58	4,05	5,47	4,66	4,20	2,94							
		283	129	213	434	192	472	326	429	136							
		624	165	198	1593	592	2784	1739	1450	208							
		0	63	71	193	90	385	355	191	0							
		11	10	54	39	0	102	74	44	0							
		4	6	0	26	0	77	36	0	25							
		4	5	26	26	0	107	61	13	4							
		2	1	56	16	0	0	0	24	0							
		644	249	405	1.893	681	3.455	2.263	1.722	237							
		0,41	0,31	0,23	1,48	0,90	2,40	1,98	1,00	0,32							
Standardanlagen																	
Anlage	Interviewpartner	Datum	Probencode	pH	TS	oTS	TKN	NH ₄ ⁺	UAN	Essigsre	Propionsre	i-Busre	Busre	i-Valisre	Valisre	VFA ges.	UFA
					[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[mg/kg]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]
		24.3.2005	18.6.2004	10.2.2004	11.1.2005	21.7.2004	7.4.2004	27.7.2005	14.6.2005	12.1.2005							
		50204	40211	40210	50015	40262	40407	50497	50379	50020							
		7,81	7,52	7,64	8,03	7,55	7,64	7,92	8,11	8,22							
		5,86	6,06	6,05	-	5,11	7,81	10,12	12,11	9,35							
		4,63	4,56	4,54	-	3,51	6,00	7,74	9,19	7,17							
		5,30	5,63	6,31	-	-	4,38	8,67	9,07	-							
		3,05	3,50	3,41	2,78	1,34	2,09	5,84	5,77	-							
		208	127	161	302	52	99	505	737	-							
		295	334	468	1265	57	407	926	380	-							
		47	25	100	5070	32	21	121	3456	-							
		18	0	18	439	0	15	30	54	-							
		0	0	17	69	28	13	39	29	-							
		18	16	18	1394	0	10	56	43	-							
		7	0	9	181	0	12	0	32	-							
		384	375	629	8.417	117	477	1.172	3.993	-							
		0,34	0,66	0,83	4,54	0,19	0,63	0,77	1,47	-							

Ergebnisse aus den Fermenteranalysen II													
Upgrade-Anlagen													
Anlage	Interviewpartner												
Datum	7.3.2005	16.12.2004	17.9.2004	16.8.2005	8.8.2005	17.8.2005	8.8.2005	23.8.2005	11.4.2005				
Probencode	50144	40592	40407	50540	50521	50535	50520	50561	50230				
pH	8,02	7,87	7,81	7,60	7,62	8,12	8,07	7,80	7,78				
TS	7,02	6,84	5,54	2,61	4,86	6,71	7,76	7,14	6,86				
oTS	4,11	4,43	3,52	1,56	3,48	5,31	5,62	5,27	5,08				
TKN	-	4,70	4,71	2,27	2,46	5,42	5,26	4,89	4,10				
NH ₄ ⁺	3,33	3,33	2,90	1,28	1,36	3,89	3,79	1,81	2,05				
UAN	355	259	198	56	62	507	335	121	131				
Essigsre	875	778	528	37	102	636	649	410	1101				
Propionsre	123	139	166	0	0	162	58	0	87				
i-Busre	81	60	59	4	8	23	14	9	45				
Busre	13	55	0	1	0	17	4	2	-				
i-Valsre	10	60	49	3	4	17	4	5	55				
Valsre	15	55	0	0	0	15	6	6	23				
VFA ges.	1.116	1.144	802	45	113	869	734	431	1.310				
UFA	0,62	0,89	0,72	0,06	0,15	0,36	0,48	0,39	1,20				
Neuanlagen													
Anlage	Interviewpartner												
Datum	20.6.2005	6.6.2005	2.5.2005	25.7.2005	29.6.2005	29.3.2005	15.8.2005	18.7.2005	20.6.2005				
Probencode	50391	50349	50263	50479	50431	50217	50541	50470	50417				
pH	7,23	7,33	7,30	7,77	7,78	7,96	7,66	7,69	7,64				
TS	6,46	6,01	6,53	5,88	6,11	5,35	3,92	3,63	3,14				
oTS	5,11	4,65	5,24	4,30	4,62	3,96	2,98	2,80	2,33				
TKN	3,62	3,45	3,44	3,35	3,23	2,70	3,99	4,02	3,99				
NH ₄ ⁺	1,30	1,20	1,16	1,63	1,52	1,59	2,42	2,46	2,31				
UAN	25	28	26	102	97	149	120	130	109				
Essigsre	39	104	94	149	82	135	51	17	14				
Propionsre	0	0	29	24	0	0	0	48	0				
i-Busre	11	4	21	10	0	0	6	0	4				
Busre	6	0	0	5	0	-	0	1	0				
i-Valsre	3	5	6	13	3	3	2	4	10				
Valsre	1	0	0	3	0	0	0	0	1				
VFA ges.	59	112	149	202	84	138	58	70	28				
UFA	0,18	0,29	0,39	0,18	0,08	0,09	0,07	0,07	0,03				

4. Anhang

Kennzahl	Einheit	1	2	3	4	5	6
1. Technisches Monitoring und Benchmarking							
1.1 Kennzahlen zur Charakterisierung der Fermentation							
installierte bzw. genehmigte el. Leistung gemäß Ökostromtarif	kWh _{el}	500	500	220	100	200	100
jährliche Substratmenge	t _{Substrat/a}	12.904	10.644	6.930	3.495	5.683	1.124
tägliche Substratmenge	t _{Substrat/d}	35,4	29,2	19,0	9,6	15,6	3,1
Hydraulische Verweilzeit	m ³ _{FR} / (t _{Substrat/d})	75	131	90	153	69	398
Organische Raumbelastung	kg _{OTS} / (m ³ _{FR} ·d)	4,73	3,99	3,82	2,76	4,56	2,96
CSB Raumbelastung	kg _{CSB} / (m ³ _{FR} ·d)	7,83	5,85	5,76	4,19	8,57	3,98
jährliche Menge oTS	t _{OTS/a}	2.336	2.928	1.291	831	897	563
tägliche Menge oTS	t _{OTS/d}	6,40	8,02	3,54	2,28	2,46	1,54
1.2 Kennzahlen zur Charakterisierung der Ausbeute							
jährliche Biogasmenge	Nm ³ _{Biogas/a}	1.727.193	1.996.105	878.123	443.587	651.182	437.147
tägliche Biogasmenge	Nm ³ _{Biogas/d}	4.732	5.469	2.406	1.215	1.784	1.198
Gasertrag	Nm ³ _{Biogas} / (m ³ _{FR} ·d)	1,79	1,42	1,30	0,59	1,66	0,90
C-Ausnutzungsgrad	%	87,04	88,72	84,01	67,04	80,73	91,55
durchschnittliche Gasausbeute	Nm ³ _{Biogas} / kg _{TS}	0,652	0,643	0,553	0,453	0,616	0,726
	Nm ³ _{Biogas} / kg _{OTS}	0,739	0,682	0,680	0,534	0,726	0,777
Heizwert des Biogases	kWh / Nm ³ _{Biogas}	6,23	5,51	5,79	5,41	6,54	5,16
1.3 Kennzahlen zur Charakterisierung der energetischen Effizienz							
Brennstoffenergie	kWh/a	10.761.195	10.998.029	5.087.687	2.401.288	4.256.689	2.254.325
Jahresarbeit elektrisch	kWh _{el} /a	3.924.900	4.175.606	1.700.000	780.000	1.413.160	715.000
Nettostromproduktion	kWh _{el} /a	3.636.550	3.904.192	1.600.081	695.000	1.300.000	657.800
Jahresarbeit thermisch	kWh _{therm} /a	4.537.184	4.317.577	2.163.636	1.162.944	2.291.032	1.156.618
Wärmenutzung	kWh _{therm} /a	2.000.000	2.000.000	0	400.000	1.419.522	884.500
Volllaststunden	h/a	7.850	8.351	7.727	7.879	7.066	7.150
Ausnutzung der BHKW	%	89,6	95,3	88,2	89,9	80,7	81,6
Ausnutzung therm. Energie	%	44,1	46,3	0,0	34,4	62,0	76,5
el. Wirkungsgrad der BGA	%	33,8	35,5	31,5	28,9	30,5	29,2
therm. Nutzungsgrad der BGA	%	18,6	18,2	0,0	16,7	33,3	39,2
Gesamtwirkungsgrad der BGA	%	52,4	53,7	31,5	45,6	63,9	68,4
1.4 Kennzahlen zur Charakterisierung der ökonomische Effizienz							
1.4.1 Agrarökonomische Kennzahlen							
Gesamtinvestitions-somme	€	1.900.000	1.600.000	720.000	500.000	1.290.000	300.000

Substratkosten	€/a	129.336	276.611	48.800	48.280	58.012	14.449
	€/Cent/ kWh _{el}	3,56	7,08	2,87	6,19	4,46	2,19
Betriebskosten	€/a	179.940	134.900	29.277	26.671	49.896	47.018
	€/Cent/ kWh _{el}	4,95	3,46	1,72	3,42	3,84	7,12
Stromgestehungskosten	€/Cent/ kWh _{el}	8,50	10,54	4,59	9,61	8,30	9,31
Flächenenergieertrag	kWh _{el} /ha	39.249	22.538	24.286	20.000	25.235	35.750
Volumenbezogener Energieertrag	kWh _{el} / (m ³ _{FR} ·a)	1.481	1.081	919	376	1.311	536
Stromertrag bezogen auf oTS	kWh _{el} / kg _{oTS}	1,680	1,426	1,317	0,939	1,576	1,271
1.4.2 Kennzahlen bezogen auf die Investitionssumme							
Investitionssumme/Vol.	€/m ³ _{FR}	717	414	389	241	1.197	225
besser: Investitions- summe/CSB-Belastung	€/Cent/ (kg _{CSB} /a)	49,19	37,25	37,03	39,69	76,53	39,71
1.4.3 Kennzahlen bezogen auf laufende Kosten							
Betriebskosten/CSB- Belastung	€/Cent/ (kg _{CSB} /a)	8,01	9,58	4,02	5,95	6,40	8,14
Betriebskosten/ab- gebaute Substratmenge	€/Cent/ (kg _{CSB} /a)	9,20	10,81	4,83	9,03	7,69	9,03
1.4.4 Kennzahlen bezogen auf Energieausbeuten							
bez. auf Investitionssumme	(kWh _{el} /a)/ €	2,066	2,610	2,361	1,560	1,095	2,383
bez. auf Betriebskosten	(kWh _{el} /a)/ €	12,69	10,15	21,77	10,41	13,10	11,63
bez. auf jährl. CSB- Belastung	(kWh _{el} /a)/ (kg _{CSB} /a)	1,016	0,972	0,874	0,619	0,838	0,946

Kennzahl	Einheit	7	8	9	10	11	12
1. Technisches Monitoring und Benchmarking							
1.1 Kennzahlen zur Charakterisierung der Fermentation							
installierte bzw. genehmigte el. Leistung gemäß Ökostromtarif	kWh _{el}	500	1.000	99	100	100	500
jährliche Substratmenge	t _{Substrat} /a	11.164	21.490	5.361	3.318	2.973	7.991
tägliche Substratmenge	t _{Substrat} /d	30,6	58,9	14,7	9,1	8,1	21,9
Hydraulische Verweilzeit	m ³ _{FR} / (t _{Substrat} /d)	228	181	69	80	135	111
Organische Raumbelastung	kg _{oTS} / (m ³ _{FR} ·d)	5,05	3,46	3,38	3,61	3,72	6,03
CSB Raumbelastung	kg _{CSB} / (m ³ _{FR} ·d)	6,90	4,72	5,02	5,67	5,47	8,48
jährliche Menge oTS	t _{oTS} /a	3.186	5.030	627	688	661	2.916
tägliche Menge oTS	t _{oTS} /d	8,73	13,78	1,72	1,89	1,81	7,99
1.2 Kennzahlen zur Charakterisierung der Ausbeute							
jährliche Biogasmenge	Nm ³ _{Biogas} / a	2.334.073	3.691.982	370.764	405.281	435.826	2.042.172
tägliche Biogasmenge	Nm ³ _{Biogas} / d	6.395	10.115	1.016	1.110	1.194	5.595

Gasertrag	$\text{Nm}^3_{\text{Biogas}} / (\text{m}^2_{\text{FR}} \cdot \text{d})$	0,86	0,90	1,00	1,26	0,96	2,11
C-Ausnutzungsgrad	%	88,67	91,21	75,70	76,47	84,15	91,46
durchschnittliche Gasausbeute	$\text{Nm}^3_{\text{Biogas}} / \text{kg}_{\text{TS}}$	0,694	0,695	0,493	0,508	0,585	0,661
	$\text{Nm}^3_{\text{Biogas}} / \text{kg}_{\text{OTS}}$	0,733	0,734	0,591	0,589	0,659	0,700
Heizwert des Biogases	$\text{kWh} / \text{Nm}^3_{\text{Biogas}}$	5,65	5,47	5,41	5,34	4,95	5,26
1.3 Kennzahlen zur Charakterisierung der energetischen Effizienz							
Brennstoffenergie	kWh/a	13.177.917	20.181.574	2.007.072	2.162.484	2.157.615	10.732.192
Jahresarbeit elektrisch	$\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$	4.300.000	8.000.000	640.000	730.000	739.000	4.347.000
Nettostromproduktion	$\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$	3.953.250	7.760.000	580.000	660.000	665.000	4.200.000
Jahresarbeit thermisch	$\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{a}$	5.586.103	10.130.130	969.697	657.000	1.108.500	4.651.290
Wärmenutzung	$\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{a}$	420.000	6.000.000	460.000	0	89.644	2.685.884
Volllaststunden	h/a	8.600	8.008	6.465	7.300	7.390	8.264
Ausnutzung der BHKW	%	98,2	91,4	73,8	83,3	84,4	94,3
Ausnutzung therm. Energie	%	7,5	59,2	47,4	0,0	8,1	57,7
el. Wirkungsgrad der BGA	%	30,0	38,5	28,9	30,5	30,8	39,1
therm. Nutzungsgrad der BGA	%	3,2	29,7	22,9	0,0	4,2	25,0
Gesamtwirkungsgrad der BGA	%	33,2	68,2	51,8	30,5	35,0	64,2
1.4 Kennzahlen zur Charakterisierung der ökonomische Effizienz							
1.4.1 Agrarökonomische Kennzahlen							
Gesamtinvestitionssumme	€	1.800.000	5.400.000	550.000	550.000	550.000	2.300.000
Substratkosten	€/a	178.150	588.582	17.108	40.051	28.049	218.534
	€/Cent/ kWh_{el}	4,14	7,36	2,67	5,49	4,01	5,20
Betriebskosten	€/a	73.827	178.048	17.561	19.260	23.363	131.178
	€/Cent/ kWh_{el}	1,72	2,23	2,74	2,64	3,34	3,12
Stromgestehungskosten	€/Cent/ kWh_{el}	5,86	9,58	5,42	8,12	7,34	8,33
Flächenenergieertrag	$\text{kWh}_{\text{el}}/\text{ha}$	#DIV/0!	29.630	40.000	14.038	19.320	17.743
Volumenbezogener Energieertrag	$\text{kWh}_{\text{el}} / (\text{m}^3_{\text{FR}} \cdot \text{a})$	577	715	630	826	593	1.640
Stromertrag bezogen auf oTS	$\text{kWh}_{\text{el}} / \text{kg}_{\text{OTS}}$	1,350	1,591	1,021	1,061	1,118	1,491
1.4.2 Kennzahlen bezogen auf die Investitionssumme							
Investitionssumme/Vol.	€/m ³ _{FR}	241	483	541	622	441	868
besser: Investitionssumme/CSB-Belastung	€/Cent/(kg _{CSB} /a)	41,35	78,71	59,14	50,86	56,68	56,07
1.4.3 Kennzahlen bezogen auf laufende Kosten							
Betriebskosten/CSB-Belastung	€/Cent/(kg _{CSB} /a)	5,79	11,17	3,73	5,49	5,30	8,53
Betriebskosten/abgebaute Substratmenge	€/Cent/(kg _{CSB} /a)	6,65	12,43	3,73	7,17	5,30	9,43
1.4.4 Kennzahlen bezogen auf Energieausbeuten							
bez. auf Investitionssumme	($\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$)/€	2,389	1,481	1,164	1,327	1,344	1,890
bez. auf Betriebskosten	($\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$)/€	17,07	10,44	18,46	12,31	14,37	12,43
bez. auf jährl. CSB-Belastung	($\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$)/(kg _{CSB} /a)	0,988	1,166	0,688	0,675	0,762	1,060