



**Ministerium für Umwelt, Raumordnung
und Landwirtschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen**

**Entwicklung eines Managementkonzeptes
für eine wirtschaftliche Energiebereitstellung
auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen
mit dem Ziel der Energieautarkie**

- Forschungs- und Entwicklungsvorhaben -

fiw

T&M

IBR

August 2000



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft
an der RWTH Aachen e.V.
Mies-van-der-Rohe-Straße 17
52056 Aachen



Ingenieurbüro Redlich und Partner GmbH
Beratende Ingenieure für Elektrotechnik
Technologiezentrum Jülich
Karl-Heinz-Beckurts-Straße 13
52428 Jülich

TUTTAHS & MEYER
INGENIEURGESELLSCHAFT



FÜR WASSER-, ABWASSER-
UND ABFALLWIRTSCHAFT MBH

Bismarckstraße 2 - 8 52066 Aachen

**Entwicklung eines Managementkonzeptes
für eine wirtschaftliche Energiebereitstellung
auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen
mit dem Ziel der Energieautarkie**

Projektbearbeitung FiW:

Dipl.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bolle

Dipl.-Ing. Peter Brautlecht

Dipl.-Ing. Sylvia Gredigk

Projektbearbeitung IBR:

Dipl.-Ing. Richard Wagner

Dipl.-Ing. Frank Illing

Dipl.-Ing. Stefan Schmuck

Projektbearbeitung Tuttahs & Meyer:

Dr.-Ing. Markus Schröder

Dipl.-Ing. Arnold Schäfer

Dipl.-Ing. Bernhard Wöffen

August 2000



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft
an der RWTH Aachen e.V.
Mies-van-der-Rohe-Straße 17
52056 Aachen



Ingenieurbüro Redlich und Partner GmbH
Beratende Ingenieure für Elektrotechnik
Technologiezentrum Jülich
Karl-Heinz-Beckurts-Straße 13
52428 Jülich

TUTTAHS & MEYER
INGENIEURGESELLSCHAFT



FÜR WASSER-, ABWASSER-
UND ABFALLWIRTSCHAFT MBH

Bismarckstraße 2 - 8 52066 Aachen

**Entwicklung eines Managementkonzeptes
für eine wirtschaftliche Energiebereitstellung
auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen
mit dem Ziel der Energieautarkie**

- Band I -

Projektbearbeitung FiW:

Dipl.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bolle
Dipl.-Ing. Peter Brautlecht
Dipl.-Ing. Sylvia Gredigk

Projektbearbeitung IBR:

Dipl.-Ing. Richard Wagner
Dipl.-Ing. Frank Illing
Dipl.-Ing. Stefan Schmuck

Projektbearbeitung Tuttahs & Meyer:

Dr.-Ing. Markus Schröder
Dipl.-Ing. Arnold Schäfer
Dipl.-Ing. Bernhard Wöffen

August 2000

INHALTSVERZEICHNIS**BAND I**

1 Veranlassung und Zielsetzung	1
2 Entwicklung des Energieverbrauchs und der Energiebereitstellung auf Kläranlagen.....	6
2.1 Energiebedarf und Energieverbrauch	6
2.2 Energiebedarfsentwicklung durch veränderte Anforderungen an die Abwasserbehandlung	7
2.3 Veränderung des Energieverbrauchs durch technischen Fortschritt	8
2.4 Veränderung der Energiebereitstellungskonzepte	10
2.5 Zusammenfassende Bewertung des Energiebedarfs/-verbrauchs und des vorhandenen Energiedangebotes in Abhängigkeit vom Reinigungsgrad der Abwasserbehandlung	12
3 Aufstellung des Ist-Zustandes	17
3.1 Charakteristik des Energieverbrauchs auf kommunalen Kläranlagen	17
3.1.1 Elektrischer Energieverbrauch	17
3.1.2 Thermischer Energieverbrauch	20
3.2 Ist-Zustand der Energiebereitstellung	23
3.2.1 Umfrage zum Einsatz regenerativer Energieträger auf Kläranlagen ..	23
3.2.2 Verfügbare Energieträger und deren Bereitstellung	29
3.2.3 Umgesetzte bzw. geplante Kombinationsmöglichkeiten bei der Energiebereitstellung.....	36
4 Grundlagen für den Einsatz verschiedener Energieträger auf Kläranlagen ..	43
4.1 Technische Voraussetzungen.....	44
4.1.1 Sekundärenergie	44
4.1.1.1 EVU-Strom	44
4.1.2 Primärenergie	44
4.1.2.1 Faulgas.....	44
4.1.2.2 EVU-Erdgas.....	47

4.1.2.3	Propangas	48
4.1.2.4	Diesel/Heizöl.....	48
4.1.2.5	Biodiesel/Rapsöl.....	49
4.1.2.6	Holz	49
4.1.2.7	Klärschlamm.....	50
4.1.2.8	Wasserkraft	51
4.1.2.9	Windkraft	53
4.1.2.10	Solarenergie	54
4.1.2.11	Abwasserwärme	57
4.1.2.12	Oberflächennahe Erdwärme.....	58
4.2	Verfügbarkeit	59
4.2.1	Zeitliche Verfügbarkeit.....	59
4.2.2	Quantitative Verfügbarkeit.....	63
4.2.3	Geographische Verfügbarkeit.....	67
4.2.4	Witterungsbedingte Verfügbarkeit.....	70
4.2.5	Verfahrensbedingte Verfügbarkeit.....	70
4.3	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	71
4.3.1	Grundsätzlicher Vorrang der Abwasserreinigung.....	71
4.3.1.1	Wasserhaushaltsgesetz, Abwasserabgabengesetz und Strafgesetzbuch.....	72
4.3.1.2	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG).....	72
4.3.2	Vertragliche Gestaltung der Energieversorgung einer Kläranlage	73
4.3.2.1	Vertragsrecht (Bürgerliches Gesetzbuch, VOL)	73
4.3.2.2	Energiewirtschaftsgesetz und Stromeinspeisungsgesetz....	74
4.3.2.3	Stromlieferverträge	76
4.3.3	Besonderheiten bei verschiedenen Energieträgern (Heizöl, Wind, Faulgas)	77
4.3.3.1	Einfluß des Mineralölsteuergesetzes auf die Energie- nutzung.....	77
4.3.3.2	Öko-Steuer	77

4.3.3.3	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft und Bundes-Immissionsschutzgesetz	78
4.3.3.4	Gewerberechtliche und a.a.R.d.T. bei BHKW-Anlagen	80
4.3.3.5	Schallschutz	81
4.3.3.6	Bundesbaugesetzliche Rahmenbedingungen bei Windkraftanlagen.....	81
4.3.3.7	Rechtliche Besonderheiten bei Wasserkraftanlagen.....	82
4.3.3.8	Rechtliche Besonderheiten bei Wärmepumpen	82
4.3.3.9	Versicherungsrechtliche Empfehlungen	83
4.3.3.10	Formen öffentlicher Zuwendungen und alternative Finanzierungsstrategien	85
5	Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Energieträgern auf kommunalen Kläranlagen (Grobanalyse).....	88
5.1	EVU-Strom.....	89
5.2	Faulgas	90
5.3	Zweitbrennstoffe	91
5.4	Klärschlamm	92
5.5	Wasserkraft	92
5.6	Windkraft	95
5.7	Solarenergie	97
5.8	Abwasserwärme	99
5.9	Oberflächennahe Erdwärme	101
6	Kostenbetrachtung	102
6.1	Elektrische Energie (EVU)	102
6.2	Faulgas	103
6.3	Erdgas	103
6.4	Brennstoffe	104
6.5	Klärschlamm	104
6.6	Wasserkraft	106
6.7	Windkraft	106

6.8 Solarenergie	107
6.9 Abwasserwärme	107
6.10 Oberflächennahe Erdwärme	107
6.11 Gebäudekosten	108
6.12 Heizungsanlagen	108
6.13 BHKW	108
7 Zusammenfassung.....	111
8 Literatur.....	113

ANHANG BAND I

Erläuterungen und Umrechnungstabelle für Energieeinheiten	A1
Umfrage zur alternativen Energiebereitstellung auf Kläranlagen in Deutschland.....	A2
Fotodokumentation: Exkursion zu Kläranlagen mit regenerativer Energie- versorgung vom 2. - 3.8.1998.....	A14

BAND II

1 Einleitung	1
2 Managementkonzept für die Energiebereitstellung auf Kläranlagen	4
2.1 Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie	5
2.1.1 Grundsätzliches.....	5
2.1.2 Sicherheitstechnische Aspekte der Energieautarkie	7
2.2 Datenbasis und Genauigkeitsstufen des Managementkonzeptes	7
2.3 Energieverbrauchsermittlung	11
2.3.1 Ermittlung des elektrischen Energieverbrauchs	11
2.3.2 Ermittlung des thermischen Energieverbrauchs.....	11
2.3.3 Ergebnis der Energieverbrauchsermittlung als Basis für die Verbrauchsdeckung	13
2.4 Energieverbrauchsdeckung	14
2.4.1 Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas	15
2.4.1.1 Faulgasanfall	17
2.4.1.2 Faulgasverbrauch.....	18
2.4.2 Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffe	20
2.4.3 Energieverbrauchsdeckung durch Wasserkraft	22
2.4.4 Energieverbrauchsdeckung durch Windkraft	24
2.4.5 Energieverbrauchsdeckung durch Solarenergie	26
2.4.6 Energieverbrauchsdeckung durch Abwasserwärme	28
2.4.7 Energieverbrauchsdeckung durch oberflächennahe Erdwärme.....	29
2.4.8 Baustein Energieverbrauchsdeckung im Simulationsprogramm Eman.....	30
2.5 Wirtschaftlichkeitsnachweis auf Jahreskostenbasis	31
2.5.1 Einflußgrößen auf die Strombezugskosten	32
2.5.2 Einflußgrößen auf die Wärmebezugskosten	34
2.5.3 Kalkulation der Einspeisevergütung	34
2.5.4 Jahreskosten von BHKW-Anlagen.....	35

2.5.5	Jahreskosten von Wasserkraftanlagen	37
2.5.6	Jahreskosten von Windkraftanlagen	38
2.5.7	Jahreskosten von Solaranlagen	39
2.5.7.1	Photovoltaik	39
2.5.7.2	Solarthermie	39
2.5.8	Schlußfolgerungen aus den Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	40
3	Beispielhafte Anwendung der Simulation mit Standardwerten (Genauigkeitsstufe 3).....	43
3.1	Vorstellung der Kläranlage Vreden	43
3.2	Datenbasis und Genauigkeitsstufe der Beispielrechnung	45
3.3	Energieverbrauchsermittlung	45
3.3.1	Stromverbrauchsermittlung	45
3.3.2	Wärmeverbrauchsermittlung	48
3.4	Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie	53
3.4.1	Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas	53
3.4.1.1	Faulgasanfall	53
3.4.1.2	Faulgasverbrauch.....	54
3.4.2	Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffeinsatz (Status Quo-Lastfall)	55
3.4.3	Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Wasserkraft	57
3.4.4	Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft (Variante 1)	58
3.4.5	Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Solarenergie (Variante 2)	59
3.4.6	Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Solar- energie (Variante 3).....	61
3.5	Wirtschaftlichkeitsnachweis für alle Varianten.....	63
4	Anwendung der Simulation nach energetischer Optimierung der Kläranlage Vreden (Genauigkeitsstufe 2)	69
4.1	Wesentliche Ergebnisse der energetischen Feinanalyse	69
4.2	Energieverbrauchsermittlung.....	70

4.2.1	Stromverbrauchsermittlung	70
4.2.2	Wärmeverbrauchsermittlung	72
4.3	Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie	73
4.3.1	Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas	73
4.3.1.1	Faulgasanfall	73
4.3.1.2	Faulgasverbrauch	74
4.3.2	Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffeinsatz (analog Status Quo-Lastfall)	75
4.3.3	Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft (Variante 1)	75
4.3.4	Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Solarenergie (Variante 2)	77
4.3.5	Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Solar- energie (Variante 3)	77
4.4	Wirtschaftlichkeitsnachweis für alle Varianten (Genauigkeitsstufe 2)	79
5	Vergleich der Ergebnisse	83
6	Zusammenfassung	85
7	Literatur	88

ANLAGE BAND II

Simulationsprogramm Eman (CD-Rom)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Entwicklung der atmosphärischen CO ₂ -Konzentrationen an der Meßstelle Schauinsland [Umweltbundesamt 1997, S. 94].....	1
Abbildung 2:	Bisherige und prognostizierte CO ₂ -Emissionen im Vergleich zum nationalen Ziel der Bundesrepublik [nach BMU 1997]	2
Abbildung 3:	Verknüpfungen bei der Energieoptimierung auf Kläranlagen.....	3
Abbildung 4:	Anteil verschiedener Energieträger an der Deckung des Weltenergieverbrauchs bis 2060 [Vahrenholt 1998]	4
Abbildung 5:	Mögliche Energieträger für den Einsatz auf Kläranlagen	5
Abbildung 6:	Einwohnerspezifischer Strombedarf in Abhängigkeit von der Schlammbelastung B_{TS} [Kunz 1988].....	7
Abbildung 7:	Spezifischer Energiebedarf der Belüftung für verschiedene Kläranlagenanschlußgrößen bei unterschiedlichen Zielen der Abwasserreinigung [Dichtl, Koppetsch 1989].....	8
Abbildung 8:	Ansicht der Treibmethananlage auf dem Gelände des Klärwerkes Wuppertal-Buchenhofen	10
Abbildung 9:	Details von mit Treibmethan des Klärwerkes Mönchengladbach-Neuwerk betriebenen Kraftfahrzeugen.....	11
Abbildung 10:	Energieverbrauch und -dargebot in Abhängigkeit von unterschiedlichen Zielen der Abwasserreinigung [Riegler, Bau 1989]	14
Abbildung 11:	Spezifischer elektrischer Energieverbrauch von Kläranlagen gemäß der Umfrage in Nordrhein-Westfalen [N.N. 1998]	18
Abbildung 12:	Mittlere Verbrauchswerte einzelner Stromverbraucher auf Beleuchtungsanlagen [Roth 1998].....	19
Abbildung 13:	Exemplarische Darstellung des Trockenwetterzulaufs sowie der geglätteten elektrischen Lastganglinie einer Kläranlage	20
Abbildung 14:	Jahresganglinie der Rohschlammtemperatur sowie der zur Aufheizung des Rohschlammes zuzuführenden Wärmeenergie.....	21
Abbildung 15:	Monatlicher Wärmebedarf zur Deckung der Transmissionsverluste bezogen auf das Faulbehältervolumen.....	22
Abbildung 16:	Monatlicher Wärmebedarf für die Gebäudeheizung auf Kläranlagen bezogen auf den umbauten Raum.....	22

Abbildung 17:	Auswertung der durchgeführten Umfrage zu alternativen Energiebereitstellungsformen auf Kläranlagen in Deutschland.....	25
Abbildung 18:	Standorte regenerativer Energiesysteme auf Kläranlagen gemäß Umfrage	26
Abbildung 19:	Installierte Netto-Kraftwerksleistung der Stromversorger in Deutschland 1998 [VDEW 1999]	27
Abbildung 20:	Anteil der Energieträger an der gesamten Netto-Stromerzeugung in Deutschland 1998 [VDEW 1999].....	28
Abbildung 21:	Anteil der elektrischen Eigenenergieproduktion über Faulgas gemäß Teilergebnisse der Umfrage NRW [N.N. 1998].....	31
Abbildung 22:	Eigenenergieversorgungsgrade Strom / Wärme der mit BHKW ausgerüsteten Kläranlagen in Hessen [HessenEnergie 1994].....	32
Abbildung 23:	Übersicht über die Eigenenergieerzeugung der Kläranlage Burg auf Fehmarn.....	38
Abbildung 24:	Foto des defekten BHKW-Moduls (links) sowie der Windkraftanlage (rechts) der Kläranlage Burg auf Fehmarn	39
Abbildung 25:	Photovoltaikanlage der Kläranlage Burg auf Fehmarn.....	39
Abbildung 26:	Prognose der elektrischen Energieverbrauchsdeckung der Kläranlage Balingen im Jahresmittel [ZV Balingen 1998].....	41
Abbildung 27:	Untersuchte Energieträger zur Energieversorgung auf Kläranlagen	43
Abbildung 28:	Zusammenhang zwischen Feststoffgehalt, Glühverlust GV und daraus resultierendem Heizwert Hu für Klärschlamm	51
Abbildung 29:	HQ-Diagramm der Einsatzbereiche von Wasserrädern und Turbinen [Günther 1997].....	53
Abbildung 30:	Wirkungsgradvergleich und Arbeitstemperaturbereich unterschiedlicher Kollektoren [RWE 1995, S. 17/15]	57
Abbildung 31:	Jahresganglinie des mittleren täglichen Faulgasanfalls	60
Abbildung 32:	Exemplarische Tagesganglinie des Trockenwetterzulaufes für einen Werk- und einen Wochenendtag.....	60
Abbildung 33:	Monatsschwankungen des Windkraftdargebotes in % des mittleren Dargebotes für das nordrhein-westfälische Flachland	61
Abbildung 34:	Tagesschwankungen des Solarenergiedargebotes in % des mittleren täglichen Solarenergiedargebotes (mittlere Werte)	62

Abbildung 35: Verlauf von Sonnenaufgang und Sonnenuntergang in Deutschland (Essen)	62
Abbildung 36: Solarenergiedargebot in % des mittleren Dargebotes.....	63
Abbildung 37: Einfluß des Schlammalters auf den spezifischen Faulgasanfall	64
Abbildung 38: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für verschiedene Rotordurchmesser	66
Abbildung 39: Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten in der BRD.....	68
Abbildung 40: Räumliche Verteilung der Globalstrahlungssumme im Jahresmittel für Nordrhein-Westfalen [Energieagentur NRW 1998]	69
Abbildung 41: Zukünftiger Energiemarkt [Lampe 1998].....	73
Abbildung 42: Klassifizierung verschiedener Energieträger nach ihren Steuerungs- und Speichermöglichkeiten bei der Verwendung auf ARA.....	88
Abbildung 43: Elektrische Eigenenergieversorgungsgrade in Abhängigkeit von der Anschlußgröße der Kläranlage	91
Abbildung 44: Leistungsdaten der Wasserkraftnutzung bei unterschiedlichen Kläranlagenanschlußgrößen und Potentialdifferenzen	93
Abbildung 45: Abschätzung der aus Wasserkraft erzeugbaren Jahresenergie sowie des erzielbaren Eigenenergieversorgungsgrades bei unterschiedlichen Fallhöhen	94
Abbildung 46: Energieertrag verschiedener Windkraftanlagen sowie Energieverbrauch von Kläranlagen unterschiedlicher Anschlußgrößen	96
Abbildung 47: Überschlägliche Abschätzung der aus Photovoltaik gewinnbaren Energiemenge und der daraus resultierenden Kosten.....	98
Abbildung 48: Investitionen für BHKW-Module	109

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Faulgasanfall und spezifisches elektrisches Energiedargebot bei verschiedenen Abwasserreinigungsverfahren (nach Kapp)	13
Tabelle 2:	Energetische Beurteilungskriterien für die Energiesituation gemäß Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [Müller et al. 1999].....	15
Tabelle 3:	Grundsätzlich auf Kläranlagen verfügbare Energieformen, deren Wandlungsprozesse sowie Nutzungsformen	29
Tabelle 4:	Kenndaten der Kläranlage Schönberg	37
Tabelle 5:	Kenndaten der Kläranlage Burg/Fehmarn.....	38
Tabelle 6:	Kenndaten der Kläranlage Balingen [ZV Balingen 1998].....	40
Tabelle 7:	Kenndaten der vorgesehenen solaren Klärschlamm-trocknung der Kläranlage Balingen.....	41
Tabelle 8:	Kenndaten der Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen.....	42
Tabelle 9:	Übersicht über die möglichen Zweitbrennstoffe verschiedener Gasmotoren	46
Tabelle 10:	Entwicklung der Einspeisevergütungen nach Stromeinspeisegesetz.....	76
Tabelle 11:	Auswirkungen der Öko-Steuer auf die Energiekosten	77
Tabelle 12:	TA Luft-Grenzen bzw. Grenzen nach Dynamisierungsbeschuß und erforderliche technische Maßnahmen	80
Tabelle 13:	Kostenübersicht Brennstoffe sowie deren Speicherung.....	104
Tabelle 14:	Investitionen und Betriebskosten verschiedener Schlamm-entwässerungsverfahren	105

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABMG	Allgemeine Bedingungen für die Maschinen- und Kasko-Versicherung von fahrbaren Geräten
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
BB	Belebungsbecken
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zum BImSchG
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
B _{BB}	BSB ₅ -Fracht zur Belebung
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
B _{TS}	Schlammbelastung [kg/kg · d]
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
d	dies (Tag)
DtA	Deutsche Ausgleichsbank
E	Einwohner
E _{ges}	elektrischer Gesamtverbrauch einer Kläranlage [kWh/a]
E _{BB}	jährlicher Elektrizitätsverbrauch der Belebungsanlage (Belüftung, Umwälzung, Rezirkulation und Rücklaufschlammförderung)
EW _{BSB5}	aktueller mittlerer Einwohnerwert, berechnet aus der mittleren BSB ₅ -Fracht im Zulauf einer Kläranlage dividiert durch die jährliche einwohnerspezifische BSB ₅ -Fracht bei 60 g BSB ₅ /(E·d)
e _{ges}	Einwohnerspezifischer Stromverbrauch in kWh/(E·a)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
elektr.	elektrisch
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ERP	European Recover Program
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EW	Einwohnerwerte
EWG	Europäische Wirtschafts-Gemeinschaft
GV	Glühverlust
GVU	Gasversorgungsunternehmen
GW	Gigawatt (elektrische / thermische Leistungseinheit = 1.000 kW)
GWh	Gigawattstunde (elektrische / thermische Arbeitseinheit = 1.000 kWh)

h	Höhe
HGB	Handelsgesetzblatt
HSW	Husumer Schiffswerft
HT	Hoch-Tarif (= Arbeitspreis der EVU für elektrische Arbeit in Tagstunden [DPf/kWh])
H _u	Heizwert, unterer
i. S. v.	im Sinne von
K _B	Betriebskosten [DM/a bzw. €/a]
K _I	Investitionen [DM bzw. €]
K _J	Jahreskosten = Kapital- und Betriebskosten [DM/a bzw. €/a]
K _K	Kapitalkosten = Abschreibung und Verzinsung [DM/a bzw. €/a]
KA	Kläranlage
kW	Kilowatt (elektrische / thermische Leistungseinheit = 1.000 Watt)
kWh	Kilowattstunde (elektrische / thermische Arbeitseinheit = 1.000 Wh)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LWG	Landeswassergesetz
MPP	Maximum Power Point
MSE	Maschinelle Schlammwässerung
MURL	Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen
MW	Megawatt (elektrische/thermische Leistungseinheit = 1.000 kWh)
N	Nitrogenium (Stickstoff)
NT	Nieder-Tarif (= Arbeitspreis der EVU für elektrische Arbeit in den Nachtstunden [DPf/kWh])
NW	Nordrhein-Westfalen
O	Oxygenium (Sauerstoff)
oTS	organischer Trockensubstanzgehalt [%]
P	Phosphor
P	Leistung [W bzw. kW]
PLS	Prozeßleitsystem
PS	Primärschlamm
Q	Volumenstrom [l/s bzw. m ³ /h]
RME	Rapsöl-Methylester
S _{Monat(Jahr)}	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die monatstypische Abweichung der elektrischen Leistung vom Jahresmittel angibt
S _{Monat, TL (Jahr)}	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die monatstypische Abweichung der thermischen Leistung für die Gebäudebeheizung vom Jahresmittel angibt

$S_{\text{Monat, TS}}$ (Jahr)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die monatstypische Abweichung der thermischen Leistung für die Schlammaufheizung vom Jahresmittel angibt
SPS	Systemprogrammierbare Steuerung
StrEG	Stromeinspeisungsgesetz
S_{Stunde} (Tag)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die stundentypische Abweichung der elektrischen Leistung vom Tagesmittel angibt
$S_{\text{Stunde, TL}}$ (Tag)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die stundentypische Abweichung der thermischen Leistung für die Gebäudebeheizung vom Tagesmittel angibt
$S_{\text{Stunde, TS}}$ (Tag)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die stundentypische Abweichung der thermischen Leistung für die Schlammaufheizung vom Tagesmittel angibt
S_{Tag} (Woche)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die wochentagstypische Abweichung der elektrischen Leistung vom Wochenmittel angibt
$S_{\text{Tag, TL}}$ (Woche)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die wochentagstypische Abweichung der thermischen Leistung für die Gebäudebeheizung vom Wochenmittel angibt
$S_{\text{Tag, TS}}$ (Woche)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die wochentagstypische Abweichung der thermischen Leistung für die Schlammaufheizung vom Wochenmittel angibt
T	(Reaktor-)Temperatur
TA	Technische Anleitung
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
therm.	thermisch
TR	Trockenrückstand [%]
TS	Trockensubstanzgehalt [mg/l]
TS_{VK}	Trockenmasseentnahme aus der Vorklärung [g/(E · d)]
TS_0	Trockenmasse im Zulauf zum Reaktor [g/(E · d)]
t_{TS}	Schlammalter
ÜS	Überschußschlamm
$ÜS_{\text{P}}$	Fällschlamm aus Phosphorfällung
USV	Unabhängige Stromversorgung
UVPg	Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung
VOL	Verdingungsordnung für Leistungen
W	Watt
WEA	Windenergieanlage
WG	Wassergehalt

WHG	Wasserhaushaltsgesetz
W _s	Schadenswahrscheinlichkeit je Jahr [%/a]

1 Veranlassung und Zielsetzung

Der Schutz der Erdatmosphäre stellt für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft eine neue Herausforderung dar. Die CO₂-Konzentrationen in der Luft sind in den letzten Jahrzehnten besorgniserregend gestiegen (siehe Abbildung 1).

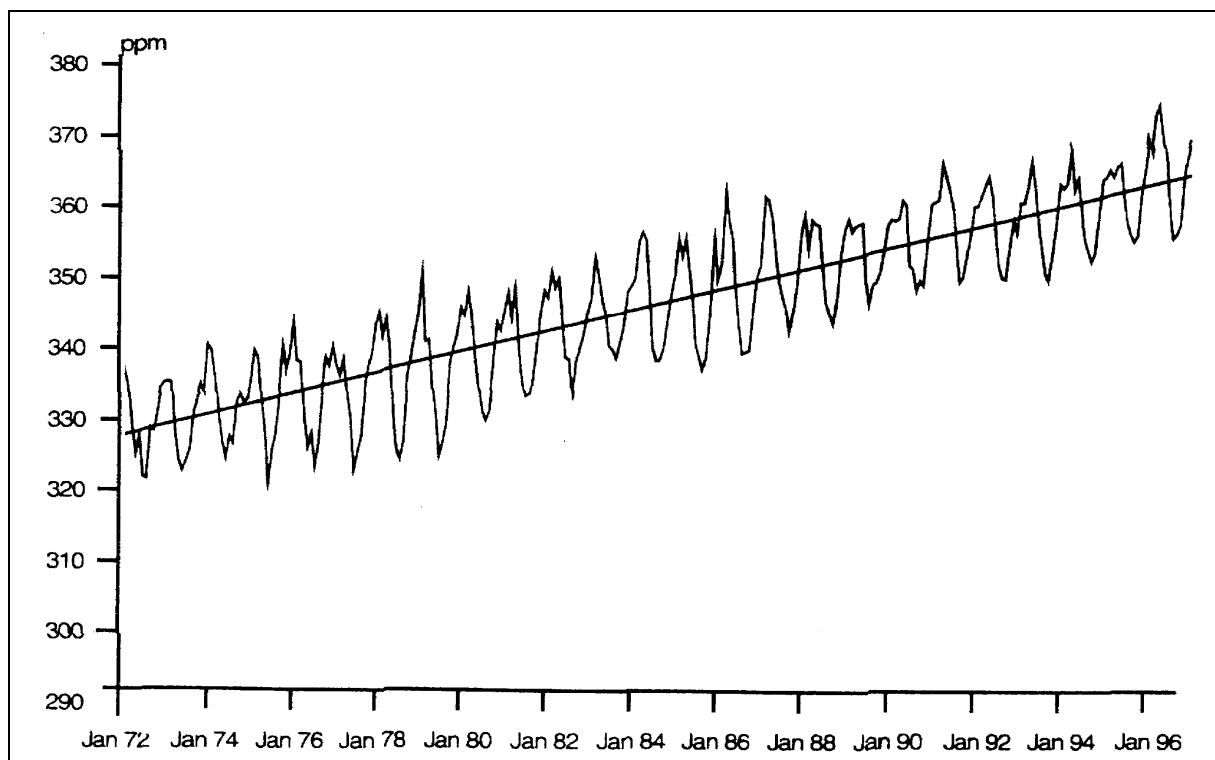


Abbildung 1: Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentrationen an der Meßstelle Schauinsland [UMWELTBUNDESAMT 1997, S. 94]

Aus diesem Grunde ist die Reduktion der klimarelevanten Schadstoffe zu einem wesentlichen Ziel in der nationalen und internationalen Umweltpolitik geworden. So strebt die Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahre 2005 eine Reduzierung der CO₂-Emissionen um 25 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 an. Den bestehenden Handlungsbedarf macht eine im Auftrag des BMU/UBA durchgeführte Studie zur prognostizierten CO₂-Emissionsentwicklung deutlich: danach wird die mit den bisher beschlossenen Maßnahmen erzielte CO₂-Reduktion bis zum Jahr 2005 lediglich auf 14,5 % geschätzt; gegenüber 1995 sogar lediglich auf 3 % [BMU 1997]. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 2 verdeutlicht.

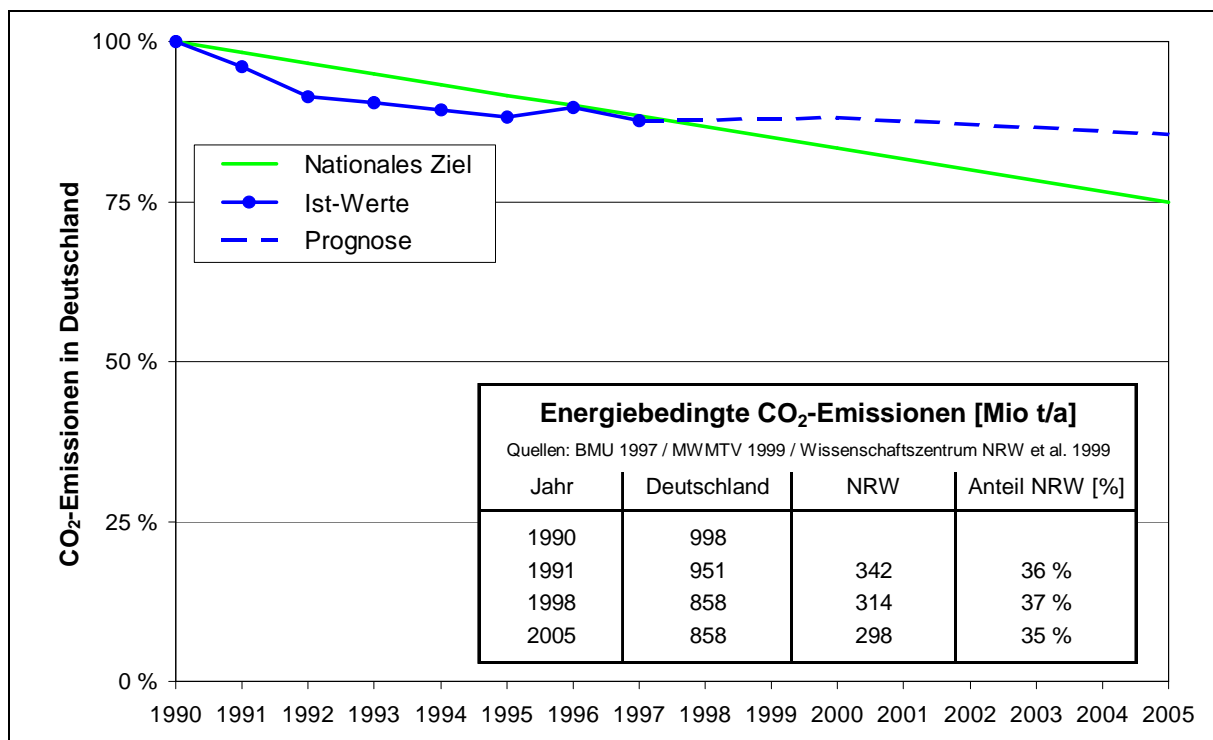


Abbildung 2: Bisherige und prognostizierte CO₂-Emissionen im Vergleich zum nationalen Ziel der Bundesrepublik [nach BMU 1997]

Vor diesem Hintergrund ist deshalb zu prüfen, inwieweit auch auf Kläranlagen ein Beitrag zum allgemeinen Ziel der CO₂-Reduktion geleistet werden kann. Zur Sicherstellung des Gewässerschutzes ist bei Kläranlagen ein hoher Energieeinsatz notwendig. Ihr Energieverbrauch ist mit dem eines mittleren Industriebetriebes vergleichbar. Unter den öffentlichen Bauten und Anlagen der Kommunen stellen die Kläranlagen in vielen Fällen den größten Energieverbraucher dar und verfügen entsprechend über das größte Einsparpotential an Energie bzw. klimarelevanten Schadstoffen.

Für Kläranlagenbetreiber sind Maßnahmen zum Klimaschutz i.d.R. jedoch nur dann interessant und durchführbar, wenn sie auch wirtschaftlich umsetzbar sind und nicht einen Anstieg der Abwassergebühren provozieren. Durch eine Energieoptimierung auf Kläranlagen lassen sich die volkswirtschaftlichen Ziele des Klimaschutzes mit den betriebswirtschaftlichen Interessen des Kläranlagenbetreibers effizient verknüpfen. Bei einer Optimierung des Energieverbrauches und der Energiebereitstellung können sowohl die CO₂-Emissionen als auch die Gesamtjahreskosten der Kläranlage gesenkt werden.

In Abbildung 3 ist das Zusammenwirken der einzelnen Bausteine der Energieoptimierung auf Kläranlagen dargestellt. Die Verminderung der klimarelevanten Schadstoffe kann sowohl durch eine Reduzierung des Energieverbrauches als auch durch

eine Versorgung der Kläranlage mit regenerativen Energien erreicht werden. Beide Ansatzmöglichkeiten der Energieoptimierung können zudem zur Energiekostenreduzierung unter Beibehaltung der Gesamtjahreskostenreduzierung beitragen. Dem Gewässerschutz als eigentliche Zielsetzung der Abwasserbehandlung muß dabei jedoch Priorität eingeräumt werden.

ENERGIEOPTIMIERUNG AUF KLÄRANLAGEN	
ZIELSETZUNG	K CO ₂ -Reduktion ↘ Klimaschutz
	K Betriebskostenreduzierung ↘ Gebührenstabilisierung
INSTRUMENTE	K Optimierung Energieverbrauch
	K Optimierung Energiebereitstellung
VORAUSSETZUNG	K Einhaltung der prozeßstabilen Abwasserreinigung

Abbildung 3: Verknüpfungen bei der Energieoptimierung auf Kläranlagen

Die Optimierung des Energieverbrauches steht im Mittelpunkt anderer Projekte wie beispielsweise dem im Auftrag des MURL NRW erarbeiteten Handbuch „Energie in Kläranlagen“, das Betreibern und Ingenieuren eine umfassende Anleitung zur Erfassung energetischer Einsparpotentiale bietet [MÜLLER ET AL. 1999]. Aus diesem Grunde wird in diesem Forschungsvorhaben der Energieverbrauch nur dort thematisiert, wo er für die Fragestellungen der Energiebereitstellung erforderlich ist. Für detaillierte Auskünfte über die Möglichkeiten der Energieverbrauchsoptimierung verweisen die Autoren auf das Handbuch.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird der zweite Pfeiler der Energieoptimierung - die Optimierung der Energiebereitstellung - fokussiert. Heutzutage erfolgt die Versorgung einer Kläranlage mit elektrischer und thermischer Energie meist durch elektrische Energie über das öffentliche Netz, durch angelieferte fossile Brennstoffe und/oder durch Faulgas. Dabei bestehen auf kommunalen Kläranlagen vielfältige Alternativen für die Energiebereitstellung.

So ist z.B. die Nutzung der Wind- oder Solarenergie - wenn auch nicht auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen - inzwischen Stand der Technik. Abbildung 4 macht deutlich, welchen Beitrag nach einer Prognose des Energiekonzerns Shell die regenerativen Energieträger bei der zukünftigen Energieverbrauchsdeckung spielen werden [VAHRENHOLT 1998]. Vor dem Hintergrund der nur begrenzt verfügbaren fossilen Energieträger sollte deshalb untersucht werden, ob verstärkter Einsatz regenerativer Energieträger auch auf Kläranlagen sinnvoll ist.

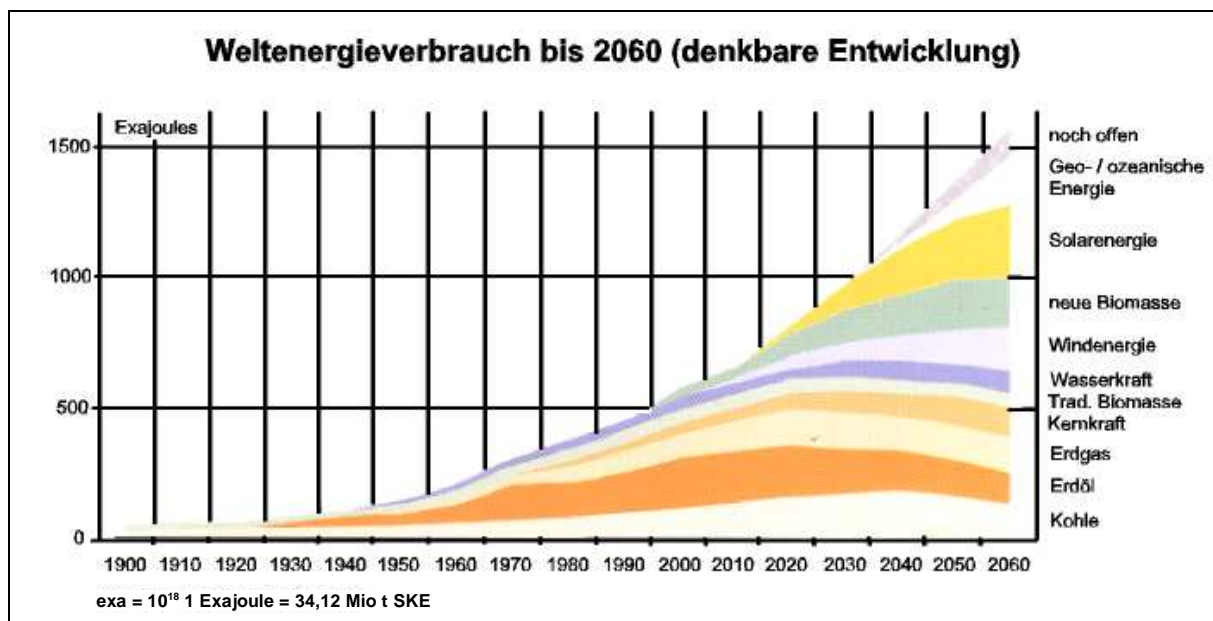


Abbildung 4: Anteil verschiedener Energieträger an der Deckung des Weltenergieverbrauchs bis 2060 [VAHRENHOLT 1998]

Eine systematische Kombination und ein optimiertes Managementkonzept unterschiedlicher Energieträger mit planmäßiger Abstimmung auf die spezifische Verbrauchscharakteristik einer Kläranlage sind bisher noch nicht gezielt untersucht worden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll deshalb überprüft werden, inwieweit durch die Kombination verschiedener Energieträger eine autarke Energieversorgung einer kommunalen Abwasserreinigungsanlage realisierbar ist. Autarkie ist nach [BROCKHAUS 1994] wie folgt definiert:

1) allg.: (wirtschaftliche) Unabhängigkeit.

2) Ethik: als >Selbstgenügsamkeit< im alten Griechenland ein Grundprinzip der Lebenshaltung des einzelnen wie auch der Polisgemeinschaft gegenüber der Umwelt; in philosoph. Sinn Selbstbeherrschung als Bedingung der Freiheit; bei den Kynikern und den Stoikern Unabhängigkeit von äußeren Dingen, von den Affekten (Apathie) als Auszeichnung für das allein glückselige Leben des Weisen. Die kynisch-stoische Bedeutung wirkte bis in die Neuzeit fort. Der ökonom. Begriff A. findet sich zuerst bei den Utopisten (T. MORUS, T. CAMPANELLA, F. BACON).

3) Wirtschaft: die vollständige oder teilweise Selbstversorgung eines Haushaltes, einer Region oder eines Staates mit Gütern und Dienstleistungen. Wirtschaftlich autark ist ein Land, das alles selbst besitzt oder das seinen Bedarf auf das beschränkt, was es selbst besitzt oder erzeugt (künstliche A.). Natürl. A. spielt z. B. in wirtschaftstheoret. Analysen der geschlossenen Volkswirtschaft ohne außenwirtschaftl. Beziehungen eine Rolle. Künstl. A. ist das Ergebnis außen- und binnenwirtschaftl. Maßnahmen zur Sicherung polit. und wirtschaftl. Unabhängigkeit. In etwas abgeschwächter Form zielt A.-Politik darauf ab, den Selbstversorgungsgrad, v. a. mit Nahrungsmitteln und Rohstoffen, zu erhöhen. d. h. den tatsächlichen an den theoretischen möglichen Grad der Selbstversorgung heranzuführen. Inwieweit A. verwirklicht werden kann, hängt entscheidend von der Ausstattung eines Landes mit Produktionsfaktoren (z. B. landwirtschaftl. und mineral. Rohstoffe, techn. Know-how, Produktionspotential) ab.

Für Kläranlagen bedeutet Energieautarkie demnach Erhöhung des Eigenenergieversorgungsgrades mit der Zielsetzung einer vollständigen oder teilweisen Selbstversorgung. Wegen der geringeren Relevanz der thermischen Energieverbrauchsdeckung wird in diesem Forschungsvorhaben das Hauptaugenmerk auf die elektrische Energieautarkie gelegt.

Die Energieträger, die in ein Managementkonzept zur optimierten Energiebereitstellung eingebunden werden können, fallen verfahrensbedingt auf der Kläranlage selbst an bzw. können aus den öffentlichen Netzen bezogen oder am Standort Kläranlage zusätzlich installiert werden (siehe Abbildung 5). Im Rahmen des F+E-Vorhabens werden die Möglichkeiten und Hemmnisse, diese verschiedenartige Energieträger in ein neuartiges Energiemanagement einer Kläranlage einzubinden, zusammengestellt und für eine Kläranlage beispielhaft vorgeführt.

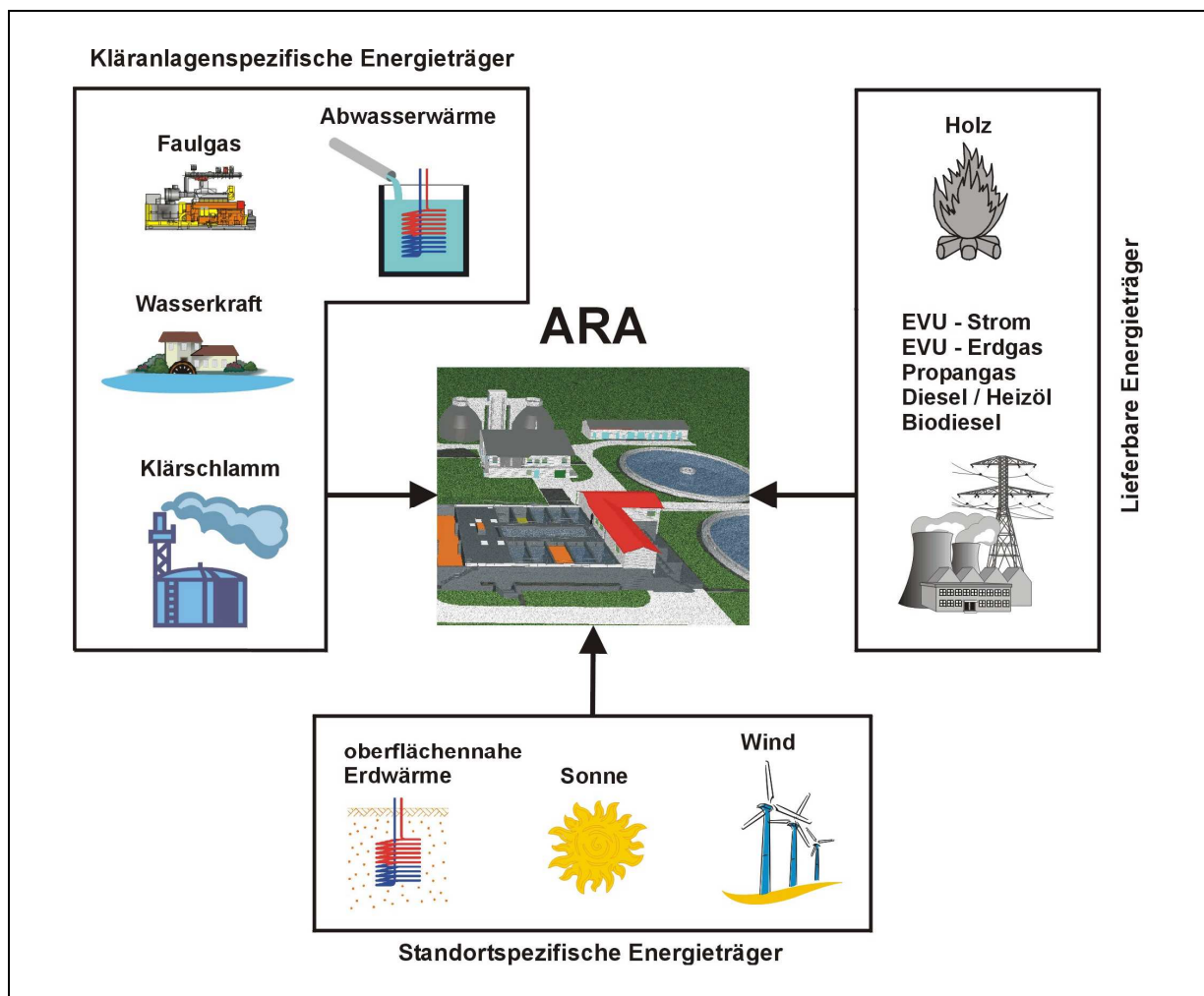


Abbildung 5: Mögliche Energieträger für den Einsatz auf Kläranlagen

2 Entwicklung des Energieverbrauchs und der Energiebereitstellung auf Kläranlagen

2.1 Energiebedarf und Energieverbrauch

Der Energieverbrauch einer Kläranlage unterscheidet sich vom Energiebedarf zur Sicherung einer ordnungsgemäßen Abwasserreinigung erheblich.

Während der *Energiebedarf* die theoretisch benötigte Energie zur Deckung der eigentlichen Abwasserreinigung (hinreichende Sauerstoffversorgung, Hebung und Transport des Abwassers, etc.) beschreibt, wird durch den *Energieverbrauch* zusätzlich die Summe aller Einflußfaktoren erfaßt, die zu einem gegenüber dem theoretischen Bedarf erhöhten, tatsächlichen Verbrauch auf Kläranlagen führen.

Der Energiebedarf einer Kläranlage ist direkt abhängig von der zufließenden Abwassermenge, der Abwasserbelastung, den Reinigungsanforderungen, der topographischen Lage der Kläranlage, dem gewählten Reinigungsverfahren u.a.. Unter Berücksichtigung der genannten Parameter ist der Energiebedarf rechnerisch zu ermitteln und als spezifische Kenngröße (z.B. kWh/(E·a), kWh/m³) darzustellen.

Der Energiebedarf ist nur begrenzt zu beeinflussen, da die beschriebenen Ausgangsdaten nur geringe Optimierungsspielräume bieten. Im Gegensatz dazu ist der Energieverbrauch direkt einflußbar durch die Geräteauswahl und die gewählte Betriebsstrategie. So kann z.B. durch Einsatz von Motoren mit hohem Wirkungsgrad oder einer Regelung der Aggregate nach ihrem effektiven Bedarf der Bezug der eingesetzten Energie wesentlich reduziert werden. Durch den Energieverbrauch werden zusätzlich zum Energiebedarf u.a. folgende Einflußfaktoren erfaßt:

- überschüssig eingetragene Energie durch Überdimensionierung von Aggregaten, Betrieb mit schlechten Wirkungsgraden, fehlende Abstufungs- bzw. Regelungsmöglichkeiten,
- Leerlaufzeiten unnötig laufender Aggregate,
- Umwandlungsverluste durch Reibung und Wärme.

Bei einer Optimierung des Energieverbrauches soll letztlich die Differenz zwischen dem Energiebedarf und dem Energieverbrauch auf das zwingend notwendige und wirtschaftlich vertretbare Maß reduziert werden.

2.2 Energiebedarfsentwicklung durch veränderte Anforderungen an die Abwasserbehandlung

Die Anforderungen an die Reinigungsleistung kommunaler Kläranlagen haben vor allem einen wesentlichen Einfluß auf den Energiebedarf der Belebungsstufen. Da der erhöhte Gesamtenergiebedarf zu 60 - 70 % durch das Belebungsbecken bestimmt wird, können die Einflüsse in erheblichem Maß auf die Gesamtanlage übertragen werden. So ist für die Sicherstellung einer Nitrifikation gegenüber einer reinen C-Elimination ein erhöhter Energiebedarf für den Sauerstoffeintrag notwendig. Eine qualitative Aussage über den Anteil des C- und N-Abbaus am Energiebedarf läßt sich aus den theoretischen Untersuchungen von KUNZ ableiten (siehe Abbildung 6).

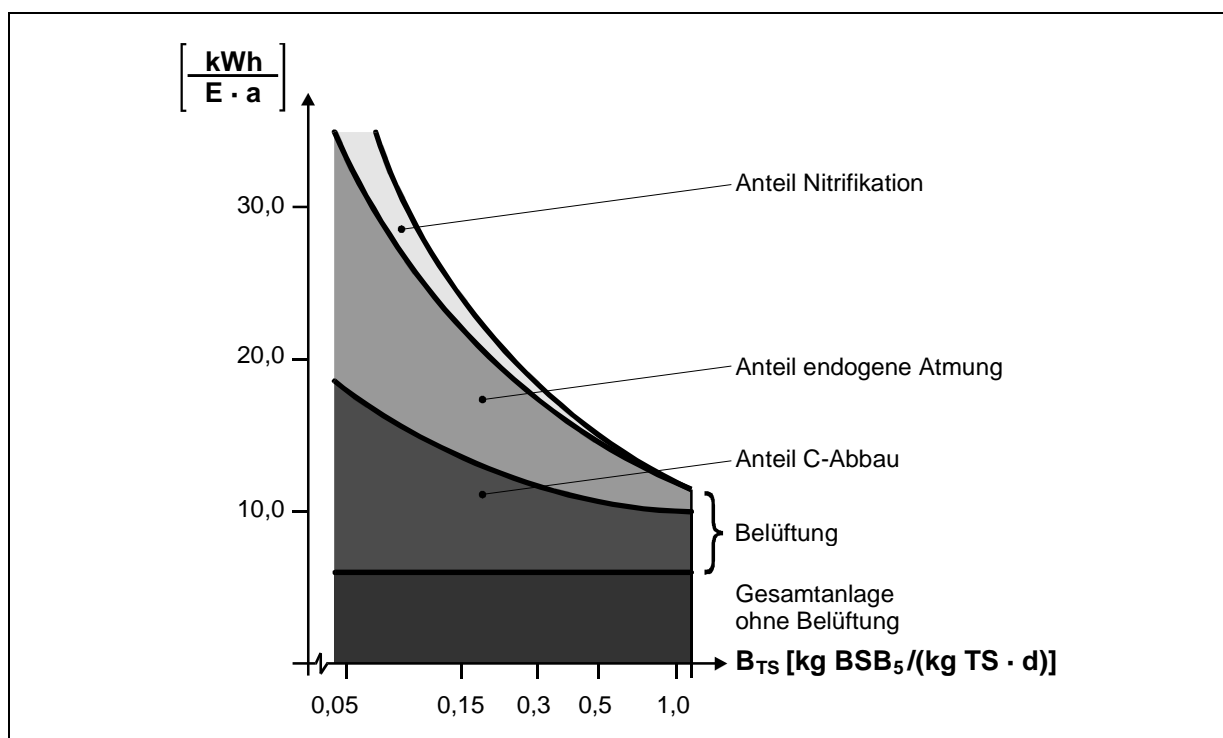


Abbildung 6: Einwohnerspezifischer Strombedarf in Abhängigkeit von der Schlammbelastung B_{TS} [KUNZ 1988]

DICHTL und KOPPETSCH untersuchten den Einfluß veränderter Reinigungsanforderungen auf die Energiesituation für die Belebungsanlage von Modellanlagen mit Anschlußgrößen von 20.000, 50.000 und 100.000 E. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen wurden folgende Reinigungsziele untersucht:

- reine Kohlenstoffelimination; $B_{TS} = 0,3 \text{ kg BSB}_5/(\text{kg TS} \cdot \text{d})$
- weitgehende Nitrifikation ($\text{NH}_4\text{-N} \leq 10 \text{ mg/l}$), mit/ohne Denitrifikation ($\eta_{\text{Deni}} = 80\%$); $B_{TS} = 0,15 \text{ kg BSB}_5/(\text{kg TS} \cdot \text{d})$

- vollständige Nitrifikation ($\text{NH}_4\text{-N} \leq 1 \text{ mg/l}$), mit/ohne Denitrifikation ($\eta_{\text{Deni}} = 80\%$);
 $B_{\text{TS}} = 0,12 \text{ kg BSB}_5/(\text{kg TS}\cdot\text{d})$

Der spezifische Energiebedarf für die untersuchten Ausbaugrößen in Abhängigkeit von den Reinigungsanforderungen ist in Abbildung 7 dargestellt. Danach sind für Kläranlagen mit weitgehender Nitrifikation gegenüber Anlagen mit reiner C-Elimination Mehraufwendungen in Größenordnungen von 80 - 120 % erforderlich. Durch einen Verzicht auf eine gezielte Denitrifikation erhöht sich der Energiebedarf um weitere 10 - 20 %, da die „Energierückgewinnung“ durch die Nitratatmung nicht ausgenutzt wird.

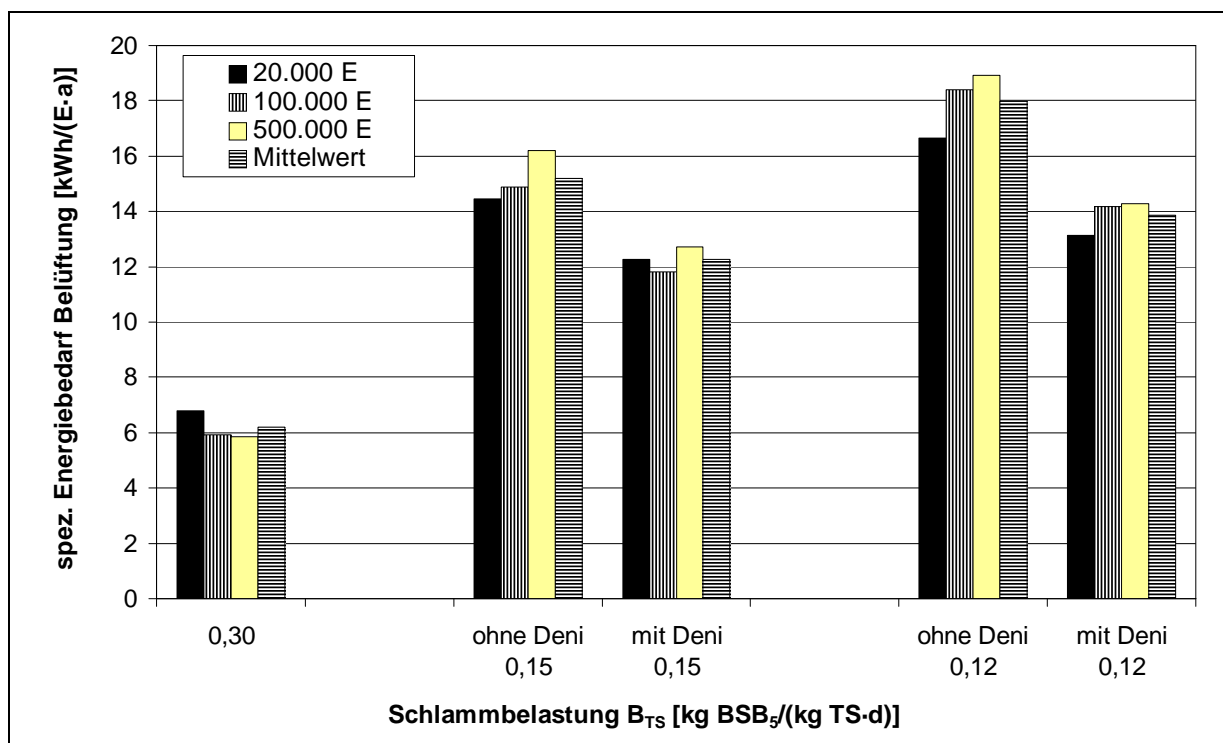


Abbildung 7: Spezifischer Energiebedarf der Belüftung für verschiedene Kläranlagenanschlußgrößen bei unterschiedlichen Zielen der Abwasserreinigung [DICHTL, KOPPETSCH 1989]

Durch die zunehmenden Anforderungen an eine weitgehende Phosphorelimination und damit die Einführung der Filtration auf Kläranlagen kommt zur Belebungsstufe noch ein maßgeblicher Verbraucher hinzu.

2.3 Veränderung des Energieverbrauchs durch technischen Fortschritt

Eine Veränderung des Energieverbrauchs durch den technischen Fortschritt ist im wesentlichen durch die Verbesserung der Wirkungsgrade und die Änderung der Energieverbrauchscharakteristik drehzahlverstellbarer Antriebe begründet. Die Ver-

besserung der Wirkungsgrade elektrischer Antriebe durch z.B. Senkung der mechanischen Verluste in der Arbeits- und Antriebsmaschine oder der elektrischen Verluste in den Wicklungen hat allerdings nur geringfügigen Einfluß auf den Energieverbrauch.

Weitaus wichtiger war die Entwicklung im Bereich drehzahlveränderlicher Antriebe. Während früher zur Drehzahlverstellung elektrischer Antriebe vielfach Gleichstrommotoren oder Asynchronmotoren mit Schleifringläufer bzw. Polumschaltung eingesetzt wurden, sind es heute fast ausschließlich Asynchronmotoren mit Kurzschlußläufer in Verbindung mit Frequenzumrichtern. Diese Entwicklung wurde im wesentlichen durch technisch optimierte Frequenzumrichter und die günstige Preisentwicklung in diesem Bereich verursacht.

Moderne Frequenzumrichter erreichen Wirkungsgrade von bis zu 98 % bei einem $\cos \varphi$ von nahezu 1. Der Anlauf am Frequenzumrichter verläuft mit dem etwa 1 bis 3-fachen Nennstrom des Antriebs im Vergleich zu Antrieben mit Direktanlauf bzw. Polumschaltung wesentlich netzfreundlicher. Nachteilig wirkt sich auf der Antriebsseite der bei niedrigen Frequenzen erforderliche Einsatz eines Fremdlüfters wegen fehlender Eigenkühlung bzw. die Anpassung der erforderlichen Normbaugröße aus. Bedingt durch die Oberwellen des Frequenzumrichters ist zudem eine geänderte Auslegung der Motorenwicklung erforderlich, da die Oberwellen in den Wicklungssträngen zusätzliche Verluste erzeugen, die zur Erwärmung führen.

Aus verfahrenstechnischer bzw. regelungstechnischer Sicht ist die mittels frequenzgetriebener Aggregate exakte Anpassung der Drehzahlen eines Antriebes auf den Anwendungsfall - z.B. die Optimierung der Betriebsstrategie von Pumpwerken - positiv zu bewerten. Durch diese Optimierung findet eine Verminderung des Energieverbrauchs statt, da Antriebe nicht mehr mit höheren Drehzahlen und Leistungen als notwendig betrieben und nicht mehr häufig ein- und ausgeschaltet werden müssen.

Das gesunkene Kostenniveau im Bereich der Frequenzumrichter hat dazu geführt, daß der Mehrpreis durch den Frequenzumrichter bei gleichen Voraussetzungen durch den teureren polumschaltbaren Antrieb fast vollständig kompensiert wird.

Ein weiterer Beitrag zur Reduzierung des Stromverbrauches auf Kläranlagen ergibt sich aus einer gestiegenen Effizienz der Belüftungssysteme. So haben moderne Flächenbelüftungssysteme einen wesentlich höheren Sauerstoffertrag von ca. 3 kg O₂/kWh im Vergleich zu den früher häufig eingesetzten Oberflächenbelüftern, die in der Regel nur Ertragswerte von 1,5 bis 2,0 kg O₂/kWh erreichten [KAPP 1997]. Da die biologische Stufe der wesentliche Verbraucher der Kläranlage ist (vgl. Kapitel 3.1.1), wirken sich diese technischen Entwicklungen im Bereich der Belüftungssysteme

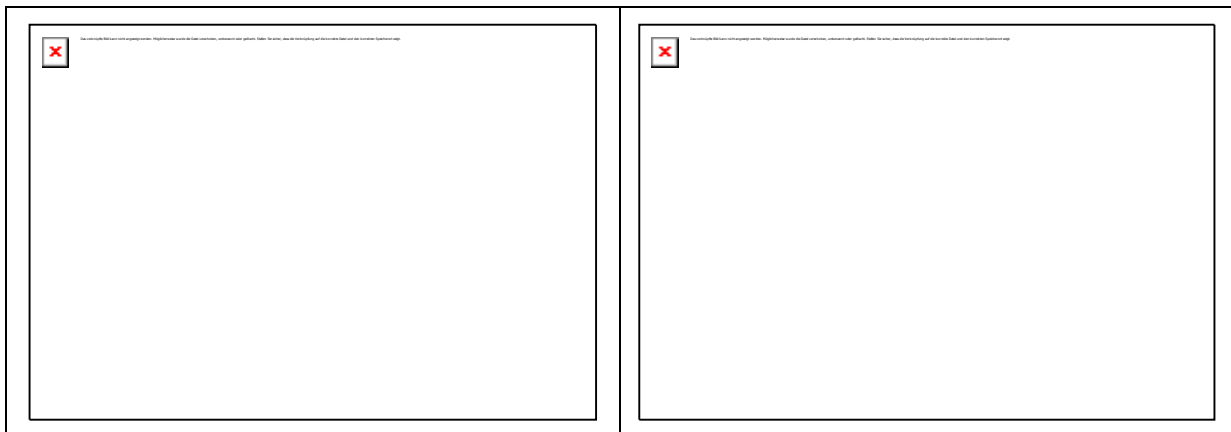
systeme maßgeblich auf den Gesamtstromverbrauch aus.

2.4 Veränderung der Energiebereitstellungskonzepte

Elektrische Energie aus dem öffentlichen Netz war seit jeher eine wesentliche Energiebezugsquelle für Kläranlagen. Auch die Faulgasnutzung wurde schon früh in das Energiebereitstellungskonzept von Kläranlagen einbezogen.

Bei den ersten, ungeheizten Faulbehältern war zunächst keine Nutzung des Faulgases vorgesehen. Bald erkannte man aber die Vorteile der Faulgasverwertung und stattete Faulbehälter mit Gasfangdeckeln aus.

Da auf vielen Kläranlagen das anfallende Faulgas den erforderlichen Eigenbedarf überschritt, wurde es nach einer Reinigung und Verdichtung in vielen Städten als Treibstoff für Fahrzeuge verwendet (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9). In der Literatur wurde eine Faulgastankstelle in Stuttgart bereits 1938 vorgestellt [RYSSEL 1938]. Der gesamte Fuhrpark der Stadt Stuttgart fuhr Mitte der fünfziger Jahre mit Faulgas aus der städtischen Kläranlage. 1953 waren in der Bundesrepublik insgesamt 19 Faulgastankstellen in Betrieb, womit die Treibmethanherzeugung an der Spitze der Verwertungsmöglichkeiten von Faulgas stand.



(Quelle: Wupperverband, Wuppertal)

Abbildung 8: Ansicht der Treibmethananlage auf dem Gelände des Klärwerkes Wuppertal-Buchenhofen



(Quelle: Niersverband, Viersen)

Abbildung 9: Details von mit Treibmethan des Klärwerkes Mönchengladbach-Neuwerk betriebenen Kraftfahrzeugen

Aber schon in den darauffolgenden Jahren nahm diese Art der Verwendung ab und wird seit 1967 in der Bundesrepublik gar nicht mehr angewandt. Benzin und Diesel verdrängten das weniger hochwertige Treibmethan, da mit ihnen ein höherer Fahrkomfort erreicht wurde und zudem die neueren Lkw-Motoren nicht mehr mit Treibmethan betrieben werden konnten. [ATV 1978]

In vielen Städten wurden hohe Verkaufserlöse für das Faulgas bei einem Verkauf an die Stadtwerke erzielt, so daß die Energieversorgung über das öffentliche Netz oder mit Heizöl günstiger als die Faulgasverwertung vor Ort war. Erst nachdem die Städte an Erdgasnetze angeschlossen wurden und bestehende Verträge mit Stadtwerken ausliefen, setzte sich die Faulgasverwertung auf der Kläranlage selbst durch.

Schon 1964 wurden 27 % des in der Bundesrepublik anfallenden Faulgases zur Krafterzeugung genutzt [KIESS 1966]. Damit stand diese Verwertungsart neben der Beheizung der Faulbehälter an der Spitze. In den Folgejahren erfolgte ein Rückschritt bei der Faulgasverwertung: nach den jährlichen Erhebungsstatistiken des Landesamtes für Datenverarbeitung und Statistik NW zum Aufkommen, zur Verwendung und Abgabe von Faulgas ist bei einem Vergleich zwischen 1968 und 1980 ein prozentualer Anstieg der Fackelverluste (von 26,5 % auf 34,7 % bezogen auf den Gesamt-Faulgasanfall) verbunden mit einem prozentualen Rückgang der Eigenerzeugung für Kraft und Wärme (von 68,1 % auf 63,5 %) zu verzeichnen [HOFFMANN 1982]. Dabei nahm insbesondere der Anteil des Eigenverbrauches für die Stromerzeugung überproportional ab (von 26,5 % auf 13,5 %). Durch eine erhöhte Wärme-Eigennutzung (von 41,6 % auf 50 %) wurde dieser Trend etwas gebremst. Für die niedrige Eigenstromerzeugungsrate waren insbesondere wirtschaftliche Gründe ausschlaggebend. Erst nach einem durch die Energiekrise ausgelösten Anstieg des

Energiepreinsniveaus Anfang der 80er Jahre setzte eine „Renaissance“ der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ein.

BHKW stellen heutzutage eine sichere und ausgereifte Form der Energieversorgung auf Kläranlagen dar. Die Wirkungsgrade wurden in den vergangenen Jahren stetig verbessert. Früher wurde thermisch nur die Abwärme des Kühlwasserkreislaufs genutzt, womit von der eingesetzten Primärenergie 30 % thermisch und 25 % elektrisch genutzt werden konnten. Bei heutigen KWK-Konzepten wird auch die Wärme aus dem Abgasstrang verwertet, die mit ca. 50 % zu den Verlusten beiträgt,. Dadurch werden Wirkungsgrade von $\eta_{\text{elektr.}} \approx 33 \%$ und $\eta_{\text{therm.}} \approx 55 \%$ bei η_{ges} von ca. 90 % erreicht.

Die Entwicklung von BHKW-Anlagen ist jedoch nicht abgeschlossen. Für die Zukunft sind noch niedrigere Abgasemissionen bei weiter steigenden Wellenleistungen und höheren Wirkungsgraden zu erwarten. Die „intelligenter“ konzipierten Steuer- und Regeleinheiten tragen in großem Maße dazu bei.

Alternative Energiebereitstellungskonzepte für kommunale Kläranlagen werden seit Ende der 80er Jahre diskutiert. Ein im Auftrag des BMFT durchgeführtes Pilotvorhaben auf der Insel Fehmarn kombiniert die Energieträger Faulgas, Sonne und Wind. Ein ähnliches Projekt befindet sich in Körkwitz, Mecklenburg-Vorpommern, bei dem die Energiebereitstellung neben dem öffentlichen Netz durch eine Windkraftanlage und eine Photovoltaik-Anlage gewährleistet wird. Eine detaillierte Zusammenstellung inzwischen auf Kläranlagen eingesetzter regenerativer Energieträger erfolgt in Kapitel 3.2.1.

2.5 Zusammenfassende Bewertung des Energiebedarfs/-verbrauchs und des vorhandenen Energiedargebotes in Abhängigkeit vom Reinigungsgrad der Abwasserbehandlung

Die zunehmenden Reinigungsanforderungen steigern nicht nur der Bedarf an elektrischer Energie (vgl. Abbildung 7), sondern führen auch im Bereich der Schlammbehandlung zu einer ungünstigeren Energiebilanz.

Zur Sicherstellung der geforderten Reinigungsleistungen (ausreichendes Schlammalter zur Anreicherung der nitrifizierenden Biozönose) wird eine niedrige Schlammbelastung $B_{TS} < 0,10 \text{ kg BSB}_5/(\text{kg TR}\cdot\text{d})$ eingestellt. Häufig wird die Aufenthaltszeit in der Vorklärung reduziert, um in der Denitrifikationszone eine ausreichende Menge an notwendigem BSB_5 zu verfügbar zu halten. Beide Effekte bewirken eine Verminderung an organischem Material im Rohschlamm und damit an Potential zur Faulgas-

erzeugung durch einen geringeren Primärschlammanfall sowie einen höheren Mineralisierungsgrad des Überschussschlammes.

In Abhängigkeit von verschiedenen Abwasserreinigungssystemen wurde von KAPP der mittlere theoretische Gasanfall ermittelt [KAPP 1997]. Bei einem Heizwert des Faulgases von $6,5 \text{ kWh/m}^3$ bzw. 23.400 kJ/m^3 und einem elektrischen Wirkungsgrad von 33 % ergibt sich die in Tabelle 1 dargestellte erzeugbare elektrische Energie.

Reinigungs- verfahren	t_{TS} [d]	Faulgasanfall [l/(E·d)]	Energiedargebot [kWh/(E·a)]	
			theoretisch	elektrisch nutzbar
Vorklärung, C-Abbau	8	20,7	49,1	15,7
Vorklärung, C- und N-Abbau	15	18,2	43,2	13,8
Grobentschl., C- und N-Abbau	15	13,2	31,3	10,0
C- und N-Abbau ohne VK	15	7,8	18,5	5,9
Stabilisierungsanlage	25	4,4	10,4	3,3

Tabelle 1: Faulgasanfall und spezifisches elektrisches Energiedargebot bei verschiedenen Abwasserreinigungsverfahren (nach KAPP)

Von RIEGLER UND BAU wurden mit Hilfe eines Simulationsprogramms für eine Kläranlage mit 50.000 E ähnliche Untersuchungen angestellt. Dabei wurde für das Energiedargebot von folgenden Werten ausgegangen:

- Gasanfall aus PS ($\sigma_{TS} = 70 \%$, Abbaugrad 60 %): $900 \text{ l/kg GV}_{\text{abgebaut}}$
- Gasanfall aus ÜS ($\sigma_{TS} = 70 - 80 \%$, Abbaugrad 30 - 45 %): $700 \text{ l/kg GV}_{\text{abgebaut}}$

Den Einfluß unterschiedlicher Reinigungsziele auf den Energieverbrauch der Belüftungsanlage und auf das Energiedargebot zeigt der in Abbildung 10 dargestellte Verlauf:

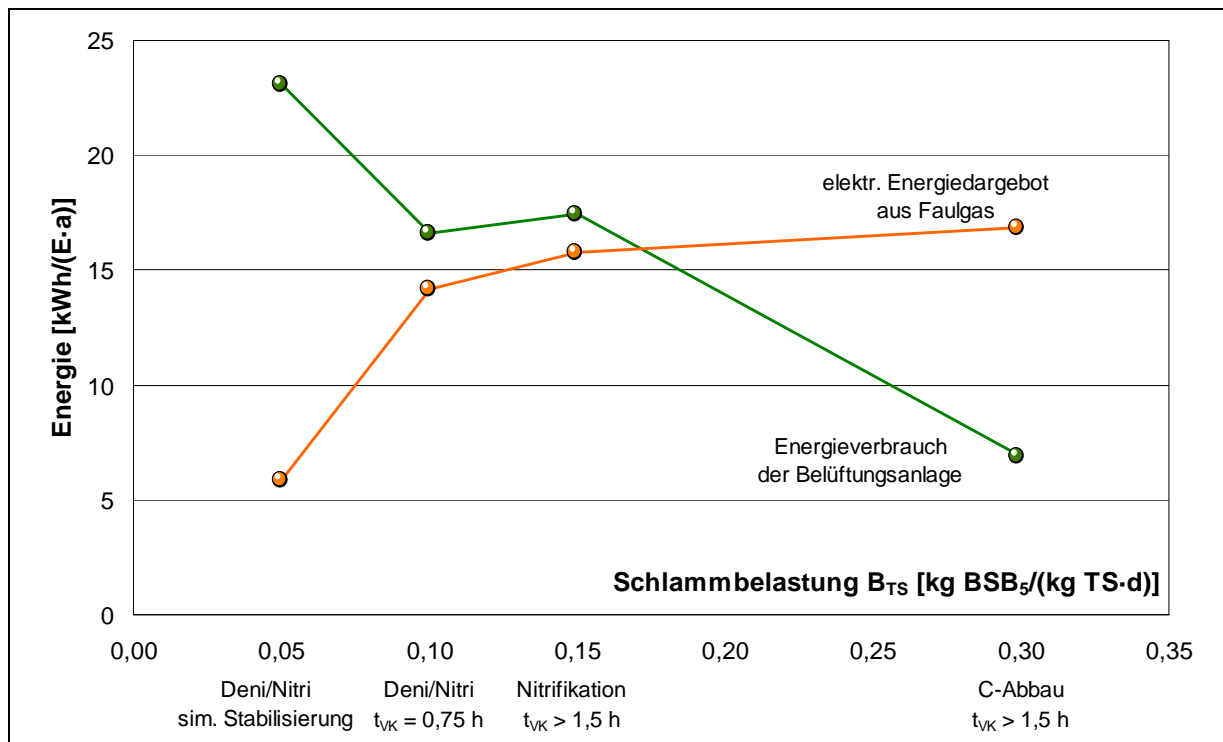


Abbildung 10: Energieverbrauch und -dargebot in Abhängigkeit von unterschiedlichen Zielen der Abwasserreinigung [RIEGLER, BAU 1989]

Im Rahmen der Initiative „Ökologische und nachhaltige Wasserwirtschaft“ hat das Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes NRW ein Handbuch zur Energieeinsparung in Kläranlagen in Auftrag gegeben [MÜLLER ET AL 1999]. Dieses Handbuch beschreibt Maßnahmen sowie mögliche Vorgehensweisen zur Energieeinsparungen in Kläranlagen und leitet Kennwerte für den Stromverbrauch und das Faulgasnutzungspotential bei optimierter Betriebsführung ab. In Tabelle 2 sind die im Handbuch entwickelten Beurteilungskriterien zur Einschätzung der Energiesituation von Kläranlagen nach derzeitigem Stand der Technik dargestellt.

Tabelle 2: Energetische Beurteilungskriterien für die Energiesituation gemäß Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [MÜLLER ET AL. 1999]

	Kläranlagengröße (aktuelle EW _{BSB5})									
	2.000-5.000		5.000-10.000		10.000-30.000		30.000-100.000		über 100.000	
	Richtwert	Idealwert	Richtwert	Idealwert	Richtwert	Idealwert	Richtwert	Idealwert	Richtwert	Idealwert
e_{ges} : gesamter Elektrizitätsverbrauch pro aktuelle EW _{BSB5} * / **										
C (t _{TS} > 5 Tage) mit Faulung kWh/(EW-a)			30	23	(27)	(21)	(24)	(18)		
C+N (t _{TS} 13 Tage) mit Faulung kWh/(EW-a)			39	30	34	26	30	23	26	20
C+N (t _{TS} > 25 Tage) mit simultaner aerober Stabilisierung kWh/(EW-a)	54	41	46	35	40	31				
e_{BB} : Elektrizitätsverbrauch Belebung pro aktuelle EW _{BSB5} ***										
C (t _{TS} > 5 Tage) mit Faulung kWh/(EW-a)			20	15	(18)	(14)	(17)	(13)		
C+N (t _{TS} 13 Tage) mit Faulung kWh/(EW-a)			29	22	25	19	23	18	21	16
C+N (t _{TS} > 25 Tage) mit simultaner aerober Stabilisierung kWh/(EW-a)	41	32	36	28	31	24				
N₁ : Grad der gesamten Faulgasnutzung %			95%	97%	97%	98%	98%	99%	98%	99%
N₂ : Grad der Faulgasumwandlung in Kraft/Elektrizität %			25%	26%	29%	30%	30%	31%	31%	32%
N₃ : spez. Faulgasproduktion pro oTR										
C l/kg oTR			500	525	(500)	(525)	(500)	(525)		
C+N l/kg oTR			450	475	450	475	450	475	450	475
V_e : Eigenversorgungsgrad - Elektrizität * / **										
C %			48%	65%	(62%)	(84%)	(72%)	(95%)		
C+N %			37%	50%	50%	67%	58%	78%	68%	90%
V_w : Eigenversorgungsgrad - Wärme %			90%	95%	95%	97%	97%	98%	98%	99%

* : Zuschlag für Hebewerke: pro Höhenmeter (bezogen auf gesamte Abwassermenge) +0,5 kWh/(E-a) bei e_{ges} sowie entsprechender Abschlag bei V_e

** : Zuschlag für Filtration bei e_{ges} (entsprechender Abschlag bei V_e): Richtwert +3 kWh/(E-a), Idealwert +2 kWh/(E-a); (Anlagen kleiner 30.000 EW zusätzlich +1 kWh/(E-a))

*** : Belebung: Belüftung/Gebläse inkl. Umwälzung, Rezirkulation, Rücklaufschlamm

Legende:
Richtwert: Aus bestehenden Feinanalysen und der Bestandsaufnahme an Kläranlagen über 10.000 EW in NRW abgeleiteter Wert, der realistisch erreicht werden kann.
Idealwert: Aufgrund theoretischer Berechnungen anhand einer Modellanlage ermittelter Wert, der unter optimalen Voraussetzungen erreicht werden kann.
Falls die Richt- und Idealwerte nicht erreicht werden, sollten die Ursachen plausibel benannt werden.
EW: aktuelle Einwohnerwerte BSB₅, berechnet aus aktuellem Jahresmittel BSB₅ im Zulauf zur Kläranlage (60 g/(E-d)).
Obige Werte beziehen sich auf die Modellanlage mit einem Vorklärbecken und einem dem kommunalen Abwasser entsprechenden C/N-Verhältnis.
Werte in Klammern für C, da diese Anlagen nach den geltenden rechtlichen Vorgaben nur noch für eine Übergangszeit betrieben werden dürfen.

Sämtliche dargestellten Untersuchungen zeigen den gegenläufigen Trend des Energieverbrauchs und des Energiedargebotes auf kommunalen Kläranlagen bei höheren Reinigungszielen. Vor dem Hintergrund, daß derzeit zudem weitergehende Abwasserreinigungsverfahren zur Entkeimung, wie z.B. die energieintensive Membranfiltration bzw. die UV-Behandlung, diskutiert oder auch zusätzliche Anstrengungen in der Regenwasserbehandlung verbunden mit einem erhöhten Mischwasseranfall unternommen werden, gewinnt die Forderung nach einem ressourcenschonenden Energieeinsatz auf Kläranlagen zunehmend an Gewicht.

Zur Erreichung dieses Zieles kommt neben der Minimierung des Energieverbrauchs auch der nachhaltigen Energiebereitstellung auf Kläranlagen hohe Bedeutung zu. Dies wird nicht zuletzt durch die Aufgabenstellung des vorliegenden Forschungsvorhabens bestätigt.

3 Aufstellung des Ist-Zustandes

3.1 Charakteristik des Energieverbrauchs auf kommunalen Kläranlagen

Für ein effizientes Energiebereitstellungskonzept einer kommunalen Abwasserreinigungsanlage ist die Beschreibung des Energieverbrauchs von entscheidender Bedeutung, um eine optimale Verbrauchsdeckung herleiten zu können.

Die erforderliche Energie wird für die verschiedenen Prozesse der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und Infrastruktur in Form von Kraft, Licht und Wärme benötigt. Elektrische Energie muß überwiegend für den Antrieb der Maschinen (Belüftungs-, Förder-, Umwälzaggregate, Pumpen, Räumler, etc.) zur Verfügung gestellt werden. Thermische Energie wird für die anaerobe Schlammbehandlung und die Beheizung der Gebäude benötigt.

Im folgenden werden die charakteristischen Kenndaten zur Darstellung des elektrischen und thermischen Energieverbrauchs - unterschieden nach statischen und temporär abhängigen Gesichtspunkten - dargestellt.

3.1.1 Elektrischer Energieverbrauch

Kommunale Kläranlagen zeigen einen von der Ausbau- und Anschlußgröße abhängigen spezifischen Verbrauch an elektrischer Energie.

Der aktuelle Stand der Energiesituation auf nordrhein-westfälischen Kläranlagen wurde durch eine Umfrage des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen erfaßt [N.N. 1998]. Eine Auswertung dieser Umfrage bezüglich des spezifischen Energieverbrauches in Abhängigkeit von der auf den BSB₅ bezogenen Anschlußgröße zeigt Abbildung 11. Aus der Grafik wird ersichtlich, daß kleinere Anlagen, die häufig mit einer aeroben Schlammstabilisierung ausgestattet sind, einen höheren spezifischen Stromverbrauch aufweisen. Die großen Schwankungsbereiche bei gleicher Kläranlagengröße erklären sich einerseits durch unterschiedliche Verfahrenstechniken, Reinigungsanforderungen, Betriebsweisen sowie Auslastungsgrade der einzelnen Kläranlagen. Andererseits sind sie ein Indikator für die Energieeinsparpotentiale, die bei optimierter Anlagenführung erschlossen werden können.

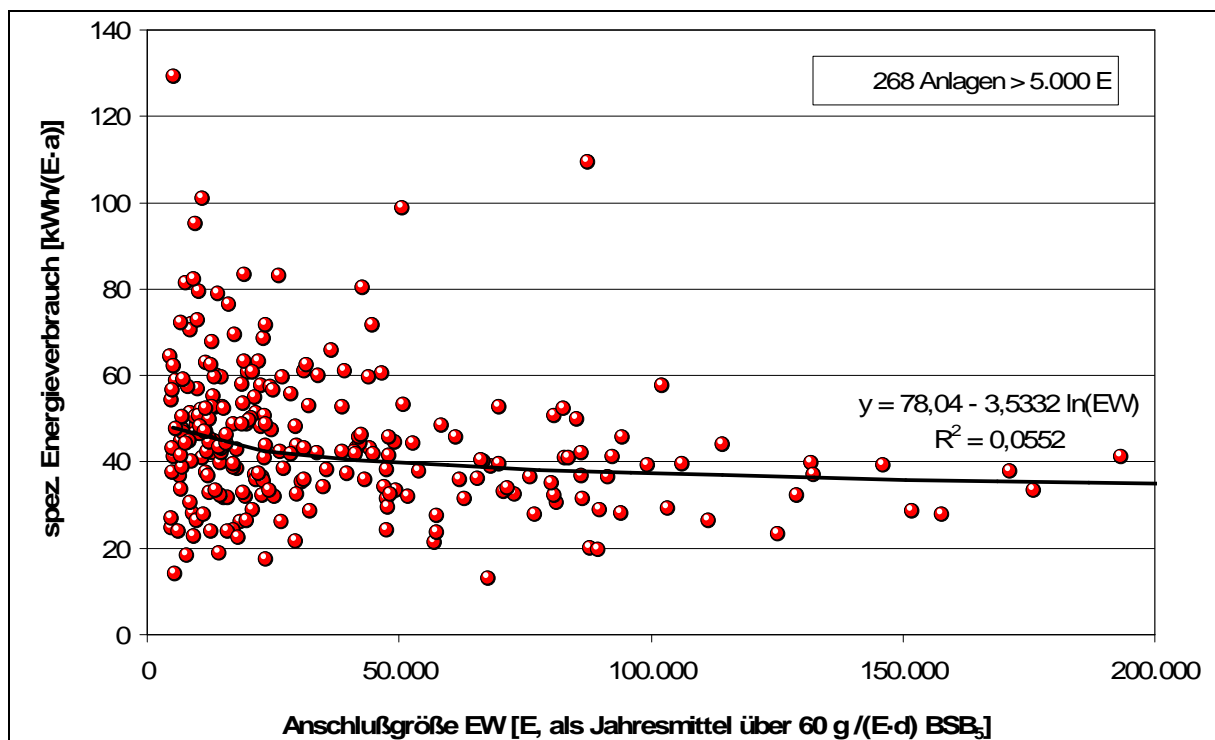


Abbildung 11: Spezifischer elektrischer Energieverbrauch von Kläranlagen gemäß der Umfrage in Nordrhein-Westfalen [N.N. 1998]

Der gesamte elektrische Energieverbrauch läßt sich überschlägig den verfahrenstechnisch gegliederten Anlagenbereichen zuordnen. Er verteilt sich zu ca. 60 - 70 % auf die biologische Abwasserreinigung, zu ca. 25 % auf die Schlammbehandlung und zu ca. 5 - 10 % auf Zulauf- bzw. Zwischenpumpwerke.

Eine detaillierte Verteilung der Stromverbrauchsanteile auf Belebungsanlagen der Größenklasse 4 und 5 wird in Abbildung 12 dargestellt. Im Einzelfall können die einzelnen Stromverbraucher auch einen von den dargestellten Mittelwerten abweichenden Verbrauch aufweisen.

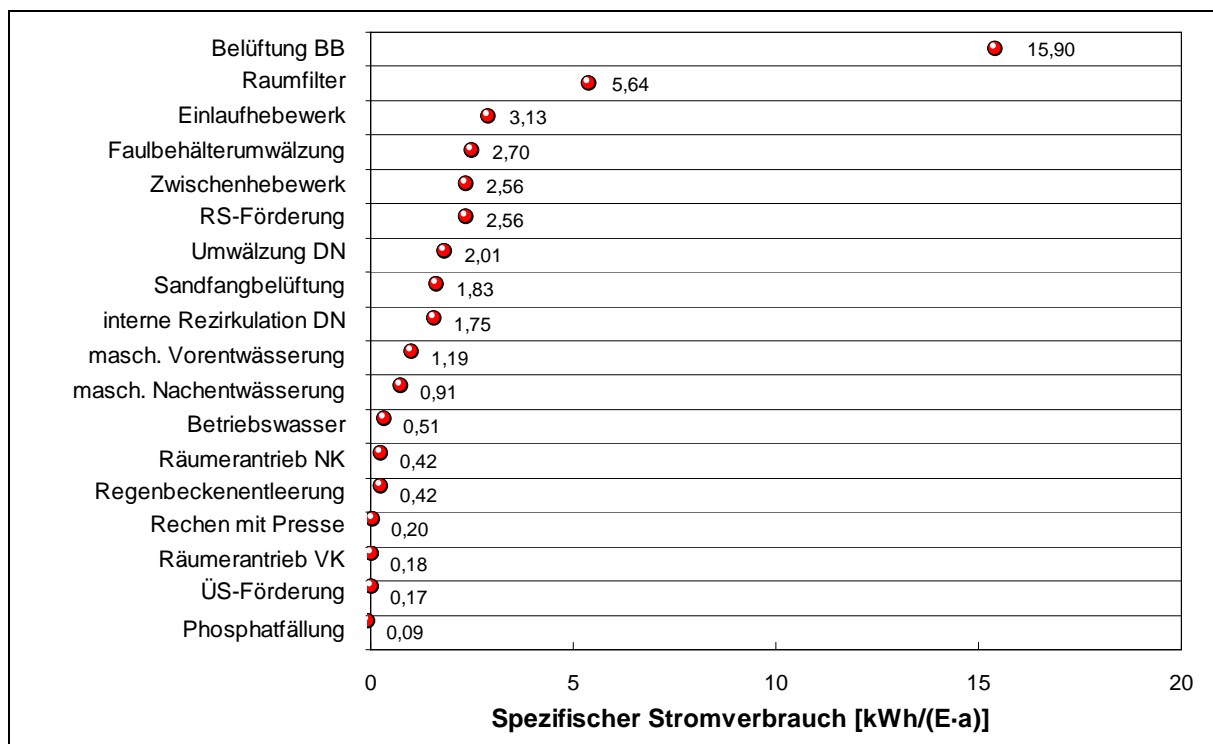


Abbildung 12: Mittlere Verbrauchswerte einzelner Stromverbraucher auf Belebungsanlagen [ROTH 1998]

Abbildung 12 bestätigt, daß die Belüftung der Belebungsbecken der dominierende Stromverbraucher der Kläranlage ist. Ohne Berücksichtigung von Einlauf- und Zwischenhebewerken, die in Abhängigkeit von der Topographie einen erheblichen Anteil am Gesamtstromverbrauch ausmachen können, beläuft sich der durchschnittliche Anteil der Belüftung auf ca. 60 % des elektrischen Gesamtenergieverbrauchs.

Der elektrische Energieverbrauch einer Kläranlage unterliegt erheblich dem Einfluß der temporär abhängigen Zulaufverhältnisse einer Kläranlage. In der Regel zeigt er eine tageszeitliche Abhängigkeit von der Zulaufmenge und -schmutzfracht mit einer durch Fließwege und Verfahrensabläufe bedingten zeitlichen Verzögerung (Totzeit). Bei Trockenwetter läßt sich für kommunale Kläranlagen ein charakteristisches Zulaufverhalten und eine elektrische Lastganglinie in Abhängigkeit von der Tageszeit gemäß Abbildung 13 darstellen.

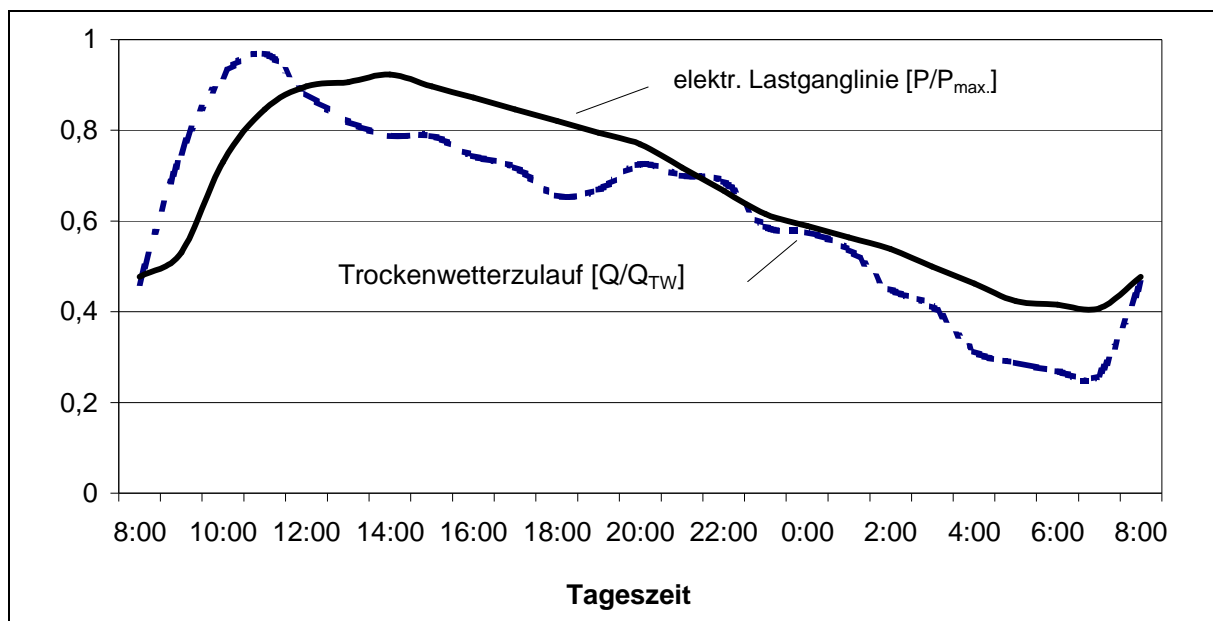


Abbildung 13: Exemplarische Darstellung des Trockenwetterzulaufs sowie der geglätteten elektrischen Lastganglinie einer Kläranlage

Die Erfassung, Archivierung und Auswertung der Daten, die für das Erstellen charakteristischer Tagesganglinien des Trockenwetterzulaufs und entsprechender elektrischer Lastkennlinien erforderlich sind, sollten im Einzelfall über eine fachgerecht ausgeführte Prozeßleittechnik unproblematisch darzustellen sein.

Anders als der Wasserweg wird der elektrische Energieverbrauch der Schlammbehandlung nur bedingt durch das tageszeitliche Zulaufverhalten beeinflusst. Bei geeigneter technischer Ausrüstung im Bereich Maschinen- und Verfahrenstechnik sowie Automatisierung und Prozeßleittechnik kann der Betrieb energieintensiver Prozesse der Schlammbehandlung und -entwässerung in Schwachlastzeiten verlegt und damit eine Vergleichmäßigung des elektrischen Energieverbrauchs und besonders der bezogenen Leistung erreicht werden.

3.1.2 Thermischer Energieverbrauch

Der Verbrauch an thermischer Energie wird mit bis zu 90 % fast ausschließlich von der Schlammbehandlung bestimmt. Die Beheizung der Gebäude spielt mit etwa 10 % eine untergeordnete Rolle. Der Gesamtwärmeverbrauch ist außertemperaturabhängig und daher im wesentlichen von jahreszeitlichen und teilweise auch tageszeitlichen Schwankungen bestimmt. Die mittlere einwohnerspezifische Wärmeleistung für Faulung und Betriebsgebäude beträgt nach DICHTL ET AL. (1997):

- im Winter $3,1 W_{\text{therm}}/E$
- im Sommer $1,88 W_{\text{therm}}/E$

Der Wärmeverbrauch für die Schlammbehandlung setzt sich zum einen aus der erforderlichen Wärmeenergie zusammen, um das für den Prozeß der anaeroben Schlammstabilisierung notwendigen Temperaturniveau des Rohschlammes zu gewährleisten. Die hierzu notwendige Wärmeenergie ist proportional zur Temperaturdifferenz Faulbehältertemperatur-Rohschlammtemperatur und damit jahreszeitlichen, nicht beeinflussbaren Schwankungen gemäß Abbildung 14 unterworfen. Zum anderen wird Wärmeenergie für die Verluste im Bereich der anaeroben Schlammstabilisierung benötigt, die ebenso jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen und wesentlich durch den Einsatz einer geeigneter Wärmeisolierung reduziert werden können.

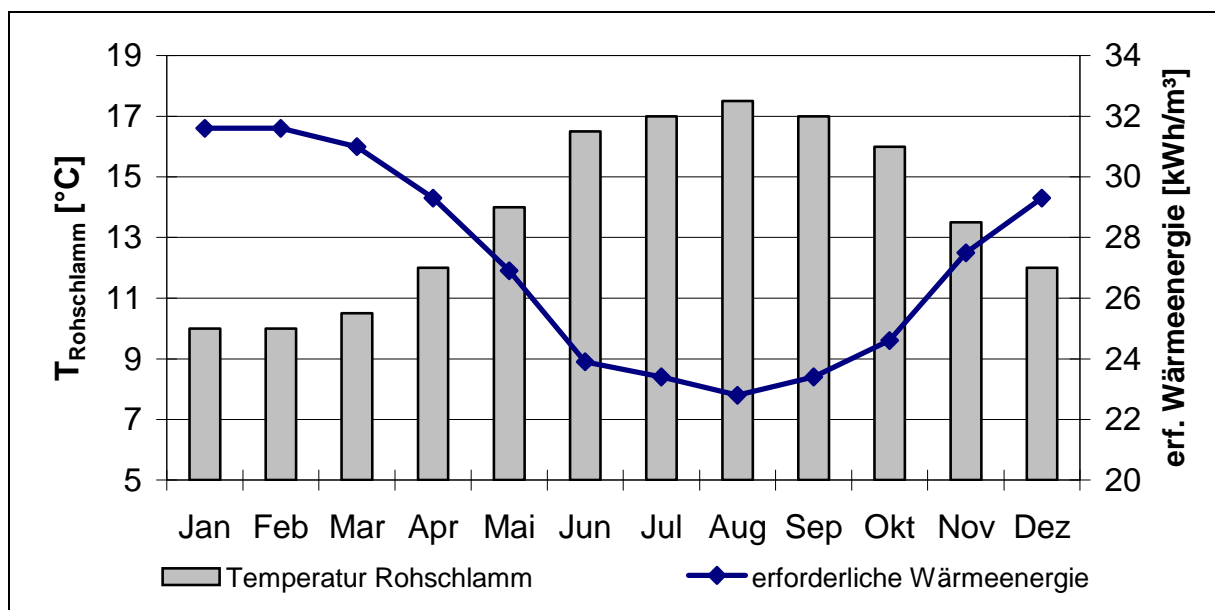


Abbildung 14: Jahresganglinie der Rohschlammtemperatur sowie der zur Aufheizung des Rohschlammes zuzuführenden Wärmeenergie [DICHTL ET AL. 1997]

Der jahreszeitlich abhängige, monatliche Wärmebedarf zur Deckung der Transmissionsverluste je Faulbehältervolumen nach [DICHTL ET AL. 1997] sowie der monatliche Wärmebedarf für die Gebäudeheizung auf Kläranlagen je umbautem Raum sind in der folgenden Abbildung 15 bzw. Abbildung 16 grafisch dargestellt.

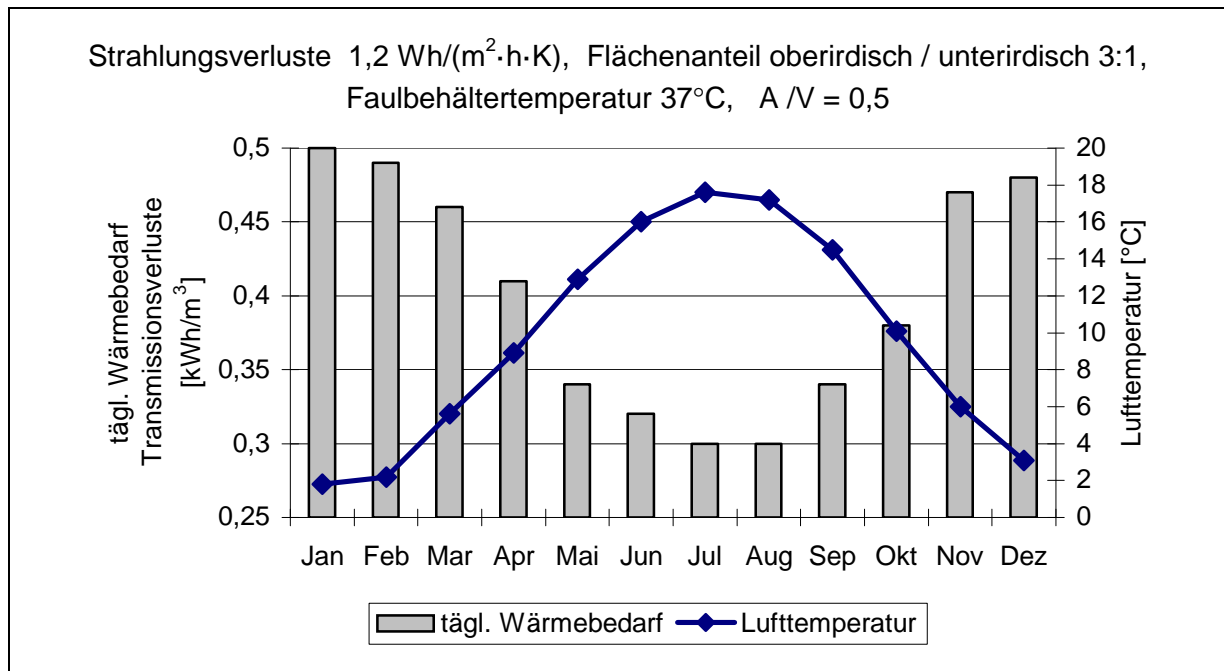


Abbildung 15: Monatlicher Wärmebedarf zur Deckung der Transmissionsverluste bezogen auf das Faulbehältervolumen [DICHTL ET AL. 1997]

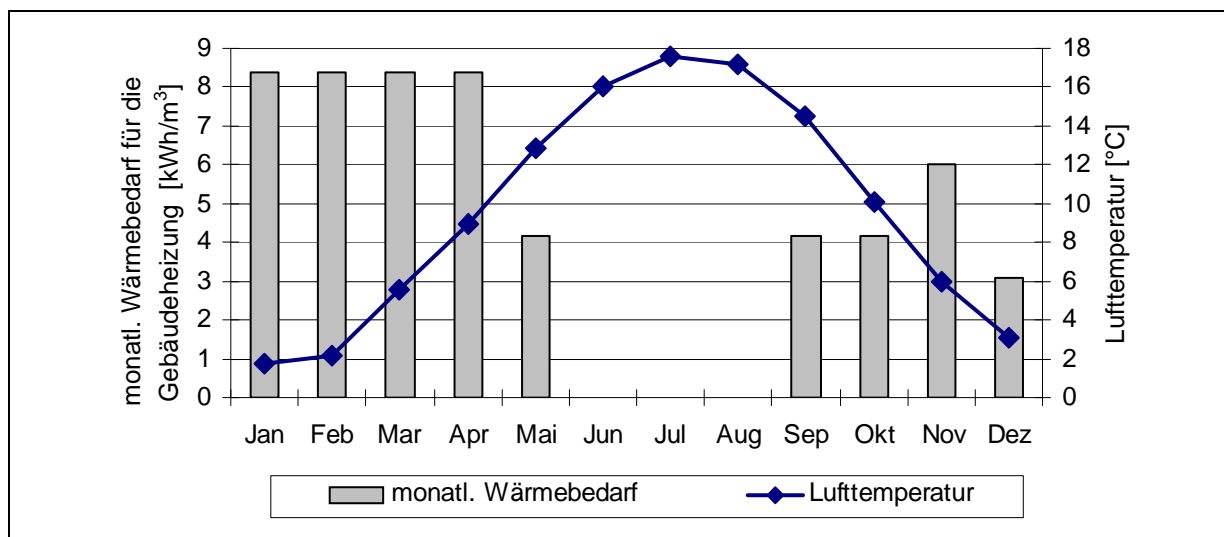


Abbildung 16: Monatlicher Wärmebedarf für die Gebäudeheizung auf Kläranlagen bezogen auf den umbauten Raum [DICHTL ET AL. 1997]

3.2 Ist-Zustand der Energiebereitstellung

Konventionell wird derzeit die auf Kläranlagen erforderliche Energie überwiegend

- als elektrische Energie durch die EVU und – soweit BHKW vorhanden – durch Wandlung der verfügbaren Brennstoffe Faul- oder Erdgas etc. sowie
- als thermische Energie mittels Heizungsanlagen und –soweit BHKW vorhanden - durch Wandlung der verfügbaren Brennstoffe Faul- und Erdgas bzw. Heizöl etc.

bereitgestellt. Als Alternativen werden im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens insbesondere die regenerativen Formen der Energiebereitstellung für Kläranlagen untersucht. Bei der Einbindung regenerativer Energien in das Energiebereitstellungskonzept einer Kläranlage handelt es sich bislang nur um Einzelanwendungen. Eine systematische Erfassung dieser Einzelanwendungen und der bisher gesammelten Betriebserfahrungen stellt den ersten Arbeitsschritt der durchgeführten Untersuchungen dar.

3.2.1 Umfrage zum Einsatz regenerativer Energieträger auf Kläranlagen

Die derzeit genutzter regenerativer Energieträger sowie alternativer Energiebereitstellungsmöglichkeiten auf Kläranlagen wurden im Rahmen des vorliegenden Vorhabens mittels einer bundesweiten Umfrage durch die Verfasser erfaßt. Die konventionellen Möglichkeiten der Energiebereitstellung (Energieversorgungsunternehmen, Eigenerzeugung durch Faul- und Erdgas-Blockheizkraftwerke, Heizungsanlagen, etc.) finden im Rahmen dieser Umfrage keine Berücksichtigung, da diese Formen der Energiebereitstellung hinreichend bekannt sind.

Die Befragung verfolgte die folgenden Ziele:

- Erfassen von Informationen über den Einsatz regenerativer Energieträger auf kommunalen Kläranlagen,
- Erfassen des Umfangs bislang in Kombination eingesetzter regenerativer Energieträger auf kommunalen Kläranlagen,
- Erfassen des Umfangs bislang erreichter Energieautarkie auf kommunalen Kläranlagen,
- regional, geographisch etc. unabhängige Erfassung und Ableitung der bundesweiten Ausdehnung.

Bis zur Fertigstellung der Datenerhebung wurde zudem eine angemessene zeitliche Begrenzung auf max. ca. 2 Monate angestrebt. Um eine hohe Erfassungsdichte zu

erlangen, wurden Adressaten ausgewählt, die den Betreibern der Abwasserreinigung übergeordnet angesiedelt sind.

Vor dem Hintergrund der vorstehend aufgeführten Zielsetzungen wurde ein angemessener Umfang anzufragender Behörden, Institutionen und Körperschaften etc. innerhalb Deutschlands festgelegt:

- 32 Staatliche Umweltämter, Landesämter für Umwelt etc.,
- 10 Abwasserverbände, Abwasserzweckverbände etc.,
- 30 Wasserwirtschaftsämter,
- 17 Landratsämter, Bezirksregierungen etc.,
- 16 Staatliche Ämter für Wasser und Abfall etc.,
- 7 Institutionen aus den Bereichen Wasser, Abwasser und regenerative Energien.

Die vorgenannten Ziele können im Zuge einer zeitlich begrenzten Umfrage nur erreicht werden, wenn die Befragung einerseits die angestrebte hohe Informationsdichte und andererseits eine hohe Rücklaufquote als Ergebnis gewährleistet. Diese Anforderungen sind häufig gegensätzlicher Natur, da die Adressaten aus verschiedensten Gründen in der geforderten Zeit nur einen beschränkten Umfang an Informationen verfügbar machen können. Es wurde daher ein vorgefertigtes Rückantwortschreiben entwickelt, welches mit vergleichsweise geringem Aufwand einen grundsätzlichen Überblick gesuchter Einsatzfälle gewähren sollte. Der Fragebogen einschließlich Anschreiben ist in der Anlage beigefügt.

Von den 112 versandten Anschreiben mit Fragebögen an oben genannte Institutionen konnten insgesamt 43 Rückläufer verzeichnet und ausgewertet werden. Es wurden darin insgesamt 62 Einrichtungen benannt. Abzüglich der übermittelten Anlagen, die aus unterschiedlichen Gesichtspunkten nicht dem Ziel der Umfrage entsprachen, verblieben 52 Kläranlagen, die regenerative Energieerzeugung nutzen. Die auf Basis dieser Umfrage ermittelten Kläranlagen wurden aufgenommen und entsprechend des eingesetzten regenerativen Energieträgers klassifiziert.

Eine Übersicht über die identifizierten alternativen Bereitstellungsformen zeigt Abbildung 17. Mit „Hybridanlagen“ werden Kläranlagen bezeichnet, bei denen mehrere alternative Formen der elektrischen Eigenenergieerzeugung genutzt werden. Unter „Sonstige“ sind jene Kläranlagen zusammengefasst, die über weitere Besonderheiten bei der Eigenenergieerzeugung verfügen. Sämtliche Kläranlagen sind zudem tabellarisch im Anhang an diesen Bericht zusammengestellt.

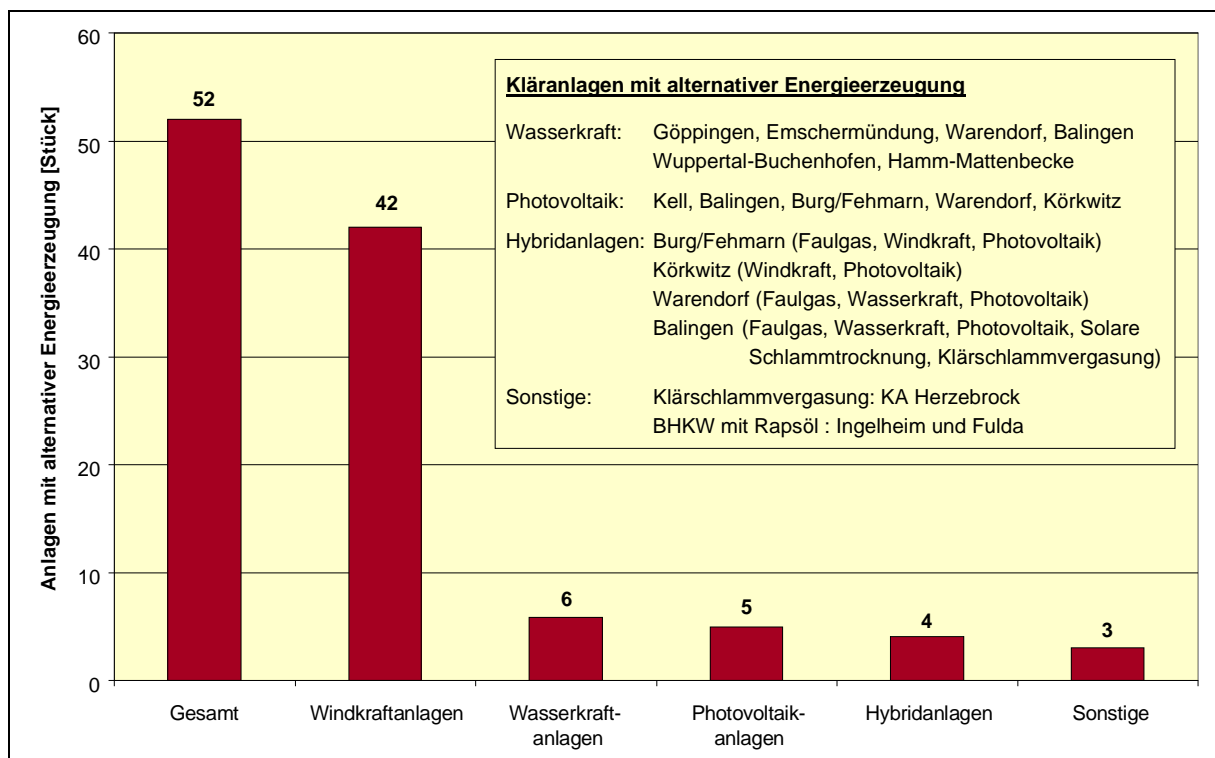


Abbildung 17: Auswertung der durchgeführten Umfrage zu alternativen Energiebereitstellungsformen auf Kläranlagen in Deutschland

Die Standorte der ermittelten Kläranlagen sind in der folgenden Abbildung 18 dargestellt.



Abbildung 18: Standorte regenerativer Energiesysteme auf Kläranlagen gemäß Umfrage

Die Analyse der Umfrage ergab zunächst folgende grundsätzliche Feststellungen:

- Es werden bereits regenerative Energieträger auf kommunalen Kläranlagen genutzt.
- Das Ziel einer großen Erfassungsdichte wurde erreicht.
- Der Einsatz regenerativer Energieträger ist nicht auf eine bestimmte Region Deutschlands beschränkt. Die Dichte von Windkraftanlagen ist im Norden feststellbar größer als im Süden Deutschlands. Auf die Ursache wird im folgenden näher eingegangen.
- Der augenscheinlich geringe Anteil der in der Umfrage festgestellten regenerativen Energiebereitstellungsformen ist angesichts der insgesamt an der Erzeugung elektrischer Energie in Deutschland beteiligten regenerativen Energieträger nicht überraschend, liegt doch der Anteil der regenerativen Energie an der gesamten öffentlichen Stromerzeugung bei nur rund 5 %. Zur installierten Netto-Kraftwerksleistung tragen die Windkraft weniger als 0,1 % und die Wasserkraft weniger als 9 % bei; Photovoltaik ist unbedeutend. Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 19 und Abbildung 20 verdeutlicht.

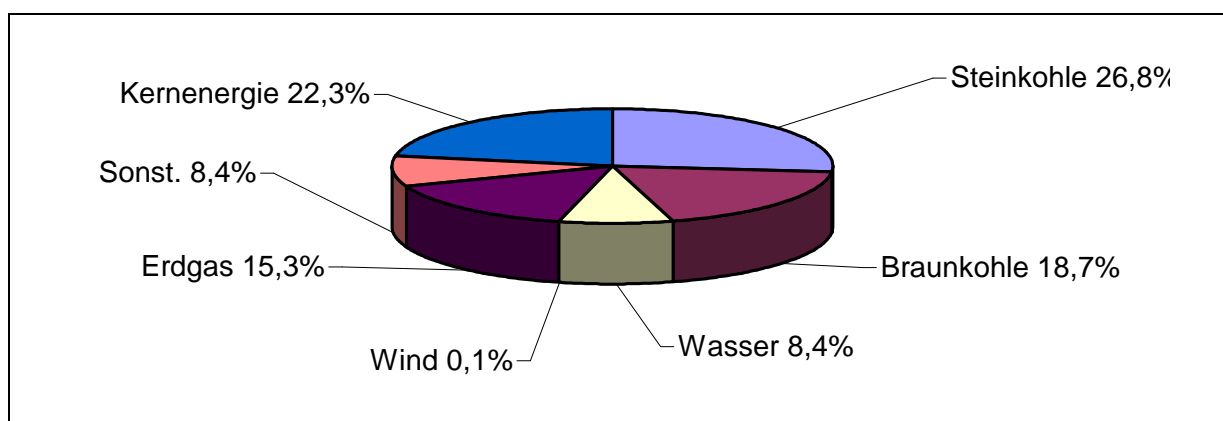


Abbildung 19: Installierte Netto-Kraftwerksleistung der Stromversorger in Deutschland 1998 [VDEW 1999]

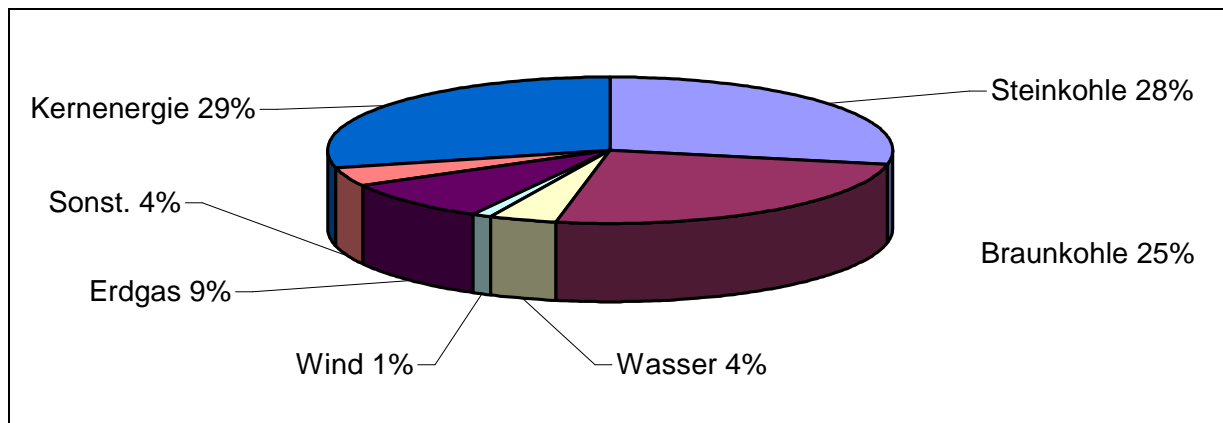


Abbildung 20: Anteil der Energieträger an der gesamten Netto-Stromerzeugung in Deutschland 1998 [VDEW 1999]

Die Erfassung des Umfangs bislang in Kombination eingesetzter regenerativer Energieträger auf kommunalen Kläranlagen, deren Bereitstellungsformen sowie ggf. gegebene Abhängigkeiten werden im folgenden Abschnitt analysiert und anhand ausgewählter Beispiele der Umfrage vorgestellt.

3.2.2 Verfügbare Energieträger und deren Bereitstellung

Im folgenden werden die derzeit auf Kläranlagen eingesetzten Energieträger mit deren möglichen Wandlungsprozessen und nutzbaren Energieformen ohne Gewichtung nach Häufigkeit zusammengefaßt.

Energieträger	Wandlung	Nutzung
Strom (EVU)	entfällt	elektrisch
Erdgas (EVU)	Verbrennungsmotor / BHKW Heizungsanlagen	elektrisch / thermisch thermisch
Faulgas	Verbrennungsmotor / BHKW Heizungsanlagen	elektrisch / thermisch thermisch
Propangas	Verbrennungsmotor / BHKW Heizungsanlagen	elektrisch / thermisch thermisch
Diesel / Heizöl	Verbrennungsmotor / BHKW Heizungsanlagen	elektrisch / thermisch thermisch
Rapsöl / Biodiesel	Verbrennungsmotor / BHKW Heizungsanlagen	elektrisch / thermisch thermisch
Klärschlamm	Verbrennung / Vergasung mit Verbrennungsmotor	elektrisch / thermisch
Wasserkraft	Turbine, Wasserrad	elektrisch
Windenergie	Windkraftanlage	elektrisch
Solarenergie	Photovoltaik Solarthermie	elektrisch thermisch
Abwasserwärme	Wärmepumpe	thermisch
Erdwärme	Wärmepumpe	thermisch

Tabelle 3: Grundsätzlich auf Kläranlagen verfügbare Energieformen, deren Wandlungsprozesse sowie Nutzungsformen

Für den Einsatz der verschiedenen Energieträger auf Kläranlagen läßt sich folgender Status quo vermerken:

Elektrischer Strom (Energieversorgungsunternehmen)

Die elektrische Energieversorgung durch Strombezug aus den öffentlichen Netzen der Energieversorger ist heute die wesentliche Säule der Energiebereitstellung und auf vielen Kläranlagen die einzige Form der elektrischen Energieverbrauchsdeckung.

Faulgas

Das bei der anaeroben Schlammstabilisierung anfallende Faulgas stellt die am häufigsten genutzte Primärenergiequelle zur elektrischen und/oder thermischen Eigenenergieerzeugung auf Kläranlagen dar.

Abbildung 21 stellt den derzeit in Nordrhein-Westfalen erreichten elektrischen Eigenenergieversorgungsgrad von Kläranlagen durch Faulgasnutzung dar. Die Daten stammen aus Ergebnissen einer Umfrage des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen [N.N. 1998]. Insgesamt wurden Daten von 268 Kläranlagen mit einer Anschlußgröße > 5.000 E ausgewertet, von denen 81 als aerobe Stabilisierungsanlagen oder mit externer Schlammbehandlung konzipiert sind. Von den verbleibenden 187 Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung auf dem Klärwerksgelände wird erst auf 74 Kläranlagen Faulgas zur Erzeugung elektrischer Energie in BHKW oder durch direkte Kraftkopplung von Gasmaschinen mit klärwerksspezifischen Antrieben – überwiegend Gebläse - genutzt. Zwei Kläranlagen betreiben zur Eigenversorgung mit elektrischer Energie neben einem BHKW auch eine Windkraftanlage.

Die mittels Faulgas als Primärenergieträger eigenerzeugte elektrische Energie deckt auf den betrachteten Kläranlagen zwischen 8 % und 78 % des klärwerkseigenen elektrischen Energieverbrauchs. Ein Großteil der Kläranlagen (ca. 60 % der erfaßten Anlagen) nutzt das anfallende Faulgas bislang nur zu Heizzwecken.

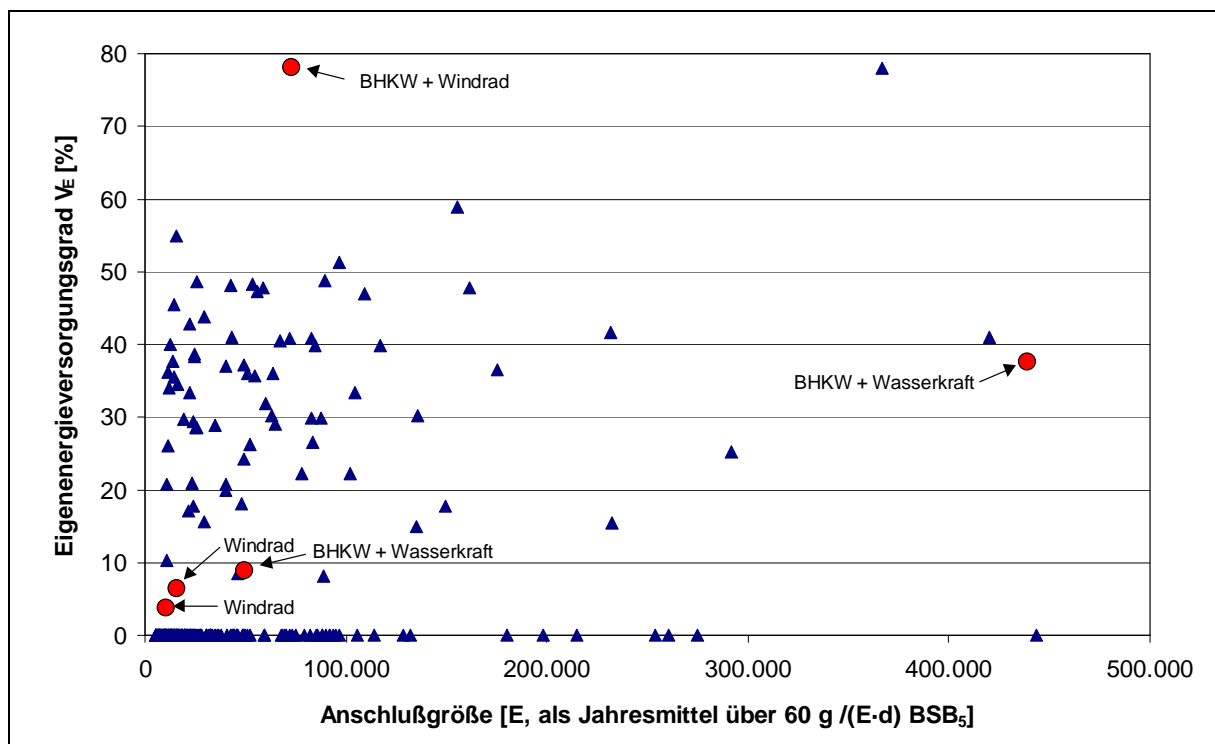


Abbildung 21: Anteil der elektrischen Eigenenergieproduktion über Faulgas gemäß Teilergebnisse der Umfrage NRW [N.N. 1998]

Ähnliche Untersuchungen, die auch die thermische Eigenenergieversorgung einbeziehen, wurden in Hessen durchgeführt. Sie beschränkten sich dabei auf Kläranlagen, die bereits über ein BHKW verfügen [HESSENENERGIE 1994]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung hinsichtlich der erreichten Eigenenergieversorgungsgrade in Abhängigkeit von der Anschlußgröße der Kläranlage sind aus Abbildung 22 ersichtlich.

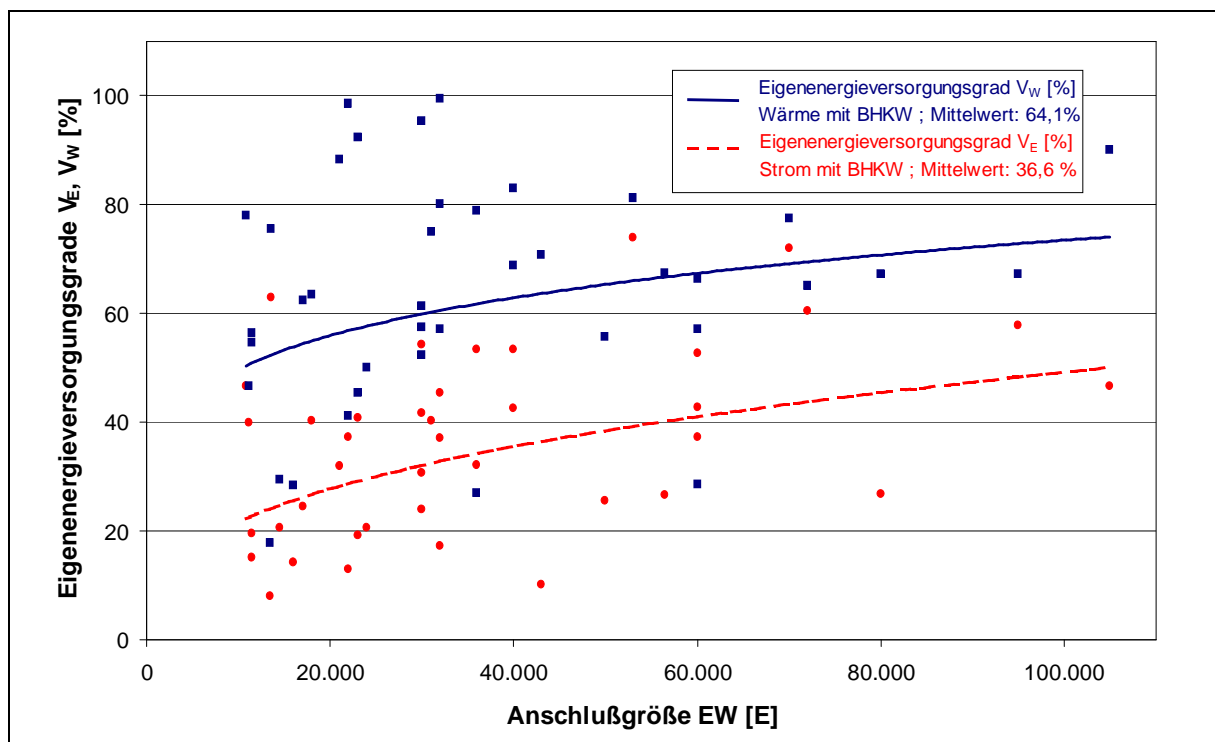


Abbildung 22: Eigenenergieversorgungsgrade Strom / Wärme der mit BHKW ausgerüsteten Kläranlagen in Hessen [HESSENENERGIE 1994]

Im Jahresmittel lag bei den erfaßten Anlagen die Faulgasproduktion zwar 20 - 30 % über der zur konventionellen Wärmeverbrauchsdeckung erforderlichen Wärmeenergie. Aufgrund von Schwankungen in der Faulgasproduktion und der überwiegend jahreszeitlichen Abhängigkeit im Wärmeverbrauch war jedoch keine vollständige Wärmeverbrauchsdeckung zu verzeichnen.

Zweitbrennstoffe: Erd-, Propangas, Diesel, Heizöl; Rapsöl, Biodiesel

Die Beschaffung erfolgt über das jeweilige Versorgungsunternehmen (EVU/GVU) oder den Fachhandel. Die Wahl des jeweiligen Zweitbrennstoffs ist von örtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig.

- Die mit Zweitbrennstoffen in BHKW-Anlagen erzeugte elektrische Energie wird zur Deckung des elektrischen Energieverbrauchs und ggf. Rückspeisung in das EVU-Netz eingesetzt. Der Einsatz hängt aus wirtschaftlichen Gründen überwiegend von der Bilanz der thermischen Energieverbrauchsdeckung ab.
- Die mit Zweitbrennstoffen in BHKW- oder Heizungsanlagen erzeugte thermische Energie wird zur Deckung des thermischen Energieverbrauchs und im besonderen zur Deckung des im Winter anfallenden Spitzenwärmeverbrauchs von Kläranlagen genutzt.

- Mit Zweitbrennstoffen wird teilweise auch die Notstromversorgung (BHKW; Dieselaggregate) von Kläranlagen bei Netzausfall gewährleistet.
- Die Zweitbrennstoffe Rapsöl und Biodiesel werden derzeit noch selten verwendet. Sie haben gegenüber fossilen Brennstoffen den Vorteil der Erneuerbarkeit.

Holz

Holz zählt zu den erneuerbaren Primärenergieträgern, der jedoch auf Kläranlagen bislang noch nicht zum Einsatz gekommen ist. Die Nutzung zur Erzeugung elektrischer und/oder thermischer Energie ist technisch prinzipiell möglich. Die Wirtschaftlichkeit hängt insbesondere von der weiteren technischen Entwicklung und den Beschaffungsmöglichkeiten des Brennstoffs (Sägewerke, Abfall- bzw. Forstwirtschaft, etc.) ab.

Klärschlamm

Klärschlamm fällt als Abfall der Abwasserbehandlung an und kann nach entsprechender Vorbehandlung verbrannt werden.

- Die mit dem Primärenergieträger Klärschlamm in Verbrennungsanlagen erzeugte thermische Energie kann als Prozeßwärme in der anaeroben Schlammstabilisierung etc. oder für eine vorgeschaltete Klärschlamm Trocknung mit genutzt werden.
- Der Klärschlamm kann vergast und anschließend in BHKW-Anlagen zur Erzeugung elektrischer und thermischer Energie genutzt werden. Eine Umsetzung dieser Technik ist bislang nicht bekannt. Der Zweckverband Abwasserreinigung Balingen plant einen Einsatz [ZV BALINGEN 1998], und auf der Kläranlage Herzebrock wird gerade eine derartige Anlage erstellt.
- Wegen seines hohen Heizwertes kann Klärschlamm auch in Kohlekraftwerken oder Abfallverbrennungsanlagen mitverbrannt werden.

Wasserkraft

Wasserkraft kann als Träger potentieller und kinetischer Energie in elektrische Energie umgewandelt werden. Der Einsatz auf Kläranlagen ist in der Regel mangels ausreichender geodätischer Höhenunterschiede oder unzureichender Wasservolumenströme nur sehr eingeschränkt möglich. Dennoch gibt es einige Kläranlagen, bei denen die Nutzung von Wasserkraft zur Erzeugung elektrischer Energie möglich ist und bereits verwirklicht wurde (siehe Abbildung 17).

Windenergie

Wind kann als Träger kinetischer Energie in elektrische Energie umgewandelt werden. Der Einsatz auf Kläranlagen ist grundsätzlich möglich und wurde bereits in den Küstenregionen, in der norddeutschen Tiefebene und in den Mittelgebirgsregionen umgesetzt.

Die mittels Windenergienutzung erzeugte elektrische Energie wird unmittelbar in das Versorgungsnetz der Kläranlage gespeist; abhängig von der Größe der Windkraftanlage und dem kläranlageneigenen elektrischen Energieverbrauch wird ggf. überschüssige Energie in das EVU-Netz zurückgespeist und vergütet. Die Baugröße der Windkraftanlagen ist grundsätzlich unabhängig von der Größe der Kläranlage wählbar.

Solarenergie

Solarenergie wurde früher bereits häufig zur Trocknung des Klärschlammes auf Trockenbeeten genutzt.

Die Solarenergie kann heute mittels Photovoltaik zur Erzeugung elektrischer Energie sowie mittels Solarthermie zur Erzeugung thermischer Energie genutzt werden. Da der Bedarf an thermischer Energie i.d.R. durch die Faulgasnutzung sowie Zweitbrennstoffe abgedeckt wird, ist auf Kläranlagen überwiegend Photovoltaik von Nutzen.

- Solarenergie kann sinnvoll zur Schlamm-trocknung eingesetzt werden. Die Nutzung ist jedoch aufgrund des Platzbedarfs des verfahrensbedingt zeitlich längeren Prozesses begrenzt. Derzeit wird in Balingen eine Anlage für eine Ausbaugröße von 70.000 E erstellt [ZV BALINGEN 1998].
- Photovoltaik auf Kläranlagen wird wegen der hohen Investitionen und des relativ großen Platzbedarfs bis heute vorwiegend zur Versorgung geographisch entlegener Verbraucher sowie in Versuchsanlagen eingesetzt.

Abwasserwärme

Die Nutzung der Abwasserwärme zur Erzeugung thermischer Energie mit Wärmepumpen für z.B. die Beheizung einzelner Gebäude ist auf Kläranlagen in Deutschland bisher nicht bekannt. Grundsätzlich ist der Einsatz jedoch möglich und künftig durch technische und wirtschaftliche Entwicklungen zu erwarten. Eine Nutzung dieser Energieform ist in einzelnen Kanalnetzen in der Schweiz bereits realisiert worden. Mittels der hierbei gewonnenen Wärmeenergie wurden vorwiegend Haushaltsverbraucher versorgt.

Oberflächennahe Erdwärme

Eine Nutzung von oberflächennaher Erdwärme in Kläranlagen ist ebenfalls grundsätzlich möglich, jedoch bisher nicht bekannt. Die bereits konkurrenzfähigen Kosten für die Nutzung dieser Energieform lassen in Zukunft ein gewisses Anwendungspotential erwarten, das allerdings nur bedingt als Ersatz für Zweitbrennstoffe eingesetzt werden kann.

Die im folgenden aufgeführten Energieträger sind grundsätzlich technisch anwendbar, haben jedoch aus unterschiedlichen Gründen (bislang) keinen Einsatz auf Kläranlagen gefunden oder gehören zu bereits angewendeten Energieträgern, deren Beitrag zur Energieverbrauchsdeckung auf Kläranlagen gering ist. Der Vollständigkeit halber wird auf diese Energieträger lediglich in gekürztem Umfang eingegangen:

Fossile Energieträger

Fossile Energieträger, wie z.B. Stein- und Braunkohle, werden auf Kläranlagen nicht eingesetzt. Prinzipiell ist eine Nutzung zur Erzeugung elektrischer oder thermischer Energie technisch möglich. Die Energieerzeugung wird jedoch erst ab einer Kraftwerksgröße (Primärenergieeinsatz größer ca. 10 MW) wirtschaftlich, die i.d.R. weit über dem Energieverbrauch von kommunalen Kläranlagen liegt.

Fernwärme

Die Nutzung von Fernwärme zur Bereitstellung der auf Kläranlagen benötigten thermischen Energie ist durchaus möglich. Der Bedarf an thermischer Energie wird jedoch i.d.R. mit dem anfallenden Faulgas und ggf. einem Zweitbrennstoff abgedeckt. Ungünstig wirkt sich zudem der geographisch meist abgelegene Standort von Kläranlagen auf die Anschlußkosten aus. Eine Anbindung an kommunale Fernwärmenetze wird daher nur in Einzelfällen zur Anwendung gelangen. Möglich und sinnvoll könnte jedoch die an das Fernwärmenetz angekoppelte Anbindung zur Einspeisung auf der Kläranlage verfügbarer, überschüssiger thermischer Energie sein.

Geothermie

Eine Nutzung der geothermischen Energie auf Kläranlagen ist zwar grundsätzlich möglich, jedoch von der Existenz hydrogeothermaler Vorkommen abhängig. Der Einsatz ist bislang auch nicht bekannt. Hier gilt auch, daß der Bedarf an thermischer Energie auf Kläranlagen i.d.R. mit dem anfallenden Faulgas und ggf. einem Zweitbrennstoff abgedeckt wird. Die Deckung zusätzlichen thermischen Energiebedarfs durch geothermische Energie wird aufgrund hoher Investitionen kaum Anwendung finden; bei einer thermischen Leistung von 1 MW und einer Nutzungsdauer von 30

Jahren liegen die Wärmegestehungskosten mehr als doppelt so hoch als bei der konventionellen Wärmeerzeugung [STRAUBEL 1998].

Maschinenabwärme

Die Maschinenabwärme, z.B. von Gebläseeinrichtungen für die Beheizung von Gebäuden, wird auf Kläranlagen bereits genutzt und ist jedoch meist auf einzelne Räume begrenzt. Eine gezielte Nutzung dieser zur Verfügung stehenden thermischen Energie ist grundsätzlich zu prüfen, da durch kompetente Berücksichtigung in der Planung hohe Einsparungen erreicht werden können. Beispielsweise hält ein dauerhaft in Betrieb befindlicher elektrischer Antrieb mit 10 kW elektrischer Leistung (rd. 1 kW Verlustwärme) einen nach Wärmeschutzverordnung (WschVO) isolierten Raum mit 50 m² Fläche frostfrei.

3.2.3 Umgesetzte bzw. geplante Kombinationsmöglichkeiten bei der Energiebereitstellung

Zur Energiebereitstellung auf Kläranlagen bestehen bereits einige „konventionelle“ Kombinationsmöglichkeiten. Darüber hinaus wurden an einigen wenigen Standorten auch alternative Kombinationsmöglichkeiten mit regenerativen Energien umgesetzt (vgl. Kapitel 3.2.1). Die im Rahmen der Umfrage und zusätzlichen Vor-Ort-Untersuchungen gewonnenen Betriebsergebnisse werden nachfolgend beispielhaft für einzelne Verfahrenskombinationen beschrieben.

Energieversorgungsunternehmen (EVU) - Windenergie - konventionelle Heizung

Der Bedarf an elektrischer Energie wird mittels einer Kombination aus öffentlichem EVU-Netz und Windenergie gedeckt. Die elektrische Eigenenergieversorgung muß netzgekoppelt betrieben werden, um den Betrieb der Kläranlage windunabhängig zu gewährleisten. Aufgrund des netzgekoppelten Betriebs kann zudem die ggf. überschüssig produzierte elektrische Energie der Windkraftanlage in das öffentliche EVU-Netz zurückgespeist werden. Der Bedarf an thermischer Energie wird mit einer konventionellen Heizung bei Einsatz des ggf. anfallenden Faulgases und / oder eines Zweitbrennstoffes als Energieträger gedeckt.

Als Beispiel für diese Form der Energieversorgung sei die Kläranlage Schönberg in Schleswig-Holstein genannt, deren wesentliche Kenndaten in Tabelle 4 zusammengestellt sind. Die für Windkraftanlagen auffällig niedrige jährliche Energieerzeugung ist hier auf häufige Wartungs- und Reparaturarbeiten der bereits 9 Jahre alten Windkraftanlage zurückzuführen.

Ausbaugröße EW	28.000	E
Max. Netzbelastung (elektr.)	105	kW
Max. Leistung Windkraftanlage (elektr.)	60	kW
Energieverbrauch im Mittel	480 – 500	MWh/a
Energieerzeugung durch Windkraft im Mittel	65	MWh/a

Tabelle 4: Kenndaten der Kläranlage Schönberg

Energieversorgungsunternehmen (EVU) - BHKW - Windenergie - Photovoltaik

Der elektrische Energieverbrauch wird durch eine Kombination aus EVU-Versorgung, Blockheizkraftwerk, Windkraft und Photovoltaik gedeckt.

Durch den gezielten Einsatz dieser Kombination konnte z.B. auf der Kläranlage Burg/Fehmarn im Jahresmittel ein mit > 100 % sehr hoher Grad an elektrischer Eigenenergieversorgung erreicht werden. Nach Angaben des Betreibers wird im Jahresmittel ein Überschuß an elektrischer Energie produziert und in das Netz des Energieversorgers zurückgespeist. Ca. 94 % der eigenerzeugten elektrischen Energie werden zur Deckung des Eigenverbrauchs genutzt. Der augenscheinlich geringe Anteil der durch das BHKW erzeugten Energie liegt in der Störanfälligkeit des installierten Moduls begründet.

In Tabelle 5 sind beispielhaft die wesentlichen Kenndaten der Kläranlage Burg/Fehmarn dargelegt, die als konventionelle Belebungsanlage konzipiert wurde. Das Einzugsgebiet hat den Charakter einer Tourismus-/Erholungs-/Freizeitregion, weshalb die Anlage im Jahresmittel großen Schwankungen unterworfen ist.

Ausbaugröße EW	36.000	E
installierte Leistung Windkraftanlage (elektr.)	250	kW
installierte Leistung Photovoltaikanlage (elektr.)	140	kW _p
installierte Leistung Blockheizkraftwerk (elektr.)	40	kW
installierte Brennerleistung Gasheizung, konv. (therm.)	70 –275	kW
Volumen Gasbehälter 1	250	m ³
Volumen Gasbehälter 2	50	m ³
Mittl. Energieverbrauch (elektr.)	510	MWh/a
Mittl. Eigenenergieerzeugung durch Windkraft	400	MWh/a
Mittl. Eigenenergieerzeugung durch Photovoltaik	130	MWh/a
Mittl. Eigenenergieerzeugung durch BHKW (elektr.)	10 *	MWh/a

* wegen hoher Störanfälligkeit geringe Erzeugung

Tabelle 5: Kenndaten der Kläranlage Burg/Fehmarn

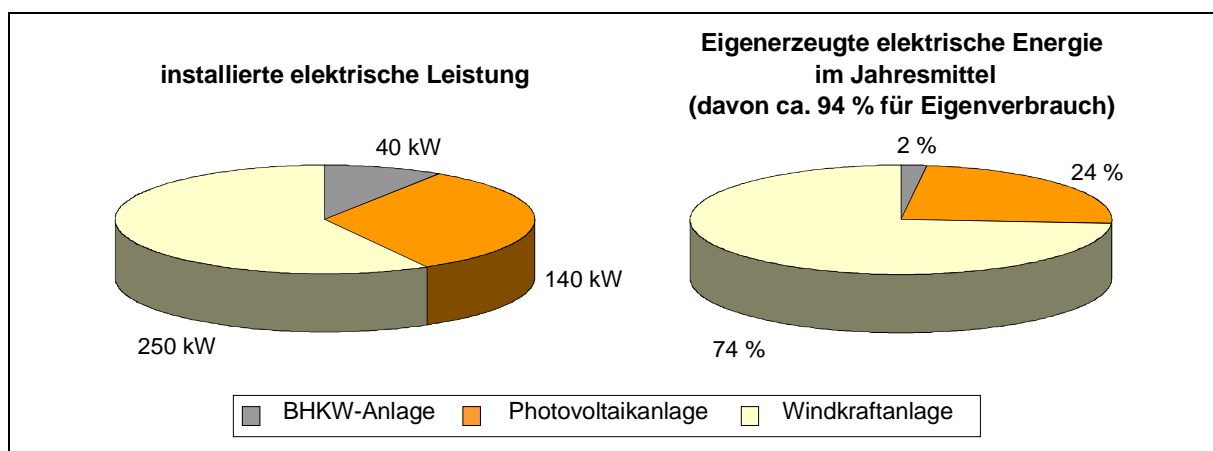


Abbildung 23: Übersicht über die Eigenenergieerzeugung der Kläranlage Burg auf Fehmarn



Abbildung 24: Foto des defekten BHKW-Moduls (links) sowie der Windkraftanlage (rechts) der Kläranlage Burg auf Fehmarn



Abbildung 25: Photovoltaikanlage der Kläranlage Burg auf Fehmarn

Energieversorgungsunternehmen (EVU) - BHKW - Wasserkraft - Solarenergie - Photovoltaik

Das Klärwerk Balingen deckt den elektrischen Energieverbrauch durch eine Kombination aus EVU, faulgasgespeistem Blockheizkraftwerk, Wasserkraft sowie Photovoltaik und den thermischen Energieverbrauch vollständig über Solarthermie und das Blockheizkraftwerk ab. Der äußerst geringe Verbrauch an elektrischer Energie und der damit vergleichsweise hohe Anteil der eigenproduzierten elektrischen Energie liegt in der topographischen Lage begründet: Das Klärwerk Balingen kann den Wasserweg ohne Hebewerk realisieren und vermag den ganzjährigen Höhenunterschied zwischen dem Auslauf der Kläranlage und der Vorflut von 4 m mittels Wasserkraft zur elektrischen Energieerzeugung zu nutzen. Für die Kläranlage Balingen ist geplant nach vollständiger Fertigstellung ihrer Eigenenergieerzeuger (Blockheizkraftwerk, Photovoltaik- und Wasserkraftanlage) über 80 % des elektrischen Energieverbrauchs im Jahresmittel selbst zu erzeugen [ZV BALINGEN 1998]. Diese Prognose wird erst in einigen Jahren nach entsprechenden Betriebserfahrungen und Optimierungen verifizierbar sein.

Die Kenndaten der Kläranlage Balingen faßt Tabelle 6 zusammen.

Ausbaugröße EW	125.000	E
Inst. Leistung Wasserkraftanlage (elektr.)	18	kW
Inst. Leistung Photovoltaikanlage (elektr.)	20	kW _p
Inst. Leistung Blockheizkraftwerk (elektr.)	150	kW
Volumen Gasbehälter	200	m ³
Mittl. Energieverbrauch (elektr.)	ca. 1.400	MWh/a
Prognose mittlere Eigenenergieerzeugung durch Wasserkraft	64	MWh/a
Prognose mittlere Eigenenergieerzeugung durch Photovoltaik	20	MWh/a
Prognose mittl. Eigenenergieerzeugung durch BHKW (elektr.)	1.000	MWh/a
Prognose Versorgung durch EVU (elektr.)	270	MWh/a

Tabelle 6: Kenndaten der Kläranlage Balingen [ZV BALINGEN 1998]

In Abbildung 26 ist die Prognose der im Jahresmittel verteilten Deckung des elektrischen Energieverbrauches für die Kläranlage Balingen aufgezeigt.

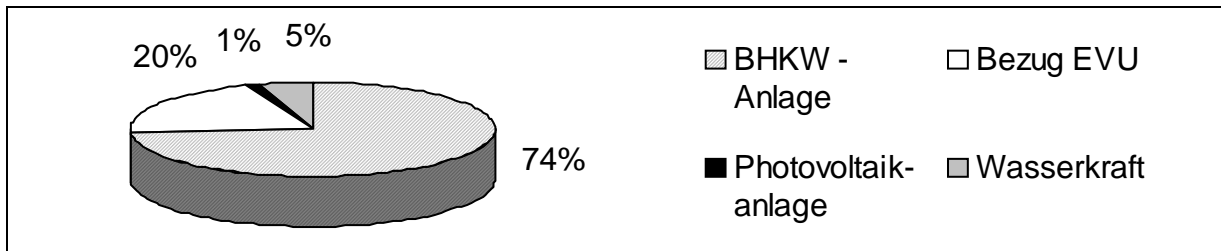


Abbildung 26: Prognose der elektrischen Energieverbrauchsdeckung der Kläranlage Balingen im Jahresmittel [ZV BALINGEN 1998]

Zudem wird die Kläranlage Balingen nach ihrer Gesamtfertigstellung über eine mittels Solarthermie und Photovoltaik vollständig eigenenergieversorgte Klärschlamm-trocknungsanlage verfügen. Hierzu soll der auf ca. 35 % TS entwässerte Schlamm über Fördereinrichtungen in einem separaten, gläsernen Gebäude durch Sonneneinstrahlung nach dem Verdunstungsprinzip auf vorgesehene 90 % TS getrocknet werden.

In Tabelle 7 sind die Kenndaten der geplanten Schlamm-trocknungsanlage der Kläranlage Balingen sowie die Prognose für die aus Solarthermie umgewandelte Energie dargestellt.

Schlammanfall nach Entwässerung	2.100	t/a
Trockensubstanz nach Entwässerung	ca. 35	% TS
mittlere Schlammtemperatur nach Entwässerung	20	° C
Prognostizierte Trockensubstanz nach Trocknung	ca. 90	% TS
Prognostizierte Trocknungsenergie, thermisch	864	MWh/a

Tabelle 7: Kenndaten der vorgesehenen solaren Klärschlamm-trocknung der Kläranlage Balingen

Ein weiterer Ausbau sieht zudem die Vergasung des getrockneten Schlamms und eine anschließende Nutzung mit Kraft-Wärme-Kopplung vor. Hierüber liegen jedoch derzeit noch keine Detaildaten vor.

Energieversorgungsunternehmen (EVU) - BHKW - Wasserkraft - konventionelle Heizung

Das Klärwerk Wuppertal-Buchenhofen deckt einen Teil des elektrischen Energieverbrauchs neben einer klärwerkseigenen Blockheizkraftwerksanlage mit einem Was-

serkraftwerk, welches - in der Wupper installiert - eine Besonderheit darstellt, da das als Vorfluter genutzte Fließgewässer als Primärenergielieferant genutzt wird.

In Tabelle 8 sind Kenndaten der Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen zusammengestellt.

Ausbaugröße EW	700.000	E
Installierte Leistung Wasserkraftanlage (elektr.)	575	kW
Installierte Leistung Blockheizkraftwerk (elektr.)	4 x 538	kW
Volumen Hochdruckgasbehälter (4 bar)	1.000	m ³
Mittl. Energieverbrauch (elektr.)	15.694	MWh/a
Mittl. Eigenenergieerzeugung durch BHKW (elektr.)	6.464	MWh/a
Mittl. Eigenenergieerzeugung durch Wasserkraft (elektr.)	ca. 2.000	MWh/a
Mittl. Wärmeverbrauch	15.838	MWh/a
Mittl. Wärmeeigenproduktion	13.739	MWh/a

Tabelle 8: Kenndaten der Kläranlage Wuppertal-Buchenhofen

Weitere Energiebereitstellungssysteme

Die Kläranlage Körkwitz (15.000 E) verfügt über die Kombination einer Windkraftanlage (330 kW) und einer Photovoltaikanlage. Die eigenerzeugte Energie beträgt mittels Windkraftanlage 400 MWh/a und Photovoltaikanlage 100 MWh/a; der Bezug durch das EVU beträgt ca. 500 MWh/a; leider konnten keine weiteren Auskünfte durch den Betreiber zur Verfügung gestellt werden.

Die Kläranlage Herzebrock erstellt eine Klärschlammvergasungsanlage. Der getrocknete Klärschlamm wird vergast und das dabei anfallende Gas im Blockheizkraftwerk über 24 h mit ca. 50 kW elektrischer Leistung genutzt. Diese Anlage ist noch nicht in Betrieb, steht aber kurz vor der Fertigstellung.

Die Kläranlage Fulda betreibt seit August 1998 ein mit Rapsöl gespeistes BHKW mit einer Leistung von 130 kW_{elektr.} zur Spitzenlastdeckung (ca. 10 h/d; ca. 50 h/Woche).

Der Abwasserverband Untere Selz unterhält auf der Kläranlage Ingelheim seit 4 Jahren ein mit Rapsöl gespeistes Blockheizkraftwerk mit einer Leistung von 90 kW_{elektr.}, welches 24 h täglich betrieben wird.

4 Grundlagen für den Einsatz verschiedener Energieträger auf Kläranlagen

Die Liste der auf kommunalen Kläranlagen theoretisch zur Energieversorgung einsetzbaren Energieträger ist sehr umfassend. Die weiteren Ausführungen beschränken sich auf die in Abbildung 27 dargestellten Energieträger. Deren Entwicklungsstand ist bereits so weit fortgeschritten, daß ihr Einsatz auf Kläranlagen unter realen Bedingungen vorstellbar ist oder bereits umgesetzt wurde.

<i>Autarke Energieversorgung aus dem Abwasser</i>	<i>Standortautarke Energieversorgung</i>	<i>Energieversorgung durch Zulieferung</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Faulgas • Klärschlamm • Abwasserwärme • Wasserkraft 	<ul style="list-style-type: none"> • Windkraft • Solarenergie • Oberflächennahe Erdwärme 	<ul style="list-style-type: none"> • EVU-Strom • EVU-Erd- und Propangas • Diesel/Heizöl • Biodiesel/Rapsöl • Holz

Abbildung 27: Untersuchte Energieträger zur Energieversorgung auf Kläranlagen

Zunächst werden die technischen Voraussetzungen und die Einflüsse auf die Verfügbarkeit der aufgeführten Energieträger erläutert. Darauf folgt eine Beschreibung der zu berücksichtigenden rechtlichen Rahmenbedingungen sowie ein Verweis auf die Formen öffentlicher Zuwendungen und Finanzierungsmöglichkeiten. Ziel einer sich anschließenden „Grobanalyse“ ist eine überschlägige Ermittlung, welchen Anteil die jeweiligen Energieträger an der Gesamtenergieversorgung der Kläranlage übernehmen können. Da neben der technischen und rechtlichen Realisierbarkeit die Wirtschaftlichkeit in den meisten Fällen die entscheidende Rolle spielt, werden zum Abschluß dieses Kapitels die anfallenden Kosten aufgeführt.

4.1 Technische Voraussetzungen

4.1.1 Sekundärenergie

4.1.1.1 EVU-Strom

Die Nutzung elektrischer Energie erfordert den Anschluß an das öffentliche EVU-Netz. Bei einer beantragten Leistungsbereitstellung von bis zu ca. 100 kVA wird dieser Anschluß i.a. aus dem Niederspannungsnetz (0,4 kV) erfolgen.

Bei höherer Leistungsbereitstellung wird mit dem EVU in den meisten Fällen ein Liefervertrag über Strom aus dem Mittelspannungsnetz (i.d.R. 10 bzw. 20 kV) abgeschlossen. Durch eine Schaltanlage sowie Transformatoren erfolgt eine Umwandlung des Mittelspannungsstroms zur Versorgung der elektrischen Verbraucher im internen Niederspannungsnetz der Kläranlage.

4.1.2 Primärenergie

4.1.2.1 Faulgas

Faulgas hat einen Heizwert von 6 - 7 kWh/m³_N bei einem Methananteil von 60-70 %.

Die **Umwandlung in Strom und Wärmeenergie** kann mittels Gasturbinen, Gasmotoren oder Brennstoffzellen erfolgen.

Die **Bemessung von Faulgasverwertungsanlagen** sollte von der tatsächlich anfallenden Tagesmenge abhängig gemacht werden. Unter Berücksichtigung des jeweiligen gemessenen Faulgasanfalls werden nachfolgend allgemeine Erwartungswerte für die Faulgasausbeute und Empfehlungen für die Auslegung angegeben.

- Bei der Festlegung des nutzbaren Energiepotentials sollten grundsätzlich die niedrigsten Werte des zu erwartenden Gasanfalls berücksichtigt werden. Wenn nicht aus dem Betrieb einer bereits bestehenden Anlage höhere Werte vorliegen, sollte mit einer spezifischen Gasausbeute von 17 l/(E·d) gerechnet werden.
- Eine Anlagenauslegung über 25 l/(E·d) ist nur bei großen, verfahrenstechnisch optimal betriebenen Anlagen, die diesen Anfall über mehrere Betriebsphasen hinweg bestätigt haben, empfehlenswert.
- Bei der Auswahl der Gasmotoren sind sämtliche Belastungsänderungen der Anlage zu berücksichtigen, damit die Aggregate jeweils unter möglichst optimalen Betriebsbedingungen betrieben werden können. Ein zusätzlicher Betrieb mit Erdgas stellt oftmals eine sinnvolle Methode zum Erreichen eines gleichmäßigen Motorenbetriebs dar.

Gasspeicher dienen zur Anpassung des Faulgasanfalls an den Verbrauch. Man unterscheidet zwischen drucklosen Speichern mit drucklosen Membranen, Niederdruckspeichern bis 50 mbar mit gewichtsbelasteten Membranen, die bis zu einem Volumen von 5.000 m³ realisiert werden, sowie Hochdruckspeichern bis 10 bar bei größeren Speichervolumina. Bei Hochdruckspeichern beträgt das Volumen nur ca. 1/10 der zu speichernden Gasmenge. Zur Beschickung des Druckspeichers ist jedoch ein zusätzlicher druckloser oder Niederdruckspeicher als Saugvorlage für die Verdichtereinheit erforderlich.

Bei der Auslegung des Gasspeichers sollte die Kapazität für Anlagen mit Gasmotoren bzw. BHKW auf hohe Erwartungswerte ausgelegt werden, auch wenn diese nur in gewissen Jahreszeiten bzw. Betriebsphasen erreicht wurden. Die Speichergröße ist neben der Auslegung und der Betriebsart der Gaskraftanlage stark von dem zeitlichen Verlauf der Rohschlammbeschickung und dem damit verbundenen Faulgasanfall abhängig. Um den Speicher zu minimieren, ist eine quasi-kontinuierliche Schlammbeschickung des Faulbehälters anzustreben. Überschläglich sollte ein Gasbehälter bei BHKW-Tagesstromerzeugung mindestens 75 % der mittleren täglichen Gasproduktion und 50 % der Grundlast speichern können.

Das **Gasleitungssystem**, welches standardmäßig aus Edelstahlrohrleitungen, Werkstoff 1.4571 besteht, ist mit Sicherheitseinrichtungen wie Detonations- und Deflagrationssicherungen sowie Absperreinrichtungen, Feststoff- und Flüssigkeitsabscheidern in Form von Schaumfallen und Kondenswasserabscheidung durch Kiestöpfe auszurüsten.

Faulgasreinigung und -behandlung wie z.B. Entschwefelung in Adsorptionsanlagen werden bei einer Überschreitung des für BHKW gefährlichen Grenzwertes an H₂S mit 2,3 g/m³_N CH₄ erforderlich. Durch den Einsatz von eisenhaltigen Fällmitteln bei P-Fällung kann der Grenzwert jedoch gesichert unterschritten werden. Chlor- und Fluorverbindungen müssen für den BHKW-Betrieb in der Summe unter 100 mg/m³_N CH₄ liegen. Ansonsten ist eine Faulgasreinigung z.B. mit Aktivkohle vorzusehen. Ebenso werden Siliziumwäscher bei hohen Siliziumanteilen (> 20 mg/m³_N CH₄) und evtl. CO₂-Wäscher erforderlich.

Eine **Gasfackel** ist aus sicherheitstechnischen Überlegungen, z.B. bei Ausfall der Anlagen zur Faulgasnutzung, unbedingt erforderlich. Die Zündung der Fackel ist abhängig von dem Füllstand des Gasbehälters. Ausgelegt werden Gasfackeln auf die mittlere stündliche Faulgasproduktion mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5. Ein planmäßiger Betrieb der Gasfackel ist - außer zur Notentlastung - aus energiewirtschaftlicher Sicht zu vermeiden.

Als faulgasbetriebene **Gasmotoren** sind Gas-Ottomotoren und Gas-Dieselmotoren im Einsatz. Der häufiger zum Einsatz kommende Gas-Ottomotor wird durch elektrische Funken einer Zündkerze gezündet, während der Gas-Dieselmotor durch Einspritzen von Dieselkraftstoff gezündet wird. Die erforderliche Zündölmenge liegt bei ca. 10 % des Primärenergieeinsatzes, kann aber gleichzeitig voll mechanisch und thermisch genutzt werden. Bei Ausfall des Faulgases bietet der Gas-Dieselmotor die Möglichkeit, mit vollem Dieselbetrieb zu fahren. Die in den Gasmotoren verwendbaren Zweitbrennstoffe sind in Tabelle 9 zusammengefaßt.

	Mögliche Brennstoffe neben Faulgas
Gas-Ottomotor	nur gasförmige Brennstoffe einsetzbar wie Erdgas, Propangas, Deponiegas etc.
Gas-Dieselmotor	sowohl flüssige als auch gasförmige Brennstoffe einsetzbar wie Diesel, Heizöl, Biodiesel, Rapsöl, Erdgas, Propangas, Deponiegas etc.

Tabelle 9: Übersicht über die möglichen Zweitbrennstoffe verschiedener Gasmotoren

Gasmotoren können als Direktantriebe oder in Verbindung mit Generatoren als BHKW-Anlagen eingesetzt werden. Das dem Motor zugeführte Faulgas wird je nach Aggregattyp und -größe durchschnittlich zu 34 % in mechanische Energie an der Welle, zu 34 % in Wärmeenergie im Motorkühler sowie zu 26 % in Wärmeenergie im Abgas und 6 % in Abstrahlungswärme des Motors umgewandelt. Zusätzlich sind bei einem BHKW noch der Wirkungsgrad des Generators mit ca. 97 % sowie der Wirkungsgrad der Wärmetauschereinrichtungen mit ca. 93 % zu berücksichtigen. In Abhängigkeit von der Motorenart setzen BHKW somit ca. 30 - 35 % der eingesetzten Kraftstoffenergie in elektrische und ca. 50 - 55 % in nutzbare Wärmeenergie um.

Direktantriebe, z.B. bei Pumpen oder Druckluftverdichtern, bewirken gegenüber dem Einsatz eines Generators zur Stromerzeugung und eines Elektromotors zur Krafterzeugung eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades um ca. 10 %. Ist jedoch der Faulgasanfall zeitweise nicht ausreichend für den Antrieb und muß mit einem Ersatzbrennstoff wie z.B. Erdgas zugefeuert werden, so wird der Direktantrieb meist unwirtschaftlich, da in diesem Fall für den Ersatzbrennstoff Mineralölsteuer zu entrichten ist.

Aus diesem Grund werden findet man heute vorwiegend Generator-Gasmotor-Module vor. Wenn die elektrische Energie parallel zum EVU-Netz eingespeist wird, sind Synchronisationseinrichtungen erforderlich, die in der Regel in Verbindung mit

Synchron-Generatoren eingesetzt werden. Bei einem vom EVU-Netz unabhängigen System kommen Synchrongeneratoren zum Einsatz.

In Abhängigkeit von der Auslegung des BHKW und des Gasspeichers kann der Wärmeverlust der Aggregate, der über eine hydraulische Weiche an den Heizwasserverteiler der Kläranlage abgegeben wird, vor allem in den Sommermonaten größer sein als die erforderliche Wärmeabnahme der Kläranlage. Um die Faulgasverwertung zur Stromerzeugung aufrechterhalten zu können, ist in diesem Fall ein zusätzliches Kühlsystem erforderlich.

Bei dem Einsatz von thermischen Schlamm-trocknungsanlagen wird Wärme auf einem hohen Niveau benötigt. Diese kann beim Einsatz von **Gasturbinen** zur Verfügung gestellt werden. Die Gasturbine besteht aus einem Verdichter, der Brennkammer und der Turbine. Der Verdichter, der über die Turbine angetrieben wird, komprimiert die Ansaugluft, die zusammen mit dem Gas in der Brennkammer verbrannt wird. Die Turbine setzt etwa 1/3 der eingebrachten Energie in mechanische Energie und ca. 2/3 in Wärmeenergie im Abgas um. Mit Hilfe eines Generators und eines Dampfkessels kann diese Energie verarbeitet werden. Derartige Gasturbinen, die auch im Umschaltbetrieb mit Erdgas oder Heizöl betrieben werden, können somit im Vollastbetrieb ihre Primärenergie zu 25 % in elektrische und bis zu 60 % in thermische Energie umwandeln. Sie sind heute ab einer elektrischen Leistung von 200 kW lieferbar und somit auch für mittlere Kläranlagengrößen mit Schlamm-trocknung interessant.

Des Weiteren kann Faulgas zur Beifeuerung und Ofensteuerung bei der Klärschlammverbrennung eingesetzt werden.

Durch katalytische Umwandlung des Methangases (CH_4) in Wasserstoffgas (H_2) kann Faulgas in **Brennstoffzellen** eingesetzt werden. Die elektrochemische Nutzung von aufbereitetem Faulgas in Brennstoffzellen wird seit Mitte des Jahres 1999 erstmalig in Europa auf der Kläranlage Köln-Rodenkirchen erprobt. Der erwartete elektrische Wirkungsgrad liegt bei 40 %, der thermische bei 45 %; somit wird von einer Gesamtenergienutzung von 85 % ausgegangen. Die Brennstoffzellentechnologie erscheint z.Zt. sehr vielversprechend und steht derzeit im Mittelpunkt zahlreicher Forschungsprojekte.

4.1.2.2 EVU-Erdgas

Erdgas hat je nach Art des Gases einen Heizwert von 6 - 12 kWh/m³_N.

Es kann auf Kläranlagen ebenso wie Faulgas in entsprechenden **Brennern** oder **Gasmotoren** genutzt werden. Bei einer Nutzung beider Brennstoffe muß der Gasmotor eine automatische Zündverstellung besitzen.

Zusätzlich erforderlich ist neben dem öffentlichen Versorgungsnetz zur Kläranlage eine Übergabestation mit Messung des Verbrauchs, evtl. Druckminderung und Sicherheitseinrichtungen wie Rückströmsicherung, Überdrucksicherheitsventil u.ä. Das **Gasleitungssystem** besteht standardmäßig aus Edelstahlrohrleitungen, Werkstoff 1.4571.

Weiterhin können die flammenlose chemische Umwandlung in Wärme mittels katalytischer Verbrennung sowie die **Brennstoffzelle** genutzt werden. Diese Technologien sind jedoch noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase.

4.1.2.3 Propangas

Der Heizwert von Propangas beträgt 12,9 kWh/kg.

Es sind spezielle Propangasbrenner für die **Heizung** bzw. für Propangasbetrieb taugliche **BHKW** (keine Gas-Dieselmotoren) einzusetzen.

Bei dem Einsatz von Propan als Zweitenergieträger für Faulgasmotoren ist zu beachten, daß durch die geringere Methanzahl mit einer Leistungsminderung von 25 % zu rechnen ist. Außerdem ist die Klopfestigkeit des Motors ohne Zusatzmittel nicht gewährleistet.

Weiterhin erforderlich ist ein entsprechender **Tank** mit einem Abfüllplatz für Propangaslieferfahrzeuge. Hierbei ist auf die entsprechenden Sicherheitsabstände der Unfallverhütungsvorschriften zu achten. Das **Gasleitungssystem** besteht ebenfalls standardmäßig aus Edelstahlrohrleitungen, Werkstoff 1.4571. Außerdem ist vor dem Verbraucher eine Propangasregelstrecke mit Druckminderern erforderlich.

4.1.2.4 Diesel/Heizöl

Der Heizwert von Diesel/Heizöl beträgt 11,0 kWh/kg.

Für den Einsatz von Heizöl sind ein **Öltank** mit Auffangwanne sowie eine entsprechende Abfüllstation bzw. -platz erforderlich. Es werden **Ölbrenner** für die Verbrennung und **Diesel- bzw. Gas-Dieselmotoren** eingesetzt.

4.1.2.5 Biodiesel/Rapsöl

Der Heizwert von Rapsöl beträgt 9,72 kWh/kg und der von Biodiesel 11,77 kWh/kg.

Aus klimatischen Gründen ist Raps in Deutschland die einzige zur Gewinnung von Kraftstoffen eingesetzte Pflanze. Aus dem Rapsöl wird durch synthetische Veresterung mit Methanol Rapsöl-Methylester (RME), der sogenannte Biodiesel, gewonnen.

Für den Einsatz von Biodiesel bzw. Rapsöl sind ein **Öltank** mit Auffangwanne sowie eine entsprechende Abfüllstation erforderlich. Es sind **Ölbrenner** für die Heizung und angepaßte **Diesel- bzw. Gas-Dieselmotoren** einzusetzen. RME kann zwar technisch unbedenklich in den meisten Dieselmotoren verwendet werden, kann jedoch Gummi- und Kunststoffteile sowie die meisten Lacke angreifen, so daß eine Freigabe des Motorenherstellers erforderlich ist. Rapsöl ist im Gegensatz zu RME nicht in serienmäßigen Motoren als Brennstoff einsetzbar, da die Brennräume oft schon nach kurzen Laufzeiten verkolken und Ablagerungen die Motorleistung bis zum Ausfall mindern können. Durch Umstellung auf Einstrahleinspritzung und Einsatz eines Spezialkolbens aus Stahl werden die Aggregate auch für Rapsöl tauglich.

4.1.2.6 Holz

Der Heizwert von luftgetrocknetem Holz beträgt 4,31 kWh/kg. Ein kg Holzschnitzel entspricht rd. 0,78 kg luftgetrocknetem Holz. Buchen- und Eichenholz haben eine Dichte von 0,7 kg/dm³; Kiefer- und Tannenholz eine Dichte von 0,5 kg/dm³.

Holz kann in entsprechenden **Feuerungsanlagen** zur reinen Wärmeerzeugung und mit **Dampfkesseln** in Dampfmaschinen oder Dampfturbinen genutzt werden. Zur Verbrennung von Gebrauchtholz werden vornehmlich Rost- und Wirbelschichtfeuerung eingesetzt. Der wirtschaftliche Einsatzbereich der Wirbelschichtfeuerung liegt derzeit mit über 50 MW weit über den für Kläranlagen üblichen Größenordnungen. Der heute am meisten verbreitete Einsatztyp - die Rostfeuerung - erlaubt ebenfalls die Verbrennung von nicht oder nur grob zerkleinerten Holzresten und sehr feuchtem Material. Die Beschickung erfolgt entweder über einen Vorschub- oder Wanderrost. [MARUTZKY 1999]

Eine weitere Möglichkeit stellt die **Holzvergasung** dar. Sie bietet sich an, wenn ein BHKW und die Faulgasinstallationen bereits vorhanden sind und das vergaste Holz mit genutzt werden kann. Für ein derartiges Verfahren erforderlich sind die Lagerung und Aufbereitung entsprechend der angelieferten Holzart, ein Hochtemperaturvergasungsreaktor mit einem Gleichstromvergaser mit Festbett bzw. ein Wirbelschichtreaktor, ein Rostaustrag der Schlacke und der Restkohle mit Containern sowie eine

Gasreinigung bzw. Kühlung des erzeugten Schwachgases zur Erhöhung des BHKW-Motorenwirkungsgrades. Die Gaskühlung erfolgt über einen Wärmetauscher, der mit dem Gesamtwärmekreislauf gekoppelt werden kann. [WÖRSDÖRFER 1997]

4.1.2.7 Klärschlamm

Der Heizwert von Klärschlamm ist abhängig vom Wassergehalt und von seinem organischen Anteil. Er bemisst sich überschläglich nach der Formel:

$$H_u = GV \cdot 21.000 \text{ MJ/t} \cdot (1-WG) - WG \cdot 2.800 \text{ MJ/t}$$

mit: H_u : Heizwert in MJ/t

WG: Wassergehalt Klärschlamm [-]

GV: Glühverlust Klärschlamm [-]

21.000 MJ/t: Heizwert der organischen Stoffe

2.800 MJ/t: theoretisch erforderliche minimale Verdampfungsenergie für
1 m³ Wasser

In Abbildung 28 sind diese Zusammenhänge grafisch dargestellt.

Die **Klärschlammmonoverbrennung** wird in Deutschland am häufigsten in Wirbelschichtöfen mit stationärer Wirbelschicht realisiert. [WIEBUSCH 1997] Zum Einsatz kommen aber auch Etagenöfen oder Etagenwirbler.

Um den Schlamm ohne Zusatzbrennstoffe zu verbrennen, ist eine Nutzung der anfallenden Rauchgas-Abwärme notwendig. Die durch die Verbrennung freigesetzte thermische Energie im Rauchgas kann zu ca. 75 % verwertet werden. Mit der Abwärme wird entweder die Verbrennungsluft vorgewärmt oder über einen Abhitzeessel Dampf erzeugt, der zur Trocknung des Klärschlammes, zur Warmwassererzeugung bzw. zur Heizung oder über eine Dampfturbine mit Generator zur Erzeugung elektrischer Energie eingesetzt werden kann. [ZHANG 1999]

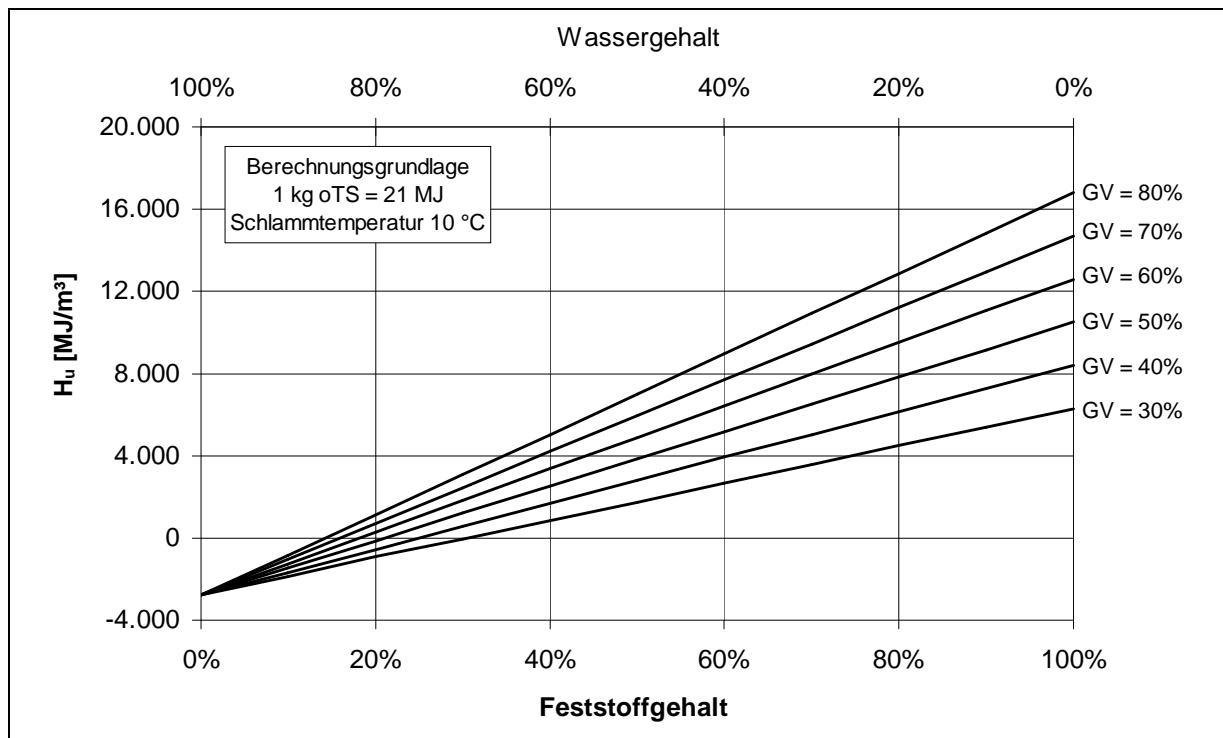


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Feststoffgehalt, Glühverlust GV und daraus resultierendem Heizwert H_u für Klärschlamm [Wöffen 1991]

Eine weitere Möglichkeit zur Energiegewinnung aus Klärschlamm stellt die **Klärschlammvergasung** dar. Ebenso wie beim Holz bietet sich die Vergasung an, wenn ein BHKW und die Faulgasinstallationen bereits vorhanden sind und das Gas mitgenutzt werden kann. Für ein derartiges Verfahren ist zunächst eine Trocknung bis auf ca. 90 % TS mit einer anschließenden Brikettierung erforderlich. Die Vergasung erfolgt anschließend analog der beim Holz beschriebenen Verfahrensweise (vgl. Kap. 4.1.2.6). Die entsprechende Technik wird bisher lediglich in Versuchs- bzw. Pilotanlagen eingesetzt.

4.1.2.8 Wasserkraft

Wasserkraft kann mittels Wasserrädern oder Turbinen in mechanische Arbeit umgesetzt werden. Durch die Kopplung mit einem Generator wird über die mechanische Arbeit elektrische Energie erzeugt. Die Nutzung von Wasserkraft auf Kläranlagen geschieht mit Niederdrucklaufkraftwerken.

Als **Turbinenarten** werden Durchström-, Francis-, Kaplan- und Rohrturbinen eingesetzt. Kaplan- und Francisturbinen besitzen ein Spiralgehäuse, Stütz-, Leit- bzw. Laufradschaufeln und einen Saugschlauch. Die Rohrturbinen besitzen neben dem Rohr, in dem sie installiert sind, Leit- und Laufradschaufeln sowie einen Saug-

schlauch. Bei der Durchströmturbine wird das horizontale Laufrad über einen Leitapparat angeströmt. Bei stark schwankender Wasserführung besitzen sie für eine wirtschaftliche Nutzung wesentliche Vorteile gegenüber den anderen Aggregaten. Somit hat die langsam laufende Ossberger Durchströmturbine im deutschen Turbinenbau bis 1 MW Leistung eine dominierende Stellung eingenommen. Als Stromerzeuger kommt ein Drehstromgenerator im Niederspannungsbereich als Synchron- oder Asynchronmaschine zum Einsatz. [KUHNERT 1988]

Für die **Nutzung der Wasserkraft des Fließgewässers** mit Laufwasserkraftwerken sind ein bewegliches Stauwehr, ein Einlauf mit Rechen und ein Zulaufdruckrohr erforderlich. Um einen möglichst großen Höhenunterschied zwischen Einlauf und Auslauf nutzen zu können, sollten die Entnahme- und Einleitstelle möglichst weit auseinander liegen. Es bleibt anzumerken, daß vor der Errichtung einer solchen Wasserkraftanlage die im Kapitel 4.3.3.7 aufgeführten erforderlichen Genehmigungen eingeholt werden müssen.

Bei der **Nutzung des Kläranlagenablaufes** hingegen ist keine gesonderte wasserrechtliche Genehmigung erforderlich. Außerdem kann auf einen Reinigungsrechen verzichtet werden. Sollte eine effektive Fallhöhe von mindestens 2 m vom Ablauf der Kläranlage bis zum Flußlauf vorhanden sein, kann sie z.B. mit oberflächigen Wasserrädern genutzt werden. Das Wasserrad aus Edelstahl, Aluminium oder Holz kann einseitig fliegend oder zweiseitig gelagert über ein Getriebe mit dem Drehstromgenerator verbunden werden. Sollten geringere Fallhöhen mit höheren Wassermengen vorliegen, werden unterschlächtige Wasserräder eingesetzt, die aber im Gegensatz zu oberflächigen Wasserrädern oder Turbinen einen geringeren Wirkungsgrad aufweisen.

Die Einsatzbereiche der einzelnen Technologien sind aus Abbildung 29 ersichtlich. Für die Dimensionierung einer Wasserkraftanlage ist eine detaillierte Auswertung der Häufigkeitganglinie des Ablaufvolumenstroms über mindestens ein Jahr erforderlich.

Eine weitere Möglichkeit, die vorhandenen Höhendifferenzen zu nutzen, besteht durch rückwärtslaufende Kreiselpumpen. Da diese Pumpen nicht regelbar sind, verursachen sie bei Abschaltung Druckstöße im Leitungssystem, die durch Windkessel oder Nebenauslaßventile begrenzt werden können. [WELZEL 1998]

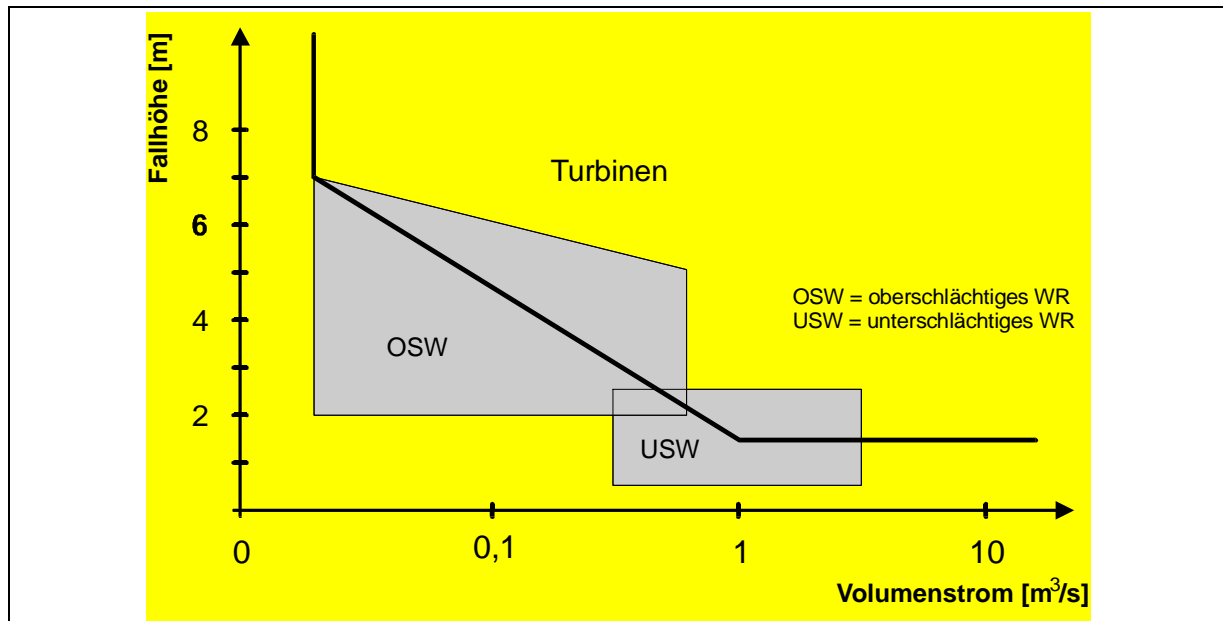


Abbildung 29: HQ-Diagramm der Einsatzbereiche von Wasserrädern und Turbinen [GÜNTHER 1997]

Derzeit noch in der Erprobungsphase ist der Einsatz einer Rohraxialturbine. Deren Generator liegt saugseitig hinter dem Axiallaufrad, und die Einheit kann ohne Rohrkrümmen direkt in die Rohrleitung eingeflanscht werden. Sie ermöglicht einen nahezu konstanten Durchfluß über den gesamten Drehzahlbereich, wodurch der Abfluß immer gewährleistet ist und auch bei Netzausfall keine nennenswerten Druckschwankungen entstehen. [WELZEL 1998]

4.1.2.9 Windkraft

Wind kann in Form von Windkraftanlagen in mechanische und elektrische Energie umgewandelt werden. Die Umwandlung in mechanische Energie für Pumpen ist auf Kläranlagen aufgrund des unbestimmten Energiedargebotes nicht umsetzbar. Die Erzeugung von Strom stellt bei einem entsprechenden Windangebot einen sinnvollen Beitrag zur unabhängigen Energieversorgung auf Kläranlagen dar.

Der Aufbau der Windkraftanlagen ist unterschiedlich und hängt stark vom jeweiligen Hersteller ab. Im wesentlichen werden zum heutigen Zeitpunkt 2- oder 3-flüglige, schnelllaufende Windräder mit einer horizontalen Achse eingesetzt. Verdrehbare Rotorblätter zur Anpassung der antreibenden Kräfte (Pitch) kommen erst bei mittleren Anlagengrößen zur Ausführung. Die Pitchverstellung erfolgt von der Gondel der Windkraftanlagen mechanisch bzw. hydraulisch. Bei kleineren Anlagen wird die Leistungsbegrenzung durch ein „Aus-dem-Wind-Schwenken“ bzw. -Kippen des Rotorkopfes oder den „stall-effect“ erreicht. Hierbei wird die Anlage unabhängig von der Windgeschwindigkeit auf einer konstanten Drehzahl gehalten. Bei hohen Windge-

schwindigkeiten führt dies zu einem Abreißen der Strömung, was wiederum die antreibenden Kräfte und damit die Leistungsabgabe des Rotors reduziert.

Der ebenfalls in der Gondel integrierte Triebstrang besteht aus Rotorwelle mit Lagerung, Bremsen, Drehstromgenerator und ggf. Getriebe sowie Kupplungen. Die Windrichtungsnachführung wird entweder mit einer Windfahne oder mittels eines Getriebemotors, der die Gondel gegenüber dem Turm verdreht, durchgeführt.

Um mit dem Drehstromgenerator drehzahlunabhängig in das Netz einspeisen zu können, wird zusätzlich ein Umrichter erforderlich. Für kleinere Anlagen sind die höheren Investitionen sowie die zusätzlichen energetischen Verluste durch den Umrichter oftmals der Grund für einen drehzahlfesten Betrieb mit Asynchrongenerator. Bei diesen Anlagen nach dem sogenannten „Dänischen Konzept“ muß aufgrund der festgelegten Rotordrehzahl ein hoher Anspruch an die Bemessung gelegt werden.

Die Betriebsführung wird durch eine programmierbare Steuerung umgesetzt. Neben der Störungsüberwachung übernimmt sie die Steuerung für die bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten erforderlichen Betriebszustände wie Freigabe des Rotors, motorisches Anfahren, Netzsynchrisation, Zuschalten der Generatoren, Windnachführung, Eingriff in die Leistungsregelung und Sturmabschaltung.

4.1.2.10 Solarenergie

Neben der passiven Nutzung der Sonnenenergie durch bauliche Maßnahmen kann die aktive Nutzung durch Photovoltaik oder Solarthermie auf Kläranlagen zum Einsatz kommen.

Derartige Systeme können entweder auf Gebäudedächern, Abdeckungen von Becken bzw. Behältern oder auf Freiflächen installiert werden.

Photovoltaik

Photovoltaikanlagen wandeln die solare Strahlung in elektrische Energie um. Sie bestehen entweder aus amorphen, multi- oder monokristallinen Solarzellen, deren Kernstück eine dünne Halbleiterscheibe aus Silizium ist, die beim Einfall von Licht Spannung erzeugt. Der so erzeugte Gleichstrom kann entweder direkt genutzt oder mittels eines Wechselrichters zu Wechselstrom umgewandelt und in das interne Netz eingespeist werden. Weiterhin erforderlich sind entsprechende Regel- und Sicherheitseinrichtungen zur Überwachung der erzeugten Wechselspannung sowie ein Blitzschutz.

Der Strom, der nicht direkt durch die Kläranlage verbraucht wird, kann in das Netz des EVU eingespeist werden. Dieser Fall ist aber für den aus Photovoltaik erzeugten Strom auf Kläranlagen in Deutschland eher selten.

Amorphe Solarzellen haben einen Wirkungsgrad von 5 bis 6 %. Die entsprechenden Photovoltaikmodule sind installationsfertige Platten in den Abmessungen von ca. 50 x 100 x 3 cm. Mit multikristallinen Solarzellen lassen sich derzeit Wirkungsgrade von bis zu 14 %, mit Monokristallinen bis zu 17 % erzielen.

Unabhängig vom Modultyp haben alle Solarzellen qualitativ gleichwertige Kennlinien, die die Höhe der Leistung in Abhängigkeit von der Gleichspannung wiedergeben. Die Kennlinien besitzen einen Punkt, der als MPP (Maximum Power Point) bezeichnet wird und die maximale Leistung bei voller Sonneneinstrahlung angibt. Photovoltaikmodule mit kristallinen Solarzellen sind derzeit mit einer MPP-Leistung von 40 bis 94 W_P erhältlich. Amorphe Module werden heute aufgrund des niedrigeren Wirkungsgrades im Leistungsbereich von 20 bis 30 W_P angeboten. Der Index P deutet auf die Spitzenleistung (Peak) unter MPP-Bedingungen hin. Da es sich hierbei um den theoretischen Spitzenwert handelt und gleichzeitig noch Leistungsverluste in der Gesamtanlage auftreten, liegt die tatsächliche Leistung deutlich unterhalb dieser Werte. Wegen der Verluste durch den Wechselrichter sollte die Leistung der Gesamtmodule 1 kW_P nicht unterschreiten, was in etwa einer Modulfläche von 10 m^2 entspricht.

Am günstigsten für die Installation sind nach Süden ausgerichtete sowie zwischen 30° und 50° geneigte Flächen, die nicht beschattet werden. Ein bewährter Durchschnittswert für das ganze Jahr liegt bei 45°. Neigungswinkel unter 20° sollten auf jeden Fall vermieden werden, damit Regen für die Moduloberfläche eine reinigende Wirkung hat und Schnee noch abrutschen kann. [RWE 1995]

Solarthermie

Solarthermie wird mit Hilfe von Sonnenkollektoren gewonnen. Die Kollektoren absorbieren die Sonnenstrahlung und geben die gewonnene Wärme an einen strömenden Wärmeträger wie z.B. Wasser mit Frostschutzmittel ab.

Man unterscheidet im wesentlichen Vakuum-Röhrenkollektoren, Flachkollektoren und Solarabsorber.

Die einfachste Form, der Solarabsorber, besteht lediglich aus schwarzen Kunststoffrohren oder Kunststoffmatten mit Multikanälen, die auf horizontalen oder gering geneigten Flächen installiert werden. Sie sind nur für Temperaturdifferenzen von ca.

15° C mit vertretbaren Verlusten einsetzbar und somit selbst für die Warmwasserbereitung nicht geeignet.

Flachkollektoren bestehen aus Kupferrohren, auf denen Lamellen oder Bleche aufgepreßt sind. Sie besitzen eine schwarze Absorberbeschichtung, sind mit transparentem Sicherheitsglas abgedeckt und in ein Gehäuse mit Wärmedämmung eingebunden. Erhältlich sind Standard-Kollektormodule mit ca. 2 m² Fläche und Großflächenkollektoren mit bis zu 14 m² in einem Stück. Flachkollektoren werden hauptsächlich für die Warmwasserbereitung eingesetzt. [BGW 1997]

Soll auch die Raumheizung im Herbst und Frühjahr mittels Sonnenenergie erfolgen, werden bevorzugt Vakuumkollektoren wegen ihrer geringen Wärmeverluste eingesetzt. Diese geringen Verluste werden durch die Evakuierung der Luft zwischen Absorber und der Außenhülle des Kollektors erreicht. Die Flüssigkeit im Absorber verdampft und steigt zum Wärmetauscher auf, wo sie ihre Energie an den Warmwasserkreislauf abgibt. Es werden Röhrenkollektoren und Flachkollektoren eingesetzt. Röhrenkollektoren haben den Vorteil, daß die Sonnenstrahldurchlässigkeit der Glasröhren bei Schrägeinfall der Sonnenstrahlen höher ist als die einer ebenen Glasscheibe. Ein Vorteil der Vakuumkollektoren gegenüber üblichen Flachkollektoren ist eine höhere Alterungsbeständigkeit der selektiven Absorberschichten, die zu einer allmählichen Verringerung der Leistungsfähigkeit führt.

Der Wirkungsgradvergleich in Abbildung 30 zeigt, welcher Anteil der Bestrahlungsstärke von den Kollektoren als Wärmemenge über den Wärmeträger abgeführt werden kann. Die Unterschiede kommen im wesentlichen durch die Qualität der Wärmedämmung der Kollektoren zustande, welche durch den Wärmeverlustfaktor k beschrieben wird. Mit den erforderlichen Arbeitstemperaturbereichen ergeben sich die o.a. zweckmäßigen Anwendungsbereiche.

Für die Nutzung der solaren Energie zur Warmwasseraufbereitung und Raumheizung sind neben den Kollektoren ein Brauchwasserspeicher mit Wärmetauscher, ein Heizwasserspeicher mit Wärmetauscher, jeweils ein bis zwei Umwälzpumpen, jeweils eine Regelung, Rohrleitungen, Sicherheitseinrichtungen und eine Zusatzheizung erforderlich.

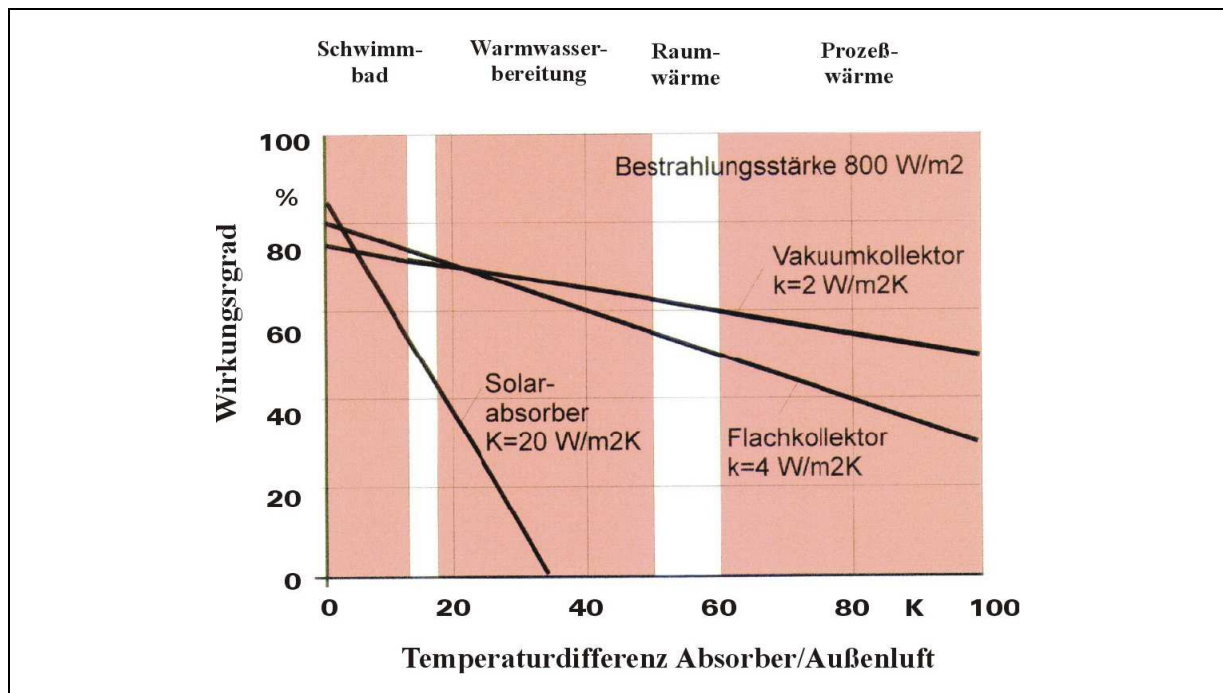


Abbildung 30: Wirkungsgradvergleich und Arbeitstemperaturbereich unterschiedlicher Kollektoren [RWE 1995, S. 17/15]

4.1.2.11 Abwasserwärme

Einer Abwasserreinigungsanlage wird ununterbrochen und in großen Mengen Abwasser zugeleitet, das eine ideale Wärmequelle für Wärmepumpen darstellt und die Nutzung mit einem hohen Wirkungsgrad erlaubt. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit des Wärmeentzuges im Abwasser vor oder nach der Reinigung. Bei einem Wärmeentzug im Zulauf zur Kläranlage sind möglicherweise eine eintretende Verringerung der Absetzeigenschaften in der Vorklärung sowie eine eventuelle Verlangsamung der biochemischen Reinigungsprozesse zu berücksichtigen. Weiterhin führen die starken Verunreinigungen des Rohabwassers zu einem erheblichen Reinigungsaufwand am Wärmetauscher. Der Einsatz im Kläranlagenablauf läßt dagegen keine derartigen Probleme erwarten, da die Abkühlung des gereinigten Abwassers für den Vorfluter sogar eher als positiv zu werten ist.

Da das Wärmeangebot ortsspezifisch stark unterschiedlich ist und auch von der Kläranlagengröße abhängt, ist seine Nutzung im Einzelfall zu bilanzieren. Die tiefste Temperatur, die im Ablauf der Anlagen angesetzt werden kann, beträgt ca. 10°C.

Wärmepumpen erreichen gegenwärtig ein Temperaturniveau von 55°C bis zu 80°C. Sie werden in Kompressions- und Absorptionswärmepumpen unterschieden.

Die Kompressionswärmepumpe besteht aus einem Kreislauf mit Verdampfer, Verflüssiger, Entspannungsventil und Kompressor, der ein Kältemittel als Arbeitsmedium transportiert.

Während die Kompressionswärmepumpe zur Aufrechterhaltung des Wärmeprozesses mechanische Arbeit verbraucht, wird die Absorptionswärmepumpe durch die Zufuhr von Heizwärme angetrieben. An die Stelle des mechanischen Kompressors tritt ein thermischer Verdichter, der aus einem Austreiber sowie dem Absorber besteht.

4.1.2.12 Oberflächennahe Erdwärme

Ebenso wie beim Abwasser kann auch Energie aus der Erde bzw. dem Grundwasser genutzt werden. Wegen der nahezu gleichbleibenden Temperatur sind sie ideale Wärmequellen für den Einsatz von Wärmepumpen.

Die gespeicherte Sonnenenergie im Erdreich kann mittels eines großflächig verlegten Kunststoffrohrsystems ca. 1,50 bis 2,00 m tief im Erdreich parallel zur Oberfläche gewonnen werden. Die Rohre sollten in einem Abstand von ca. 50 cm parallel zueinander eingebracht werden, so daß je m² Entzugsfläche ca. 2,00 m Rohr vorhanden sind. Die Sole wird mittels einer Umwälzpumpe durch das Rohrsystem gefördert, und die gespeicherte Wärme aus dem Erdreich mittels einer Wärmepumpe für die Raumheizung nutzbar gemacht. Welche Wärmeleistung dem Boden entzogen werden kann, hängt stark vom Erdreich und den anstehenden Grundwasserverhältnissen ab. Grundsätzlich eignet sich ein stark mit Wasser angereicherter Lehmboden besonders gut als Wärmequelle; dabei sind Wärmeentzugsleistungen von 20 - 50 W/m² zu erreichen. Stark sandige Böden sind nur bedingt geeignet.

Ebenfalls stark von den Untergrundverhältnissen abhängig ist der Einsatz von vertikalen Erdwärmesonden, die bis zu Tiefen von 100 m reichen. Dem Vorteil des geringen Flächenbedarfs stehen die Nachteile der hohen Kosten für das Bohren oder Rammen (ca. 100 DM/m) und die erforderliche wasserrechtliche Erlaubnis entgegen. Bei günstigen hydrogeologischen Bedingungen können mittlere Sondenleistungen von ca. 100 W/m erreicht werden.

Über Wasser-Wasser-Wärmepumpen kann Wärme dem in der Regel 10°C warmen Grundwasser entzogen werden. Die Nutzung der konstanten Wärme des Grundwassers erfolgt über Förder- und Schluckbrunnen. Grundwasserentnahme und Wiedereinleitung erfordern aber ebenfalls eine Erlaubnis durch die Wasserbehörden.

4.2 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit der Energieträger auf Kläranlagen als wesentlicher Bestandteil zur Bewertung und Konfiguration autarker Energieversorgungssysteme unterliegt verschiedenen Abhängigkeiten, die im folgenden detailliert untersucht werden. Dabei wird nur auf diejenigen Energieträger Bezug genommen, deren Verfügbarkeit auch tatsächliche Abhängigkeiten aufweist.

4.2.1 Zeitliche Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit der Primärenergien oder der gewandelten Formen wird aufgrund von zeitlichen Kriterien wie Tageszeit, Jahreszeit, etc. beeinflusst. Diese Abhängigkeiten lassen sich für die einzelnen Energieträger wie folgt beschreiben:

- **EVU-Strom:** Der Bezug elektrischer Energie ist prinzipiell unabhängig von zeitlichen Kriterien. Der Bezug verursacht jedoch je nach Tages- und Jahreszeit unterschiedliche Kosten, da die Tarife nach Hoch- und Niedertarifzeiten gestaffelt sind.
- **Faulgas:** Der Faulgasanfall schwankt einerseits jahreszeitlich, bedingt durch den jahreszeitlich unterschiedlich hohen Schlammanfall, als auch tageszeitlich, sofern der Schlammabzug aus dem Faulbehälter tageszeitlich nicht kontinuierlich erfolgt. Die relativen Abweichungen im Jahresmittel sind dabei gering, wie aus Abbildung 31 ersichtlich wird.
- **Zweitbrennstoffe:** Für Erdgas, Propangas, Diesel, Heizöl, Biodiesel, Rapsöl sowie Holz bestehen keine zeitlichen Abhängigkeiten.
- **Klärschlamm:** Die Menge des zur Verfügung stehenden Klärschlammes hat insofern zeitliche Abhängigkeiten, als der Betrieb der Schlammwässerung und ggf. der Schlamm Trocknung häufig nur während der Tagschicht sowie teilweise nur werktags erfolgt. Jahreszeitliche Schwankungen werden durch im Jahresverlauf schwankenden Schlammanfall verursacht.
- **Wasserkraft:** Da Wasserkraftwerke auf Kläranlagen direkt im Abwasserweg (Zu- oder Ablauf) der Kläranlage eingesetzt werden, ist die Nutzung der Wasserkraft (unter Berücksichtigung zeitlicher Verzögerung) proportional zum Zufluß einer Kläranlage, dessen exemplarischen Tagesverlauf Abbildung 32 zeigt.

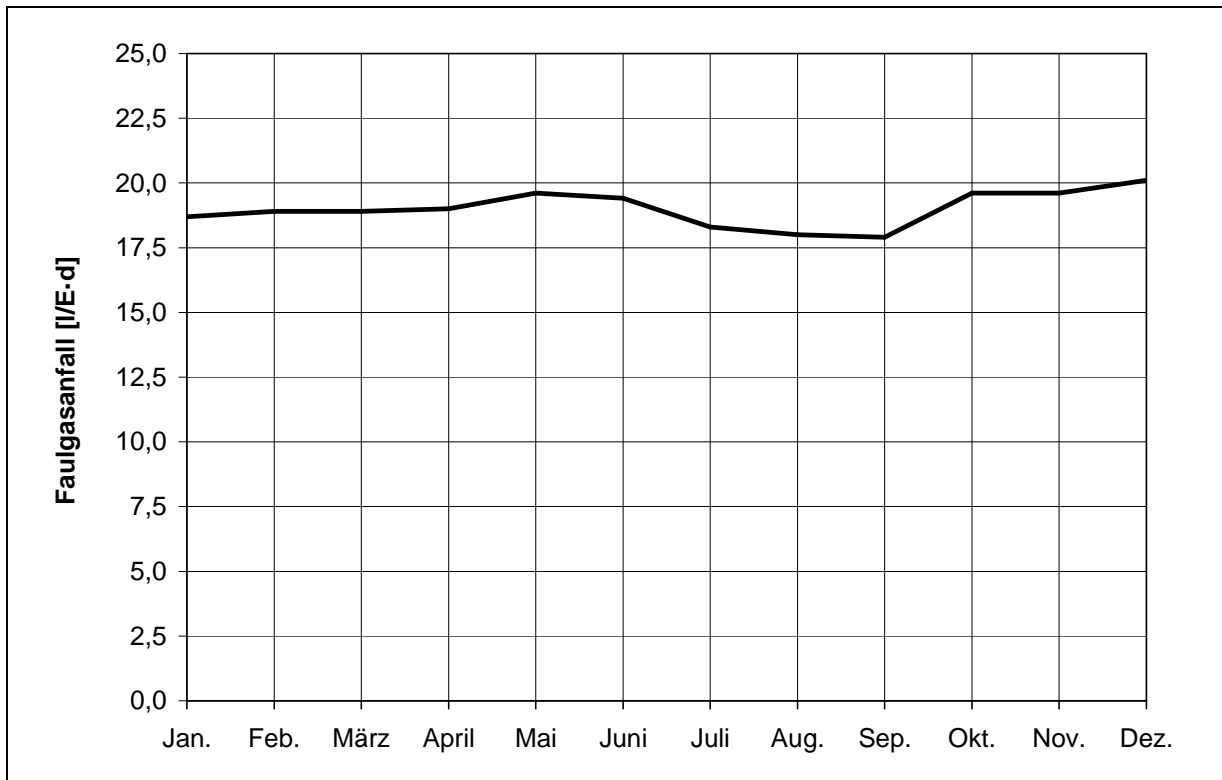


Abbildung 31: Jahresganglinie des mittleren täglichen Faulgasanfalls [DICHTL ET AL. 1997]

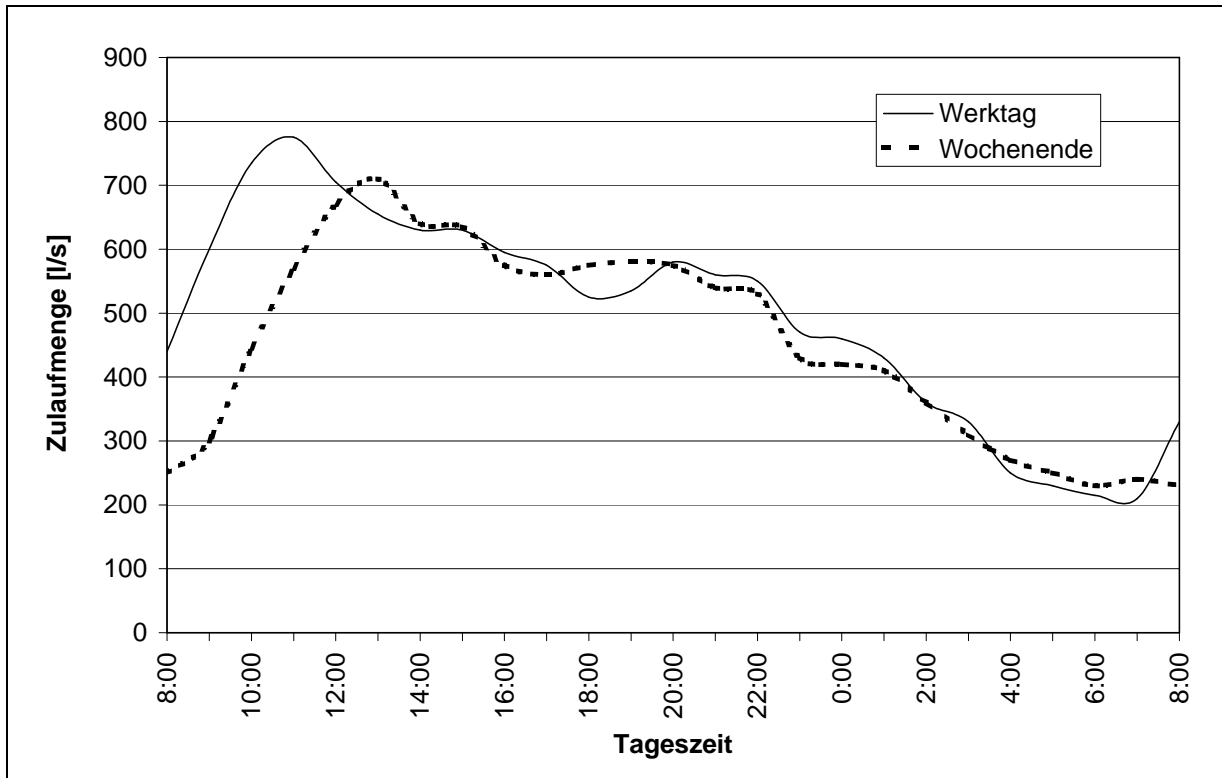


Abbildung 32: Exemplarische Tagesganglinie des Trockenwetterzulaufes für einen Werk- und einen Wochenendtag

- **Windenergie:** Die Verfügbarkeit von Windenergie hat eine zeitliche Abhängigkeit zur Jahreszeit. Die Schwankungen des Windenergieangebotes im Laufe eines Jahres werden durch den regionalen Windindex veranschaulicht, welcher mit Hilfe der Betreiber-Datenbasis des Bundesverbandes Windenergie ermittelt wird. Betriebsergebnisse von 2.000 Windanlagen werden monatlich zusammengetragen und daraus Mittelwerte errechnet, die als Vergleichswerte für das monatliche Windgeschehen dienen (= Windindex). In Abbildung 33 ist für das Jahr 1997 der regionale Windindex für das nordrhein-westfälische Flachland exemplarisch dargestellt.

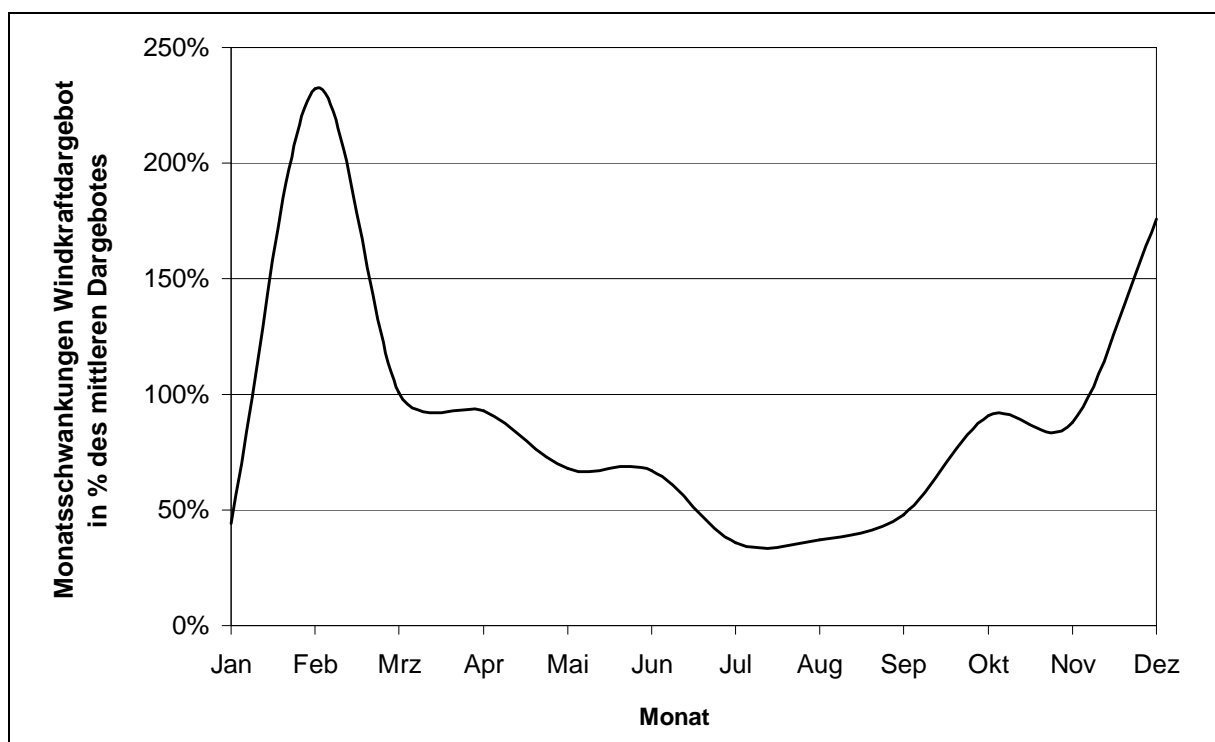


Abbildung 33: Monatsschwankungen des Windkraftdargebotes in % des mittleren Dargebotes für das nordrhein-westfälische Flachland [BUNDESVERBAND WINDENERGIE 1998, S. 135]

- **Solarenergie:** Die Verfügbarkeit von Solarenergie zeigt eine zeitliche Abhängigkeit von der Dauer sowie von der Intensität der Sonneneinstrahlung. Die Abhängigkeiten von der Tageszeit ist in Abbildung 34 dargestellt. Die Dauer der Helligkeitsphase des Tages ist hinreichend bekannt und verschiebt sich im Verlauf eines Jahres; zudem ist der Azimutwinkel der Sonne jahreszeitabhängig (vgl. Abbildung 35). Die Unstetigkeiten in den Sonnenauf- bzw. -untergangszeiten resultieren aus den Sommer- bzw. Winterzeitumstellungen. Eine Zusammenfassung der jahreszeitlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlungsintensität erfolgt in Abbildung 36.

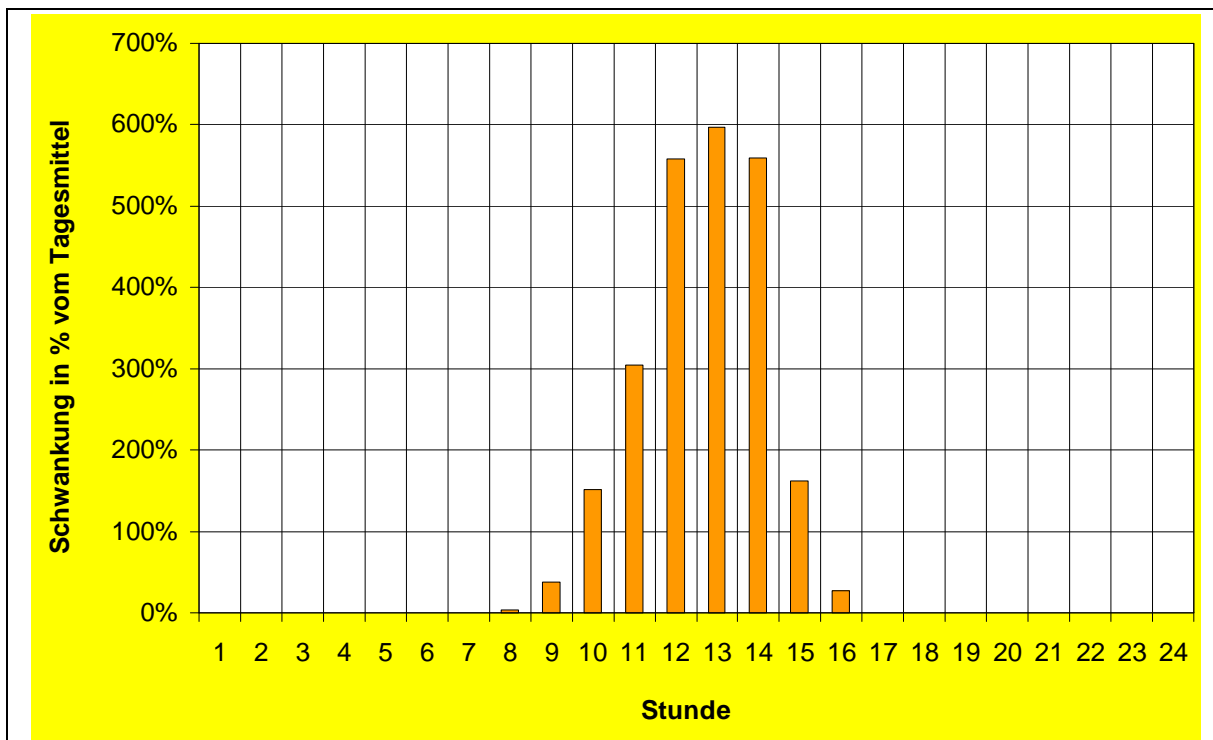


Abbildung 34: Tagesschwankungen des Solarenergiedargebotes in % des mittleren täglichen Solarenergiedargebotes (mittlere Werte)

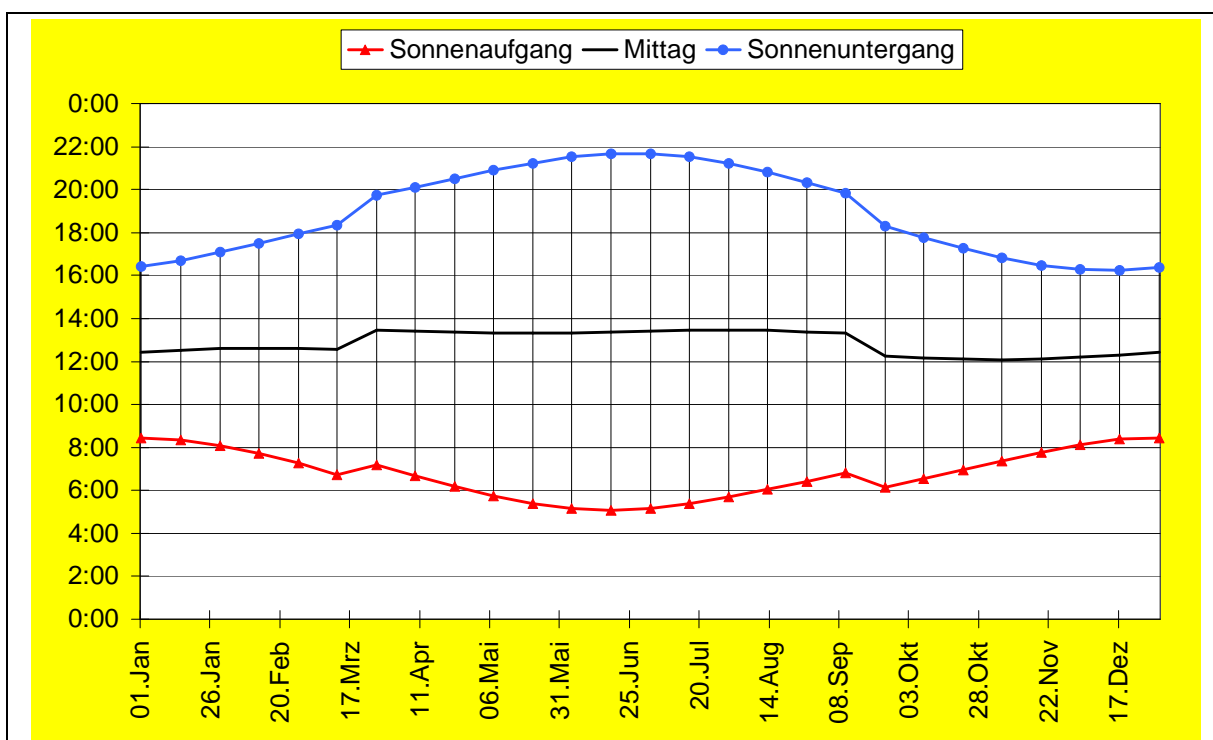


Abbildung 35: Verlauf von Sonnenaufgang und Sonnenuntergang in Deutschland (Essen)

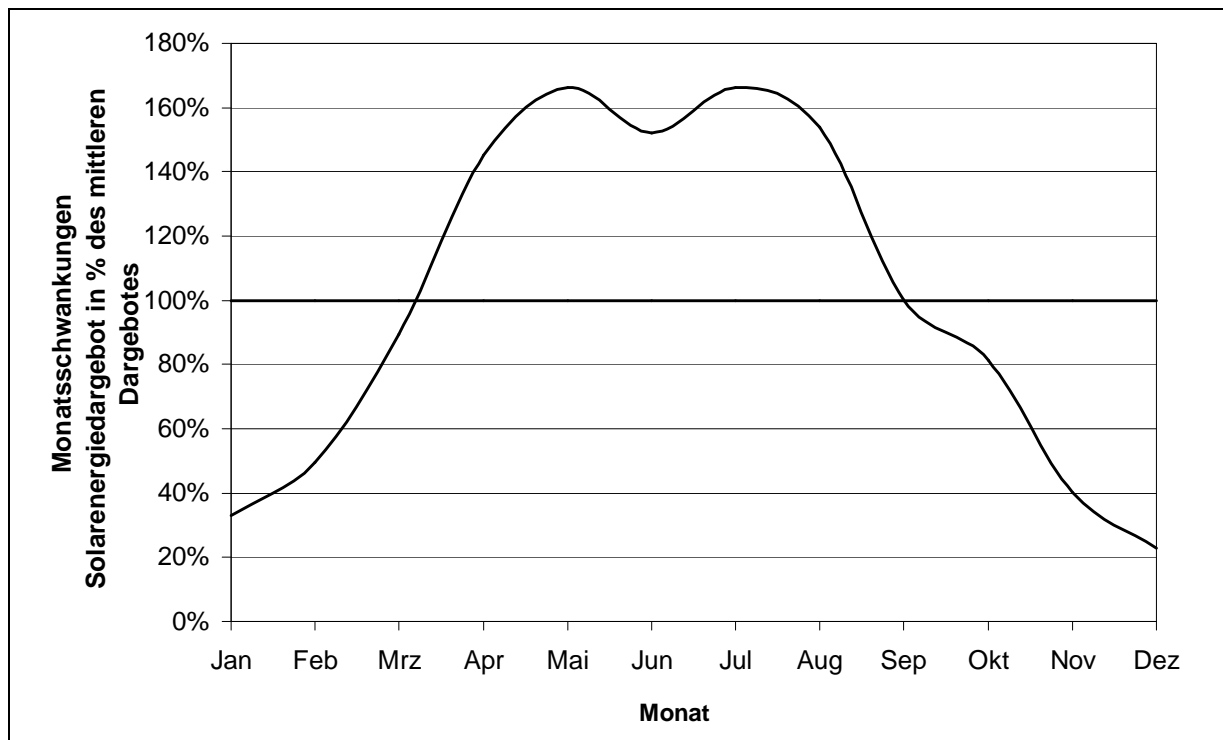


Abbildung 36: Solarenergiedargebot in % des mittleren Dargebotes
[RWE 1995, S. 17/5]

- **Abwasserwärme:** Die im Abwasser gespeicherte thermische Energie ist abhängig von Temperatur und Menge des der Kläranlage zufließenden Abwassers. Die Abwassermenge schwankt im tageszeitlichen Verlauf (vgl. Abbildung 32). Der Verlauf der Temperatur des Abwassers ist i.d.R. tageszeitlich gesehen konstant, weist aber jahreszeitliche Unterschiede auf. Während in den Sommermonaten die durchschnittliche Temperatur bei etwa 18 °C liegt, sinkt sie in den Wintermonaten auf ca. 10 °C ab. Dies verdeutlicht der in Abbildung 14 dargestellte jahreszeitliche Verlauf der Rohschlammtemperatur, der weitgehend mit der Abwassertemperatur übereinstimmt. Bei kleineren Kläranlagen und abhängig von der geographischen und topographischen Lage können diese Temperaturbereiche hiervon abweichen.

4.2.2 Quantitative Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit des Betrages der Primärenergie oder deren gewandelte Form wird teilweise von spezifischen Randbedingungen beeinflusst. Diese Abhängigkeiten lassen sich wie folgt beschreiben:

- **EVU-Strom:** Prinzipiell ist elektrische Energie fast unbegrenzt vom EVU lieferbar. Vertraglich begrenzt wird die Menge der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie durch die beim EVU beantragte maximale Leistungsbereitstellung. Die

Leistungsbereitstellung einer Kläranlage liegt je nach Ausbaugröße etwa zwischen 3 und 7 kW/1.000 E [DICHTL ET AL. 1997]. Technologisch begrenzt wird die Verfügbarkeit der elektrischen Leistung durch die technische Ausgestaltung des Energieversorgungsanschlusses (durch das EVU) sowie auf der Verbraucherseite jeweils durch Kabelquerschnitte, Mittel- und Niederspannungsschaltanlagen, Trafostationen etc.

- Faulgas:** Die verfügbare Faulgasmenge ist im wesentlichen von der Menge und Qualität des anfallenden Rohschlammes, der Verweilzeit des Schlammes im Faulturm sowie der Temperatur im Faulturm abhängig. Der Faulgasanfall liegt nach DICHTL ET AL. (1997) im Jahresmittel bei 17,3 l/(E·d). Eine Steigerung der Faulgasproduktion kann eventuell durch einen höheren Primärschlammabzug oder einen niedrigeren Mineralisierungsgrad des Überschussschlammes erreicht werden. Höhere Erträge über 25 l/(E·d) bedingen einen hohen organischen Anteil z.B. durch industrielle Abwässer oder dem Faulprozess zugeführte externe Substrate (Öle, Fette, etc.) aus z.B. lebensmittelverarbeitenden Betrieben. Die Zusammenhänge zwischen Schlammalter, organischem Anteil im Rohschlamm und Faulgasanfall zeigt Abbildung 37.

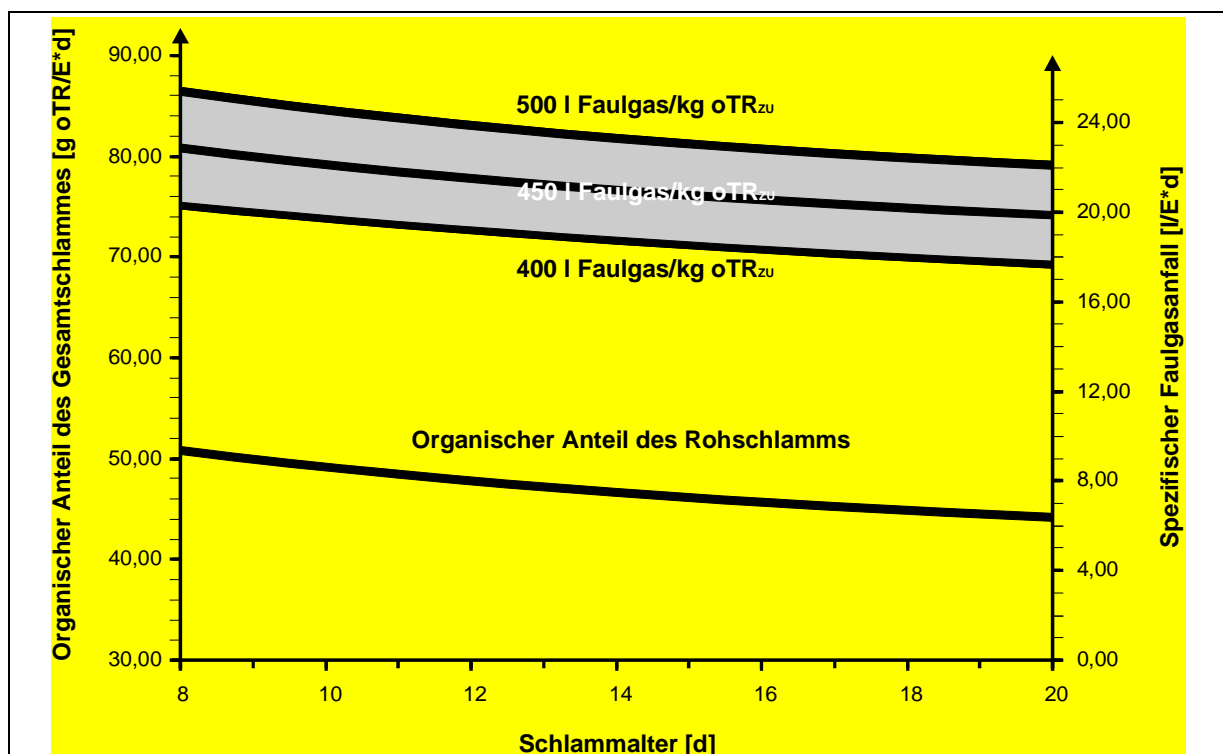


Abbildung 37: Einfluß des Schlammalters auf den spezifischen Faulgasanfall [BRAUTLECHT 2000]

- **Erdgas:** Prinzipiell ist Erdgas über das Versorgungsunternehmen fast unbegrenzt lieferbar. Vertraglich begrenzt wird die Bezugsleistung durch die vereinbarte Bestelleistung. Technologisch begrenzt wird die verfügbare Leistung durch die technische Ausgestaltung des Erdgasanschlusses seitens des Energieversorgers und auf der Verbraucherseite durch das gewählte Druckniveau, ggf. eingesetzte Druckwandler- und Regeleinrichtungen, Dimensionierung von Rohrleitungen etc.
- **Zweitbrennstoffe:** Prinzipiell liegen für die weiteren Zweitbrennstoffe wie Propangas, Diesel, Heizöl, Biodiesel und Rapsöl keine quantitativen Abhängigkeiten vor. Durch den Fachhandel erfolgt die Bereitstellung in der Regel in jeder gewünschten Menge.

Technologische Grenzen bilden hier lediglich die Volumina der beim Endkunden vorhandenen Speicherkapazität. Typische Größenordnungen für Propangastanks liegen bei 20 bis 120 m³, für Diesel- und Heizöltanks bei 1.000 bis 10.000 l sowie für Biodiesel und Rapsöl ebenso bei 1.000 bis 10.000 l.

- **Klärschlamm:** Die anfallende Schlammmenge einer Kläranlage richtet sich nach Zusammensetzung des Abwassers, zufließender Abwassermenge sowie Behandlungsverfahren. Im Mittel fallen bei Belebungsanlagen als Rohschlamm etwa 80 g/(E·d) TS mit 51 - 56 g/(E·d) oTS an. Nach der Faulung verbleibt noch eine Gesamtschlammmenge von ca. 50 g/(E·d) TS mit 21 - 26 g/(E·d) oTS. [MÖLLER 1986].
- **Wasserkraft:** Die Verfügbarkeit der Wasserkraft hängt von der zur Verfügung stehenden geodätischen Fallhöhe h und der Wassermenge Q ab. Die Wassermenge Q selbst ist vom Zulauf der Kläranlage und damit indirekt von der Anschlußgröße, von der Art des Entwässerungssystems (Misch- oder Trennkanalisation) sowie dem Fremdwasseranteil abhängig. Die Zulaufwassermengen für Kläranlagen liegen bei 100 - 300 l/(E·d). Die erzielbare elektrische Leistung beträgt:

$$P_{el} = \eta_{ges} \cdot g \cdot \rho \cdot Q \cdot h$$

mit: Wirkungsgrad (Rohrleitung, Turbine, Generator) $\eta_{ges} \approx 0,8$

Fallbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Dichte Wasser $\rho = 1 \text{ kg/l}$

Zufluß Q [l/s]

Höhendifferenz h [m]

Erzielbare elektrische Leistungen für verschiedene geodätische Fallhöhen in Abhängigkeit von der Zulaufmenge sind aus Abbildung 44 ersichtlich.

- **Windenergie:** Die im Wind enthaltene kinetische Energie steigt exponentiell mit der Windgeschwindigkeit v und proportional zur durchströmten Fläche A . Die erzielbare elektrische Leistung errechnet sich wie folgt:

$$P_{el} = \eta_{ges} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

mit: Wirkungsgrad (Rotor, Turbine, Generator) $\eta_{ges} \approx 0,35$

Dichte Luft $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$

Rotorfläche $A = \pi \cdot (d/2)^2 \text{ [m}^2\text{]}$

Windgeschwindigkeit $v \text{ [m/s]}$

Eine Nutzung der Windkraft wird durch die anstehenden Windgeschwindigkeiten begrenzt. Unterhalb einer spezifisch für eine Windkraftanlage vorgegebenen Mindest-Windgeschwindigkeit ist technologisch bedingt ein Betrieb nicht möglich. Oberhalb einer spezifisch für eine Anlage vorgegebenen Maximal-Windgeschwindigkeit ist technologisch ein sicherer Betrieb ebenso nicht mehr möglich. Diese Grenzen liegen i.d.R. zwischen 3 und 25 m/s, wobei die Nennwindgeschwindigkeit je nach Hersteller meist zwischen 11 und 15 m/s liegt [BUNDESVERBAND WINDENERGIE 1999]. Die erzielbaren elektrischen Leistungen für verschiedene Rotordurchmesser in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit zeigt Abbildung 38.

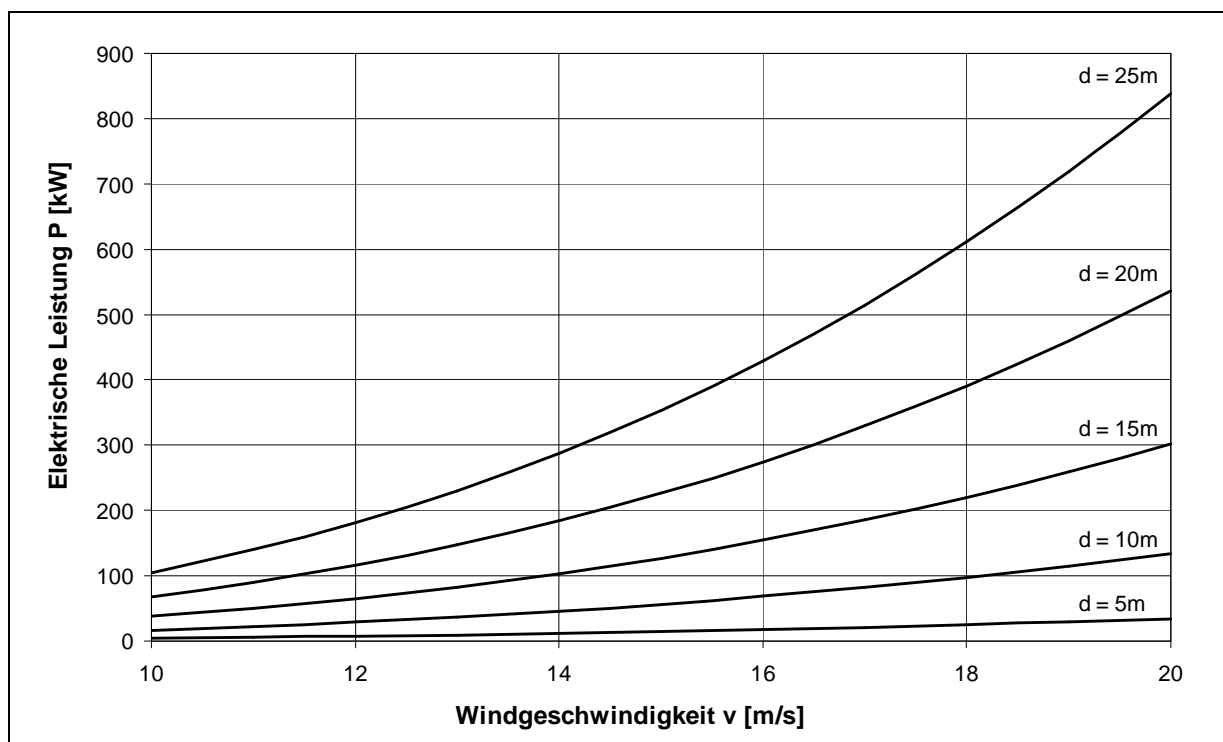


Abbildung 38: Elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit für verschiedene Rotordurchmesser

- **Solarenergie:** Für die Solarenergie steht im Jahresmittel in Deutschland eine Energiedichte von 930 bis 1.200 kWh/m²-a zur Verfügung (vgl. Abbildung 40).
- **Abwasserwärme:** Die im Abwasser gespeicherte Wärmeenergie ist quantitativ abhängig von Menge und Temperatur des zur Verfügung stehenden Abwassers. Die zur Verfügung stehende thermische Energie beträgt gemäß der spezifischen Wärmekapazität von Wasser 1,16 Wh/(l·K).
- **Oberflächennahe Erdwärme:** Die im Erdreich gespeicherte Wärmeenergie ist quantitativ abhängig von der Temperatur des Erdreiches, die als nahezu konstant anzusehen ist, und je nach Verfahren von der Fläche des Rohrsystems bzw. der Tiefe der Erdwärmesonde. Die zur Verfügung stehende thermische Energie beträgt bei großflächig verlegten Rohrsystemen etwa 20 - 50 W/m² und bei Erdwärmesonden ca. 100 W/m. Bei Erdwärmesonden liegt die Grenze bei einer Tiefe von etwa 100 m.

4.2.3 Geographische Verfügbarkeit

Die geographische Lage beeinflusst die Verfügbarkeit der Primärenergie bzw. deren gewandelter Form. Bei folgenden Energieträgern liegen geographische Abhängigkeiten vor:

- **Wasserkraft:** Für Wasserkraftanlagen bestehen die geographischen Abhängigkeiten in der Beeinflussung der verfügbaren geodätischen Fallhöhe und Wassermenge. Die Fallhöhen sind in Gebirgsregionen häufig größer. Es ist jedoch aufgrund der unterschiedlichen Topographie keine allgemeingültige Aussage möglich.
- **Windenergie:** Die Windintensität und die Windverteilung weisen geographische Unterschiede auf. Das durchschnittliche Jahresmittel der Windgeschwindigkeit steigt geographisch in der BRD von Süden nach Norden an und ist insbesondere in den Küstenregionen am größten. Diese Tendenz wird durch Abbildung 39 verdeutlicht. Die geographische Abhängigkeit darf jedoch anhand dieser Abbildung nicht örtlich bewertet werden. Für detaillierte Aussagen zu örtlichen Verhältnissen sollten Meßergebnisse des Deutschen Wetterdienstes herangezogen bzw. Messungen vor Ort durchgeführt werden.

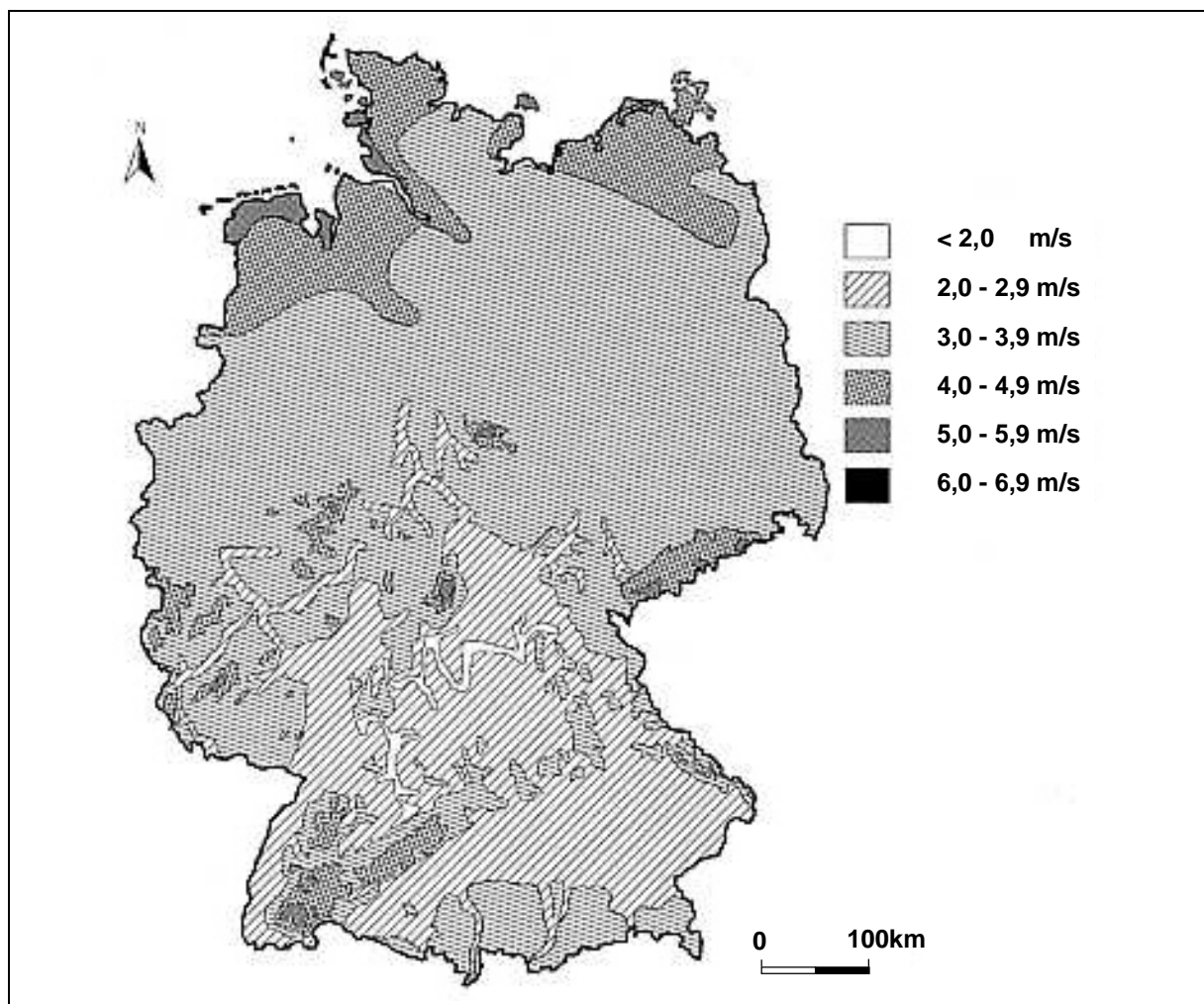


Abbildung 39: Jahresmittel der Windgeschwindigkeiten in der BRD [ALLNOCH 1993]

- **Solarenergie:** Die Verfügbarkeit der Solarenergie weist geographische Abhängigkeiten unterschiedlicher mittlerer Strahlungsintensität auf, die aus der folgenden Abbildung 40 für Nordrhein-Westfalen ersichtlich sind.

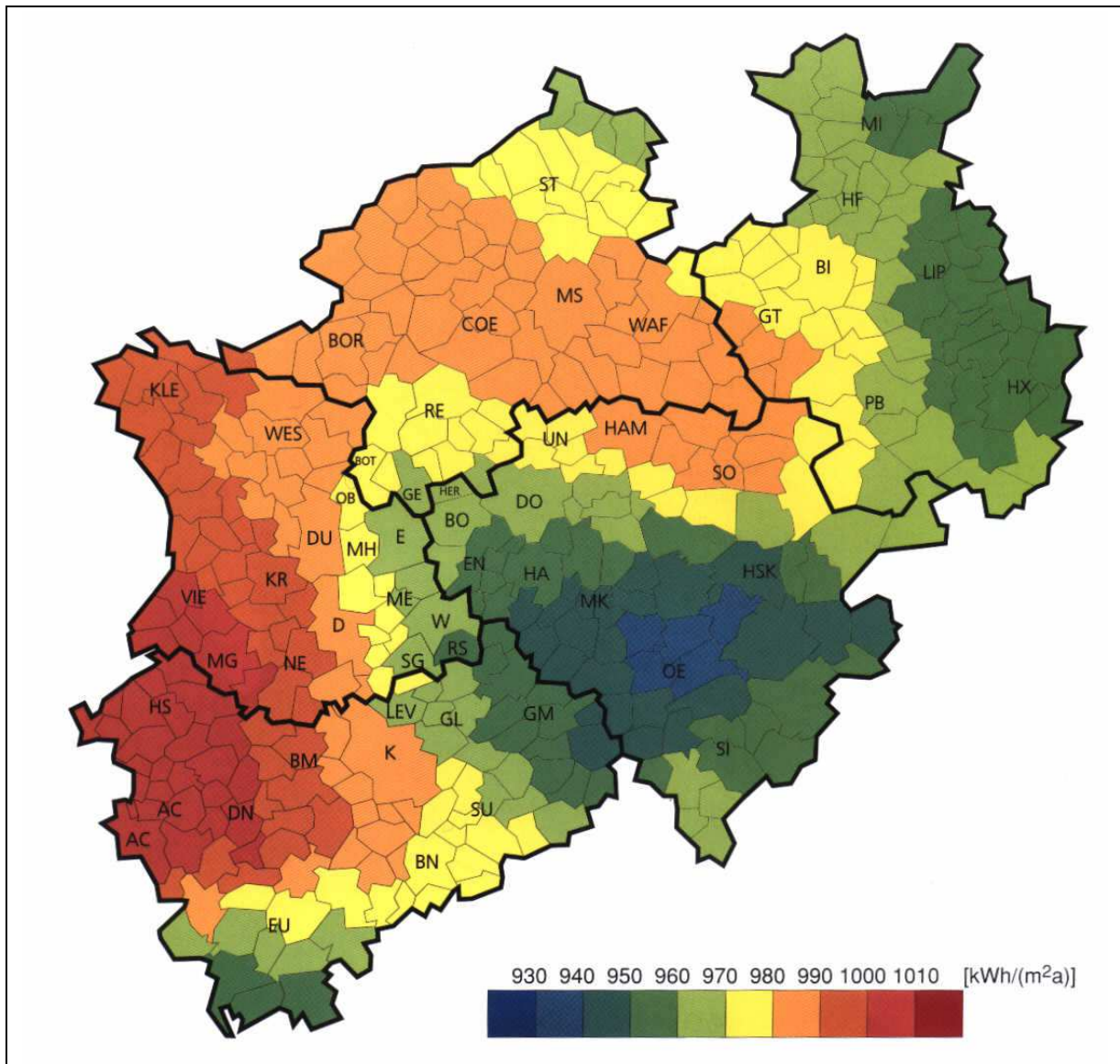


Abbildung 40: Räumliche Verteilung der Globalstrahlungssumme im Jahresmittel für Nordrhein-Westfalen [ENERGIEAGENTUR NRW 1998]

- **Abwasserwärme:** Die geographisch abhängige Verfügbarkeit der Abwasserwärme ist durch unterschiedliche Abwassertemperaturen, die wiederum vorherrschend durch die mittleren Jahreslufttemperaturen beeinflusst werden, gegeben.

4.2.4 Witterungsbedingte Verfügbarkeit

Witterungsbedingungen, wie beispielsweise Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftdruck und -feuchtigkeit, Niederschlag, Bewölkung, etc., beeinflussen die zur Verfügung stehende Primärenergie oder deren gewandelte Form für folgende Energieträger:

- **Wasserkraft:** Die durch Wasserkraftnutzung erzeugte Energie weist eine Abhängigkeit von Regenereignissen mit der damit verbundenen höheren Wassermenge zur Kläranlage auf, sofern Regenwasser in das Kanalsystem des Kläranlagenzulaufs gelangt.
- **Windenergie:** Die Windgeschwindigkeit ist abhängig von regionalen und überregionalen Witterungsbedingungen, da Wind beim Aufeinandertreffen von Luftmassen unterschiedlicher Temperaturen und Luftdrücke entsteht.
- **Solarenergie:** Die Intensität der Sonneneinstrahlung ist abhängig von der Bewölkung.
- **Abwasserwärme:** Die witterungsbedingte Verfügbarkeit thermischer Energie hängt von Regenereignissen und der damit verbundenen höheren Wassermenge ab. Die Temperatur des Abwassers kann im Einzelfall von witterungsbedingt unterschiedlichen Lufttemperaturen abhängen.

4.2.5 Verfahrensbedingte Verfügbarkeit

- **Faulgas:** Der Faulgasanfall hängt zum einen wesentlich vom gewählten Abwasserreinigungsverfahren ab, z.B. von der Zeit der Vorklärung und dem Belebungsverfahren (Nitrifikation, Schlammalter etc.). Zum anderen hängt der Faulgasanfall wesentlich von dem gewählten Verfahren der Schlammbehandlung ab, da z.B. bei simultaner Stabilisierung kein Faulbehälter zur Produktion von Faulgas betrieben wird. Der Faulgasanfall in Abhängigkeit des gewählten Reinigungsverfahrens ist bereits in Kapitel 2.5 beschrieben (vgl. Tabelle 1; Abbildung 10). Die erzeugbare Faulgasmenge ist verfahrensbedingt von der Einhaltung der optimalen Schlammtemperatur (ca. 37 °C) und der Aufenthaltszeit im Faulbehälter (ca. 20 d) abhängig.
- **Klärschlamm:** Die verfahrensbedingte Verfügbarkeit von Klärschlamm hängt von dem gewählten Abwasserreinigungsverfahren hinsichtlich der Quantität und dem gewählten Ort des Schlammabzuges ab sowie von der gewählten Verfahrenstechnik der Schlammmentwässerung mit den damit verbundenen unterschiedlichen Entwässerungsergebnissen. Je nach Entwässerungsgrad sind in einer nachge-

geschalteten Schlammrocknung unterschiedliche Energien aufzuwenden. Zudem erfordert eine nachgeschaltete Verbrennung in Abhängigkeit der erzielten Entwässerungsergebnisse unterschiedliche thermische Energieaufwendungen. Der Heizwert von Klärschlamm sinkt, wie in Abbildung 28 dargestellt, mit steigendem Wassergehalt.

4.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

4.3.1 Grundsätzlicher Vorrang der Abwasserreinigung

Bei unterschiedlichen Konzepten zur Energiebereitstellung (EVU-Versorgung - Eigenversorgung) muß selbstverständlich die sichere Einhaltung der im Einleitungsbescheid festgelegten Grenzwerte immer im Vordergrund der Betrachtungen stehen und als wichtige Randbedingung beachtet werden.

Dies mag auf den ersten Blick selbstverständlich erscheinen, jedoch bei der Entscheidung über

- die notstromberechtigten Verbraucher einer Kläranlage,
- die Reihenfolge der Wiedereinschaltung der Aggregate nach einem EVU-Netzausfall,
- die evtl. Abschaltungen von Aggregaten (welche Aggregate, wie lange) durch eine Maximumüberwachung zur Reduzierung des elektrischen Spitzenleistungsbedarfes,
- die Redundanz der elektrischen Einspeiseleitungen (Stich-/Schleife oder gar dreiseitige Einspeisung),
- Anzahl, Dimensionierung und Regelung der Notstrom-/Eigenstromversorgungsaggregate,
- die Dimensionierung der **Unabhängigen Strom-Versorgungsanlage** (USV-Anlage) sowie
- die Nutzung der Wärme des Abwassers mit einer Wärmepumpe

wird die Frage nach der Gefährdung der Grenzwerte aus dem Erlaubnisbescheid neben sicherheitstechnischen Kriterien (Zuschaltung der BHKW-Anlage bei EVU-Netzausfall/Netzwiederkehr, Synchronisation zum EVU-Netz bzw. bei Inselbetrieb mit mehreren Aggregaten zur Eigenversorgung) zum einem wesentlichen Energiemanagementkriterium.

4.3.1.1 Wasserhaushaltsgesetz, Abwasserabgabengesetz und Strafgesetzbuch

Im Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (= WHG; Wasserhaushaltsgesetz), in der Fassung der Bekanntmachung vom 12. November 1996 (BGBl. I Nr. 58 vom 18.11.1996 S. 1695), werden die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Gewässerreinigung zusammen mit der Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (AbwV), in der Fassung vom 9. Februar 1999 (BGBl. I Nr. 6 vom 18.02.1999 S. 86), festgelegt.

In den zur AbwV zugehörigen Anhängen (z.B. Anhang 1, Gemeinden) sind konkrete Konzentrationsgrenzwerte für die Abwasserreinigung genannt, die jedoch in Einzelfällen durch die für jede Kläranlage im Erlaubnisbescheid festgelegten Grenzwerte auch unterschritten werden können. Das Nähere regeln die Landeswassergesetze (=LWG), die auch die Durchführungsregelungen für die Erhebung der Abwasserabgabe entsprechend dem Abwasserabgabengesetz (= AbwAG; Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer) enthalten.

Mit den o.a. Festlegungen zur Abwasserreinigung im WHG hat die Bundesrepublik Deutschland die EG-Richtlinie 91/271/EWG des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser vom 21. Mai 1991 (ABl. EG vom 30.05.1991 Nr. L 135 S. 40) zur Wasserreinigung in Landesrecht umgesetzt.

Verstöße gegen die Einhaltung der Einleiteerlaubnismerte (z.B. durch ein fehlerhaftes Energiemanagement) können nach §§ 325/326 des Strafgesetzbuches (StGB) als Umweltgefährdung bzw. schwere Umweltgefährdung strafrechtlich geahndet werden.

4.3.1.2 Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)

Laut Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) vom 12. Februar 1990 (BGBl. I Nr. 6 vom 20.02.1990 S. 205), zuletzt geändert am 18. August 1997 durch Artikel 7 des Gesetzes zur Änderung des Baugesetzbuchs und zur Neuregelung des Rechts der Raumordnung (Bau- und Raumordnungsgesetz 1998 - BauROG) (BGBl. I Nr. 59 vom 25.08.1997 S. 2081), sind Kläranlagen mit mehr als 50.000 Einwohnerwerten einer Umweltverträglichkeitsprüfung zu unterziehen. Die Umweltverträglichkeitsprüfung kann einen erheblichen Einfluß auf den Energiebedarf (z.B. zusätzlicher Bedarf durch Abluftbehandlung) und auf die Energieverbrauchsdeckung (z.B. Zulässigkeit von Windkraftanlagen) ausüben.

4.3.2 Vertragliche Gestaltung der Energieversorgung einer Kläranlage

4.3.2.1 Vertragsrecht (Bürgerliches Gesetzbuch, VOL)

Öffentliche Lieferungen und Leistungen sind nach der VOL dann EG-weit öffentlich auszuschreiben, wenn der voraussichtliche Lieferumfang ohne Mehrwertsteuer mehr als 400.000 Euro beträgt.

Da die meisten Kläranlagenbetreiber derzeit noch durch (langfristige) Lieferverträge an die EVU gebunden sind, wird sich der freie Energiemarkt erst langsam durchsetzen.

Für die Vertragsgestaltung sind §§ 145-157 des Bürgerlichen Gesetzbuches (=BGB) grundlegend.

Gemäß des neuen Energiewirtschaftsgesetzes ist auch für leitungsgebundene Versorgung (Strom, Gas) ein freier Markt erwünscht. Der zukünftige Energiemarkt wird sich von dem derzeitigen Energiemarkt mit den EVU-Gebietsmonopolen unterscheiden, da ein EG-weiter Wettbewerb unter Einbeziehung von Maklern (§§ 93 ff HGB), Terminmarkt, Börsenhandel und Kundengruppenbildung zu erwarten ist (s. Abbildung 41).

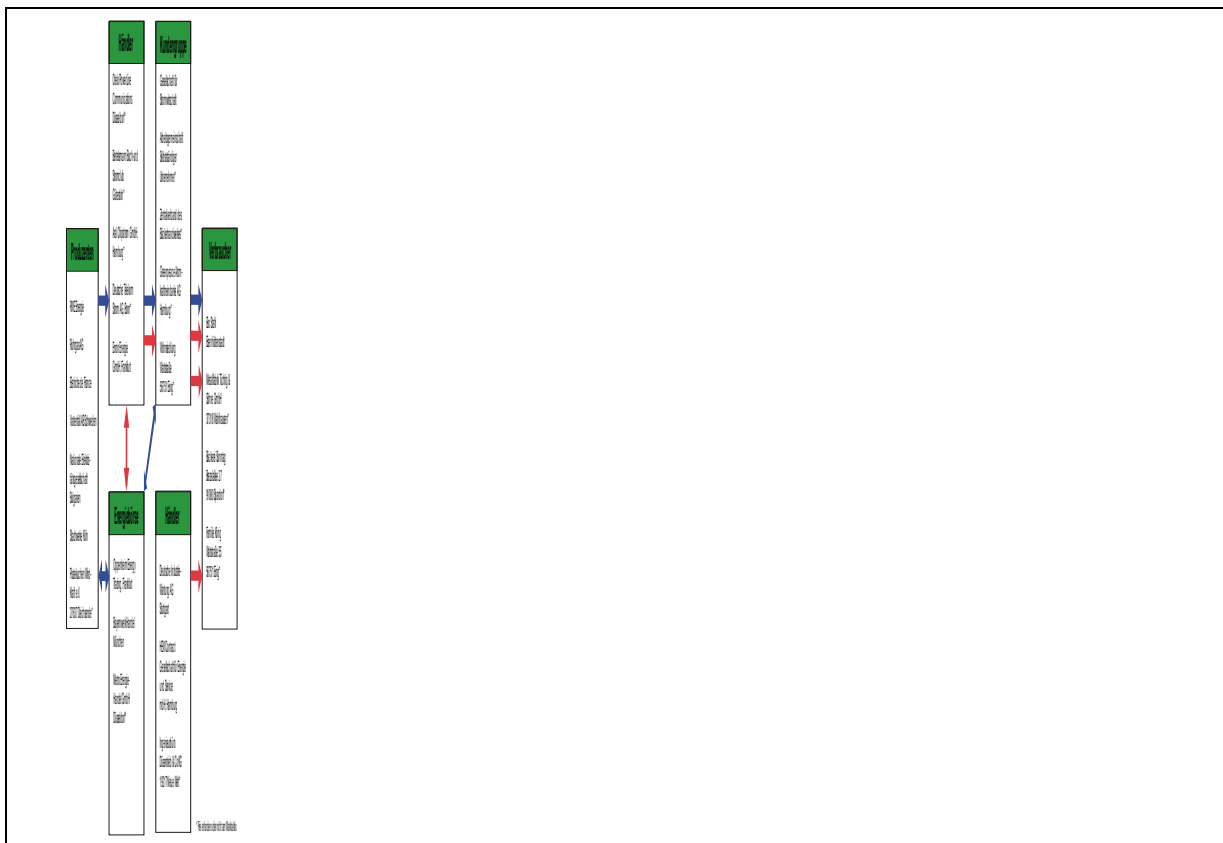


Abbildung 41: Zukünftiger Energiemarkt [LAMPE 1998]

4.3.2.2 Energiewirtschaftsgesetz und Stromeinspeisungsgesetz

Mit der Neuregelung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) vom 24. April 1998 wurde die Liberalisierung des Energiemarktes lt. Richtlinie 96/92/EG des Europäischen Rates und Parlaments in deutsches Recht umgesetzt. Ziel des Energiewirtschaftsgesetzes ist lt. § 1 EnWG eine sichere, umweltverträgliche und kostengünstige Versorgung mit leitungsgebundener Energie (Strom, Gas).

Die Energieversorger der allgemeinen Versorgung müssen nach § 9 EnWG „Rechnungslegung der Energieversorgungsunternehmen“ mit Inkrafttreten des Gesetzes in ihren Buchführungen getrennte Konten für folgende Bereiche führen:

- Erzeugung,
- Übertragung und Verteilung,
- Aktivitäten außerhalb des Elektrizitätsbereichs.

Die derzeit noch geltenden Konzessionsverträge (zwischen EVU und Kommunen) und Demarkationsverträge (zwischen zwei EVU) bleiben davon unberührt und behalten bis Vertragsende Gültigkeit (EnWG Artikel 4 Übergangsvorschriften, § 1).

Die Verbändevereinbarung soll das Verhältnis EVU-Lieferanten-Kunden auf unbürokratische Weise klären; ein spezieller Erlaß auf Bundesebene ist nicht notwendig. In Abhängigkeit von den Liefermengen und Lieferübergabepunkten, maßgeblich sind die Luftlinienentfernungen, werden für die Stromdurchleitung spez. Preise für Dienstleistungen, sog. „Briefmarken“ - z.B. für die Übergabe auf 110 kV-, 10 kV- oder 0,4 kV-Ebene - nach Spitzenlast, nach Grenzentfernungen, etc. berechnet, die der Lieferant dem „Dienstleister“ bei Durchleitung zu einem Kunden zu entrichten hat. Der Kunde hat dabei nur ein Vertragsverhältnis zum Lieferant.

Seit dem 1.1.2000 gilt eine novellierte Verbändevereinbarung [BDI ET AL. 1999] für die Bestimmung der Netznutzungsentgelte. Darin wird die Berechnung der Netznutzungsentgelte gegenüber der vorher geltenden Verbändevereinbarung wesentlich vereinfacht: Statt der entfernungsabhängig zu ermittelnden Netznutzungskosten werden für den deutschlandinternen Stromhandel nur noch 2 Handelszonen (Nord und Süd) gebildet - für die Überschreitung einer Handelszonenengrenze sowie für den Außenhandel werden je 0,25 DPf/kWh fällig. Dazu hat jeder Stromempfänger für die Netznutzung eine jährliche Netznutzungspauschale zu bezahlen, die nach Spannungsebene (Hoch-, Mittel- bzw. Niederspannungsebene), Spitzenleistung und jährlicher Nutzungsdauer („Gleichzeitigkeitsgrad“) bestimmt wird.

Der Gasmarkt ist aufgrund der unterschiedlichen Gasqualitäten (H-Gas, Lo-Gas) und Druckstufen inhomogener gestaltet als der Elektrizitätsmarkt. Zudem können Gasspeicher zur Vergleichmäßigung des Energiebezuges genutzt werden. Grundsätzlich gelten für den Gasmarkt wie für den Strommarkt jedoch die gleichen rechtlichen Rahmenbedingungen.

Da die benötigte Leistung einer Kläranlage im zeitlichen Verlauf stark schwankt, z.B. treten Leistungsspitzen bei Regenwetterzulauf und bei Schmutzfrachtmaxima auf, führt eine Eigenstromerzeugung im Netzparallelbetrieb zu zeitweiliger Einspeisung dieses Stroms in das EVU-Netz (z.B. BHKW ohne Leistungsregelung, fehlendes Lastmanagementsystem zur Steuerung des Leistungsbedarfs, Windkraftanlage bei Starkwind nachts). Die Stromeinspeisung ist mit dem EVU hinsichtlich

- der technischen Voraussetzungen (Sicherheitsstandards bei Netzfreeschaltung) und
- der Stromeinspeisevergütung

zu klären. Die Abnahme- und Vergütungspflicht für die Einspeisung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien richtet sich gemäß Artikel 1 des EnWG nach dem Stromeinspeisegesetz (StromEG) bzw. mit Inkrafttreten des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien vom 29. März 2000 nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz [N.N. 2000]. Ziel dieser Gesetzesänderung ist es, neben der Sicherung des Betriebs laufender Anlagen, auf allen Gebieten der Verstromung erneuerbarer Energien eine dynamische Entwicklung einzuleiten und mittel- bis langfristig die Wettbewerbsfähigkeit mit konventionellen Energieträgern herbeizuführen. Die Vergütungsregelung des EEG baut auf der Systematik des Stromeinspeisungsgesetzes auf und orientiert sich an den Empfehlungen der Europäischen Kommission in dem Weißbuch „Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energien“. Die im EEG vorgesehenen Vergütungen sind nach Energieträgern, Standorten und Anlagengrößen differenziert, degressiv ausgestaltet sowie zeitlich begrenzt. Der Schwerpunkt der Arbeiten zu dem vorliegenden Vorhaben erfolgte vor Inkrafttreten des EEG, so daß der Rechtsstand und die Vergütungsregelungen des Stromeinspeisegesetzes hier Berücksichtigung finden.

Die Einspeisevergütung beträgt nach StrEG für die über Windkraft und Solarenergie erzeugte elektrische Energie 90 % und für die über Wasserkraft und Faulgas erzeugte Energie 80 % des Durchschnittserlöses je Kilowattstunde aus der Stromabgabe von Elektrizitätsunternehmen. Diese Verpflichtungsregelung zur Übernahme und Vergütung nach den vorgenannten Bedingungen wurde auf 5 % der insgesamt im Kalenderjahr über das Versorgungsnetz des EVU abgesetzten elektrischen Energie

begrenzt. Maßgebend für die Vergütungssätze ist die amtliche Statistik des Bundes für das vorletzte Kalenderjahr. Die Entwicklung der Einspeisevergütung für die Jahre 1996 bis 1999 ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Jahr	Windkraft/Solarenergie	Wasserkraft/Faulgas
1996	17,8 DPf/kWh	15,8 DPf/kWh
1997	18,4 DPf/kWh	16,4 DPf/kWh
1998	17,6 DPf/kWh	15,6 DPf/kWh
1999	16,5 DPf/kWh	14,7 DPf/kWh

Tabelle 10: Entwicklung der Einspeisevergütungen nach Stromeinspeisegesetz

4.3.2.3 Stromlieferverträge

Bei den Lieferungs- und Bereitstellungsverträgen der EVU werden i.a.

- Leistungspreistarifverträge,
- Arbeitspreistarifverträge und
- Zusatzstromlieferverträge

unterschieden. Der typische Leistungspreisliefervertrag beinhaltet eine maximale Leistungsabgabe (kW), die durch das Mittel von bis zu drei Spitzenlastviertelstunden des Jahres nicht überschritten werden sollte und mindestens zu 70 % als sogenannter Leistungspreis bezahlt werden muß.

Zu diesem Leistungspreis wird ein vom Jahresstromverbrauch abhängiger Arbeitspreis (DM/kWh) fällig, der meist nach Hochtarifzeit (z.B. 8-18 bzw. 9-19 Uhr) und Niedertarifzeit differenziert wird.

Zudem gibt es oft Sonderrabatte, die für eine gleichmäßige Stromabnahme gewährt werden. Die Gleichmäßigkeit der Stromabnahme wird dabei an der sog. Jahresbenutzungsstundenzahl gemessen, d.h. an der theoretischen Zeit, die zur Abgabe des Jahresstrombedarfs mit der Maximalleistung erforderlich wäre.

Diese Jahresbenutzungsstundenzahl ist ein nützliches Kriterium für den Wirtschaftlichkeitsvergleich von verschiedenen Leistungspreisverträgen untereinander und mit BHKW-Eigenstromerzeugung.

Bei den Arbeitspreisverträgen wird i.a. für Kleinverbraucher ein fester Arbeitspreis (ohne Leistungspreis) in DPf/kWh unabhängig vom Verbrauch festgelegt.

Zusatzstromlieferverträge beinhalten den Preis, der bei Ausfall der Eigenversorgung einer Kläranlage, z.B. für die Überschreitung der vertraglich vorgesehenen Leistungsobergrenze benötigt wird. Zusatzstromlieferverträge sind i.a. preisgünstiger als die ständige Bereitstellung einer Ersatzeinheit für die Eigenstromversorgung durch den Anlagenbetreiber.

4.3.3 Besonderheiten bei verschiedenen Energieträgern (Heizöl, Wind, Faulgas)

4.3.3.1 Einfluß des Mineralölsteuergesetzes auf die Energienutzung

Nach dem Mineralölsteuergesetz sind neben Heizöl/Dieselmotoren auch Erdgas und Propangas als Ersatzenergieträger für Gasmotoren, die direkt Maschinen antreiben, mineralölsteuerpflichtig. Dagegen ist der Einsatz von Faulgas nicht mineralölsteuerpflichtig.

Der Einsatz von Heizöl/Dieselmotoren sowie Erd- und Propangas für die Stromerzeugung in BHKW-Anlagen ist dagegen bei Kraft-Wärme-Kopplung mit einem Gesamtnutzungsgrad > 60 % mineralölsteuerfrei. Dieser Unterschied führt zu einer wirtschaftlichen Benachteiligung der Direktantriebe, da die Wirkungsgradverluste durch Stromerzeugung, -übertragung und Elektromotor in der Regel geringer als die Mineralölsteuer sind.

4.3.3.2 Öko-Steuer

Seit 1999 wird auf Energieträger Strom und Erdgas die sog. Öko-Steuer erhoben. Zielsetzung der Öko-Steuer ist es, bei durch den Wettbewerb fallenden Energiepreisen einen wirtschaftlichen Anreiz zum sparsamen Umgang mit Energie zu erhalten.

Energieträger	Erhöhung des Steuersatzes	
	Regelsatz	Produzierendes Gewerbe
Strom	+ 2 DPf/kWh	+ 0,4 DPf/kWh
Erdgas	+ 0,32 DPf/kWh H ₀	+ 0,064 DPf/kWh H ₀

Tabelle 11: Auswirkungen der Öko-Steuer auf die Energiekosten

Von der Stromsteuer befreit sind Anlagen für die Stromeigenerzeugung bis zu einer elektrischen Leistung von 700 kW, dabei wird Contracting der Eigenerzeugung gleichgestellt. Contracting ist eine Vertragsart, bei der sich einer der Vertragspartner verpflichtet, eine Energiebereitstellungsanlage gegen ein festgesetztes jährliches Entgelt vom Nutzer der erzeugten Energie zu bauen und zu betreiben.

4.3.3.3 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft und Bundes-Immissionsschutzgesetz

Eine umfassende Übersicht über die beim Bau und Betrieb von Feuerungs-, Verbrennungsmotoren- und Gasturbinenanlagen in Deutschland geltenden gesetzlichen Regelungen, Bestimmungen und Verordnungen sowie die zu beachtenden technischen Regeln (DIN-Normen, DVGW-Arbeitsblätter, VDI-Richtlinien und VDI-Handbücher) ist in [DICHTL ET AL. 1997, Pkt. 10.1] enthalten.

Wichtigste gesetzliche Norm ist das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (=BImSchG, Bundes-Immissionsschutzgesetz) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I Nr. 23 vom 22.05.1990 S. 880), zuletzt geändert am 17. März durch Artikel 3 des Gesetzes zum Schutz des Bodens (BGBl. I Nr. 16 vom 24.03.1998 S. 502), mit den nachfolgenden 2 Verordnungen und 2 Verwaltungsvorschriften zum BImSchG:

- 1. Verordnung zum BImSchG (1. BImSchV) – Kleinf Feuerungsverordnung
- 4. Verordnung zum BImSchG (4. BImSchV) - Anlagenverordnung
- 1. Verwaltungsvorschrift zum BImSchG - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)
- Allgemeine Verwaltungsvorschrift über genehmigungsbedürftige Anlagen nach § 16 der Gewerbeordnung - GewO Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) vom 16.7.1968.

Die für Kläranlagen hauptsächlich relevanten Genehmigungen gemäß 4. BImSchV sind im folgenden aufgeführt.

Feuerungsanlagen für den Einsatz von festen Brennstoffen wie Kohle, Koks, naturbelassenem Holz, schwerem Heizöl usw. mit mehr als 1 MW Feuerungsleistung (für leichtes Heizöl ab 5 MW) bis 50 MW sind als Anlagen gem. 1.2 Spalte 2, über 50 MW Spalte 1, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Feuerungsanlagen für den Einsatz von Erdgas, Biogas, Erdölgas, Flüssiggas und Wasserstoff sowie Gas aus der Stahl- und Kohleindustrie, Synthesegas und Faulgas mit einem Schwefelgehalt < 0,1 Vol.-% S sind ab 10 MW bis 50 MW gem. 1.2 Spalte 2, über 50 MW Spalte 1, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Feuerungsanlagen für den Einsatz anderer als in 1.2 genannter Stoffe wie Deponiegas aus der Abfallvergärung sind ab 100 kW bis 1 MW gem. 1.3 Spalte 2, ab 1 MW gem. 1.3 Spalte 1, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Verbrennungsmotorenanlagen für den Einsatz von Altöl und Deponie- und Faulgas sind generell nach 1.4 a) Spalte 2, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Verbrennungsmotorenanlagen für den Einsatz von Biogas aus der Landwirtschaft und Abfallvergärung sind als Anlagen ab 350 kW Feuerungswärmeleistung gem. 1.4 b) Spalte 2, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Verbrennungsmotorenanlagen für den Einsatz anderer als in 1.4 a+b) genannter Stoffe sind als Anlagen ab 1 MW Feuerungswärmeleistung gem. 1.4 b) Spalte 2, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Gasturbinenanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 50 MW sind nach 1.5 Spalte 2, mit mehr als 50 MW gem. 1.5 Spalte 1, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Anlagen zur **Erzeugung von Generatorgas** aus festen Brennstoffen sind gem. 1.13 Spalte 1, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Anlagen zur **Vergasung oder Verflüssigung** von Kohle sind gem. 1.14 Spalte 1, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Netzersatzaggregate sind nach § 8 der 5. Verordnung des Energiewirtschaftsgesetzes nicht nach BImSchG genehmigungspflichtig, wenn sie nur zum Probelauf 15 h/Monat in Betrieb genommen werden und nicht dauerhaft im Einsatz sind.

Anlagen zur **Lagerung von brennbaren Gasen** sind ab einem gesamten Fassungsvermögen von 3.000 kg gem. 9.1 Spalte 2, mit mehr als 30.000 kg gem. 9.1 Spalte 1, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Anlagen zur **Lagerung von Mineralölen** sind ab einem Fassungsvermögen von 5.000 t gem. 9.2 Spalte 2, mit mehr als 50.000 t gem. 9.2 Spalte 1, Anhang 1 der 4. BImSchV genehmigungspflichtig.

Die BImSch-Genehmigung legt Betreiberpflichten fest, die unter anderem in der TA Luft konkretisiert werden: Einhaltung der Immissionswerte gemäß 2.5 TA Luft; d.h. z.B. bezogen auf 3 % Rest-Sauerstoffgehalt bei Feuerungsanlagen und 5 % Rest-Sauerstoffgehalt bei Gasmotorenanlagen sowie 15 % Rest-Sauerstoffgehalt bei Gasturbinenanlagen.

- Emissionen an Staub < 50 mg/m³ bei Feuerungsanlagen 1.3 (> 0,5 kg/h)
- Emissionen an SO_x als SO₂ < 0,5 g/m³ bei Feuerungsanlagen 1.3 (> 5 kg/h), Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen
- Emissionen an NO_x als NO₂ < 0,5 g/m³ bei Feuerungsanlagen 1.3 mit m < 5 kg/h
- usw.

Motor	TA Luft-Grenzen bzw. Grenzen nach Dynamisierungsbeschuß		Technische Maßnahmen
Gas-Ottomotor (4-Takt)	NO _x CO NMHC	< 0,5 g/m ³ (5 % O ₂) < 0,65 g/m ³ (5 % O ₂) < 0,15 g/m ³ real	Lambda = 1-Verbrennung und 3-Wege-Katalysator (oder Magerverbrennung und Gemischaufladung)
Gas-Ottomotor (2-Takt)	NO _x CO NMHC	< 0,8 g/m ³ (5 % O ₂) < 0,65 g/m ³ (5 % O ₂) < 0,15 g/m ³ real	SCR- und Oxidationskatalysator
Diesel-Ottomotor (4-Takt)	NO _x CO NMHC Staub, Ruß	< 0,5 g/m ³ (5 % O ₂) < 0,65 g/m ³ (5 % O ₂) < 0,15 g/m ³ real < 0,05 g/m ³ real	SCR- und Oxidationskatalysator Ggf. Rußfilter
Grenzwerte auch für Anlagen unter 1 MW Primärenergie bei Faul- und Deponiegas. Das Abgasvolumen bezieht sich auf den trockenen Normzustand.			

Tabelle 12: TA Luft-Grenzen bzw. Grenzen nach Dynamisierungsbeschuß und erforderliche technische Maßnahmen

4.3.3.4 Gewerberechtliche und a.a.R.d.T. bei BHKW-Anlagen

Während das BImSchG mit seinen Verordnungen die öffentlich-rechtlichen Rahmenbedingungen für BHKW-Anlagen festlegt, gehört es natürlich auch zu den Betreiberpflichten, die Rahmenbedingungen für die Arbeitsstätte (Arbeitsstättenverordnung, Auflagen des Gemeindeunfallversicherungsträgers bzw. der gewerblichen Berufsgenossenschaften, etc.) zu erfüllen.

Die wesentlichen betriebsbedingten Rahmenbedingungen sind:

- Zwangslüftung von BHKW-Anlagen,
- Abgasführung über den First von Gebäuden,
- Gaswarneinrichtung und Überwachung des BHKW-Betriebes,
- Ausstattung der Betriebsstätte mit den erforderlichen Hebezeugen, Wartungsbühnen, etc.,
- hinreichende sanitäre Einrichtungen für das Betriebspersonal,
- Dienstanweisung und Betriebsanleitung für den geordneten Anlagenbetrieb,
- fachlich geschultes Personal für Wartung bzw. entsprechende Wartungsverträge bei externer Wartung und
- geordnete Altölentsorgung.

4.3.3.5 Schallschutz

Mit dem Betrieb einer Energieerzeugungsanlage sind entsprechend der TA Lärm Kapitel 2.211 „die dem jeweiligen Stand der Lärmbekämpfungstechnik entsprechenden Lärmschutzmaßnahmen vorzusehen“ sowie die unter Kapitel 2.321 TA Lärm festgesetzten Emissionsrichtwerte im Einwirkungsbereich der Anlage außerhalb der Werksgrundstücksgrenzen ohne Berücksichtigung einwirkender Fremdgeräusche einzuhalten.

4.3.3.6 Bundesbaugesetzliche Rahmenbedingungen bei Windkraftanlagen

Mit der zum 1.1.1997 in Kraft getretenen Regelung des § 35 Abs. 1 Nr. 7 des Baugesetzbuches (BauGB, ab 1. Jan. 1998: § 35 Abs. 1 Nr. 6) hat der Bundesgesetzgeber Windenergieanlagen im Außenbereich privilegiert. Auch wenn solche Vorhaben öffentliche Belange beeinträchtigen, darf Bauwilligen die Baugenehmigung nicht verweigert werden, wenn das Baugrundstück erschlossen ist oder erschlossen werden kann. Gemeinden, die die Nutzung der Windenergie planerisch steuern wollen, müssen ein planerisches Gesamtkonzept vorlegen, mit dem geeignete Standorte für Windenergieanlagen festgelegt und andererseits ungeeignete Standorte ausgeschlossen werden.

Für Windenergieanlagen (WEA) ist das BauGB von Bedeutung, da WEA als bauliche Anlagen einer Baugenehmigung bedürfen. Neben dem bundesweit geltenden Baurecht sind die Baugesetzgebungen der Länder sowie verschiedene Erlasse und Richtlinien sowie die kommunalen Satzungen zu beachten.

Eine Darstellung der aktuellen Gesetzgebung zum Widerstreit von Raumordnung, Landesplanung, Bauleitplanung und Vorhabengenehmigungen von Windkraftanlagen ist in [BUNDESVERBAND WINDENERGIE 1998, S. 105] enthalten.

4.3.3.7 Rechtliche Besonderheiten bei Wasserkraftanlagen

Nach § 2 Abs. 1 und § 3 WHG bedürfen Gewässerbenutzungen einer wasserrechtlichen Erlaubnis oder Bewilligung, es sei denn, das WHG oder die Landeswassergesetze lassen eine gestattungsfreie Benutzung zu.

Das Entnehmen von Wasser aus oberirdischen Gewässern stellt somit eine erlaubnispflichtige Benutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 1 WHG dar. Weiterhin ist das Aufstauen des Gewässers eine Benutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 2 WHG und das Wiedereinleiten des Wassers eine Benutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 WHG und erlaubnispflichtig. Das Errichten einer Wasserkraftanlage erfordert außerdem noch einen Bauantrag.

Nach dem Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (LWG NW) in der Fassung der Bekanntmachung vom 25. Juni 1995 (GV.NW. Nr. 59 vom 18.08.1995, S. 926) § 45 Abs. 1 dürfen Benutzungen nach § 3 Abs. 1 Nrn. 1 und 6 des Wasserhaushaltsgesetzes nur zugelassen werden, wenn das Gewässer in seiner Bedeutung für die vorhandene Tier- und Pflanzenwelt nicht nachhaltig beeinträchtigt wird, soweit nicht überwiegende Belange des Wohls der Allgemeinheit oder im Einklang damit auch der Nutzen einzelner etwas anderes erfordern.

Die Wasserkraftnutzung steht dabei in der Regel im Widerspruch zur Nutzung des Gewässers als Fischgewässer; daher ist im allgemeinen um die Staustufe eines Gewässers eine Fischtreppe erforderlich, die durch die erforderliche Mindestwasserabgabe über die Fischtreppe die nutzbare Wasserkraft reduziert.

Die Nutzung der Wasserkraft des Kläranlagenablaufes hingegen unterliegt nicht dem Wasserrecht, da dies nach § 1 WHG nur für das im natürlichen Gewässerkreislauf befindliche Wasser gilt, und ist somit wasserrechtlich genehmigungsfrei.

4.3.3.8 Rechtliche Besonderheiten bei Wärmepumpen

Ob eine Wärmepumpe eine Gewässerbenutzung gem. § 3 WHG darstellt, und somit nach § 2 Abs. 1 WHG einer wasserrechtlichen Erlaubnis oder Bewilligung bedarf, ist von der Art der Wärmequelle und deren Nutzung abhängig.

Wird zum Betrieb der Wärmepumpenanlage Grundwasser zutage gefördert, so stellt dies eine Grundwasserbenutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 6 WHG dar. Das Wiedereinlei-

ten des abgekühlten Wassers in den Grundwasserleiter ist nach § 3 Abs. 1 Nr. 5 WHG ebenfalls eine erlaubnispflichtige Benutzung.

Soweit der Wärmepumpe mit Hilfe eines Wärmetauschers lediglich Wärme zugeführt oder entzogen wird oder Erdwärmesonden eingesetzt werden, liegt kein Zutagefördern von Grundwasser nach § 3 Abs. 1 Nr. 6 WHG vor. Da die Anlage schädliche Veränderungen der physikalischen Beschaffenheit durch Erwärmung oder Abkühlung des Grundwassers i. S. v. § 3 Abs. 1 Nr. 6 WHG herbeiführen kann, stellt sie jedoch ebenfalls nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG eine Gewässerbenutzung dar.

Wird der Verdampfer unmittelbar in das oberirdische Gewässer eingebracht, so spricht man laut § 3 Abs. 1 Nr. 4 WHG vom Einbringen fester Stoffe in ein Gewässer. Hier kann es sich nach § 24 WHG um einen Eigentümer- oder Anliegergebrauch handeln. Das Einbringen der Rohre o.ä. im Wasserbett ist dann je nach Landeswassergesetz evtl. genehmigungspflichtig. In diesem Fall sollte mit der zuständigen Wasserbehörde geklärt werden, ob eine bzw. welche Genehmigung für das Einbringen von Anlagen oder Anlagenteilen beantragt werden muß.

Die Nutzung der Wärme des Abwassers unterliegt nicht dem Wasserrecht, da dies nach § 1 WHG nur für das im natürlichen Gewässerkreislauf befindliche Wasser gilt. Maßgebend sind somit nur die kommunalen Abwassersatzungen der Gemeinden und die wasserrechtliche Einleiterlaubnis der Kläranlage.

Grundsätzlich fallen die notwendigen wärmeleitenden Arbeitsmittel zum Betrieb der Wärmepumpen nicht unter die Vorschriften über das Lagern, Abfüllen und Umschlagen wassergefährdender Stoffe.

4.3.3.9 Versicherungsrechtliche Empfehlungen

In der Marktübersicht Windkraftanlagen 1996 gibt J. Wiechers als Versicherungsmakler Empfehlungen zum Abschluß von Versicherungsverträgen für Windkraftanlagen [BUNDESVERBAND WINDENERGIE 1994], die sich sicher in Teilen auch auf andere Energieerzeugungsanlagen übertragen lassen:

Sachversicherung:

- Windkraftanlagen (oder allgemein Energieerzeugungsanlagen) sind im allgemeinen Anlagen von hohem wirtschaftlichen Wert.
- Die Anlagen sind meist fremdfinanziert, so daß dem Kreditgeber in der Regel ausreichender Versicherungsschutz nachzuweisen ist.

Haftpflichtversicherung:

- Lt. BGB ist der Betreiber einer Windkraftanlage für Schäden, die einem Dritten aus dem Betrieb der Anlage zugefügt werden, haftbar (Haftpflichtversicherung!).
- Eine Deckung wie für eine Gebäudeversicherung ist für eine Windkraftanlage unzureichend, da durch eine Gebäudeversicherung nur Schäden aus Feuer, Blitz, Sturm und Hagel abgedeckt werden.

Betriebsausfallversicherung:

- Bei Abschluß einer Betriebsausfallversicherung sollte die monatliche Produktionsquote nach einem Windenergiegutachten der Feststellung des Ausfalls vertraglich zu Grunde gelegt werden (besser als Messungen von Nachbaranlagen).

Es empfiehlt sich, eine Haftpflichtversicherung (möglichst mit Einschluß der Bauzeit) sowie eine Maschinenversicherung (ABMG 92) abzuschließen.

Nach den Recherchen der Versicherer gehen fast 70 % aller Windkraftanlagenschäden auf Blitzschlag zurück.

Versichert sind bei einer Maschinenversicherung auf der Grundlage der ABMG 92 Schäden an der Anlage, den Nebenaggregaten und Fundamenten verursacht durch:

- Konstruktions-, Material- und Ausführungsfehler,
- Bedienfehler, Ungeschicklichkeit, Fahrlässigkeit, Kurzschluß, Überspannung, Böswilligkeit, Sabotage, Diebstahl,
- Naturgewalten wie Erdbeben, Erdsenkung, Erdrutsch, Hochwasser, Überschwemmungen, Sturm, Frost, Eisregen und
- Brand, Blitzschlag oder Explosion sowie Löschen bei diesen Ereignissen.

Die Mithilfe eines Versicherungsmaklers kann hilfreich sein, da ein unabhängiger Makler am besten die Versicherungsrisiken (vertragliche Risiken und Schadensrisiken) und im günstigen Fall auch die Versicherer und deren Referenzen bei entsprechenden Projekten kennt. Versicherer, die seltener entsprechende Maschinenversicherungen abschließen, benennen i.a. höhere Prämien als Versicherer mit Erfahrungen im Umgang mit dem entsprechenden Risiko.

Meist bieten auch Maschinenlieferer Versicherungen mit an; dies ist jedoch aus folgenden Gründen riskant:

- Möglichkeit der Unterversicherung,
- möglicher Konkurs des Herstellers,

- eventueller Serienschaden beim Hersteller und
- Versicherungsprämien werden (zeitweilig) vom Hersteller nicht gezahlt.

Daher ist es günstiger, die Versicherung direkt und nicht über einen Dritten abzuschließen. Da bei Streitfällen der Versicherer nach den ABMG 92 den Schaden in Vorleistung dem Versicherten ersetzen muß, ist ein direkter Versicherungsvertrag von Vorteil.

4.3.3.10 Formen öffentlicher Zuwendungen und alternative Finanzierungsstrategien

Zur Sicherstellung einer langfristig komfortablen Energieversorgung muß die Nutzung alternativer Energiequellen erprobt und weiterentwickelt werden. Aus diesem Grund wird neben Forschungs- und Entwicklungsprojekten zunehmend auch die Markteinführung ressourcenschonender Energietechnologien auf breiter Ebene gefördert.

Es existieren verschiedene Formen öffentlicher Zuwendungen. Das sind im wesentlichen:

- Steuererleichterungen,
- zinsgünstige Darlehen,
- Bürgschaften,
- direkte, nicht rückzahlbare Zuschüsse zu den Investitionen sowie
- seltener auch Betriebskostenzuschüsse.

Ein rechtlicher Anspruch auf eine öffentliche Förderung besteht in der Regel nicht. Dies gilt jedoch nicht für die Form der steuerlichen Abschreibungsmöglichkeiten. Hierbei handelt es sich um gesetzlich verankerte Vorschriften. Die Höhe der Zuwendungen variiert in den einzelnen Programmen und von Bundesland zu Bundesland erheblich und wird regelmäßig neu festgelegt.

Neben den erwähnten Formen der öffentlichen Zuwendungen gibt es weitere Finanzierungsmöglichkeiten. Dies sind:

- Betreibergesellschaften,
- lokale Sonderkreditprogramme von Banken und Sparkassen und

- kostendeckende Vergütung für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Der Energieversorger kauft den in sein Stromnetz eingespeisten Strom zu einem Preis auf, der so hoch ist, daß die Anlage durch die Einnahmen finanziert und betrieben werden kann. Die hierdurch entstehenden Mehrkosten des EVU dürfen auf den Strompreis für alle Kunden umgelegt werden. Einige Tarifgenehmigungsbehörden der Bundesländer haben insbesondere bei Photovoltaik- und Windkraftanlagen Höchstbeträge für die Vergütung über einen festgelegten Zeitraum festgesetzt. (i. d. R. 20 Jahre). Die kostendeckende Vergütung darf nicht mit dem Stromeinspeisegesetz (siehe Kapitel 4.3.2.2) verwechselt werden.

Bei den zinsverbilligten Krediten stehen die Maßnahmen der Deutschen Ausgleichsbank (DtA) sowie der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) im Vordergrund. Bei der DtA bildet die Finanzierung von Windkraftanlagen einen wichtigen Schwerpunkt. Sehr viele der in den letzten Jahren errichteten Windkraftanlagen wurden u. a. mit Mitteln aus dem ERP (European Recover Programm) -Umwelt- und Energiesparprogramm oder dem DtA-Umweltprogramm finanziert.

Der Bund gewährt Investitionszuschüsse für die Markteinführung erneuerbarer Energien seit 1994. Für die Jahre 1995 bis 1998 stellte der Bund 100 Mio. DM für dieses Programm bereit. Deutlich umfangreicher ist die Förderung erneuerbarer Energien durch die Bundesländer. Mehr als 200 Mio. DM pro Jahr stehen in den Länderprogrammen insgesamt zur Verfügung.

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt bewilligte 1996 im Förderbereich „Rationelle Energienutzung und Regenerative Energien“ 48 Vorhaben mit einer Fördersumme von 12,6 Mio. DM.

Die Verfügbarkeit von Fördergeldern hängt jeweils von den Haushaltsplänen in Bund und Ländern ab. Nicht selten gibt es auch Mittelkürzungen während eines Jahres oder einen Haushaltsstop, so daß keine Bewilligungen mehr ausgesprochen werden können. Es empfiehlt sich deshalb, jeweils Informationen zu den Fördermöglichkeiten bei den zuständigen Stellen einzuholen und umgehend Mittel zu beantragen.

Es gibt derzeit zahlreiche öffentliche Förderprogramme für die rationelle Energienutzung und die Nutzung erneuerbarer Energien. Für jeden, der diese Techniken einsetzen will, ist es lohnend, sich einen Überblick über die Fördermöglichkeiten zu verschaffen. Das Forum für Zukunftsenergie e.V. und der Informationsdienst BINE des Fachinformationszentrums Karlsruhe haben gemeinsam eine Förderfibel Energie [BINE 1997] zusammengestellt und herausgegeben, die eine Hilfestellung bei der Suche nach den Fördermöglichkeiten geben soll. Die Förderfibel beinhaltet neben den geeigneten Fördermöglichkeiten auch die entsprechenden Ansprechpartner.

Etwa in vierteljährlichem Abstand wird der Förderfibel Energie ein vierseitiges Ergänzungsblatt mit aktuellen Informationen beigelegt. Weiterhin gibt die Förderdatenbank des Bundeswirtschaftsministeriums (<http://db.bmwi.de>) einen vollständigen und aktuellen Überblick über die Förderprogramme des Bundes, der Länder und der Europäischen Union. Die Daten dieser zentralen Informationsquelle werden vierzehntägig aktualisiert.

5 Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Energieträgern auf kommunalen Kläranlagen (Grobanalyse)

Ziel dieser Grobanalyse ist eine abschließende Bewertung, ob die diskutierten Energieträger grundsätzlich für die Energieversorgung einer Kläranlage sinnvoll einsetzbar sind. Zudem soll abgeschätzt werden, welchen Anteil sie an der Energieversorgung der Kläranlage übernehmen können.

Von entscheidender Bedeutung für das zu erarbeitende Managementkonzept sind die Steuerungsmöglichkeiten für den Einsatz der Energieträger. Nicht alle untersuchten Energieträger sind in ihrem zeitlichen Einsatz steuerbar. Dabei kann nur bei ausreichenden Möglichkeiten zur Speicherung bzw. Steuerung der Einsatz der jeweiligen Energieträger reguliert werden. Erst dadurch können sowohl zeitliche Schwankungen im Energiedargebot selbst als auch quantitative Schwankungen zwischen Energieverbrauch und –dargebot (in eingeschränktem Maße) ausgeglichen werden.

Eine Unterteilung nach zeitlich steuerbaren und nicht steuerbaren Energieträgern samt deren Speichermöglichkeiten erfolgt in Abbildung 42.

<u>im Einsatz steuerbare Energieträger</u>	<u>nicht steuerbare Energieträger</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Faulgas (Speicherbehälter) • Propangas (Tanks) • Diesel/Heizöl (Tanks) • Rapsöl/Biodiesel (Tanks) • Holz (Tanks) • Klärschlamm (Silos) 	<ul style="list-style-type: none"> • Windkraft • Wasserkraft • Solarenergie • Abwasserwärme
<p>jederzeit lieferbar: EVU-Strom bzw. EVU-Erdgas, oberflächennahe Erdwärme</p>	

Abbildung 42: Klassifizierung verschiedener Energieträger nach ihren Steuerungs- und Speichermöglichkeiten bei der Verwendung auf ARA

Speicher- und damit steuerbar sind im wesentlichen die Brennstoffe, während dies für regenerative Energieträger nicht zutrifft. Wind- und Solarenergie wird nur bei entsprechenden Witterungsverhältnissen bzw. Tageszeiten produziert. Die Wasserkraft in einem Klärwerk ist ebenfalls kaum speicherbar, da die Vorhaltung von Pufferb-

ecken in entsprechender Größe wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Gleiches gilt für die Abwasserwärme, die abhängig vom zufließenden Abwasservolumenstrom ist.

Batteriesysteme zur Speicherung regenerativer Energie sind bei den für Kläranlagen benötigten Energiemengen derzeit nicht rentabel. Auch die Energiespeicherung in Wasserstoffspeichern ist in der großtechnischen Umsetzung heutzutage noch nicht konkurrenzfähig. Hier herrscht weiterer Forschungsbedarf. Bei zukünftigen Weiterentwicklungen auf diesem Sektor ist eine größere Flexibilität für den Einsatz regenerativer Energieträger zu erwarten.

Die anderen betrachteten Energieträger sind in Tanks, Silos etc. speicherbar und damit für die Energiebereitstellung in gewissem Maße steuerbar. Dies erleichtert die Einbindung in ein Energiemanagementkonzept.

5.1 EVU-Strom

Das Ziel einer Energieautarkie auf Kläranlagen ist eine möglichst vollständige Substituierung der Energie aus dem öffentlichen Versorgungsnetz durch optimierte Nutzung der auf Kläranlagen selbst anfallenden Energie. Die zu substituierende Energie ist im wesentlichen Strom, der bisher auf Kläranlagen am häufigsten eingesetzte Energieträger, und heute noch auf vielen Kläranlagen die einzige Form der Energiebereitstellung.

Strom über das öffentliche Versorgungsnetz gehört zu den versorgungssichersten und bisher auch zu den wirtschaftlichsten Energieträgern. Die Verfügbarkeit ist i.d.R. durchgehend gewährleistet, sieht man von eventuellen Stromausfällen ab, für die das EVU z.T. die Gewährleistung übernehmen muß. Auch große Energieverbrauchsschwankungen werden über das öffentliche Netz problemlos bereitgestellt, was sich jedoch in den Energiebezugskosten widerspiegelt.

Für Kläranlagen ohne anaerobe Schlammstabilisierung, mit geringen Ausbaugrößen oder geringem spezifischem Faulgasanfall, für die eine Verstromung des Faulgases unmöglich oder unwirtschaftlich ist, ist eine Anbindung an das öffentliche Versorgungsnetz unumgänglich, um die prioritären Aufgaben des Gewässerschutzes zu gewährleisten.

Ein Anschluß an das öffentliche Versorgungsnetz sollte aber auch für größere Kläranlagen immer vorgesehen werden. Selbst bei sehr hohen Eigenenergieversorgungsgraden kann ein energieautarker Betrieb einer Kläranlage mit vollständiger Entkopplung vom öffentlichen Versorgungsnetz nicht durchgängig versorgungssicher garantiert werden. Bei Gewährleistung der Versorgungssicherheit ist aufgrund der

fehlenden Speichermöglichkeiten und der unterschiedlichen zeitlichen Schwankungen des Energiedangebotes und des Energieverbrauches auf Kläranlagen eine vollständige Abkopplung nicht möglich. Die erforderliche Redundanz der Aggregate für die Eigenenergieversorgung wäre für Wartungs- oder Ausfallzeiten unwirtschaftlich.

5.2 Faulgas

Faulgas ist ein energetisch wertvoller Rohstoff, der zu elektrischer und/oder thermischer Energie transformiert werden kann. Die Energieumwandlung kann mit verschiedenen Anlagensystemen und damit einhergehend mit verschiedenen Intentionen betrieben werden:

- die Umwandlung von Faulgas in Wärme mit Heizkesseln,
- die Umwandlung des Faulgases im BHKW-Betrieb in elektrischen Strom (mit Gasmotor und Generator) und einer gekoppelten Wärmegewinnung oder
- die Umwandlung des Faulgases durch einen Direktantrieb in mechanische Energie (mit Gasmotor und direkt gekoppeltem Verbraucher, z.B. Belebungsgebläse).

Die Verwertung von Faulgas zur Stromerzeugung hat dabei gegenüber der reinen Wärmeerzeugung höhere Priorität. Für ein effizientes Energiemanagementkonzept ist die vollständige Umsetzung des Faulgases unabdingbar. Aus diesem Grund wird in der obigen Aufzählung das Abfackeln von Faulgas nicht aufgeführt, da es sich hierbei um keine sinnvolle Verwertung handelt.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, das anfallende Faulgas mit Hilfe von Gasturbinen zu nutzen. Der elektrische Wirkungsgrad liegt mit $\eta_{\text{elektr.}} < 30\%$ unter dem BHKW-Wirkungsgrad, während der thermische Wirkungsgrad deutlich höher liegt als bei BHKW-Nutzung. Bei größeren Modulen liegt der Gesamtwirkungsgrad der Gasturbinen noch höher. Jedoch arbeiten sie erst ab einer Leistung von ca. $2 \text{ MW}_{\text{elektr.}}$ wirtschaftlich, so daß sie i.d.R. nicht auf Kläranlagen eingesetzt werden.

Aufbauend auf den Richtwerten für den spezifischen Energieverbrauch gemäß Handbuch NRW [MÜLLER ET AL. 1999] wurden Berechnungen zur Energieverbrauchsdeckung über Faulgas in BHKW angestellt.

In Abhängigkeit von der Anschlußgröße der Kläranlage wurden im Rahmen des F+E-Vorhabens die theoretischen elektrischen Eigenenergieversorgungsgrade durch Faulgasnutzung ermittelt. Für die hier angestellten detaillierteren Berechnungen wurden verschiedene spezifische Faulgasanfallmengen angenommen [16, 18, 20 und $22 \text{ l}/(\text{E} \cdot \text{d})$]. Der elektrische Eigenenergieversorgungsgrad steigt wegen des abfallenden spezifischen Energieverbrauches mit zunehmender Anschlußgröße; er be-

wegt sich für die angenommenen Anschlußgrößen in einem Bereich zwischen 30 und ca. 60 %.

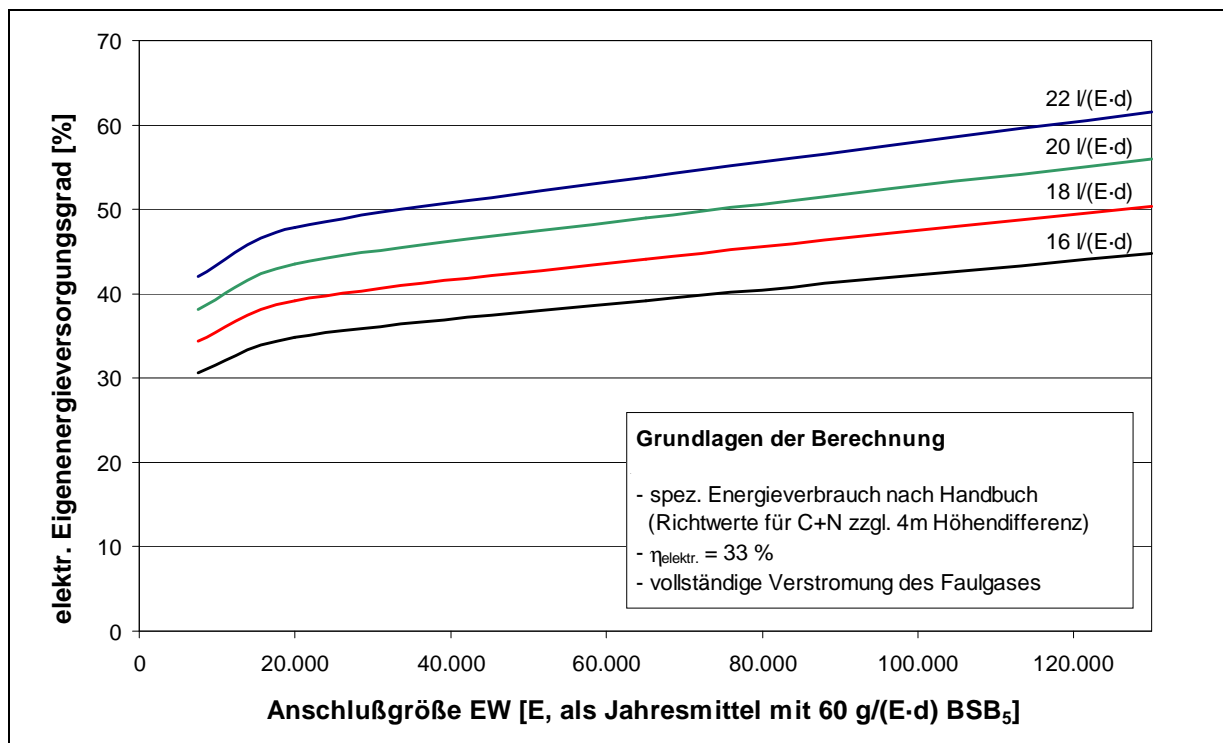


Abbildung 43: Elektrische Eigenenergieversorgungsgrade in Abhängigkeit von der Anschlußgröße der Kläranlage

Elektrische Eigenenergieversorgungsgrade von annähernd 60 % sind nur für größere Kläranlagen bei hohem spezifischem Faulgasanfall realisierbar. Eine vollständige Verstromung des Faulgases, d.h. auch ausreichend dimensionierte Faulgasspeicher, sind entsprechend Voraussetzung.

Die thermische Energieversorgung der Kläranlage kann bei optimierter Planung und Betrieb im Jahresverlauf über Faulgas fast vollständig abgedeckt werden. Lediglich für Spitzenlastzeiten im Winter wird u.U. eine Zweitenergieversorgung erforderlich.

5.3 Zweitbrennstoffe

Als Zweitbrennstoffe für Faulgas kommen folgende Energieträger in Betracht: Erdgas, Propangas, Diesel, Heizöl, Rapsöl oder der aus diesem Öl gewonnene Rapsmethylester (RME). Sie werden dabei zur Umwandlung in elektrische und/oder thermische Energie

- in BHKW,
- in Notstromaggregaten,
- zum Direktantrieb von Gasmaschinen bzw.
- in Kessel- oder Heizanlagen

eingesetzt. Für die Nutzung von Erdgas ist ein Anschluß an das öffentliche Versorgungsnetz herzustellen. Die für die einzelnen Energieträger verwendbaren Motorenkonzepte wurden bereits in Tabelle 9 zusammengefaßt. Während für die Verbrennung von Rapsöl spezielle Motoren erforderlich sind, kann der Rapsmethylester in konventionellen Dieselmotoren i.d.R. problemlos zum Einsatz kommen.

Festbrennstoffe wie Holz werden hauptsächlich zur Bereitstellung von Wärme genutzt. Die Wirbelschichtfeuerung ist erst ab einer Größenordnung um 50 MW wirtschaftlich und deshalb für den Einsatz auf Kläranlagen nicht geeignet. Die Vergasung der Feststoffe stellt eine Option dar, mit der Stromwirkungsgrade in ähnlicher Größenordnung wie in BHKW-Anlagen erreicht werden und die eine hohe Umweltfreundlichkeit aufweist. Es sind bisher lediglich Pilotprojekte realisiert worden; insbesondere traten Probleme bei der Abgasreinigung auf.

Ausschlaggebendes Kriterium für den Einsatz der verschiedenen Zweitbrennstoffe ist neben dem auf der Kläranlage verwendeten Motorenkonzept die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Energieträger, auf die in Kapitel 1 näher eingegangen wird. Weitere Abhängigkeiten bestehen daneben für diese Energieträger nicht.

5.4 Klärschlamm

Aufgrund der strengen Anforderungen der TA Siedlungsabfall werden in den kommenden Jahren auch für Klärschlamm neue Entsorgungswege zu beschreiten sein. Damit wird zukünftig vor allem die Co-Verbrennung von Klärschlamm stärker als in bisherigem Maße Anwendung finden. Die Integration dieser Energieträger in das Energieversorgungskonzept wird deshalb trotz der Neuorientierung bei der Klärschlamm Entsorgung zu berücksichtigen sein.

5.5 Wasserkraft

Das in Kläranlagen gereinigte Abwasser wird in manchen Abwasserreinigungsanlagen über Absturzbauwerke in die Vorflut geleitet. Je nach Abwasseranfall und topographischen Gegebenheiten bietet sich die Nutzung dieses Potentials an. Die mit diesen Wasserkraftanlagen erreichbaren Leistungen können in Abhängigkeit von der

Ausbaugröße der Kläranlage und der zur Verfügung stehenden Fallhöhe in Abbildung 44 abgelesen werden.

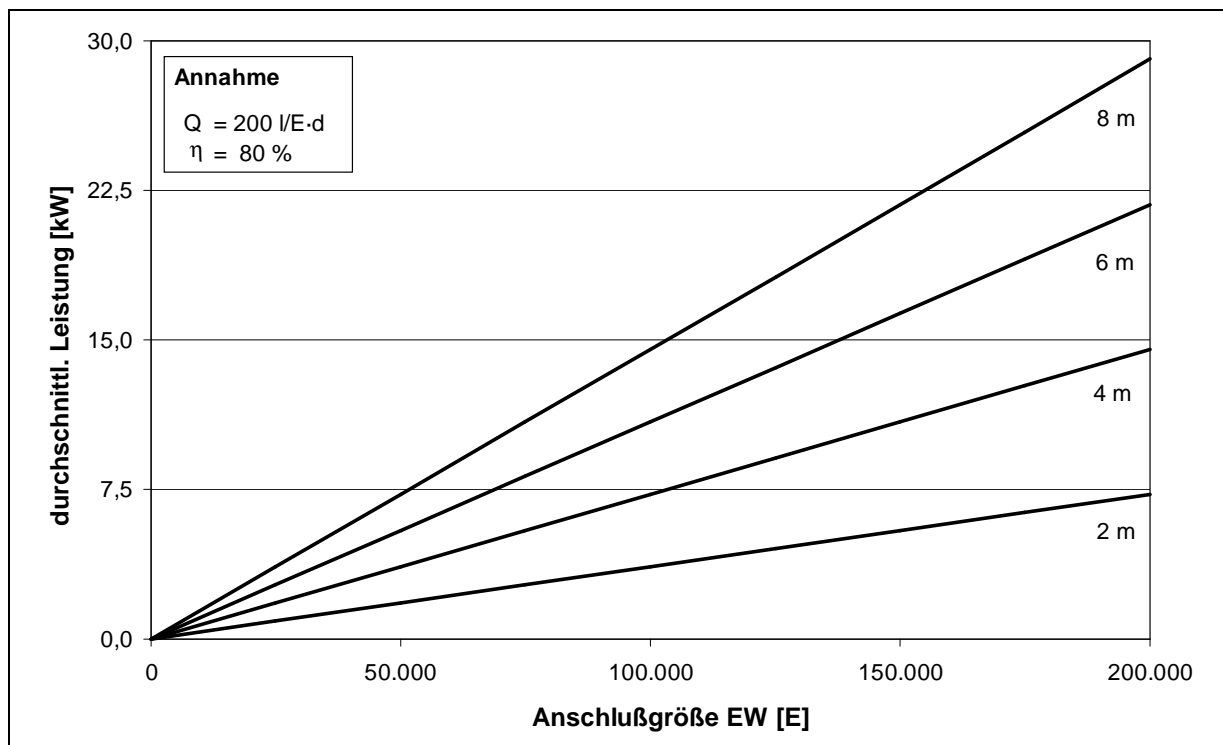


Abbildung 44: Leistungsdaten der Wasserkraftnutzung bei unterschiedlichen Kläranlagenanschlußgrößen und Potentialdifferenzen

Aus den in Abbildung 29 und Abbildung 44 ablesbaren Daten wird deutlich, daß für eine Wasserkraftnutzung im Bereich einer Kläranlage ausschließlich Kleinst- und Kleinwasserkraftwerke in Betracht kommen.

In Abbildung 45 ist die auf Kläranlagen aus Wasserkraft bei unterschiedlichen Fallhöhen erzeugbare Energie dargestellt und der notwendigen Gesamtenergie gegenübergestellt. Als Referenzwerte wurden dabei ein einwohnerspezifischer Abwasseranfall von 200 l/(E·d) und ein mittlerer Energieverbrauch von 35 kWh/(E·a) angesetzt.

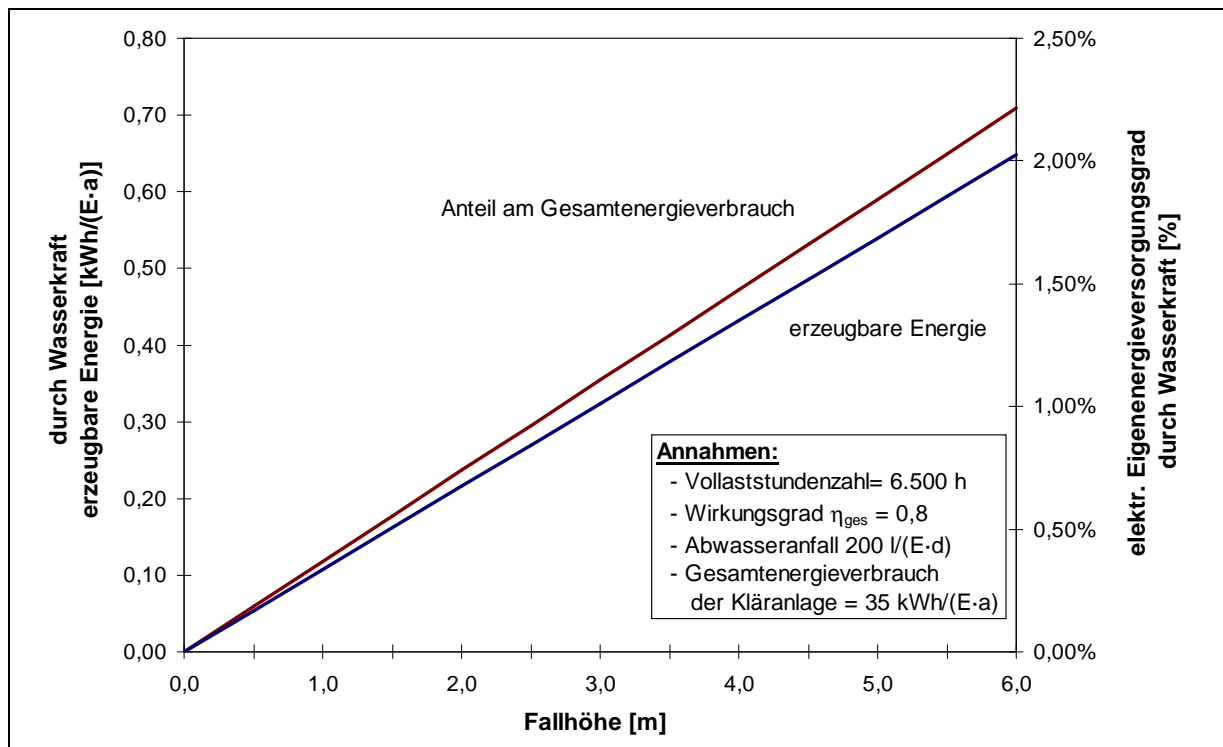


Abbildung 45: Abschätzung der aus Wasserkraft erzeugbaren Jahresenergie sowie des erzielbaren Eigenenergieversorgungsgrades bei unterschiedlichen Fallhöhen

Der Beitrag der über Wasserkraft erzeugbaren Energie beträgt selbst bei großen Fallhöhen nur ca. 3 % an der Gesamtenergieverbrauchsdeckung auf Kläranlagen und ist damit sehr gering. Dennoch sollte insbesondere unter ökologischen Überlegungen auch über eine Nutzung dieses „geringen“ Potentials nachgedacht werden. Bei geeigneten topographischen Randbedingungen lässt sich durch Wasserkraft ein Beitrag zum Klimaschutz leisten. Gegenüber der Installation im natürlichen Fließgewässer ergeben sich zudem bei der Errichtung von Kleinwasserkraftwerken in den Ausläufen von Kläranlagen folgende Vorteile:

- es ist keine wasserrechtliche Genehmigung erforderlich,
- es ist kein Reinigungsrechen erforderlich,
- die Netzanbindung ist minimal, da der gewonnene Strom direkt in der Kläranlage verbraucht wird, und
- eine Wartung kann unmittelbar durch das Betriebspersonal der Kläranlage erfolgen.

5.6 Windkraft

Bei der Frage nach potentiellen Standorten für Windenergieanlagen (WEA) sind verschiedene Kriterien wie Ausschlußgebiete und Abstandsregelungen zu beachten, da bestimmte Standorte aus technischen, Lärmschutz rechtlichen, optischen oder naturschutzrechtlichen Gründen ausscheiden. Der Standort Kläranlage besitzt für die Errichtung einer Windenergieanlage den Vorteil, daß es sich bereits um technische Bauwerke handelt, die i.d.R. nicht in unmittelbarer Nähe zur Wohnbebauung oder in Naturschutzgebieten errichtet werden. Das mögliche Konfliktpotential zu den Bereichen Wohnen, Landschaftsbild, Erholung und Naturschutz ist somit meistens stark vermindert.

Allerdings werden Kläranlagen, hydraulisch bedingt, meist auf topographisch tiefen Punkten errichtet, weshalb eine wirtschaftliche Nutzung des Energieträgers Wind in den meisten Fällen nicht darstellbar ist. Die Prüfung im Einzelfall kann jedoch auch ein anderes Ergebnis liefern. Das ausschlaggebende Kriterium zur ökonomischen Beurteilung eines Standortes ist das Windangebot, welches bei der Analyse der Wirtschaftlichkeitsfrage an erster Stelle zu behandeln ist. Standorte, die Windgeschwindigkeiten aufweisen, mit denen keine Wirtschaftlichkeit zu erzielen ist, sind wie Ausschlußflächen zu behandeln.

Sofern die Windgeschwindigkeiten an einer Kläranlage ausreichen, besitzt dieser Standort für die Errichtung einer Windenergieanlage häufig eine Reihe weiterer Vorteile. Bei energetisch optimierten Kläranlagen, die einen möglichst gleichmäßigen elektrischen Leistungsbedarf aufweisen, kann ein Großteil der erforderlichen Energie durch die Windkraftanlage gedeckt werden. Gegenüber Windkraftanlagen, die sehr weit im Außenbereich errichtet werden, besteht der Vorteil, daß ein unmittelbarer Anschluß an das Stromversorgungsnetz vorhanden ist und sich eine Einspeisung ins Netz ohne großen Kostenaufwand realisieren läßt.

Technologische Fortschritte, wie der getriebelose Anlagenbetrieb oder die Entwicklung der Megawattklasse mit Turmhöhen um 70 m, erlauben mittlerweile die Errichtung von Windkraftanlagen in Gebieten mit einer mittleren Jahreswindgeschwindigkeit von $v_{\text{Wind}} > 4 \text{ m/s}$ in 10 m Höhe.

Entsprechend setzt sich auch der Trend durch, daß WEA nicht nur an den windgünstigen Küstenstandorten installiert werden, sondern Neuanlagen zunehmend im Binnenland errichtet werden. Von den 1998 installierten 781 MW Gesamtleistung wurden rd. 56 % (435 MW) im Binnenland errichtet (1997: rd. 59 %). Bezogen auf die Anzahl der Neuanlagen entfielen 1998 mit 597 Anlagen etwa 60 % auf das Binnenland. Wegen der flächenschonenden Aufstellungsart erfahren dabei die größeren

Anlagen eine zunehmende Verbreitung. Rund die Hälfte der 1998 installierten Gesamtleistung entfällt auf die Großanlagen der Leistungsklasse 1 bis 1,5 MW. [ALLNOCH 1999]

In Abbildung 46 sind für drei verschiedene Anlagengrößen die Energieerträge gemäß Produktinformationen der Husumer Schiffswerft (HSW) und Tacke dargestellt (beide 1997). Zusätzlich sind für verschiedene Kläranlagenanschlußgrößen gemäß Handbuch NRW die jährlichen Energieverbrauchsrichtwerte gegenübergestellt. Angenommen wurden Kläranlagen mit Kohlenstoff- und Stickstoffelimination ohne Filtration sowie mit einer zu überwindenden Höhendifferenz von 4 m.

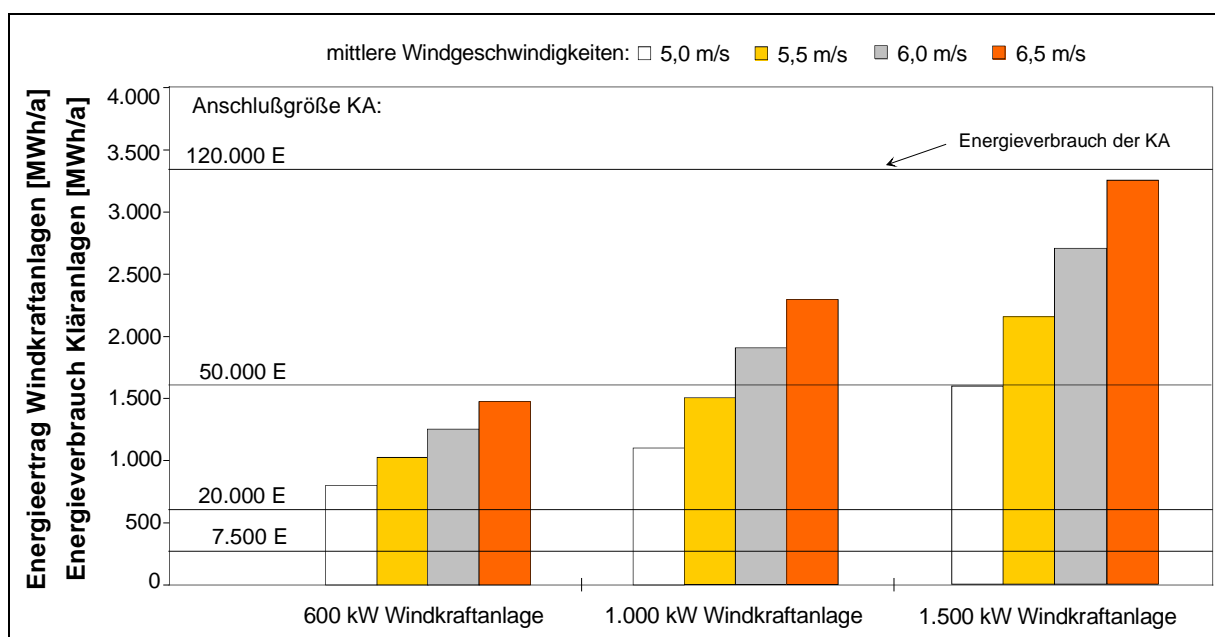


Abbildung 46: Energieertrag verschiedener Windkraftanlagen sowie Energieverbrauch von Kläranlagen unterschiedlicher Anschlußgrößen

Durch Windkraft kann also ein großer Anteil der auf Kläranlagen notwendigen Energie bereitgestellt werden. Die ausschließliche Versorgung einer Kläranlage durch Windkraftnutzung ist allerdings aufgrund

- bedingter Verfügbarkeit (Windstille) und
- fehlender wirtschaftlicher Speichermöglichkeiten

noch nicht möglich. Als Ergänzung zu anderen Energieträgern stellt die Windkraft jedoch – bei günstigen ortsspezifischen Randbedingungen – eine sehr wirtschaftliche Eigennutzungsform dar.

5.7 Solarenergie

Die Strahlungsleistung der Sonne beträgt je Quadratmeter Erdoberfläche bis zu 1.000 W. In Deutschland wird diese Maximalleistung nur in wenigen Stunden des Jahres in der Mittagszeit erreicht. Im Winter wird ein Rückgang der Strahlung am tage auf 1/25 der maximalen Sonneneinstrahlung verzeichnet. Auch zwischen dem Norden und Süden Deutschlands können Schwankungen bis 10 % auftreten. Bei Energieerträgen in Deutschland von 900 bis 1.250 kWh/(m² · a) stellt sich auch auf Kläranlagen die Frage der Nutzung dieser Energie.

Photovoltaik

Für die Installation der Photozellen kommen auf einer Kläranlage die Dachflächen der Gebäude in Betracht. In zunehmendem Maße müssen zudem zur Minimierung der Geruchsentwicklung die Behandlungsbecken abgedeckt werden. Bei einer Beckentiefe von 5 m beträgt die mittlere spezifische Belebungsbeckenfläche 36 m²/1.000 E [BÖHNKE 1991]. Diese Flächen bieten sich als Standort für Photovoltaikanlagen ebenso an wie (benachbarte) Freiflächen.

Überschläglich erzeugt man jährlich pro kW_P installierte Leistung eine Energie von 1.000 kWh. Die Investitionen betragen derzeit ca. 15.000 DM/kW_P. Den in Abhängigkeit von der installierten Leistung abdeckbaren Energieverbrauch und die damit verbundenen Kosten sind in Abbildung 47 gegenübergestellt. Für die Abschätzung des Gesamtenergieverbrauches wurde überschlagsweise von einem einwohnerspezifischen Bedarf von 35 kWh/(E·a) ausgegangen.

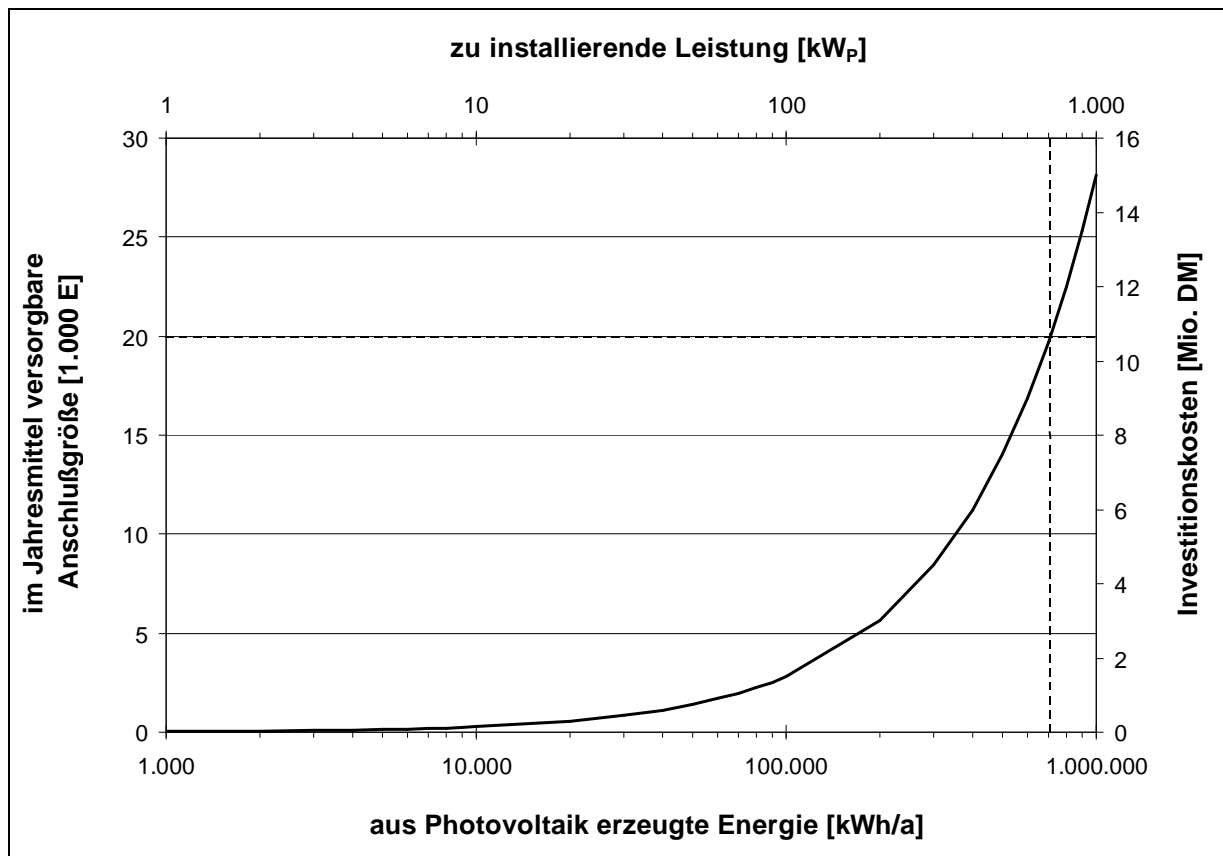


Abbildung 47: Überschlägliche Abschätzung der aus Photovoltaik gewinnbaren Energiemenge und der daraus resultierenden Kosten

Will man z.B. den Energieverbrauch einer Anlage mit einer Anschlußgröße von 20.000 E im Jahresmittel decken, so ist für die vollständige Deckung über Photovoltaik eine installierte Leistung von ca. 700 kW_P mit erforderlichen Investitionen von ca. 10,5 Mio. DM notwendig. Zudem ergibt sich als weiterer Nachteil die erforderliche Speicherung des erzeugten Stromes für die Zeiten zu geringer bzw. ohne Einstrahlungsintensität. Zwar kann man die Energie in Akkumulatoren speichern; aber bei den hohen Größenordnungen des Energieverbrauches von Kläranlagen ist man noch weit entfernt von einem wirtschaftlichen Einsatz solcher Systeme. Die hohen Gestehungskosten der Solarenergie könnten in Zukunft durch die Entwicklung günstigerer und leistungsstärkerer Photozellen reduziert werden. Die Photovoltaik ist bei dem derzeitigen Entwicklungsstand ein rein ergänzender Energieträger für Kläranlagen.

Solarthermie

Mit Solarthermie kann Wärme im Nieder- und auch Hochtemperaturbereich erzeugt und gespeichert werden. Die Dimensionierung ist neben der Intensität der Sonneneinstrahlung stark von den Verbrauchswerten abhängig. Je nach Kollektorgüte, Sys-

temkonzept und Größe des Warmwasserverbrauches wird das wirtschaftliche Optimum bei 1 bis 2 m² Kollektorfläche und 80 bis 120 l Speichervolumen pro Person erreicht [RWE 1995]. Dies ist auch der Dimensionierungsansatz für Kläranlagen, wo man überschläglich von einem Warmwasserverbrauch von ca. 50 l Warmwasser pro Beschäftigtem und Tag, entsprechend für die Bemessung von dem doppelten Speichervolumen, also ca. 100 l Wasservolumen ausgehen kann. Hiermit ist eine weitgehende Deckung des Warmwasserverbrauches im Sommerhalbjahr gewährleistet, ohne daß große Mengen an Überschußwärme produziert werden. Bei Solaranlagen zur Heizungsunterstützung sind Kollektorflächen von deutlich über 12 m² üblich.

Die Wirtschaftlichkeit der Solarthermieanlagen ist nicht allgemeingültig darstellbar, da der erforderliche Kostenaufwand stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängt. Generell muß zum heutigen Zeitpunkt gesagt werden, daß der Einsatz zu Heizwecken nur in Form einer Zusatzwärmeversorgung im Herbst und Frühjahr in Kombination mit einer Warmwasserversorgung wirtschaftlich erscheint. Ein nachträglicher Einbau ist nicht kostendeckend durchzuführen. Bei einer Neuinstallation mit gleichzeitigem Förderzuschuß von ca. 50 % der Anlagekosten können sich die Investitionen in eine derartige Anlage durchaus rechnen.

Speziell für kleine Kläranlagen ohne Faulbehälter bzw. Anlagen, bei denen der Wärmeverbrauch nicht durch Eigenenergie gedeckt werden kann, können Sonnenkollektoren einen sinnvollen Beitrag zur Wärmeversorgung leisten. Dies gilt gleichermaßen für die Wärmeversorgung entlegener Gebäude auf Kläranlagen.

5.8 Abwasserwärme

Die Wärme im Abwasser birgt ein hohes Energiepotential und ist eine günstige Wärmequelle, da

- das Wärmeangebot über den zufließenden Abwasserstrom ständig verfügbar ist,
- die Abwasserwärme damit auch langfristig eine sichere Wärmequelle darstellt und
- die nutzbaren Temperaturen relativ hoch sind (i.d.R. ein ganzjährig anstehendes Temperaturniveau von minimal 10 – 15°C, das teilweise genutzt werden kann).

Nimmt man z.B. einen einwohnerspezifischen Abwasseranfall incl. Regen- und Fremdwasser von 125 m³/a und eine Temperaturdifferenz von nur 1 K an, so ergibt sich bei einem spezifischen Wert von 1,16 kWh/(K·m³) der Energieinhalt zu 145 kWh/(E·a). Diese Energie kann aber nur als niedere Form zum Heizen unter hohen

Verlusten genutzt werden. Das Angebot reicht jedoch stets über den auf der Kläranlage benötigten Wärmeverbrauch hinaus.

Die Installation und der Betrieb von Wärmepumpen zur internen Wärmeversorgung der Kläranlage ist aufgrund des Wärmeangebotes von Faulgas selten erforderlich und dort derzeit nicht rentabel. Für kleine Kläranlagen ohne Eigenwärmeverbrauchsdeckung können Wärmepumpen, ebenso wie Sonnenkollektoren, sinnvoll sein. Es werden schon Aggregate ab 8 kW Heizleistung angeboten, die für ca. 25.000 DM zu erwerben sind. Wärmepumpen sind dann auch in Kombination mit einem Pufferspeicher zur Entkopplung der Volumenströme im Wärmepumpen- und Heizkreis bzw. in Verbindung mit einem Niedertemperaturheizsystem wirtschaftlich einsetzbar. Es muß darauf geachtet werden, daß der Standort der Heizzentrale möglichst nah am Verbraucher ist, da die Investitionen für die Kaltwasserleitungen günstiger als für die wärmegeprägten Warmwasserleitungen sind. Bei einem Kläranlagenneubau ist zur Vermeidung von Wärmeverlusten zusätzlich das Betriebsgebäude möglichst in der Nähe der Abwasserwärmenutzung anzuordnen.

Neben der internen Wärmenutzung besteht zudem die Möglichkeit einer externen Nutzung durch ein Nahwärmesystem zur Versorgung anliegender Wärmeverbraucher (öffentliche Gebäude, Siedlungen, etc.), was mit einer höheren Wirtschaftlichkeit verbunden sein kann. Diese Nutzungsmöglichkeit wird in jüngster Zeit vor allem in der Schweiz im Rahmen des vom Bund initiierten Programmes *Energie 2000* gefördert. Nach einer Schweizer Studie können mit Abwasserwärme rund 5 - 10 % der an die Kanalisation angeschlossenen Gebäude beheizt werden. Rund 30 Anlagen zur Beheizung externer Gebäude und Siedlungen wurden bisher in der Schweiz ausgeführt, wobei die Wärme sowohl im Kläranlagenablauf als auch im Kanalnetz entzogen wird. Die Schweizer Erfahrungen lassen sich wie folgt zusammenfassen [MÜLLER 1997]:

- Grundsätzlich ist die externe Nutzung der Abwasserwärme aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur in den seltensten Fällen rentabel; für die überwiegende Anzahl der Kläranlagen ergibt sich durch die Distanz zwischen Kläranlagenstandort und potentiellen Wärmeabnehmern keine wirtschaftliche Nutzbarmachung des vorhandenen Wärmepotentials.
- Bei Neubauprojekten von kläranlagennahen Siedlungen kann mit der externen Abwasserwärmenutzung gegenüber konventionellen Ölheizungen eine höhere Wirtschaftlichkeit erzielt werden.
- Nach der Schweizer Abschätzung kann unter Berücksichtigung externer Kosten bei einem Wärmeleistungsverbrauch $> 0,5$ MW eine Wirtschaftlichkeit auch bei 1 - 2 km entfernt liegenden Abnehmern gegeben sein.

Eine allgemeingültige Aussage aus diesen theoretischen Überlegungen läßt sich nicht ableiten. Die externe Nutzung sollte durch ein systematisches Vorgehen unter Berücksichtigung der ortsspezifischen Randbedingungen im Einzelfall untersucht werden.

Die Erfahrungen in Deutschland bei der Abwasserwärmenutzung sind noch gering. Insbesondere eine genaue Bilanzierung der nutzbaren Potentiale und der Auswirkungen auf die Abwasserreinigung ist noch nicht ausschöpfend erfolgt. Für eine abschließende Beurteilung der Übertragbarkeit der Schweizer Ergebnisse sind zukünftig weitergehende Untersuchungen auf diesem Gebiet erforderlich.

5.9 Oberflächennahe Erdwärme

Wie bei allen Energieträgern, die ausschließlich in Wärme umgesetzt werden können, bietet sich die oberflächennahe Erdwärme vorwiegend bei Stabilisierungsanlagen für die Raumheizung und Warmwasseraufbereitung an, da diese verfahrensbedingt nicht über den Energieträger Faulgas verfügen. Aber auch bei Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung treten z.T. Wärmedefizite auf, die durch diesen Energieträger ausgeglichen werden können. Das Erdreich kann nicht nur für Heizzwecke, sondern ebenso zur Raumklimatisierung – mit oder ohne Wärmepumpe – eingesetzt werden. Der Einsatz erdgekoppelter Wärmepumpen ist insbesondere für die lokale Versorgung bei Neubauten zu empfehlen. Bei vorausschauender Planung ist ein einfacher Einbau während der Bauausführung kostengünstiger herzustellen, während ein nachträglicher Einbau die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit gegenüber herkömmlichen Wärmeträgern weiter herabsetzt. Als Nachteil auch gegenüber anderen regenerativen Wärmeträgern wie der solaren Wärme ist die geringe Flexibilität für eventuelle Nachrüstungen zu nennen.

Die Entwicklung dieser Technologie ist noch nicht abgeschlossen, so daß zukünftig bei leistungsstärkeren und entsprechend kostengünstigeren Aggregaten mit einer höheren Marktverbreitung zu rechnen ist.

6 Kostenbetrachtung

Die Energieversorgung von Kläranlagen verursacht je nach Energieform bzw. je nach Energieträger unterschiedliche spezifische Kosten. Im folgenden werden zunächst die Energieträger und anschließend die dazugehörige Bau- und Anlagentechnik mit Maschinen- und Elektrotechnik sowie der Peripherie wie Rohrleitungen etc. betrachtet. Kosten für Verzinsung und Abschreibung sind nur bei ausdrücklicher Angabe berücksichtigt. Es werden ausschließlich Nettokosten, Stand 1998, genannt.

6.1 Elektrische Energie (EVU)

Die Investitionen für die Bereitstellung eines Energieversorgungsanschlusses durch das zuständige EVU sind abhängig von örtlichen Gegebenheiten und betragen bei Anschluß an das Niederspannungsnetz ca. 200 bis 400 DM/kVA bzw. bei Anschluß an das Mittelspannungsnetz ca. 50 bis 200 DM/kVA. In den Kosten werden anteilig die einmaligen Aufwendungen des EVU für die Versorgung des Verbrauchers mit elektrischer Energie umgelegt. In der Regel umfaßt dieser Umfang die Bereitstellung der Energie an der Grundstücksgrenze des Verbrauchers.

Weitere Investitionen für die Energieversorgung einer Kläranlage setzen sich zusammen aus den erforderlichen technischen Einrichtungen für die Übernahme, die Wandlung und den verbraucherseitigen Transport sowie die Verteilung der elektrischen Energie, beispielsweise für ggf. erforderliche Mittelspannungsschaltanlagen und Transformatoren sowie Niederspannungshauptverteilungen mitsamt zugehöriger Verkabelung. Diese Investitionen liegen aufgrund der starken Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten in einem Bereich von ca. 4 bis 8 DM/E.

Durch die Liberalisierung des Energiemarktes sind die EVU-Tarifgestaltung und damit die Strombezugskosten in jüngster Vergangenheit starken Veränderungen unterworfen gewesen, die noch immer andauern. Allgemein sind diese mit z.T. deutlich gesunkenen Kosten für die Kläranlagenbetreiber verbunden. Eine generelle Darstellung ist derzeit allerdings wegen der vielfältigen und teilweise neuartigen Abrechnungsmodalitäten nicht möglich.

Gemeinhin teilen sich die Betriebskosten für den Bezug elektrischer Energie von Energieversorgungsunternehmen weiterhin in den Leistungspreis und den Arbeitspreis auf. Mit dem Leistungspreis ist die maximal gleichzeitig benötigte Leistung zu vergüten. Der Arbeitspreis berücksichtigt die Summe der insgesamt bezogenen elektrischen Energie. Hierbei kann preislich zwischen tages- und jahreszeitlichen Hoch- und Niedertarifzeiten unterschieden sowie nach Abnahmemengen gestaffelt abgerechnet werden. Der Bezug von Blindleistung über die Grenze eines $\cos\phi$ von

0,9 muß zusätzlich vergütet werden. In der Regel wird dies jedoch durch die Integration einer Blindleistungskompensation in den elektrischen Energieverteilungen vermieden.

Bei Bedarf besteht die Möglichkeit, mit dem EVU einen Reservestrombezug zu vereinbaren. Der Reservestrombezug erlaubt, zeitlich begrenzt die über die vertraglich bestellte elektrische Leistung hinaus erforderliche elektrische Leistung zu beziehen. Die Leistungspreise für den Reservestrombezug sind abhängig von der Dauer der Beanspruchung, liegen jedoch meist erheblich unterhalb der Jahresbestelleistung. Die maximale relative Bezugsdauer und teilweise auch die maximale Häufigkeit sind vertraglich begrenzt.

6.2 Faulgas

Die Investitionen und Betriebskosten für die Erzeugung von Faulgas sind je nach Betrachtungsweise unterschiedlich anzusetzen. In der Regel werden die Kosten für die Faulgaserzeugung mit Null angesetzt.

6.3 Erdgas

Die Investitionen für die Erstellung eines Gasversorgungsanschlusses betragen ca. 5 – 10 DM/kW. In den Kosten werden anteilig die einmaligen Aufwendungen des Gasversorgers für den Erdgasanschluß bis zur Grundstücksgrenze des Verbrauchers umgelegt.

Weitere Investitionen setzen sich aus den technischen Einrichtungen für die Übernahme, ggf. die Wandlung und den verbraucherseitigen Transport sowie die Verteilung des Erdgases auf der Kläranlage, beispielsweise Druckregeleinrichtungen, Verteilungsnetze mit Rohrleitungen und Absperrorganen etc., zusammen. Bei einer Dimension der Gasleitung von DN 150 ergeben sich Kosten von ca. 200 DM/m für die Rohrverlegung in Gebäuden. Bei Erdverlegung sind ca. 100 DM/m für die Erdarbeiten hinzuzurechnen.

Die Betriebskosten für den Bezug von Erdgas teilen sich in den Leistungspreis und den Arbeitspreis auf. Mit dem Leistungspreis wird die höchste Tagesenergieabnahme vergütet. Der Arbeitspreis berücksichtigt die Summe der insgesamt bezogenen Gasarbeit und ist meist an eine Mindestabnahmemenge gekoppelt. Beispielhaft wird hier ein Angebot eines Gasversorgungsunternehmens (Stand 1998) betrachtet. Andere Tarifregelungen sind möglich.

Der Leistungspreis wird nach der höchsten Tagesenergieabnahme abgerechnet und beträgt 1,78 DM/(kWh·a).

Der Arbeitspreis wird nach der tatsächlich bezogenen Jahresgesamtarbeit des Erdgases abgerechnet. Der Arbeitspreis beträgt z.B. 0,03 DM/kWh bei einer jährlichen Abnahme von 8,5 Mio. kWh.

Gasversorgungsunternehmen bieten häufig den Bezug zusätzlicher abschaltbarer Gasmengen (Spotgas) an. In Zeiten des gasversorgerseitigen Überschusses an Erdgas wird die Möglichkeit verbilligter Bezugskosten, in der Regel vergünstigte Leistungspreise, angeboten.

Ein wesentlicher Nachteil ergibt sich aus dem langfristig nicht prognostizierbaren Bezug.

6.4 Brennstoffe

Die Kosten für den Bezug und die Speicherung von Zweitbrennstoffen bei mittlerer Abnahmemenge sowie deren erforderliche Speicherung sind in der folgenden Tabelle 13 der Speicherung von Faulgas bzw. dem Bezug von Erdgas gegenübergestellt.

Brennstoff	Bezugseinheit	Brennstoffkosten		Kosten Brennstoffspeicherung
		DM/Bezugseinheit	DM/kWh	
Faulgas	m _N ³	-	-	~ 2.000 DM/m ³
Erdgas (Durchschnittspreis)	m _N ³	0,42	0,04	-
Propangas mit bzw. ohne Mineralölsteuer	kg	1,15 0,64	0,09 0,05	~ 600 DM/m ³
Diesel (mit Mineralölsteuer)	kg	1,10	0,09	~ 700 DM/m ³
Heizöl (ohne Mineralölsteuer)	kg	0,45	0,04	~ 700 DM/m ³
Rapsöl	kg	0,97	0,10	~ 700 DM/m ³
Biodiesel	kg	1,23	0,12	~ 700 DM/m ³
Holz	kg	0,18	0,04	-

Tabelle 13: Kostenübersicht Brennstoffe sowie deren Speicherung

6.5 Klärschlamm

Die Verwertung von Klärschlamm erfordert einen von der Nutzungsanwendung abhängigen Mindestentwässerungsgrad. Die Schlammentwässerung verursacht verfahrensabhängig unterschiedliche Kosten für Investitionen und Betrieb (Energie und Hilfsmittel). Eine Übersicht für verschiedene Verfahren der Schlammentwässerung, ausgehend von einem zu entwässernden Schlamm mit 5 % TS-Gehalt und einer Durchsatzleistung des Entwässerungsaggregates von 30 m³/h zeigt Tabelle 14. In den Investitionen ist die Maschinen- und Anlagentechnik enthalten.

Kosten	Verfahren der Schlammentwässerung		
	Dekanter	Hochdruck- presse	Kammerfilter- presse
Investitionen [DM/m ³]	38,50	61,50	57,70
Betriebskosten für Hilfsmittel [DM/m ³]	1,40	0,52	0,85
Betriebskosten für Energie [DM/m ³]	0,50	0,24	0,50

Tabelle 14: Investitionen und Betriebskosten verschiedener Schlammentwässerungsverfahren

Bei thermischer Schlamm Trocknung ist der Wasseranteil bestimmend für die Jahreskosten. Die Investitionen für Maschinen- und Anlagentechnik betragen ca. 250.000 DM/(t_{H₂O}·a) [BRAUTLECHT 2000]. Hinzu kommen Investitionen für das erforderliche Gebäude, die ca. 400 bis 500 DM pro m³ umbauten Raum betragen.

Die Energiekosten für die Schlamm Trocknung setzen sich zusammen aus den Kosten für die erforderliche thermische und elektrische Energie. Die thermische Energie wird für die Verdampfung des Wasseranteils im Schlamm, die elektrische Energie für die Hilfsantriebe, Steuerung, etc. benötigt. Legt man für die Bewertung der Kosten bei der erforderlichen thermischen Energie den Einsatz von Erdgas zugrunde, so betragen die jährlichen Betriebskosten bezogen auf die enthaltene Trockensubstanz etwa 25 DM/(t_{TS}·a). Für die elektrische Energie sind etwa 12 DM/(t_{TS}·a) aufzuwenden.

Die Gesamtkosten können zu ca. 130 DM/(t_{TS}·a) bei vollgetrocknetem Schlamm und zu ca. 590 DM/(t_{TS}·a) bei entwässertem Schlamm (TS = 30 %) abgeschätzt werden. [KETTERN ET AL. 1996]

6.6 Wasserkraft

Die Einsatzbereiche von Wasserkraftanlagen liegen aufgrund der begrenzten Durchflußmenge und des geringen geodätischen Höhenunterschieds auf Kläranlagen typischerweise zwischen 10 und 100 kW_{elektr.}. Die Investitionen für eine Wasserkraftanlage betragen für Maschinen- und Anlagentechnik in einer Größenordnung < 1 MW elektrischer Leistung ca. 12.000 DM/kW [HEINLOTH 1997] bzw. nach MELIß (1999) sogar 14.000 bis 18.000 DM/kW.

Die jährlichen Betriebskosten können mit etwa 2 % der Investitionen abgeschätzt werden und betragen ca. 240 bis 360 DM/kW.

Bei einem Abschreibungszeitraum von 30 – 40 Jahren ergeben sich einschl. Abschreibung und Verzinsung für die relevanten Anlagengrößen Kosten von 0,10 bis 0,20 DM/kWh [MELIß 1999]. Nach HEINLOTH (1997) können diese Kosten sogar bis zu 0,35 DM/kWh betragen.

6.7 Windkraft

Die Gesamtinvestitionen einer Windkraftanlage betragen nach MELIß (1999) in Abhängigkeit der Größe für Anlagen

- bis 100 kW: 2.000 – 3.000 DM/kW,
- 100 – 1.000 kW: 1.200 – 1.700 DM/kW,
- über 1.000 kW: 1.500 – 2.000 DM/kW.

Die jährlichen Betriebskosten, die sich im wesentlichen aus Kosten für Versicherung, Wartung und Reparatur zusammensetzen, liegen im Bereich von 30 bis 80 DM/kW und damit bei etwa 2 – 3 % der Investitionen. [BUNDESVERBAND WINDENERGIE 1998]

Die Stromerzeugungskosten ergeben sich nach MELIß (1999) wie folgt:

- bis 100 kW: 0,30 – 1,00 DM/kWh
- 100 – 1000 kW: 0,14 – 0,54 DM/kWh
- über 1.000 kW: 0,12 – 0,30 DM/kWh

6.8 Solarenergie

Photovoltaik

Die Investitionen einer Photovoltaikanlage betragen ca. 8.000 – 20.000 DM/kW_p [MELIß 1999]. Für Anlagen kleiner Leistung (bis ca. 20 kW_p) können diese auf bis zu 23.000 DM/kW_p ansteigen [HEINLOTH 1997].

Die jährlichen Betriebskosten betragen ca. 40 bis 100 DM/kW_p [BINE 1998]. Die Stromerzeugungskosten liegen bei 1,00 bis 2,00 DM/kWh [MELIß 1999].

Solarthermie

Die Investitionen einer solarthermischen Anlage sind stark abhängig von der Ausführung der Kollektoren und betragen nach MELIß (1999) für

- einfache Kunststoffabsorber (unverglast) ca. 100 – 250 DM/m²,
- Luftkollektoren 400 – 1.000 DM/m²,
- Flachkollektoren 900 – 2.500 DM/m²,
- Thermosiphonanlagen 1.300 – 1.800 DM/m² und
- hocheffiziente Kollektoren 2.500 – 3.500 DM/m².

Hinzu kommen Kosten für einen Wärmespeicher (abhängig von Volumen und Ausführung) sowie die Rohrleitungsperipherie und Pumpen von etwa 600 DM/m².

Die Wartungskosten betragen ca. 20 DM/m². [BINE 1998].

Bei einem Abschreibungszeitraum von 25 Jahren ergeben sich somit einschl. Abschreibung und Verzinsung Kosten von 0,23 bis 0,42 DM/kWh. [BINE 1998]

6.9 Abwasserwärme

Die Investitionen für Wärmepumpen liegen je nach Ausführung (Elektrowärmepumpen, Absorberwärmepumpen, etc.) bei 1.000 bis 3.000 DM/kW Heizleistung. Damit ergeben sich Wärmegestehungskosten von 0,09 – 0,25 DM/kWh. [MELIß 1999]

6.10 Oberflächennahe Erdwärme

Die oberflächennahe Erdwärme läßt sich in zwei Varianten unterteilen:

- waagrecht in ca. 1,2 bis 1,5 m Tiefe verlegte parallele Rohrsysteme als Erdsonde zur Wärmeentnahme und

- senkrechte Erdsonde für Tiefen von ca. 30 bis 100 m zur Wärmeentnahme.

Die Investitionen für die Erdwärmenutzung mit waagrecht verlegten Rohrsystemen bestehen aus den Kosten für das Rohrsystem mit etwa 30 DM/m sowie für den etwa 1 m breiten Erdgraben mit ca. 100 DM/m.

Die Investitionen bei senkrechten Erdsonden bestehen aus den Kosten für die Erdsonde mit etwa 50 DM/m und für die erforderliche Bohrung, die je nach Beschaffenheit der Erdoberfläche und des Untergrunds mit etwa 100 DM/m angesetzt werden kann.

Bei beiden Nutzungsformen kommen noch Kosten für die Wärmepumpen hinzu, die in etwa analog zu denen der Abwasserwärme sind (siehe Kapitel 6.9).

6.11 Gebäudekosten

Die Investitionen für Gebäude, z.B. für eine Trafostelle, den Mittelspannungsraum, den Maschinenraum einer BHKW-Anlage, etc. betragen ca. 400 bis 500 DM/m³ für den umbauten Raum.

6.12 Heizungsanlagen

Die Investitionen für konventionelle Heizkesselanlagen betragen bis 100 kW Heizleistung ca. 1.000 bis 1.200 DM/kW [HEINLOTH 1997]. Bei höherer Heizleistung werden diese Kosten weit unterschritten.

Die jährlichen Wartungs- und Betriebskosten können mit etwa 2 - 3 % der Investitionen bzw. 20 bis 35 DM/kW Heizleistung abgeschätzt werden.

6.13 BHKW

In der Literatur werden unterschiedliche Angaben über die wirtschaftliche Einsatzgrenze von BHKW-Anlagen genannt. So geht DICHTL (1996) davon aus, daß ab einer Kläranlagengröße von 20.000 E mit einem wirtschaftlichen Betrieb gerechnet werden kann. Das Handbuch Energie in Kläranlagen [MÜLLER ET AL. 1999] setzt bereits für Anschlußgrößen von 5.000 E einen Zielwert für die energetische Nutzung von Faulgas über Kraft-Wärme-Kopplung an (vgl. Tabelle 2). Heutzutage sind betriebssichere BHKW-Module bereits ab 3 - 5 kW_{elektr.} erhältlich. Ein sinnvoller Einsatz ist aufgrund des Aufwands für die erforderliche Rohrleitungsanbindung und elektrische Einspeisung ab ca. 80 kW möglich, was in etwa einer Abwasserreinigungsanlage mit einer Anschlußgröße um 20.000 E entspricht.

Die spezifischen Investitionen für eine Nutzung des Faulgases mit BHKW-Anlagen zeigt Abbildung 48. Für Modulgrößen bis 50 kW_{elektr.} liegen die Kosten zwischen 5.000 und 7.000 DM/kW, für Modulgrößen über 1.000 kW_{elektr.} sinken sie bis auf etwa 1.000 DM/kW [MAN 1998].

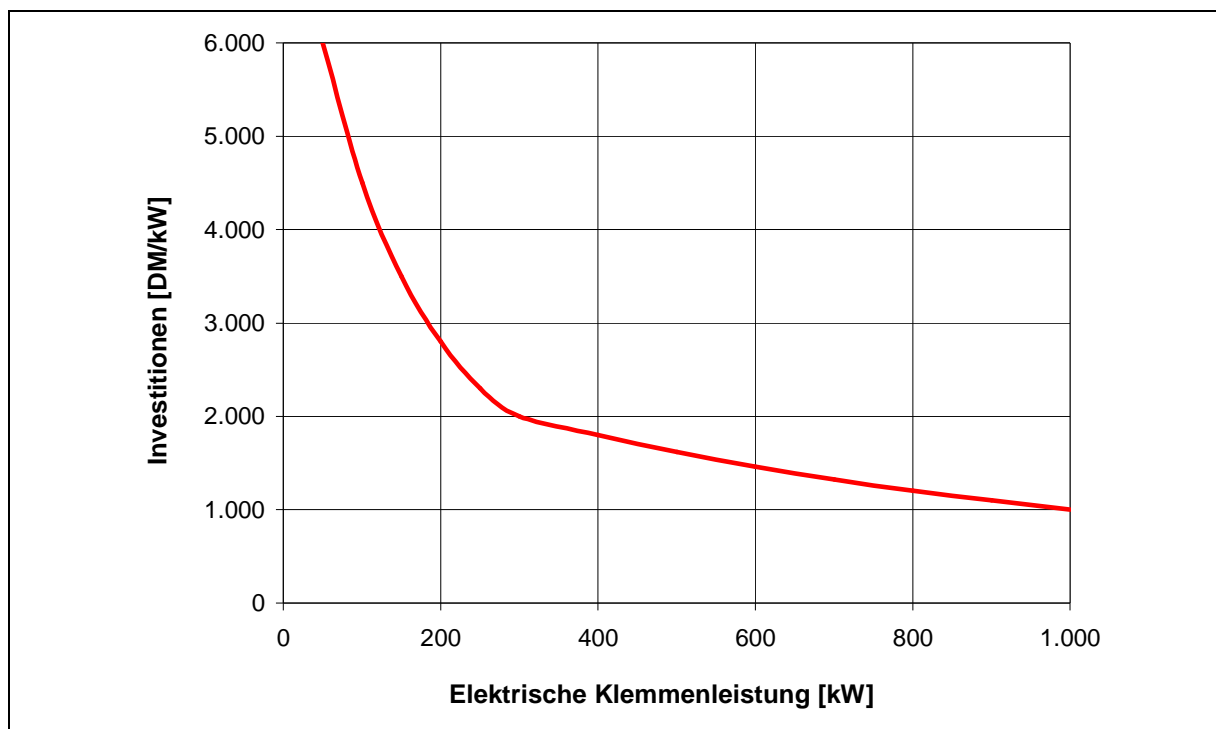


Abbildung 48: Investitionen für BHKW-Module

Zusätzlich zu den eigentlichen Modulkosten sind Kosten für die elektrischen Einrichtungen je nach BHKW-Modulgröße zwischen 8.000 und 15.000 DM zu berücksichtigen. Die Kosten für die Rohrleitungsperipherie können nicht allgemeingültig angegeben werden, da diese stark von örtlichen Randbedingungen abhängen. Bei einer unmittelbar verfügbaren Anbindung der Gasleitungen und der Niedertemperaturwärmeleitungen betragen die Investitionen ca. 5.000 – 10.000 DM.

Die Kosten für den Schmierölverbrauch - je nach BHKW-Modul werden zwischen 0,35 und 0,45 g/kWh verbraucht [MAN 1998] - betragen bei einem geschätzten Schmierölpreis von 5 DM/kg ca. 0,17 bis 0,22 DM/kWh.

Weitere Betriebskosten werden durch erforderliche Wartungs- und Reparaturarbeiten der BHKW-Module, Personalkosten für den zusätzlichen Aufwand des Betreibers und Kosten für Ersatzteile verursacht. Der zusätzliche Personalaufwand für den Betreiber ist unterschiedlich und schwierig zu beziffern. Ausgehend von einem überschläglichen Einsatz von einer Person und einer Stunde pro Kalendertag fallen bei einem Stundensatz von 80 DM/h jährliche Kosten von etwa 30.000 DM an. Ein Re-

gelwartungsvertrag, der alle zyklischen Wartungsarbeiten des Moduls umfaßt, verursacht spezifische Kosten von ca. 1 DPf/kWh [MAN 1998]. Ein Vollwartungsvertrag, der zusätzlich zu den Regelwartungen auch die Instandsetzungsarbeiten und die Beseitigung von Betriebsstörungen inkl. der erforderlichen Materialien und der Ersatzteile beinhaltet, verursacht spezifische Kosten von ca. 2,5 DPf/kWh [MAN 1998].

7 Zusammenfassung

Für einen wirksamen Klimaschutz ist auch auf Kläranlagen eine zukunftsgerichtete und nachhaltige Energieversorgung anzustreben. Derzeit erfolgt die Versorgung einer Kläranlage mit elektrischer und thermischer Energie insbesondere über das öffentliche Netz, durch Brennstoffe und durch Faulgas. Fossile und nukleare Energieträger erfüllen jedoch nicht die Kriterien der Nachhaltigkeit. Den erneuerbaren Energieträgern kommt bei der Umsetzung der umwelt- und energiepolitischen Ziele eine besondere Bedeutung zu. Der Anteil der regenerativen Energieträger an der öffentlichen Stromerzeugung soll bis 2010 verdoppelt, langfristig sogar auf 50 % im Jahr 2050 erhöht werden. Um dieses Ziel zu erreichen und damit zur Reduktion der klimarelevanten Emissionen beizutragen, bietet es sich auch auf Kläranlagen an, alternative Energieträger in die Energieversorgung einzubinden.

Die Umsetzung einer alternativen Energieversorgung für Kläranlagen erfordert eine genaue Kenntnis der kläranlagenspezifischen Charakteristika, um die Sicherstellung der Gewässerreinigung nicht zu beeinträchtigen. Energieverbrauch und Leistungsaufnahme von Kläranlagen unterliegen z.T. sehr großen Schwankungen, was bei der Konzeptionierung eines Energiemanagementkonzeptes unbedingte Berücksichtigung finden muß. Die Einflußparameter auf den Energieverbrauch und die Leistungsaufnahme sowie deren Auswirkungen auf die Energieversorgung werden im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens ausführlich diskutiert.

Für folgende Energieträger wurde eine umfangreiche Bewertung ihrer Eignung zur Einbindung in ein Energiemanagementkonzept für Kläranlagen durchgeführt:

- EVU-Strom,
- Faulgas,
- Zweitbrennstoffe
(EVU-Erdgas, Propangas, Diesel/Heizöl, Biodiesel/Rapsöl und Holz),
- Klärschlamm,
- Wasserkraft,
- Windkraft,
- Solarenergie,
- Abwasserwärme sowie
- oberflächennahe Erdwärme.

Dabei wurden neben einer umfangreichen Darstellung der technischen Voraussetzungen zur Nutzung der einzelnen Energieträger deren zeitliche, quantitative, geographische, witterungsbedingte sowie verfahrensbedingte Verfügbarkeit zusammengetragen. Auch die rechtlichen Aspekte der Abwasserreinigung und der Energieversorgung sowie der gegenseitigen Berührungspunkte wurden eingehend betrachtet.

Die derzeitige Verbreitung regenerativer Energieträger auf kommunalen Kläranlagen wurde durch eine bundesweite Umfrage erfasst. Dabei wurden insgesamt 52 Kläranlagen mit alternativer Energieversorgung identifiziert. Der wesentliche Anteil wird durch die Windenergie beigesteuert, einen Energieträger, dem auch wirtschaftlich ein hohes Potential beigemessen wird.

Im Rahmen einer „Grobanalyse“ wurde zusammenfassend bewertet, ob die diskutierten Energieträger für die Energieversorgung einer Kläranlage sinnvoll einsetzbar sind und welchen Anteil sie an der Energieversorgung der Kläranlage übernehmen können. Abschließend wurden die Kosten der Energieträger detailliert vorgestellt.

Damit steht nun ein umfangreiches Werk mit wesentlichen Hintergrundinformationen über die Eignung verschiedener Energieträger und deren Kombinationsmöglichkeiten auf Kläranlagen zur Verfügung.

Im folgenden Band II des Berichtes werden aufbauend auf diesen Erkenntnissen die Grundzüge für die Entwicklung und Umsetzung eines Managementkonzeptes erläutert. Unter Anwendung der in Band I zusammengetragenen Informationen wurde ein Simulationsprogramm entwickelt, das die drei Bausteine

- Energieverbrauchsermittlung,
- Energieverbrauchsdeckung sowie
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Jahreskostenbasis

verknüpft. Damit wird ein technisches und wirtschaftliches Beurteilungsinstrument der Energiebereitstellung auf Kläranlagen und eine Entscheidungshilfe für eine sich anschließende Planung einer möglichst weitgehenden Eigenenergieversorgung geboten. Die Umsetzung mitsamt wirtschaftlicher Betrachtung wird am Beispiel des Klärwerks Vreden demonstriert.

8 Literatur

Allnoch (1993):

Wind messen und auswerten

Praxis Geographie, H. 7-8, S. 59-62 (verändert)

Allnoch (1998):

IWR-Windindex Forschungsgruppe Windenergie

Allnoch (1999):

Zur Entwicklung der deutschen und europäischen Windenergienutzung 1998

Windkraft Journal, Ausgabe 2/1999, 19. Jahrgang, S. 24-28

Abwassertechnische Vereinigung e.V. - ATV (1978):

Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik

Band III, Zweite Auflage, Abschnitt B: Gewinnung und Verwertung von Faulgas, Kapitel 2.6, S. 496-497

Abwassertechnische Vereinigung e.V. -ATV (1999):

ATV-Arbeitsblatt A 131, Bemessungen von Kläranlagen über 5.000 E

ARA-BER Vers. 4.16 (1998):

Das EDV-Programm ARA-BER für Windows, rechnerunterstützte Dimensionierung von Kläranlagen nach dem Hochschulgruppenansatz oder nach der ATV A-131, Revision 16 von 1998

BDI-VIK-VDEW (1999):

Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Netznutzungsentgelten für elektrische Energie vom 13.12.1999, Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. Berlin, VIK Verband der Industriellen Energie und Kraftwirtschaft, Essen, Vereinigung deutscher Elektrizitätswerke - VDEW - e.V., Frankfurt am Main, veröffentlicht im Internet unter www.vik-online.de

BINE (1997):

Förderfibel Energie - Öffentliche Finanzhilfen für den Einsatz erneuerbarer Energiequellen und die rationelle Energieverwendung, 5. Auflage

Fachinformationszentrum Karlsruhe, Forum für Zukunftsenergie e.V.

ISBN 3-87156-211-4

BINE (1998):

Enerneuerbare Energien in Deutschland; Projektinfo Nr. 5/September 1998
Herausgeber: Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftliche Information mbH, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1997):

Klimaschutz in Deutschland: Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderung, April 1997

Böhnke, B. (1991):

Bemessungsgrundlagen und –ansätze zur Stickstoffelimination – Ergebnisse eines Hochschulerfahrungsaustausches
Gewässerschutz · Wasser · Abwasser, Band 119, S. 447-457

Brockhaus (1994):

Der Große Brockhaus, ISBN 2-7653 11 00 6, 19. völlig neu bearbeitete Auflage, Brockhaus GmbH, Mannheim

Brautlecht, P. (2000):

Technische und ökonomische Aspekte kommunaler Klärschlamm-trocknungsanlagen, Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. - BGW (1997):

Erdgasheizung und solare Warmwasserbereitung, Ausgabe 10/1997; herausgegeben vom BGW Bonn

Bundesverband WindEnergie (1994):

Windenergie 1996
5. Ausgabe; herausgegeben vom Bundesverband WindEnergie e.V.

Bundesverband WindEnergie (1998):

Windenergie 1998
9. Ausgabe; herausgegeben vom Bundesverband WindEnergie e.V.

Dichtl, N.; Koppetsch, J. (1989):

Einfluß weitergehender Abwasserreinigungsmaßnahmen auf die Energiesituation von Kläranlagen, abwassertechnik, Heft 2/1989, S. 7-12

Dichtl, N. (1996):

Energiewirtschaft und Energiebilanz auf Kläranlagen
Schriftenreihe des Forschungsinstitutes für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW)
an der RWTH Aachen, Band 2, Kapitel 4

Dichtl, N.; Meyer, H.; Niehoff, H.-H. (1997):

Technisch/wirtschaftliche Aspekte der Faulgasverwertung in Gasmotoren auf
Kläranlagen im Zusammenwirken von Abwasserreinigung, Schlammbehand-
lung, Energieautarkie und Berücksichtigung weitergehender Emissionsaspek-
te, Mitteilungen der Oswald-Schulze-Stiftung, Heft 22

Drodt, W.; Koglin, B.; Dünnebeil (1998):

Zweistufige Klärschlamm-trocknungsanlage in Groß-Gerau mit integrierter
Wärmerückgewinnung, Korrespondenz Abwasser 11/98, S. 2115-2122

Energieagentur NRW (1998):

Solaratlas für Nordrhein-Westfalen, S. 40; Wuppertal 1998

Europäische Union – Der Rat (1998):

Geänderter Vorschlag für eine Richtlinie des Rates zur Schaffung eines Ord-
nungsrahmens der Gemeinschaft im Bereich Wasserpolitik vom 26.6.1998
Dokument 9710/98 ENV 300 PRO-COOP 104

Fischer, T. (1998):

Kleine Geschichte der Biogastechnik, EntsorgungsPraxis 5/98, S. 69-70

Günther, T. (1997):

Das Turas Wasserrad, ein einseitig gelagertes Wasserrad
Wasserkraft & Energie 2/97, S. 52-56

Grünebaum, Th.; Weyand, M.; Schmitt, F.; Schröter, D. (1996):

Analyse der Betriebskosten von Kläranlagen
Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 32, S. 5-30

Hahn, H. H.; Kordes, B. (1984):

Energiebilanz bei der Abwasserreinigung - Grenzen und Möglichkeiten der
Energieautarkie, Korrespondenz Abwasser 3/84, S. 158-166

Heinloth, K. (1997):

Die Energiefrage, Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten,
Vieweg, ISBN 3-52803106-9

HessenEnergie (1994):

Klärgas-BHKW-Anlagen in Hessen – Auswertung von Anlagen, die nach dem hessischen Energiegesetz gefördert wurden. Hrsg. vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten

Hohmann, R. (1981):

Technik der Methangas-Tankstelle auf der KA Essen-Frohnhausen
GWA Band 45, S. 269-276

Hoffmann, J. (1982):

Energiehaushalt auf Kläranlagen; Bilanzierung und Wirtschaftlichkeit, Korrespondenz Abwasser 12/82, S. 896-904

Imhoff, Karl u. Klaus (1993):

1993, 28. Auflage
Taschenbuch der Stadtentwässerung

Kapp, H. (1997):

Abhängigkeit der Energiebilanz von der Verfahrenstechnik der Abwasserreinigung, VDI-Seminar „Energiekonzepte mit BHKW für Kläranlagen“ am 25. und 26. November in Neuss

Kettern, J.; Gallenkemper, B.; Brautlecht, P.; Böning, Th. (1996):

Klärschlamm-Sortierungskonzept für den Kreis Steinfurt; Abschlußbericht des FiW an der RWTH Aachen und des INFA-Institut für Abfall- und Abwasserwirtschaft, August 1996

Kiess, Fr. (1966):

Über die Eigenstromversorgung auf Kläranlagen unter besonderer Berücksichtigung der Stromerzeugung aus Klärgas und Wasserkraft in Wuppertal-Buchenhofen, Sonderdruck aus der Zeitschrift Kommunalwirtschaft, Heft 9, S. 1-6, Deutscher Kommunal-Verlag GmbH

König, P.; Rossmann, A. (1999):

Ratgeber für Gasturbinenbetreiber
Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Koglin, B. (1999):

Rückgewinnbare Wärme bei der Kondensation der Brüden der Klärschlamm-trocknung, Korrespondenz Abwasser 5/96, S. 848-860

- Komorowski, K. (1992):
Einsatz Erneuerbarer Energien als Energieversorgung bei der kommunalen
Abwasserbehandlung, GWA Band 131, S. 415-424
- Kuhnert, H. (1988):
Energie aus Wasserkraft, Wasserwirtschaft 78, 1988
- Kunz, P. (1988):
Prozeßführung von Kläranlagen – technisch-wirtschaftliche Optimierung am
Beispiel der biologischen Vorklärung, Springer Verlag, Berlin
- Lampe von, U. (1998):
Liberalisierung Wechselstrom, Capital 7/1998, S. 76-88
- MAN (1998):
persönliche Firmeninformation
- Marutzky, R; Strecker, M. (1999):
Moderne Feuerungstechnik, Energetische Verwertung von Gebrauchtholz,
Umwelt Nr. 1/2 – Januar/Februar 1999
- Meliß, M. (1999):
REGLOB 99 – Globale Betrachtung regenerativer Energieressourcen und ihre
technischen Nutzungsmöglichkeiten, April 1999
Solar-Institut der Fachhochschule Aachen, Ginsterweg 1, 52428 Jülich
- Meyer H., Kaudelka A., Podewils W. (1983):
Technisch/wirtschaftliche Aspekte der Klärgasverwertung auf Kläranlagen im
Zusammenwirken von Abwasserreinigung und Energieautarkie; Mitteilungen
der Oswald-Schulze-Stiftung, Heft 4, 1983
- Möller, U. (1986):
Wechselwirkung zwischen Abwasserbeschaffenheit, Abwasserbehandlung
und Schlammmenge und –beschaffenheit
ATV-Fortbildungskurs E/3, Schlammbehandlung und –beseitigung
19.-21.02.1986 in Essen

Müller, E.A. (1997):

ARA-externe Wärmenutzung: Erfahrungen realisierter Anlagen und Einsatzmöglichkeiten

„Energie in ARA“, Verbandsbericht Nr. 517 der 205. Mitgliederversammlung des VSA (Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute) am 27.Nov. in Bern, S. 135-139

Müller, E.A.; Kobel, B.; Künti, Th.; Pinnekamp, J.; Seibert-Erling, G.; Schaab, R.; Böcker, K. (1999):

Handbuch Energie in Kläranlagen

im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen

MWMTV – Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (1999):

Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen 1999; Daten und Fakten

N.N. (in Vorbereitung):

Energetische Feinanalyse für das Klärwerk Vreden

durchgeführt durch Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen und Ingenieurbüro Redlich und Partner

N.N. (2000):

Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes vom 29. März 2000

BGBl. I 2000 S. 305

N.N. (1998):

Umfrage „Energie auf Kläranlagen“

im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen

Poweska, M. (1998):

Windkraftvorsorgeplanung in Bochum

Diplomarbeit an der Ruhr-Universität Bochum

Riegler, G.; Bau, K. (1989):

Auswirkungen der N-Elimination bei der Abwasserreinigung auf die Energie-
wirtschaft einschl. Faulgasverwertung, Schriftenreihe Siedlungswasserwirt-
schaft Bochum, Band 14, S. 21-29

Roth, M. (1998):

Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen
Handbuch Wasser 4, Band 13, Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-
Württemberg

RWE (1995):

RWE Energie Bau-Handbuch
11. Ausgabe, 4/1995, 2. Auflage
Hrsg.: RWE Energie Aktiengesellschaft, Bereich Anwendungstechnik, 45117
Essen

Ryssel, W. (1938):

Die Klärgastankstelle in Stuttgart, Städtereinigung, Jahrgang 30, Heft 5, S. 99
und Heft 6, S. 116

Schleswag AG (1998):

Geschäftsbericht 1997

STAWAG Aachen (1998):

Stromlieferungsvertrag Preisregelung L 200

Straubel, D.; Ehrlich, H.; Huenges, E.; Wolff, H. (1998):

Rechenmodell zur Analyse der Wärmegestehungskosten bei hydrothormaler
Nutzung

zitiert in: Ehrlich, H.; Erbas, K.; Huenges, E. (eds.): Angebotspotential sowie
rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothormaler Ressour-
cen, Geothermie Report 98-1

Strunkheide J., Witte, H. und Berger Ch. (2000):

Wärmerückgewinnung aus Belebungsanlagen, wwt awt 2/2000, Seiten 19-22

Umweltbundesamt (1997):

Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland, S. 94
hrsg. vom Umweltbundesamt, Fachgebiet I 4.3 „Umweltberichterstattung,
Umweltstatistik“, Ausgabe 1997

Vahrenholt, F. (1998):

Globale Marktpotentiale für erneuerbare Energien; Deutsche Shell AG, Abt. Information und Presse, aus der Reihe: Analysen und Vorträge, 1/1998

VDEW (1999):

VDEW-Pressekonferenz, Düsseldorf, 24.03.1999

Welzel, B.; Gentner, C. (1998):

Drosseln mit Energiegewinn, UmweltMagazin, März 1998

Wiebusch, J.; Seyfried, F.; Johnke, B.; Credo, S. (1997):

Stand der Mono-Klärschlammverbrennung in Deutschland, Korrespondenz Abwasser 3/97, S. 473-492

Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (1999):

NRW 2030: Nachhaltig mit Energie wirtschaften; herausgegeben vom Ministerium für Bauen und Wohnen des Landes NRW (MBW)

Wörsdörfer, A. (1997):

Dualgasbetrieb von Deponiegas-Blockheizkraftwerken – Einsatz von Biogas und Holzgas, Neue Aspekte bei der Deponiegasnutzung: Innovation in Forschung und Verfahren, hrsg. von G. Rettenberg und R. Stegmann, Economica Verl., 1997

Wöffen, B. (1991):

Wirtschaftlichkeitsstudie zur Schlamm Entsorgung, Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft mbH, März 1991

Zhang, J. (1999):

Stoff- und Energieflußanalyse bei der Planung thermischer Klärschlammbehandlung, Korrespondenz Abwasser 5/99, S. 743-755

ZV Balingen (1998):

Eigenangabe Zweckverband Abwasserreinigung Balingen, Mühlhalde 3, 72336 Balingen, Tel. 07433 / 900-40, div. Broschüren 1997 / 1998



Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft
an der RWTH Aachen e.V.
Mies-van-der-Rohe-Straße 17
52056 Aachen



Ingenieurbüro Redlich und Partner GmbH
Beratende Ingenieure für Elektrotechnik
Technologiezentrum Jülich
Karl-Heinz-Beckurts-Straße 13
52428 Jülich

TUTTAHS & MEYER
INGENIEURGESELLSCHAFT



FÜR WASSER-, ABWASSER-
UND ABFALLWIRTSCHAFT MBH

Bismarckstraße 2 - 8 52066 Aachen

**Entwicklung eines Managementkonzeptes
für eine wirtschaftliche Energiebereitstellung
auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen
mit dem Ziel der Energieautarkie**

- Band II -

Projektbearbeitung FiW:

Dipl.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bolle

Dipl.-Ing. Peter Brautlecht

Dipl.-Ing. Sylvia Gredigk

Projektbearbeitung IBR:

Dipl.-Ing. Richard Wagner

Dipl.-Ing. Frank Illing

Dipl.-Ing. Stefan Schmuck

Projektbearbeitung Tuttahs & Meyer:

Dr.-Ing. Markus Schröder

Dipl.-Ing. Arnold Schäfer

Dipl.-Ing. Bernhard Wöffen

August 2000

INHALTSVERZEICHNIS**BAND II**

1 Einleitung	1
2 Managementkonzept für die Energiebereitstellung auf Kläranlagen	4
2.1 Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie	5
2.1.1 Grundsätzliches.....	5
2.1.2 Sicherheitstechnische Aspekte der Energieautarkie	7
2.2 Datenbasis und Genauigkeitsstufen des Managementkonzeptes	7
2.3 Energieverbrauchsermittlung	11
2.3.1 Ermittlung des elektrischen Energieverbrauchs	11
2.3.2 Ermittlung des thermischen Energieverbrauchs.....	11
2.3.3 Ergebnis der Energieverbrauchsermittlung als Basis für die Verbrauchsdeckung	13
2.4 Energieverbrauchsdeckung	14
2.4.1 Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas	15
2.4.1.1 Faulgasanfall	17
2.4.1.2 Faulgasverbrauch.....	18
2.4.2 Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffe	20
2.4.3 Energieverbrauchsdeckung durch Wasserkraft	22
2.4.4 Energieverbrauchsdeckung durch Windkraft	24
2.4.5 Energieverbrauchsdeckung durch Solarenergie	26
2.4.6 Energieverbrauchsdeckung durch Abwasserwärme	28
2.4.7 Energieverbrauchsdeckung durch oberflächennahe Erdwärme.....	29
2.4.8 Baustein Energieverbrauchsdeckung im Simulationsprogramm Eman.....	30
2.5 Wirtschaftlichkeitsnachweis auf Jahreskostenbasis	31
2.5.1 Einflußgrößen auf die Strombezugskosten	32
2.5.2 Einflußgrößen auf die Wärmebezugskosten	34
2.5.3 Kalkulation der Einspeisevergütung.....	34

2.5.4	Jahreskosten von BHKW-Anlagen	35
2.5.5	Jahreskosten von Wasserkraftanlagen	37
2.5.6	Jahreskosten von Windkraftanlagen	38
2.5.7	Jahreskosten von Solaranlagen	39
2.5.7.1	Photovoltaik	39
2.5.7.2	Solarthermie	39
2.5.8	Schlußfolgerungen aus den Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	40
3	Beispielhafte Anwendung der Simulation mit Standardwerten (Genauigkeitsstufe 3).....	43
3.1	Vorstellung der Kläranlage Vreden	43
3.2	Datenbasis und Genauigkeitsstufe der Beispielrechnung	45
3.3	Energieverbrauchsermittlung	45
3.3.1	Stromverbrauchsermittlung	45
3.3.2	Wärmeverbrauchsermittlung	48
3.4	Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie	53
3.4.1	Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas	53
3.4.1.1	Faulgasanfall	53
3.4.1.2	Faulgasverbrauch.....	54
3.4.2	Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffeinsatz (Status Quo-Lastfall)	55
3.4.3	Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Wasserkraft	57
3.4.4	Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft (Variante 1)	58
3.4.5	Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Solarenergie (Variante 2)	59
3.4.6	Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Solar- energie (Variante 3).....	61
3.5	Wirtschaftlichkeitsnachweis für alle Varianten.....	63

4 Anwendung der Simulation nach energetischer Optimierung der Kläranlage Vreden (Genauigkeitsstufe 2)	69
4.1 Wesentliche Ergebnisse der energetischen Feinanalyse	69
4.2 Energieverbrauchsermittlung	70
4.2.1 Stromverbrauchsermittlung	70
4.2.2 Wärmeverbrauchsermittlung	72
4.3 Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie	73
4.3.1 Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas	73
4.3.1.1 Faulgasanfall	73
4.3.1.2 Faulgasverbrauch	74
4.3.2 Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffeinsatz (analog Status Quo-Lastfall)	75
4.3.3 Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft (Variante 1)	75
4.3.4 Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Solarenergie (Variante 2)	77
4.3.5 Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Solar- energie (Variante 3)	77
4.4 Wirtschaftlichkeitsnachweis für alle Varianten (Genauigkeitsstufe 2)	79
5 Vergleich der Ergebnisse	83
6 Zusammenfassung	85
7 Literatur	88

ANLAGE

Simulationsprogramm Eman (CD-Rom)

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 49: Anwendungsprogramm Eman zur Simulation der Energieversorgung von Kläranlagen	3
Abbildung 50: Zielsetzung eines Managementkonzeptes für die Energiebereitstellung auf kommunalen Kläranlagen	4
Abbildung 51: Beispielhafte Ergebnisse einer Energieverbrauchsermittlung für ein halbes Jahr.....	14
Abbildung 52: Entscheidungshilfe für die Faulgasnutzung auf kommunalen Kläranlagen	16
Abbildung 53: Entscheidungshilfe für die Zweitbrennstoffnutzung auf kommunalen Kläranlagen	21
Abbildung 54: Entscheidungshilfe für die Wasserkraftnutzung auf kommunalen Kläranlagen	23
Abbildung 55: Entscheidungshilfe für die Windkraftnutzung auf kommunalen Kläranlagen	25
Abbildung 56: Entscheidungshilfe für die solare Energienutzung auf kommunalen Kläranlagen	27
Abbildung 57: Entscheidungshilfe für die Abwasserwärmenutzung auf kommunalen Kläranlagen	28
Abbildung 58: Entscheidungshilfe für die oberflächennahe Erdwärmenutzung auf kommunalen Kläranlagen	29
Abbildung 59: Eingabematrix des Programmes Eman zur Simulation der Energiebereitstellung verschiedener Varianten.....	30
Abbildung 60: Einwohnerspezifische Jahreskosten von Kläranlagen für das Jahr 1991 [Imhoff 1993, S. 95].....	32
Abbildung 61: Eingabematrix Eman für die Variation verschiedener Strombezugskosten	33
Abbildung 62: Gegenüberstellung der Einspeisevergütungen (ESV) für 1998 mit spezifischen Energiekosten	42
Abbildung 63: Stündliche Schwankungen der elektrischen Leistung in % der mittleren Leistung.....	46
Abbildung 64: Wochentagsschwankungen der elektrischen Leistung bezogen auf die mittlere Leistung je Wochentag.....	46

Abbildung 65:	Monatliche elektrische Leistung in Relation zur mittleren monatlichen elektrischen Leistung	47
Abbildung 66:	Eingabematrix der Schwankungen des elektrischen Energieverbrauches (Genauigkeitsstufe 3)	48
Abbildung 67:	Auf Jahresmittelwerte bezogene thermische Leistung für Schlammaufheizung und Gebäudebeheizung	52
Abbildung 68:	Eingabematrix der Schwankungen des thermischen Energieverbrauches (Genauigkeitsstufe 3)	53
Abbildung 69:	Eingabematrix der Schwankungen des Faulgasanfalles (Genauigkeitsstufe 3)	54
Abbildung 70:	Eingabematrix zur Abbildungen der Schwankungen des Windenergiedargebotes (Genauigkeitsstufe 3)	58
Abbildung 71:	Eingabematrix zur Abbildungen der Schwankungen des Solarenergiedargebotes (Genauigkeitsstufe 3)	60
Abbildung 72:	Grundlagen der Investitions- und Betriebskostenermittlung für die Beispielkläranlage	64
Abbildung 73:	Investitionen der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 3).....	65
Abbildung 74:	Jahreskosten der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 3)	66
Abbildung 75:	Stündlicher elektrischer Energieverbrauch der Kläranlage Vreden in % des arithmetischen Tagesmittels.....	71
Abbildung 76:	Monatliche Schwankungen des elektrischen Energieverbrauchs der Kläranlage Vreden in % des arithmetischen Jahresmittels	71
Abbildung 77:	Mittlere monatliche Abwasser- und Lufttemperaturen sowie deren Abweichungen von den Solltemperaturen	72
Abbildung 78:	Monatliche Schwankungen des Gasanfalls der Kläranlage Vreden in % des arithmetischen Jahresmittels	74
Abbildung 79:	Investitionen der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 2).....	80
Abbildung 80:	Jahreskosten der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 2)	81

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 15:	Qualitätsstufen der Energieautarkie.....	5
Tabelle 16:	Wirkungsgrade der Vorklärung in Abhängigkeit der Durchflußzeit nach ARA-BER (1998).....	17
Tabelle 17:	Vor- und Nachteile verschiedener Steuerstrategien der Eigenstromerzeugung mit BHKW-Anlagen	19
Tabelle 18:	Kosten-Nutzen-Vergleich der Eigenenergieerzeugung über Faulgas im BHKW und Heizkessel	36
Tabelle 19:	Zusammenstellung der spezifischen Energiekostenbandbreiten und der Einspeisevergütungen.....	41
Tabelle 20:	Erforderliche Wärmeleistung für die Schlammaufheizung der Beispielkläranlage	50
Tabelle 21:	Zusammenstellung der Wärmeleistungen und des Jahreswärmeverbrauchs für die Beispielkläranlage.....	51
Tabelle 22:	Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für den Status Quo-Lastfall der Genauigkeitsstufe 3.....	56
Tabelle 23:	Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 1 der Genauigkeitsstufe 3.....	59
Tabelle 24:	Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 2 der Genauigkeitsstufe 3.....	61
Tabelle 25:	Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 3 der Genauigkeitsstufe 3.....	62
Tabelle 26:	Technische Kenndaten der untersuchten Varianten zur Energiebereitstellung der Kläranlage Vreden (Genauigkeitsstufe 3).....	63
Tabelle 27:	Investitionen der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 3).....	64
Tabelle 28:	Tabellarische Zusammenfassung der Jahreskosten (Genauigkeitsstufe 3).....	66
Tabelle 29:	Zusammenfassung der Energieverbrauchsdeckungsgrade der einzelnen Varianten sowie Beiträge der einzelnen Energieträger....	67
Tabelle 30:	Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für den Status Quo-Lastfall der Genauigkeitsstufe 2.....	75
Tabelle 31:	Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 1 der Genauigkeitsstufe 2.....	76

Tabelle 32:	Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 2 der Genauigkeitsstufe 2.....	77
Tabelle 33:	Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 3 der Genauigkeitsstufe 2.....	78
Tabelle 34:	Technische Kenndaten der untersuchten Varianten zur Energiebereitstellung der Kläranlage Vreden (Genauigkeitsstufe 2).....	79
Tabelle 35:	Zusammenfassung der Energieverbrauchsdeckungsgrade der einzelnen Varianten und Beiträge der einzelnen Energieträger (Genauigkeitsstufe 2).....	79
Tabelle 36:	Investitionen der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 2).....	80
Tabelle 37:	Tabellarische Zusammenfassung der Jahreskosten [DM/a] für Genauigkeitsstufe 2	81
Tabelle 38:	Prozentuale Einsparungen der Genauigkeitsstufe 2 gegenüber Genauigkeitsstufe 3	83

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABMG	Allgemeine Bedingungen für die Maschinen- und Kasko-Versicherung von fahrbaren Geräten
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
BB	Belebungsbecken
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zum BImSchG
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
B _{BB}	BSB ₅ -Fracht zur Belebung
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
B _{TS}	Schlammbelastung [kg/kg · d]
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
d	dies (Tag)
DtA	Deutsche Ausgleichsbank
E	Einwohner
E _{ges}	elektrischer Gesamtverbrauch einer Kläranlage [kWh/a]
E _{BB}	jährlicher Elektrizitätsverbrauch der Belebungsanlage (Belüftung, Umwälzung, Rezirkulation und Rücklaufschlammförderung)
EW _{BSB5}	aktueller mittlerer Einwohnerwert, berechnet aus der mittleren BSB ₅ -Fracht im Zulauf einer Kläranlage dividiert durch die jährliche einwohnerspezifische BSB ₅ -Fracht bei 60 g BSB ₅ /(E·d)
e _{ges}	Einwohnerspezifischer Stromverbrauch in kWh/(E·a)
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
elektr.	elektrisch
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ERP	European Recover Program
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EW	Einwohnerwerte
EWG	Europäische Wirtschafts-Gemeinschaft
GV	Glühverlust
GVU	Gasversorgungsunternehmen
GW	Gigawatt (elektrische / thermische Leistungseinheit = 1.000 kW)
GWh	Gigawattstunde (elektrische / thermische Arbeitseinheit = 1.000 kWh)
h	Höhe

HGB	Handelsgesetzblatt
HSW	Husumer Schiffswerft
HT	Hoch-Tarif (= Arbeitspreis der EVU für elektrische Arbeit in Tagstunden [DPf/kWh])
H _u	Heizwert, unterer
i. S. v.	im Sinne von
K _B	Betriebskosten [DM/a bzw. €/a]
K _I	Investitionen [DM bzw. €]
K _J	Jahreskosten = Kapital- und Betriebskosten [DM/a bzw. €/a]
K _K	Kapitalkosten = Abschreibung und Verzinsung [DM/a bzw. €/a]
KA	Kläranlage
kW	Kilowatt (elektrische / thermische Leistungseinheit = 1.000 Watt)
kWh	Kilowattstunde (elektrische / thermische Arbeitseinheit = 1.000 Wh)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LWG	Landeswassergesetz
MPP	Maximum Power Point
MSE	Maschinelle Schlammwässerung
MURL	Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen
MW	Megawatt (elektrische/thermische Leistungseinheit = 1.000 kWh)
N	Nitrogenium (Stickstoff)
NT	Nieder-Tarif (= Arbeitspreis der EVU für elektrische Arbeit in den Nachtstunden [DPf/kWh])
NW	Nordrhein-Westfalen
O	Oxygenium (Sauerstoff)
oTS	organischer Trockensubstanzgehalt [%]
P	Phosphor
P	Leistung [W bzw. kW]
PLS	Prozeßleitsystem
PS	Primärschlamm
Q	Volumenstrom [l/s bzw. m ³ /h]
RME	Rapsöl-Methylester
S _{Monat(Jahr)}	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die monatstypische Abweichung der elektrischen Leistung vom Jahresmittel angibt
S _{Monat, TL (Jahr)}	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die monatstypische Abweichung der thermischen Leistung für die Gebäudebeheizung vom Jahresmittel angibt

$S_{\text{Monat, TS}}$ (Jahr)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die monatstypische Abweichung der thermischen Leistung für die Schlammaufheizung vom Jahresmittel angibt
SPS	Systemprogrammierbare Steuerung
StrEG	Stromeinspeisungsgesetz
S_{Stunde} (Tag)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die stundentypische Abweichung der elektrischen Leistung vom Tagesmittel angibt
$S_{\text{Stunde, TL}}$ (Tag)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die stundentypische Abweichung der thermischen Leistung für die Gebäudebeheizung vom Tagesmittel angibt
$S_{\text{Stunde, TS}}$ (Tag)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die stundentypische Abweichung der thermischen Leistung für die Schlammaufheizung vom Tagesmittel angibt
S_{Tag} (Woche)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die wochentagstypische Abweichung der elektrischen Leistung vom Wochenmittel angibt
$S_{\text{Tag, TL}}$ (Woche)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die wochentagstypische Abweichung der thermischen Leistung für die Gebäudebeheizung vom Wochenmittel angibt
$S_{\text{Tag, TS}}$ (Woche)	Dimensionsloser Schwankungsfaktor, der die wochentagstypische Abweichung der thermischen Leistung für die Schlammaufheizung vom Wochenmittel angibt
T	(Reaktor-)Temperatur
TA	Technische Anleitung
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
therm.	thermisch
TR	Trockenrückstand [%]
TS	Trockensubstanzgehalt [mg/l]
TS_{VK}	Trockenmasseentnahme aus der Vorklärung [g/(E · d)]
TS_0	Trockenmasse im Zulauf zum Reaktor [g/(E · d)]
t_{TS}	Schlammalter
ÜS	Überschußschlamm
ÜS _P	Fällschlamm aus Phosphorfällung
USV	Unabhängige Stromversorgung
UVPg	Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung
VOL	Verdingungsordnung für Leistungen
W	Watt
WEA	Windenergieanlage
WG	Wassergehalt

WHG	Wasserhaushaltsgesetz
W _s	Schadenswahrscheinlichkeit je Jahr [%/a]

1 Einleitung

Eine zukunftsorientierte Energiepolitik bedingt aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen einen schonenden Umgang mit den verfügbaren fossilen Ressourcen und die weitgehende Nutzung von alternativen Energieträgern. Die Abwasserreinigung gehört ursächlich zu den Bereichen des aktiven Umweltschutzes. Sie erfordert jedoch enorme energetische und mithin finanzielle Aufwendungen zur Umsetzung der gesteckten Ziele.

Der Gesamtverbrauch an elektrischer Energie im Bundesland Nordrhein-Westfalen betrug 1997 nach Angaben des Statistischen Bundesamtes in Wiesbaden 131.910 GWh. Setzt man einen durchschnittlichen spezifischen Jahresverbrauch an elektrischer Energie für die Abwasserreinigung von 40 kWh/(E·a) an, so werden bei ca. 18 Millionen Einwohnern ca. 0,55 % der elektrischen Energie in NRW allein für die Reinigung des häuslichen Abwassers verbraucht. Zudem wird bei der Abwasserreinigung Wärmeenergie in ähnlicher Größenordnung benötigt. Dieser nicht unerhebliche Anteil belegt die Notwendigkeit, im Bereich der Abwasserreinigung alle Anstrengungen zu unternehmen, um eine ressourcenschonende und ökologische Energiepolitik voranzutreiben.

Mit dem vorliegenden Vorhaben werden Potentiale und Konzepte aufgezeigt, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten mittels weitgehender Nutzung, Integration und Kombination alternativer Energieträger eine weitgehende Energieautarkie von Kläranlagen zu erreichen. Da es nicht möglich ist, allgemeingültige und gleichermaßen wertvolle Lösungen zu erstellen, da vielmehr die im Einzelfall vorherrschenden Bedingungen einer jeden Kläranlage zu berücksichtigen sind, wurden die Charakteristika des Energieverbrauchs von Kläranlagen im Band I des vorliegenden Vorhabens eingehend erläutert. Dem Energieverbrauch gegenüber stehen die Möglichkeiten der Energiebereitstellung, die für alle einsetzbaren Energieträger und Wandlungsprozesse einschließlich der technischen und rechtlichen Voraussetzungen, der Verfügbarkeit und zugehöriger Kosten ebenso im Band I detailliert vorgestellt wurden.

Band II stellt nun ein die grundsätzliche Vorgehensweise zur Erstellung von Energiebereitstellungskonzepten für kommunale Kläranlagen mit weitgehender Energieautarkie vor. Solche Konzepte setzen aufgrund der vielfältigen und damit unterschiedlichen Ausgangssituationen auf kommunalen Kläranlagen eine systematische Vorgehensweise voraus. Generelle Aussagen, welcher Energieträger der sinnvollste ist, sind nicht möglich. Für jede einzelne Kläranlage muß eine detaillierte Untersuchung unter Beachtung der ortsspezifischen Randbedingungen erfolgen. Für alle Untersuchungen gilt einheitlich, daß bei der Umsetzung eines Energiemanagementkonzeptes die folgenden Anforderungen an die Abwasserbehandlung zu beachten sind:

- Einhaltung der gesetzlich festgelegten Reinigungsleistungen sowie
- Sicherheit beim Betrieb der Abwasser- und Schlammbehandlungsanlage.

Um diese Anforderungen sicher und ständig zu erfüllen, muß das Managementkonzept auf den folgenden drei Eckpfeilern der Energiebereitstellung gegründet sein:

- Stromversorgung im bestimmungsgemäßen Betrieb (d. h. auch bei Spitzenlast)
- Wärmeversorgung im bestimmungsgemäßen Betrieb (d. h. auch in strengen Winter)
- Notstromversorgung bei Ausfall des EVU-Netzes

Die zu beachtenden Randbedingungen zur Ermittlung der erforderlichen Ausgangs- und Grundlagendaten des Energieverbrauchs werden im vorliegenden Band ausführlich erläutert, um anschließend mit Hilfe geeigneter Untersuchungsmethoden die Möglichkeiten der Energiebedarfsdeckung durch verschiedene Energieträger einschließlich Wirtschaftlichkeitsnachweise bewerten zu können.

Um dem Betreiber kommunaler Kläranlagen eine schnelle und praktische Anleitung an die Hand zu geben, wurde zudem in diesem Forschungsvorhaben das Simulationsprogramm Eman (Programmiersprache Delphi) entwickelt (siehe Abbildung 49). Damit kann aufbauend auf den drei Bausteinen

- Energieverbrauchsermittlung
- Energieverbrauchsdeckung
- Wirtschaftlichkeitsnachweis auf Jahreskostenbasis

die Energiebereitstellung in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht beurteilt werden. Das Programm ist kein Ersatz für eine technisch versierte Planung, bietet sich jedoch als wirksame Entscheidungshilfe für eine sich anschließende Planung einer alternativen Energieversorgung von Kläranlagen mit möglichst weitgehender Eigenenergieversorgung an. Es ist diesem Bericht auf CD beigelegt.



Abbildung 49: Anwendungsprogramm Eman zur Simulation der Energieversorgung von Kläranlagen

Das Programm hinterlegt als Eingangsdatensatz den elektrischen und thermischen Energieverbrauch der Kläranlage im gesamten Jahresverlauf zu jeder Viertelstunde des Jahres (jeweils 35.040 Daten). Sind keine konkreten Betriebsdaten vorhanden, wird der Schwankungsverlauf mit Hilfe empirischer Energieverbrauchsdaten und typischer Tages-, Wochen- und Monatsganglinien simuliert. Gleiches gilt für die Abschätzung des Beitrags verschiedener Energieträger. Es können konkrete Daten (z. B. Faulgasanfall, Prognosen des Windanfalls oder der Solarstrahlung, etc.) eingegeben werden; ist dies nicht möglich, wird auf typische Dargebotsganglinien der Energieträger zurückgegriffen. Die Genauigkeit der Berechnungen steigt entsprechend mit den zur Verfügung stehenden anlagenspezifischen Angaben.

Zur Veranschaulichung wird in den Kapiteln 3 und 4 die Anwendung des entwickelten Modells beispielhaft für die Kläranlage Vreden mit zwei unterschiedlichen Genauigkeitsstufen dargestellt.

2 Managementkonzept für die Energiebereitstellung auf Kläranlagen

In Abbildung 50 sind die Einflußparameter für ein Managementkonzept zur optimierten Energiebereitstellung auf kommunalen Kläranlagen dargestellt. Vor einer Optimierung der Energiebereitstellung sollte in allen Fällen die Optimierung des Energieverbrauchs verbunden mit einer Anlagenoptimierung durchgeführt werden, um die Wirtschaftlichkeit einer Optimierung der Energiebereitstellung nicht durch Über- oder Unterdimensionierung zu gefährden. An dieser Stelle sei auf das Handbuch „Energie in Kläranlagen“ hingewiesen, das die möglichen Maßnahmen zur Energieverbrauchsoptimierung eingehend erläutert [MÜLLER ET AL. 1999].

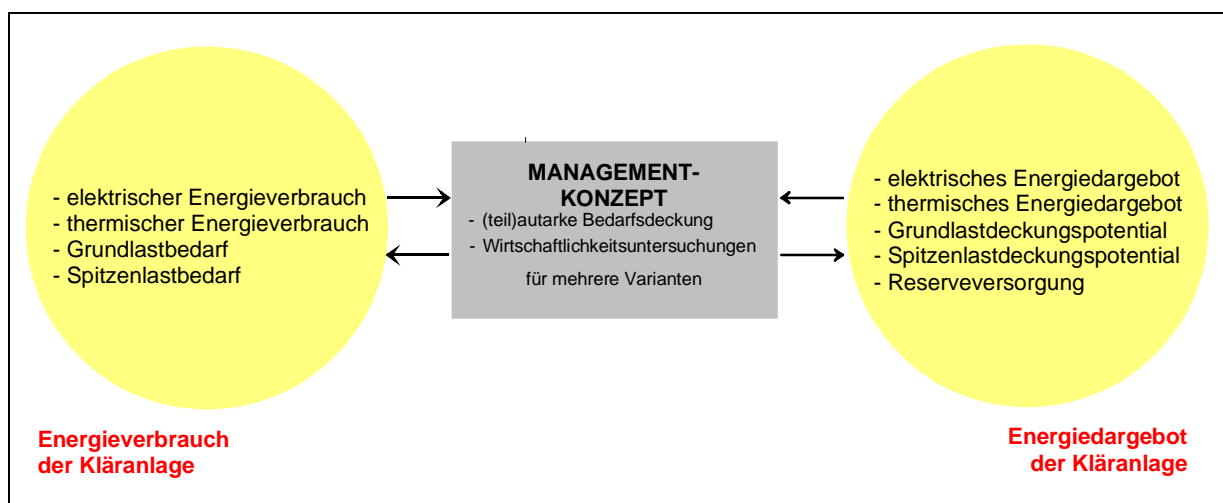


Abbildung 50: Zielsetzung eines Managementkonzeptes für die Energiebereitstellung auf kommunalen Kläranlagen

Fundierte Aussagen zur Energieversorgung der Kläranlage sind nur bei einer gezielten Analyse der Energiebedarfsstruktur der Kläranlage und des vorhandenen Energiepotentials möglich. Die Bilanzierung des Wärme- und Strombedarfs (*Energieverbrauchsermittlung*) bildet dabei die Grundlage für die weitere Vorgehensweise. Darauf aufbauend kann die Einbindung zusätzlich zu installierender Energieträger untersucht werden (*Energieverbrauchsdeckung*).

Die wesentliche Grundlage für die Entscheidung des Betreibers ist die Wirtschaftlichkeit. Aus diesem Grunde sind für das zu entwickelnde Energiemanagement als Eingangsparemeter die möglichen Kapitaldienste für die abzuleitenden Maßnahmen und die Tarifstruktur des Energieversorgers von entscheidender Bedeutung (*Wirtschaftlichkeitsnachweis*). Zukünftige Entwicklungen dieser Parameter sollten - soweit möglich - zumindest prognostiziert werden, da die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit gravierend sein können.

2.1 Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie

2.1.1 Grundsätzliches

Energieautarkie bedeutet für Kläranlagen die **vollständige oder teilweise** Selbstversorgung der Kläranlage mit Energie (vgl. Band I, Kap. 1).

Die Möglichkeiten zur Deckung des Energieverbrauchs hängen von den technischen Kapazitäten für die Eigenerzeugung sowie von der Verfügbarkeit der Primärenergieträger wie Faulgas, Propangas, Sonne und Wind etc. ab. Die Abhängigkeiten und wesentlichen Randbedingungen wurden in Band I ausführlich diskutiert.

Durch Gasspeicher können Faulgasanfall und Faulgasverbrauch geringfügig entkoppelt werden, d. h. durch Steuerung können die Primärenergieerzeugung und der Verbrauch der damit erzeugbaren elektrischen Energie zeitversetzt (je nach Speichergröße im allgemeinen $\frac{1}{2}$ - 1 Tag) stattfinden.

Bei der Stromerzeugung durch Wind, Wasser und Solarenergie ist die Speicherung grundsätzlich möglich (z. B. Batterien), jedoch wirtschaftlich bedingt nur eingeschränkt praktikabel.

Die übliche Vorgehensweise ist daher, zeitweilig auftretende Stromüberschüsse an das EVU gegen Einspeisevergütung zu verkaufen und zeitweise auftretende Energiedefizite durch das EVU oder Zweitbrennstoffeinsatz zu decken.

In Abhängigkeit der Fremdenergiezufuhr lassen sich entsprechend vier Qualitätsstufen einer Energieautarkie definieren.

Qualitätsstufe	Fremdenergiezufuhr [kWh/a]		Eigenenergieüberschuß [kWh/a]
	Zweitbrennstoffe	EVU-Strom	
1	0	0	≥ 0
2	X_{ZWEIT}	0	$\geq X_{\text{ZWEIT}}$
3	0	X_{EVU}	$\geq X_{\text{EVU}}$
4	X_{ZWEIT}	X_{EVU}	$\geq X_{\text{ZWEIT}} + X_{\text{EVU}}$

Tabelle 15: Qualitätsstufen der Energieautarkie

Als Voraussetzungen sind in allen Fällen die folgenden Bedingungen einzuhalten:

- a) Eigenenergieerzeugung [kWh/a] \geq Energieverbrauch [kWh/a]
- b) Eigenenergieüberschuß [kWh/a] \geq Fremdenergiezufuhr durch Zweitbrennstoffe (X_{ZWEIT}) und/oder EVU-Strom (X_{EVU}) [kWh/a]

In allen anderen Fällen, die sich nicht in die dargestellten Kategorien einordnen lassen, ist keine Energieautarkie gleich welcher Qualitätsstufe gegeben.

Qualitätsstufe 1:

Völlige Eigenständigkeit der Kläranlage bei der elektrischen und thermischen Energieverbrauchsdeckung; es werden weder zeitweilige EVU-Stromlieferungen noch Primärenergielieferungen anderer Art (Holz, technische Gase, Heizöl, Diesel, Rapsöl, o. ä.) benötigt.

Qualitätsstufe 2:

Eigenständigkeit der Kläranlage bei der Wärme- und Stromverbrauchsdeckung; die **Zweitbrennstofflieferung** [kWh/a sekundär] ist beschränkt auf eine Jahresmenge, die **geringer als die Stromeinspeisung** der auf der Kläranlage eigenproduzierten Energie an das EVU sein muß.

Qualitätsstufe 3:

Eigenständigkeit der Kläranlage bei der Wärme- und Stromverbrauchsdeckung; die **EVU-Stromlieferungen** [kWh/a] werden durch die Stromeinspeisung an das EVU [kWh/a] im langjährigen Mittel übertroffen; es erfolgt **keine Zweitbrennstoffzulieferung** anderer Art zur Kläranlage.

Qualitätsstufe 4:

Eigenständigkeit der Kläranlage bei der Wärme- und Stromverbrauchsdeckung; **EVU-Strom- sowie Zweitbrennstofflieferungen** [kWh/a sekundär] sind **in geringfügigem Maße zulässig**. „Geringfügig“ bedeutet dabei, daß die Menge der zugelieferten Energie geringer als der Eigenenergieüberschuß der Kläranlage sein muß.

2.1.2 Sicherheitstechnische Aspekte der Energieautarkie

Energieautarkie stützt sich allgemein auf die völlige Funktionsfähigkeit aller technischen Einrichtungen – Störungen und Defekte an einzelnen technischen Aggregaten (SPS, Gasmachine, Faulgasbehälter, Undichtigkeit des Gassystems, Gasdruckerhöhung) dürfen nicht zum Systemausfall der Kläranlage führen.

Redundanzen (= doppelt ausgeführte Aggregate) sind daher bei BHKW-Anlagen, Faulgaskompressoren, Umwälzungspumpen der Heizung, etc. sowie bei der Stromversorgung durch Notstromaggregate in technisch/wirtschaftlich vertretbarem Umfang notwendig. Soweit nicht bereits wasserrechtliche Belange Redundanzen zwingend erforderlich machen, gilt folgende Entscheidungsregel: Die Jahreskosten der Schadensvermeidungsmaßnahmen sollten geringer als das Produkt aus Schadenswahrscheinlichkeit und Kosten möglicher Schäden sein:

$$K_J < W_S \cdot K_I$$

mit: K_J = Jahreskosten der Schadensvermeidungsmaßnahmen
(Kapital- und Betriebskosten in DM/a bzw. €/a)

W_S = Schadenswahrscheinlichkeit je Jahr [%/a]

K_I = Investitionen zur Behebung möglicher Schäden [DM bzw. €].

Bei den in diesem Vorhaben durchgeführten Wirtschaftlichkeitsvergleichen werden die für sicherheitstechnische Aspekte zu veranschlagenden Kosten (z.B. EVU-Anschluß aus Gründen der Versorgungssicherheit) ausgeklammert, da diese in allen Fällen auftreten. Im allgemeinen ist ein Energieversorgungssystem, das sich auf mehrere kleine Aggregate stützt, sicherer als ein auf ein Großgerät gestütztes System.

2.2 Datenbasis und Genauigkeitsstufen des Managementkonzeptes

Eine Bewertung der Energiesituation einer Abwasserbehandlungsanlage setzt eine möglichst detaillierte Erfassung des Bestands voraus. Daran anschließend können Überlegungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs, worauf hier nicht näher eingegangen wird, und zur Erstellung eines Konzeptes für die Energiebereitstellung angestellt werden.

Die Konzipierung der Energieversorgung macht Angaben zur bestehenden Anlage erforderlich. Die Genauigkeit der Berechnung steigt mit den zur Verfügung stehenden Daten. Im folgenden sind die für das Managementkonzept erforderlichen Angaben näher detailliert:

A Energieverbrauchsermittlung

- Wenn vorhanden, Viertelstundenwerte des elektrischen und thermischen Leistungsbedarfs der gesamten Kläranlage. Dabei sind die Betriebswerte der EVU-Bereitstellung und die eigenerzeugte Leistung mit Direktantrieben und/oder BHKW zu berücksichtigen. Ersatzweise können die nachfolgend genannten Daten als Basis einer Berechnung von Näherungswerten dienen:
- Letzte Jahresabrechnung(en) des EVU mit den Lieferleistungen [kWh/a] aufgeteilt in Hoch- und Niedertarifverbrauch sowie die Jahresspitze(n) [kW]. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wird an dieser Stelle die Tarifgestaltung des EVU zweckmäßig miterfragt.
- Soweit vorhanden, Tages-, Wochen- und Monatsganglinien folgender Parameter: Volumenstrom Kläranlagenzulauf, Frischschlammtemperatur (bzw. Abwassertemperatur Belebungsbecken), Außentemperatur und Schlammanfall (incl. oTS).
- Als Bezugsgröße für die Energieverbrauchsermittlung kann ebenfalls aus der aktuellen BSB₅-Jahresbelastung im Zulauf der Kläranlage [kg BSB₅/a] eine mittlere Einwohnerwertebelastung [EW_{BSB₅}] gebildet werden. Diese berechnet sich aus der Summe der Tagesfrachten (Tageswassermenge · BSB₅-Zulaufkonzentration aus mengenproportionalen Tagesmischproben) dividiert durch die einwohnerspezifische Jahresfracht von 21,9 kg BSB₅ (= 0,060 kg BSB₅/(E·d) · 365 d/a). Daraus läßt sich, sofern keine genaueren Meßdaten vorliegen, der Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage empirisch ermitteln.

B Energieverbrauchsdeckung

- Vorhandenes Eigenenergiepotential (nutzbare elektrische und thermische BHKW-Leistungen, thermische Leistungen von Feuerungsanlagen, Wirkungsgrade für Gasverbrauchskalkulation, Gasverbrauch, Zweitenergieversorgung, Zweitenergiepreise)
- Kläranlagengrundstücksfläche (m²), evtl. nutzbare Freiflächen und nach Süden geneigte Dachflächen (für Solarenergienutzung)
- Wenn vorhanden, Winddaten (evtl. von benachbarten Windanlagen)
- Evtl. nutzbare Gebäuderäume (für BHKW-Aufstellung, geplante Erweiterungsflächen)
- Evtl. vorhandenes Gefälle im Abwasserweg der Kläranlage sowie Tages-, Monats- und Jahresganglinien der Volumenströme (für Wasserkraftnutzung)

Für die Energieverbrauchsermittlung können als Datenbasis des Energieverbrauches drei verschiedene Genauigkeitsstufen eingehen:

Genauigkeitsstufe 1:

Alle notwendigen Daten können aus dem PLS der zu untersuchenden Kläranlage übernommen werden. Für diese Genauigkeitsstufe müssen $24 \cdot 365 \cdot 4 = 35.040$ Viertelstundenwerte der gesamten verbrauchten elektrischen und thermischen Leistung vorhanden sein.

Genauigkeitsstufe 2:

Da die für die Genauigkeitsstufe 1 erforderlichen Viertelstundenwerte bei den meisten Kläranlagen nicht verfügbar sind (Archive in Prozeßleitsystemen speichern meist 15 min-Daten nur kurzzeitig), kann auch eine EVU-Jahresabrechnung mit dem Stromjahresverbrauch sowie jeweils eine charakteristische normierte Tages-, Wochen- und Monatsganglinie als Datenbasis dienen. Aus dem Jahresstromverbrauch kann dann mit Hilfe von dimensionslosen Schwankungsfaktoren eine Jahresganglinie der elektrischen Leistung wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} & \text{Leistungswert [kW]} \\ & = \text{Jahresmittelleistung} \cdot S_{\text{Stunde (Tag)}} \cdot S_{\text{Tag (Woche)}} \cdot S_{\text{Monat (Jahr)}} \end{aligned}$$

Die Jahresmittelleistung [kW] wird aus dem Jahresstromverbrauch [kWh/a] und Division mit 8.760 h/a (= 365 d/a · 24 h/d) bestimmt. Die mit S_{Index} bezeichneten Schwankungsfaktoren werden aus typischen Tages-, Wochen- und Monatsleistungsdaten errechnet. Für die Ermittlung einer normierten Ganglinie sei beispielhaft folgende Berechnung vorgeführt:

Seien 5; 8; 11; 9; 15; 10; 12 (alle Werte in kW) die elektrischen Leistungsmittelwerte von Sonntag bis Samstag einer Woche, würde die entsprechende Wochensumme 70 kW betragen.

Die mittlere Tagesleistung wäre entsprechend $70/7 = 10$ kW. Der die wochentagsbedingte Schwankung kennzeichnende dimensionslose Schwankungsfaktor $S_{\text{Tag (Woche)}}$ wird dann durch Division der tatsächlichen täglichen Leistungsmittelwerte durch das Wochenleistungsmittel gebildet. Die Schwankungsfaktoren $S_{\text{Tag (Woche)}}$ ergeben sich also als an der mittleren Tagesleistung pro Woche normierte Werte, die als Mittelwert 1 bilden müssen. Das bedeutet für das dargestellte Beispiel:

$$S_{\text{Tag (Woche)}} = 0,50; 0,80; 1,10; 0,90; 1,50; 1,00; 1,20$$

Als Summe ergibt sich 7 und als Mittelwert entsprechend 1.

Analog werden die übrigen Schwankungsfaktoren aus Ganglinien bestimmt (d. h. $S_{\text{Stunde (Tag)}}$ aus 24 Stundenverbrauchsdaten, $S_{\text{Monat (Jahr)}}$ aus 12 Monatsverbräuchen). Die Mittelwerte müssen grundsätzlich 1 ergeben.

Genauigkeitsstufe 3:

Sind weder Jahresstromverbrauch noch typische Leistungsganglinien verfügbar (z. B. bei Kläranlagen im Neu- oder Umbau), kann auch auf empirische Werte für den einwohnerspezifischen Stromverbrauch e_{ges} von Kläranlagen entsprechender Anschlußgröße zurückgegriffen werden. Der spezifische Stromverbrauch kann nach Abbildung 11 in Band I mit folgender Regressionsfunktion angenähert berechnet werden:

$$e_{\text{ges}} [\text{kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})] = 78,04 - 3,5332 \cdot \ln(\text{EW}_{\text{BSB}_5})$$

In diese Regressionsfunktion geht die über die BSB_5 -Belastung im Zulauf der Kläranlage ermittelte Ist-Belastung (EW_{BSB_5}) analog der Definition nach Energiehandbuch NRW ein. Den Gesamtjahresstromverbrauch E_{ges} erhält man nach der Formel:

$$E_{\text{ges}} [\text{kWh}/\text{a}] = e_{\text{ges}} [\text{kWh}/(\text{E}\cdot\text{a})] \cdot \text{EW}_{\text{BSB}_5} [\text{E}]$$

Durch die Berechnung der elektrischen Jahresmittelleistung $P_{\text{e,m}}$ nach der Formel

$$P_{\text{e,m}} [\text{kW}] = E_{\text{ges}} [\text{kWh}/\text{a}] / 8.760 [\text{h}/\text{a}]$$

kann dann mit Hilfe der Schwankungsfaktoren die Leistungsganglinie wie in Genauigkeitsstufe 2 gebildet werden.

Leistungswert [kW]

$$= P_{\text{e,m}} [\text{kW}] \cdot S_{\text{Stunde (Tag)}} \cdot S_{\text{Tag (Woche)}} \cdot S_{\text{Monat (Jahr)}}$$

Statt der aus wirklichen Kläranlagenbetriebsdaten berechneten Schwankungsfaktoren können bei der Genauigkeitsstufe 3 auch aus Kläranlagen ähnlicher Größenordnung angenommene Schwankungsfaktoren genutzt werden.

Eine Differenzierung nach Viertelstunden entfällt in den Genauigkeitsstufen 2 und 3 bei der Energieverbrauchsermittlung. Wegen der ungenauen Datenbasis wird die Differenzierung nur bis auf das Niveau der Stundenwerte vorgenommen. Bei der Energieverbrauchsdeckung wird durch die Simulationsrechnung mit Viertelstundengenauigkeit gerechnet.

2.3 Energieverbrauchsermittlung

2.3.1 Ermittlung des elektrischen Energieverbrauchs

Vorgehensweise:

- a) Für ein Referenzjahr wird in Anlehnung an Kapitel 2.2 die jahresdurchschnittliche Einwohnerwertebelastung bestimmt:

Beispielwerte:

$$\frac{438.000 \frac{\text{kg BSB}_5}{\text{a}}}{365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 0,06 \frac{\text{kg BSB}_5}{\text{E} \cdot \text{d}}} = \frac{438.000}{21,9} = 20.000 \text{ E}$$

- b) Sofern keine Viertelstundendaten (Genauigkeitsstufe 1) für den elektrischen Energieverbrauch und auch keine elektrischen Jahresverbrauchsdaten samt Spitzenleistungsbedarf vorliegen (Genauigkeitsstufe 2), wird für Genauigkeitsstufe 3 die Jahresarbeit als Funktionswert von Regressionsanalysen berechnet.
- c) Daraus wird die mittlere erforderliche elektrische Leistung $P_{e,m}$ [kW] als Basiswert für die elektrischen Leistungsbedarfswerte berechnet.
- d) Mit Hilfe der Schwankungsfaktoren werden dann $365 \cdot 24 \cdot 4 = 35.040$ Viertelstundenwerte (Genauigkeitsstufe 1) bzw. $365 \cdot 24 = 8.760$ Stundenwerte (Genauigkeitsstufe 2 und 3) für ein Jahr in kW berechnet.
- e) Sofern keine Daten einer bestehenden Kläranlage vorliegen, können Standardwerte für die tageszeitlichen, wochentagstypischen und monatstypischen Schwankungen vorgegeben werden.
- f) Die Energieverbrauchsermittlung erzeugt dann entsprechend der Vorgaben eine Abbildung des üblichen Energieverbrauchsbildes der Kläranlage.

2.3.2 Ermittlung des thermischen Energieverbrauchs

Entsprechend wird auch der Wärmeleistungsverbrauch der Kläranlage für Schlamm-aufheizung, Gebäude- und Faulbehälterbeheizung sowie Warmwasseraufheizung im Viertelstundentakt aus Meßdaten vorgegeben bzw. im Stundentakt für ein Jahr berechnet.

Für die Wärmeleistung liegen im allgemeinen keine Daten auf Kläranlagen vor. Während die elektrische Leistung vom EVU gemessen wird, wird auf Kläranlagen der Wärmeleistung keine besondere Bedeutung beigemessen, da Wärme bei anaerober

Schlammstabilisierung meist ausreichend zur Verfügung steht. Für die im Viertelstundentakt angestrebte Simulation müssen daher auf der Basis vorhandener Daten (Genauigkeitsstufe 1) oder mit einwohnerspezifischen Kennwerten (Genauigkeitsstufe 3) Leistungsdaten für die erforderliche Wärmeleistung ermittelt werden. Sofern keine Daten einer bestehenden Kläranlage vorliegen, kann auf Standardwerte für die tageszeitlichen, wochentagstypischen und monatsbedingten Schwankungen zurückgegriffen werden [DICHTL ET AL. 1997].

Vorhandene Daten zur Beurteilung der thermischen Energiesituation auf Kläranlagen sind im allgemeinen:

- Brennerleistung der Heizung [kW],
- Schlammbelastung B_{TS} der biologischen Stufe,
- Faulbehältervolumen,
- Schlammstrom im Zulauf zur Faulung (kg TS/d),
- Volumina der zu beheizenden Gebäude [m^3 umbauter Raum]; evtl. Wärmedämmung der Gebäude (Betriebsgebäude, Faulbehälter),
- Warmwasserverbrauch [m^3/a] sowie
- mittlere Einwohnerwertbelastung der Kläranlage.

Der Wärmebedarf einer Kläranlage setzt sich zusammen aus

- A. Beheizung von Gebäuden, z. B. Betriebsgebäude, Faulbehälter, Werkstatt, Labor, maschinelle Schlammmentwässerung (MSE),
- B. Aufheizung des Schlammes und
- C. Warmwasserbedarf.

Mittlere Leistungsbedarfswerte für Gebäudebeheizungen können im Jahresmittel aus Erfahrungswerten in Abhängigkeit von den Heiztemperaturerfordernissen (21 °C für Arbeitsstätten und Wohngebäude; frostfrei, d. h. > 5 °C für die maschinelle Schlammmentwässerung; ca. 33 °C für Faulbehälter) geschätzt werden. Für die Gebäudebeheizung können als maximale Heizleistung folgende Richtwerte angenommen werden:

- rd. 15 W/ m^3 bei Heizung auf 5 °C
- rd. 29 W/ m^3 bei Heizung auf 10 °C
- rd. 87 W/ m^3 bei Heizung auf 21 °C

Analog zur Ermittlung der elektrischen Leistungsbedarfswerte je Viertelstunde können die thermischen Leistungsbedarfswerte durch die Beziehung

Viertelstundenleistungswert [kW]

$$\begin{aligned} &= \text{Jahresmittelleistung}_{\text{Wärme, BG+FB}} \cdot S_{\text{Stunde, TL (Tag)}} \cdot S_{\text{Tag, TL (Woche)}} \cdot S_{\text{Monat, TL (Jahr)}} \\ &+ \text{Jahresmittelleistung}_{\text{Wärme, Schlamm}} \cdot S_{\text{Stunde, TS (Tag)}} \cdot S_{\text{Tag, TS (Woche)}} \cdot S_{\text{Monat, TS (Jahr)}} \end{aligned}$$

ermittelt werden. Die Schwankungsfaktoren für die Wärmeleistung werden bei den Wärmebedarfsanteilen für

- Gebäudebeheizung und Warmwasserbeheizung aus Lufttemperaturschwankungen mit Index TL und
- Schlammbeheizung aus Schlamm- oder Abwassertemperaturganglinien mit Index TS

bestimmt. Aus den damit ermittelten (Viertel)Stundenwerten des Wärmeleistungsverbrauchs kann anschließend die erforderliche Jahreswärme [kWh/a bzw. kJ/a] integriert werden.

2.3.3 Ergebnis der Energieverbrauchsermittlung als Basis für die Verbrauchsdeckung

Als Ergebnis dieser Bestandsaufnahme liegen anschließend entweder für Genauigkeitsstufe 1, 2 oder 3 sowohl für den elektrischen als auch den thermischen Leistungsverbrauch die Ganglinien vor, aus denen sich durch Integration die benötigte Arbeit ermitteln lässt. Beispielhaft sind in Abbildung 51 die Leistungsganglinien für ein halbes Jahr aufgetragen.

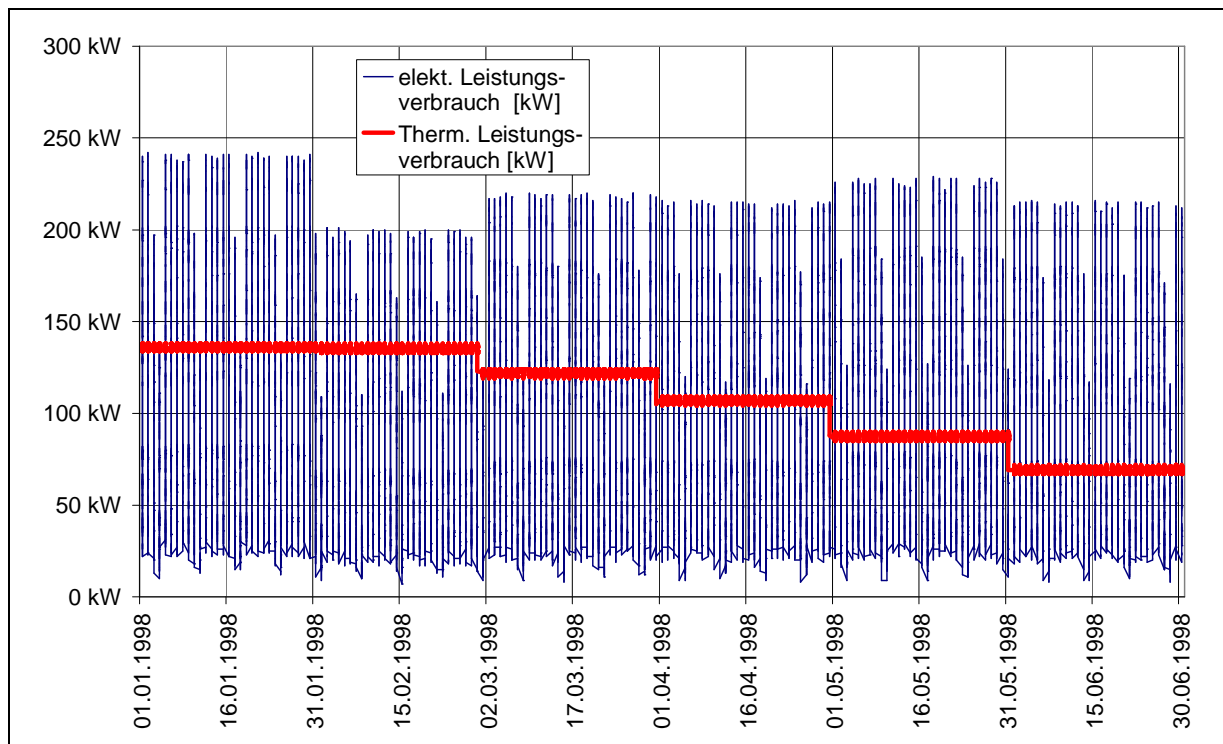


Abbildung 51: Beispielhafte Ergebnisse einer Energieverbrauchsermittlung für ein halbes Jahr

2.4 Energieverbrauchsdeckung

Prinzipiell sollten im Rahmen einer optimierten Energiebereitstellung begleitend immer die Optimierungspotentiale des vorliegenden Energieverbrauchs ausgeschöpft werden. Anschließend können die Untersuchungen hinsichtlich einer Erhöhung der Eigenenergieversorgung fortgeführt werden, was im wesentlichen eine Erweiterung vorhandener bzw. eine Ergänzung durch regenerative Energieträger bedeutet. Für das zu entwickelnde Managementkonzept muß unterschieden werden, ob die Energieträger zur Deckung von

- elektrischem und/oder thermischem Energieverbrauch,
- Grundlast und/oder Spitzenlast

sowie zur Sicherstellung der Reserveversorgung benötigt werden. Im folgenden werden die Energieträger

- Faulgas
- Zweitbrennstoffe
- Wasserkraft
- Windkraft

- Solarenergie
- Abwasserwärme
- oberflächennahe Erdwärme

in Entscheidungsbäumen erfaßt, die die wesentlichen Randbedingungen darstellen, die einer Nutzung der vorgenannten Energieträger zugrunde liegen. Die Entscheidungsbäume bieten dem Betreiber eine Entscheidungshilfe, welcher Energieträger ihm grundsätzlich zur Deckung des im vorangegangenen Arbeitsschritt ermittelten Energieverbrauchs zur Verfügung steht. Die Entscheidungsbäume ersetzen zwar keine nachfolgende Untersuchung, zeigen jedoch die tendenziellen Möglichkeiten auf. Anschließend wird für die verschiedenen Energieträger ein Berechnungsgang zur Abschätzung des Potentials der Energieverbrauchsdeckung aufgezeigt.

Die fossilen Zweitbrennstoffe sowie Rapsöl/Biodiesel und Holz werden gemeinsam betrachtet, da für den Einsatz dieser Energieträger im wesentlichen die Beschaffung des Brennstoffs von entscheidender Bedeutung ist, während für die anderen aufgezählten Energieträger eine Vielzahl weiterer Randbedingungen gelten.

2.4.1 Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas

Für die Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas ist zuerst der zu erwartende Faulgasanfall zu berechnen. Darauf aufbauend kann das Verbrauchsdeckungspotential ermittelt werden. Bevorzugt ist die höherwertige elektrische Energie zu erzeugen; thermische Energie fällt bei der Stromerzeugung mit Faulgas zwingend mit an.

Die Nutzung des Faulgases kann, wie aus der nachfolgenden Abbildung zu ersehen ist, optimiert werden.

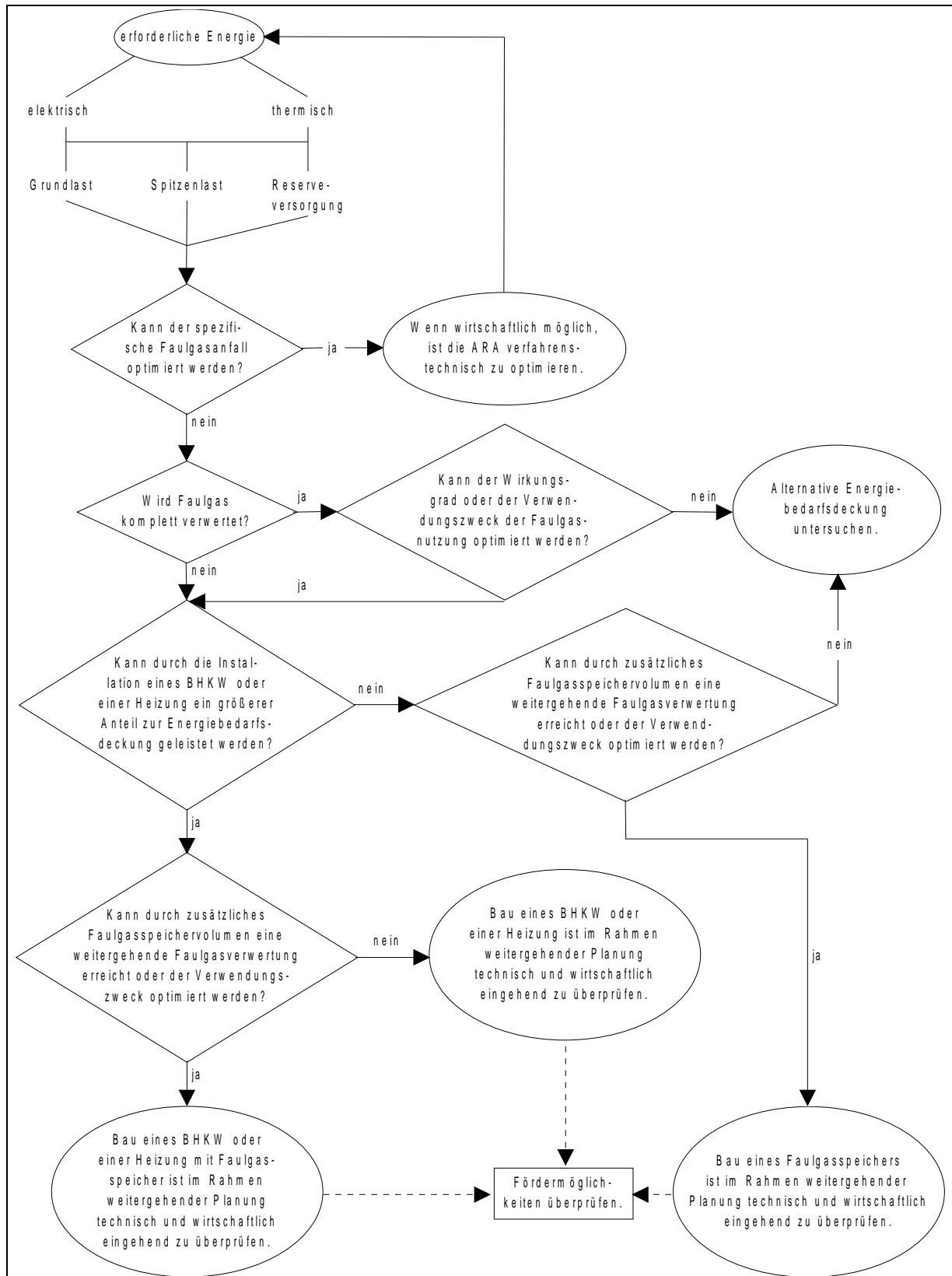


Abbildung 52: Entscheidungshilfe für die Faulgasnutzung auf kommunalen Kläranlagen

2.4.1.1 Faulgasanfall

Sofern der Faulgasanfall einer bestehenden Kläranlage bekannt ist, kann er direkt in die Modellrechnungen eingehen, ansonsten (z. B. für Kläranlageneubauten) kann er wie nachfolgend beschrieben aus verfahrens- und einwohnerspezifischen Trockenmassen und oTS-spezifischen Gasausbeuten prognostiziert werden.

Ausgehend von vorgebbaren Reinigungszielen (reine C- oder C+N-Elimination) und Verfahrenstechniken wird die täglich anfallende Trockenmasse (Überschußschlamm und Fällschlamm nach ATV-Arbeitsblatt A 131) bestimmt. Aus der organischen Trockenmasse wird anschließend der mittlere tägliche Gasanfall berechnet.

Der Schlammanfall einer Kläranlage kann dabei ausreichend genau einwohnerspezifisch (auf mittlere tatsächliche Einwohnerwerte des Referenzjahres bezogen) wie folgt berechnet werden:

a) Primärschlammanfall TS_{VK}

(soweit Vorklärung vorhanden) als Funktion der mittleren Aufenthaltszeit

Die Wirkungsgrade der Vorklärung [%] bezogen auf Q_t können wie in Tabelle 16 aufgeführt angenommen werden:

Parameter	Durchflußzeit durch die Vorklärung		
	t = 0,5 h	t = 1,0 h	t = 2,0 h
TS	40 %	50 %	60 %
BSB ₅	20 %	25 %	30 %
N _{org} *)	20 %	25 %	30 %
P _{ges}	10 %	15 %	25 %

*) : Elimination ausschließlich durch Sedimentation, nicht Ammonifikation (andere Stickstoffkomponenten wie NH₄-N und NO₃-N werden nicht sedimentiert)

Tabelle 16: Wirkungsgrade der Vorklärung in Abhängigkeit der Durchflußzeit nach ARA-BER (1998)

Der gesamte Primärschlammanfall ergibt sich zu:

$$TS_{VK} = TS_0 \cdot \text{Anschlußgröße [E]} \cdot \text{Wirkungsgrad der Vorklärung}$$

Die einwohnerspezifische Zulaufkraft wird zu $TS_0 = 70 \text{ g/(E} \cdot \text{d)}$ angenommen.

b) Überschußschlamm der biologischen Stufe \dot{U}_{BB}

als Funktion von B_{TS} nach der Formel aus dem ATV-Arbeitsblatt A 131:

$$\dot{U}_{BB} = (0,6 \cdot (TS_0/B_{BB}+1) - 0,072 \cdot 0,6 \cdot 1,072^{(T-15)}) / (1/t_{TS}+0,08 \cdot 1,072^{(T-15)}) \cdot B_{BB}$$

mit: TS_0/B_{BB} = Verhältnis Trockenmasse zur BSB₅-Fracht der Belebung

T = Reaktortemperatur

B_{BB} = BSB₅-Fracht im Zulauf zur Belebung

t_{TS} = Schlammalter der Belebung (d)

c) Fällschlamm \dot{U}_P

Der Fällschlamm kann mit Hilfe der täglich zu fällenden Phosphorfracht P [kg/d] wie folgt berechnet werden:

Fällung mit Eisensalzen	$\dot{U}_P = 6,8 \cdot P$ [kg TS/d]
Fällung mit Aluminiumsalzen	$\dot{U}_P = 5,3 \cdot P$ [kg TS/d]

Der Gesamtschlammfall ergibt sich aus der Summe von a), b) und c). Das Produkt aus oTS-Gehalt [%] und Gesamtschlammfall [kg/a] ergibt die die Faulgasproduktion bestimmende oTS-Fracht zum Faulbehälter. Der oTS-Gehalt kann - wenn keine Meßwerte vorliegen sollten - für den Vorklärschlamm zu ca. 66 % und für den Überschußschlamm je nach Schlammalter zu 50 % bei $t_{TS} > 10$ d, sonst zu 60 % angenommen werden.

Der oTS-spezifische Faulgasanfall von 400 – 525 l/kg oTS muß in Abhängigkeit von der Faulbehälteraufenthaltszeit (> 20 Tage: höhere Erträge; < 20 Tage: geringere Erträge) sowie der Schlammbelastung ($B_{TS} > 0,10$: höhere Erträge, $B_{TS} < 0,10$: geringere Erträge) bestimmt werden. Die Gaserträge können sich an den Zielwerten des Energiehandbuchs NRW [MÜLLER ET AL. 1999] orientieren.

2.4.1.2 Faulgasverbrauch

Je nach Faulgasspeichergröße und Größe der vorhandenen BHKW kann die Energieerzeugung auf Faulgasbasis

- nur zu Hochtarifzeiten des EVU (Vollastbetrieb),
- dauernd als Grundlasteigenversorgung (Vollastbetrieb) oder

- strombezugsgeregelt (d. h., z. B. 0 – 15 kW werden dauernd von EVU geliefert, darüber hinausgehende Leistungen werden vom BHKW eigenerzeugt)

erfolgen. Vorteile (+) und Nachteile (-) der Betriebsarten zeigt nachfolgende Tabelle auf:

Betriebsart	Zeitraum der Eigenerzeugung	
	Hochtarif (HT) Niedertarif (NT) nur bei ausreichender Faulgasspeicherfüllung	Hochtarif (HT) + Niedertarif (NT) bei Faulgasmangel Zweitbrennstoffeinsatz
Nur Vollast	+ höherer Wirkungsgrad - bei NT zeitweilige Einspeisung	+ höherer Wirkungsgrad - Einspeisung gegen geringe Vergütung
Leistungsregelung am Verbrauch	- geringerer Wirkungsgrad - evtl. hohe NT-Leistungsspitze - aufwendigere Steuerung	+ optimale Eigenenergienutzung, da BHKW-Leistung oft größer als die erforderliche Leistung (z. B. nachts) - aufwendigere Steuerung

Tabelle 17: Vor- und Nachteile verschiedener Steuerstrategien der Eigenstromerzeugung mit BHKW-Anlagen

Die im Viertelstundentakt ermittelten Faulgasanfalldaten werden zu Verbrauchs- und Faulgasleistungsdargebotsganglinien (Wärme- und elektrische Leistungsviertelstundenmittelwerte) transformiert, die sich entsprechend der BHKW-Betriebsvorgaben (gemäß Tabelle 17) am Faulgasspeichervolumen (viertelstündige Füllstandswerte) orientieren.

Eine optimale Eigenenergienutzung aus Faulgas mit der Zielsetzung der sehr weitgehenden Eigenenergieversorgung setzt

- eine Leistungsregelung der BHKW-Anlage,
- eine Gesamt-Aggregatgröße der BHKW-Anlage im Bereich der Leistungsspitze der Kläranlage,
- eine Mindestkapazität des Faulgasspeichers in Höhe des aus Jahresdurchschnittswerten berechneten Faulgasanfalles eines halben Tages sowie
- mindestens 2 Aggregate (keine EVU-Leistungsspitze bei Wartung des Aggregates)

voraus. Bezüglich der Kosten (Investitionen und Betriebskosten von BHKW-Anlagen) wird auf Kapitel 6.13 in Band I verwiesen.

2.4.2 Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffe

Bei der Nutzung von BHKW-Anlagen ist grundsätzlich die Frage zu klären, ob evtl. ein Zweitbrennstoff eingesetzt werden sollte. Da die Faulgasproduktion i. d. R. nicht ausreichend ist, ist eine Nutzung der BHKW-Anlage als Notstromaggregat nur bei Zweitbrennstoffeinsatz möglich. Zwar kann auch eine Notstromreservevorhaltung mit Einschränkung im Faulgasspeicher erfolgen, jedoch ist dies im allgemeinen kaum ausreichend für einen längeren Stromausfall. Zudem ist Speichervolumen relativ teuer. Als gasförmige Zweitenergie sollte Erdgas bevorzugt werden, weil dabei normalerweise kein separater Speicher auf der Anlage erforderlich und Erdgas auch in der Regel kostengünstiger als Propangas ist (vgl. Tabelle 14 in Band I).

Denkbare Zweitbrennstoffe sind auch Biodiesel/Rapsöl und Diesel/Heizöl sowie Holzhäcksel.

Beim Einsatz von Zweitbrennstoffen ist nur eine Energieautarkie im Sinne der Qualitätsstufen 2 und 4 nach Kapitel 2.1.1 erreichbar, d. h. eine den Zweitbrennstoffen entsprechende Energiemenge muß zusätzlich eigenerzeugt werden.

Die nachfolgende Graphik gibt einen Überblick über die Zweitbrennstoffnutzung und die für die Entscheidungsfindung notwendigen Fragestellungen.

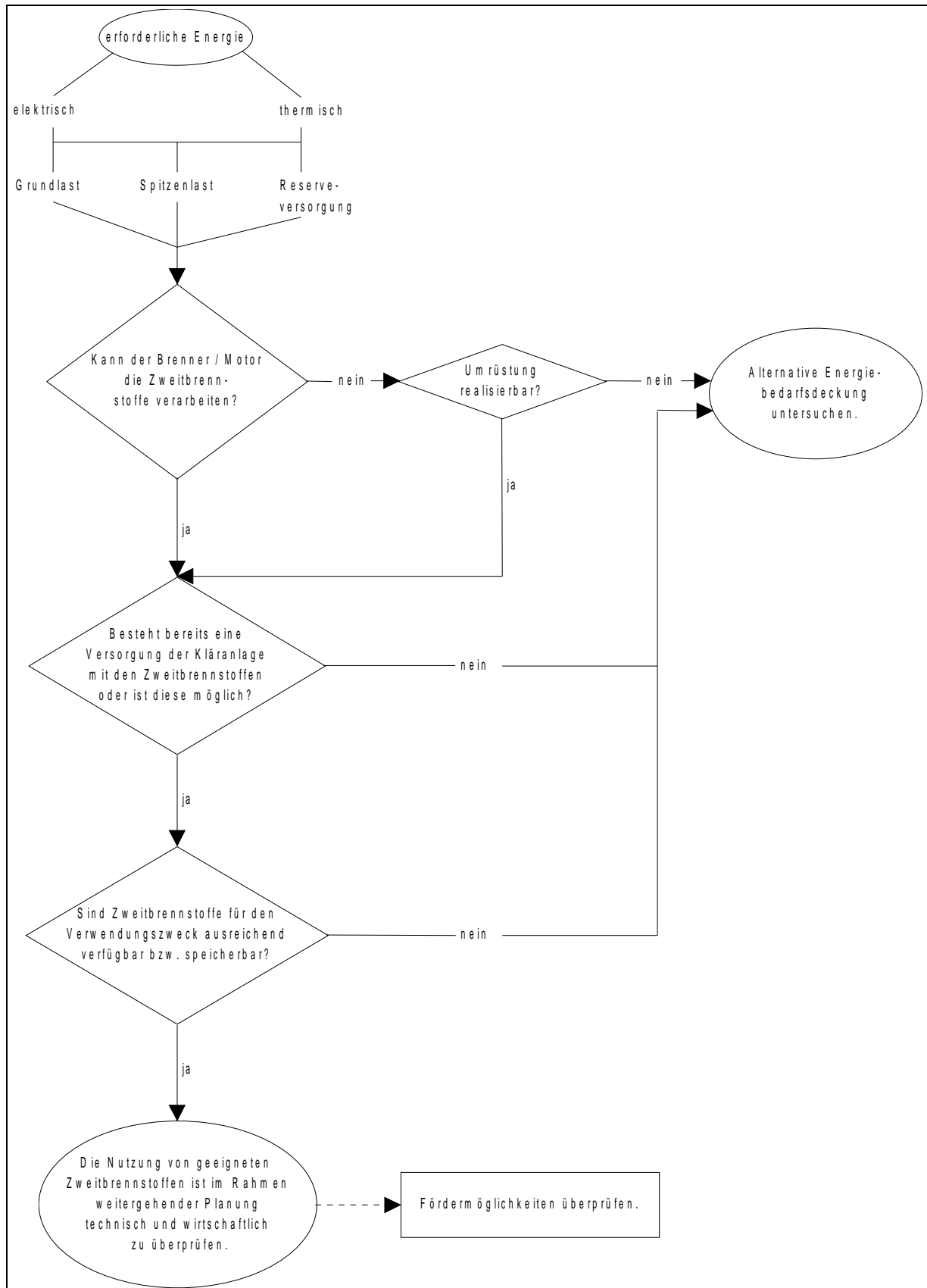


Abbildung 53: Entscheidungshilfe für die Zweitbrennstoffnutzung auf kommunalen Kläranlagen

2.4.3 Energieverbrauchsdeckung durch Wasserkraft

Die Nutzung des Energiepotentials aus Wasserkraft des Abwassers kann nur einen geringfügigen Beitrag zur Eigenenergieerzeugung leisten, sofern nicht große Fallhöhen des Abwassers zur Verfügung stehen (vgl. Kap. 5.5 in Band I). Das maximale Energiepotential P_{\max} einer Wasserkraftanlage läßt sich mit folgender Formel bestimmen:

$$P_{\max} [\text{kWh/a}] = Q \cdot H/367$$

mit: Q = Jahreswassermenge [m^3/a]
 H = nutzbare Fallhöhe [m].

Tatsächlich ist diese elektrische Arbeit um die Verluste (rd. 5 – 10 %) der Wasserkraftanlage geringer. Diese Verluste werden in der Faustformel

$$P [\text{kW}] = 8 \cdot Q \cdot H$$

mit: Q = mittlerer Volumenstrom [m^3/s]
 H = nutzbare Fallhöhe [m].

bereits berücksichtigt.

Für die Wasserkraftleistung und damit die Bestimmung des Wasserkraftpotentials zur Abbildung in der Simulation können die erforderlichen Viertelstundenwerte ermittelt werden, indem Jahresmittelleistungen geringfügig mit aus Trockenwetterzulauf ermittelten Tagesschwankungsfaktoren variiert werden.

Die Kosten der Wasserkraftnutzung sind in Kapitel 6.6 des Bandes I beschrieben.

Die nachfolgende Graphik gibt eine Entscheidungshilfe für die Wasserkraftnutzung.

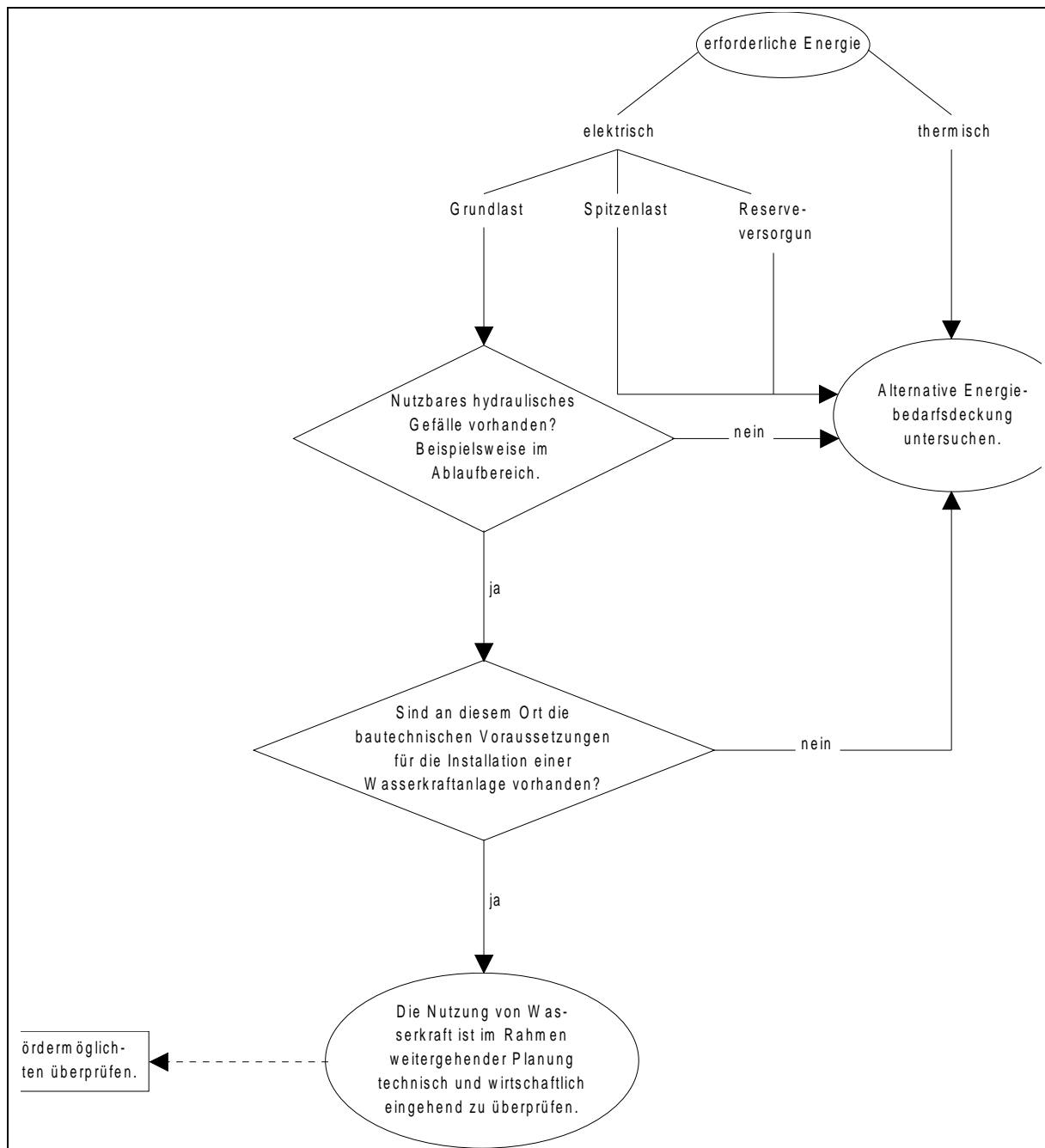


Abbildung 54: Entscheidungshilfe für die Wasserkraftnutzung auf kommunalen Kläranlagen

2.4.4 Energieverbrauchsdeckung durch Windkraft

Die Windenergie kann wegen der Unstetigkeit der Windverteilung über das Jahr keinen zeitlich garantierten Beitrag zur Energieverbrauchsdeckung leisten. So wäre eine Windkraftanlage von z.B. 250 kW elektrischer Leistung bei einer Nennwindstärke von 11 m/s zwar in der Lage, je nach Winddargebot mit 400.000 - 600.000 kWh/a zur Energiebedarfsdeckung beizutragen. Die Leistungskurve reicht jedoch von 250 bis 0 kW, weshalb Tage mit einer dauernd verfügbaren Leistung aus Windkraft von 250 kW mit tagelangen Nullerträgen aus der Windkraft abwechseln können. Faulgasspeicher sind i. d. R. nur auf maximal $\frac{1}{2}$ - 1 Tagesanfall Faulgas ausgelegt, weshalb nach vollständigem Verbrauch des verfügbaren Faulgases und bei niedrigem Winddargebot ein Fremdenergiebezug notwendig sein wird. Die Windkraft kann also gemäß der Definition aus Kapitel 2.1.1 maximal nur zur Energieautarkie der 2. Qualitätsstufe beitragen.

Für die Simulationsrechnung können sog. Windindizes helfen, aus Windmessungen ermittelte voraussichtliche Jahreserträge der Windkraft über das Jahr zu verteilen. Wie beim Energieverbrauch wird ausgehend vom prognostizierten Jahresertrag aus Windkraft [kWh/a] mit Division durch 8.760 h/a eine mittlere Windleistung berechnet. Durch Multiplikation mit den Monatsschwankungsfaktoren (berechnet aus Windindex; siehe Abbildung 33 aus Band I) erhält man die verfügbaren Leistungsviertelstundenwerte aus Windkraft.

Die nachfolgende Graphik gibt eine Entscheidungshilfe für die Windenergienutzung.

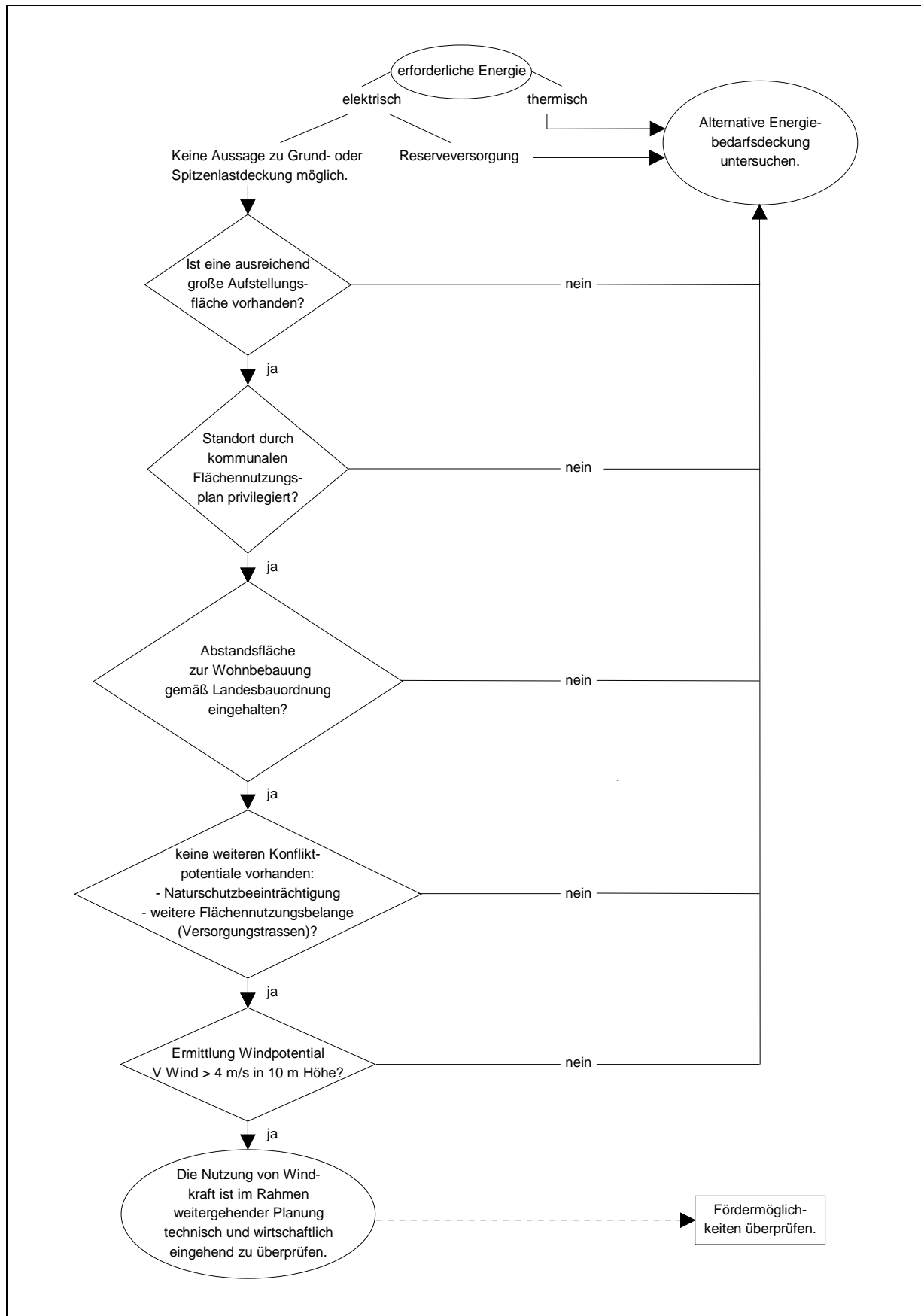


Abbildung 55: Entscheidungshilfe für die Windkraftnutzung auf kommunalen Kläranlagen

2.4.5 Energieverbrauchsdeckung durch Solarenergie

Solarenergie kann photovoltaisch und solarthermisch genutzt werden.

Ausgehend von dem Jahresstromverbrauch der Kläranlage könnte die Eigenerzeugung über Faulgas bis zu 50 – 70 % abdecken (siehe Band I, Kapitel 5.2). Mit Photovoltaikmodulen könnte grundsätzlich der restliche Energieverbrauch gedeckt werden, wenn der Nachtstrombedarf über eine leistungsgeregelte Eigenerzeugung des BHKW mit Faulgas erfolgte. Bei einem spezifischen Energieverbrauch von z.B. 40 kWh/(E·a) und 60 % elektrischem Eigendeckungsgrad über das BHKW verblieben $0,40 \cdot 40 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a}) = 16 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$ Restdeckungsbedarf für die Photovoltaik.

Bei rd. 1.000 kWh/(kW_P·a) wäre für die elektrische Energieautarkie eine Photovoltaikanlage von 16 kW_P/1.000 E, d. h. z.B. 250 kW_{P,installiert} für eine Kläranlage mit einer Anschlußgröße von 20.000 E überschläglich erforderlich.

Solare Wärmeerzeuger sind im wesentlichen nur für Rest-Wärmebedarfsdeckung oder bei aeroben Stabilisierungsanlagen zur Deckung des Warmwasser- und Wärmebedarfs der Gebäude erforderlich; ansonsten ist die Abwärme aus BHKW-Anlagen mit Faulgas im Sommer für die Wärmebedarfsdeckung ausreichend. Diese Aufgaben könnten ebenfalls durch Wärmepumpen oder Wärmenutzung aus der Belebungsbeckenbelüftung [STRUNKHEIDE ET AL. 2000] übernommen werden. Der solaren Wärme ist dabei wegen des geringeren Eigenstrombedarfs bei der Zielsetzung Energieautarkie und CO₂-Reduzierung der Vorzug vor elektroenergieverbrauchenden Wärmepumpen zu geben.

Die nachfolgende Abbildung 56 gibt eine Entscheidungshilfe für die Solarenergienutzung auf kommunalen Kläranlagen.

Bezüglich der Kosten von Solaranlagen wird auf das Kapitel 6.8 in Band I verwiesen.

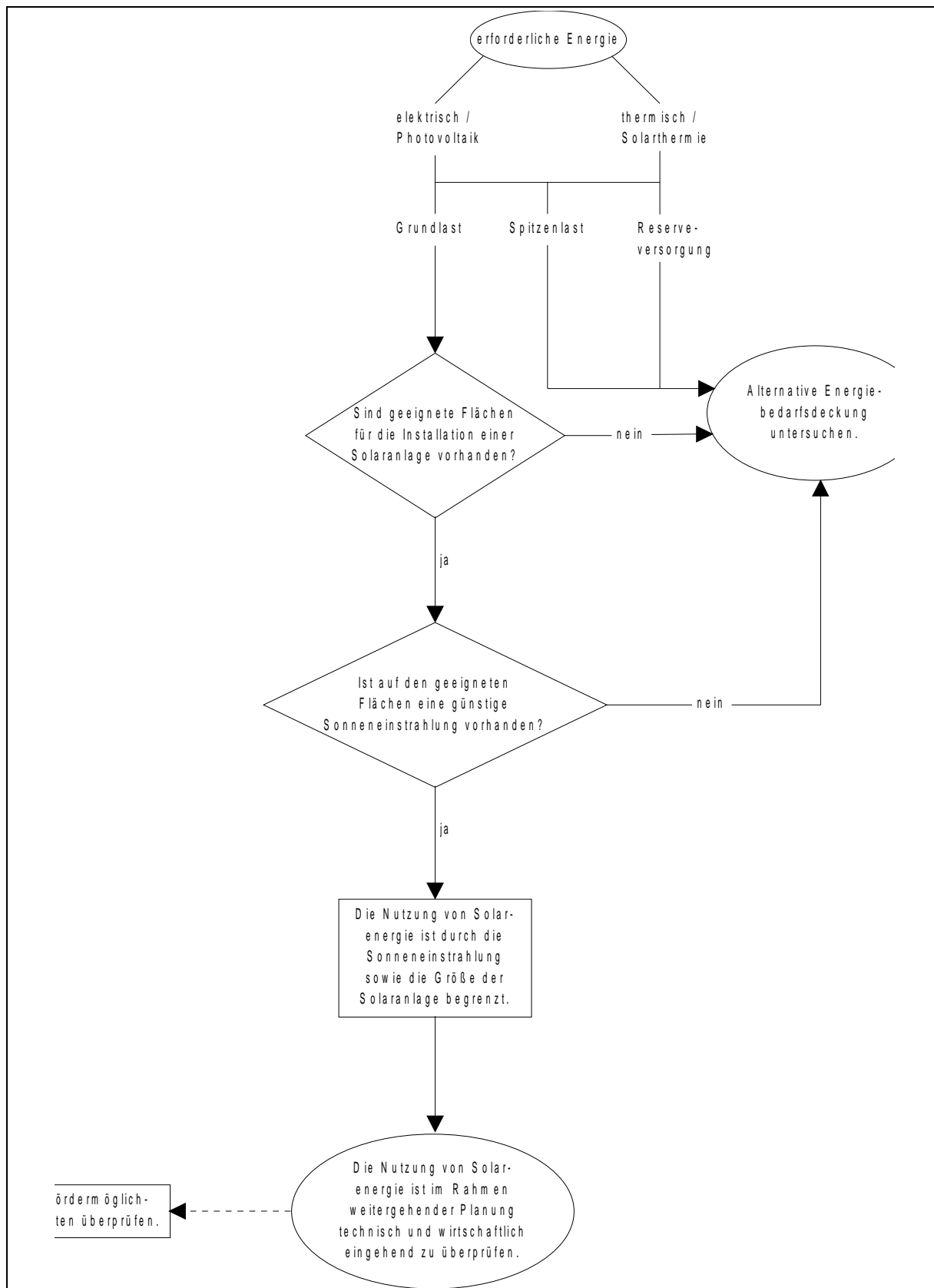


Abbildung 56: Entscheidungshilfe für die solare Energienutzung auf kommunalen Kläranlagen

2.4.6 Energieverbrauchsdeckung durch Abwasserwärme

Für die Nutzung der Abwasserwärme kann die nachfolgende Graphik eine Entscheidungshilfe geben. Die Nutzung der Abwasserwärme zur Unterstützung einer energieautarken Kläranlage ist jedoch nur erforderlich, soweit die Verbrauchsdeckung durch andere Energieträger (BHKW, solare Wärme o. ä.) nicht schon gegeben ist.

Beim Einsatz einer entsprechenden Wärmepumpe ist die elektrische Verbrauchsdeckung erneut zu überprüfen, da der elektrische Gesamtverbrauch der Kläranlage von einer Wärmepumpe beeinflusst wird.

Bezüglich der Investitionen und spezifischen Wärmeenergiekosten wird auf Kapitel 6.9 des Bandes I verwiesen.

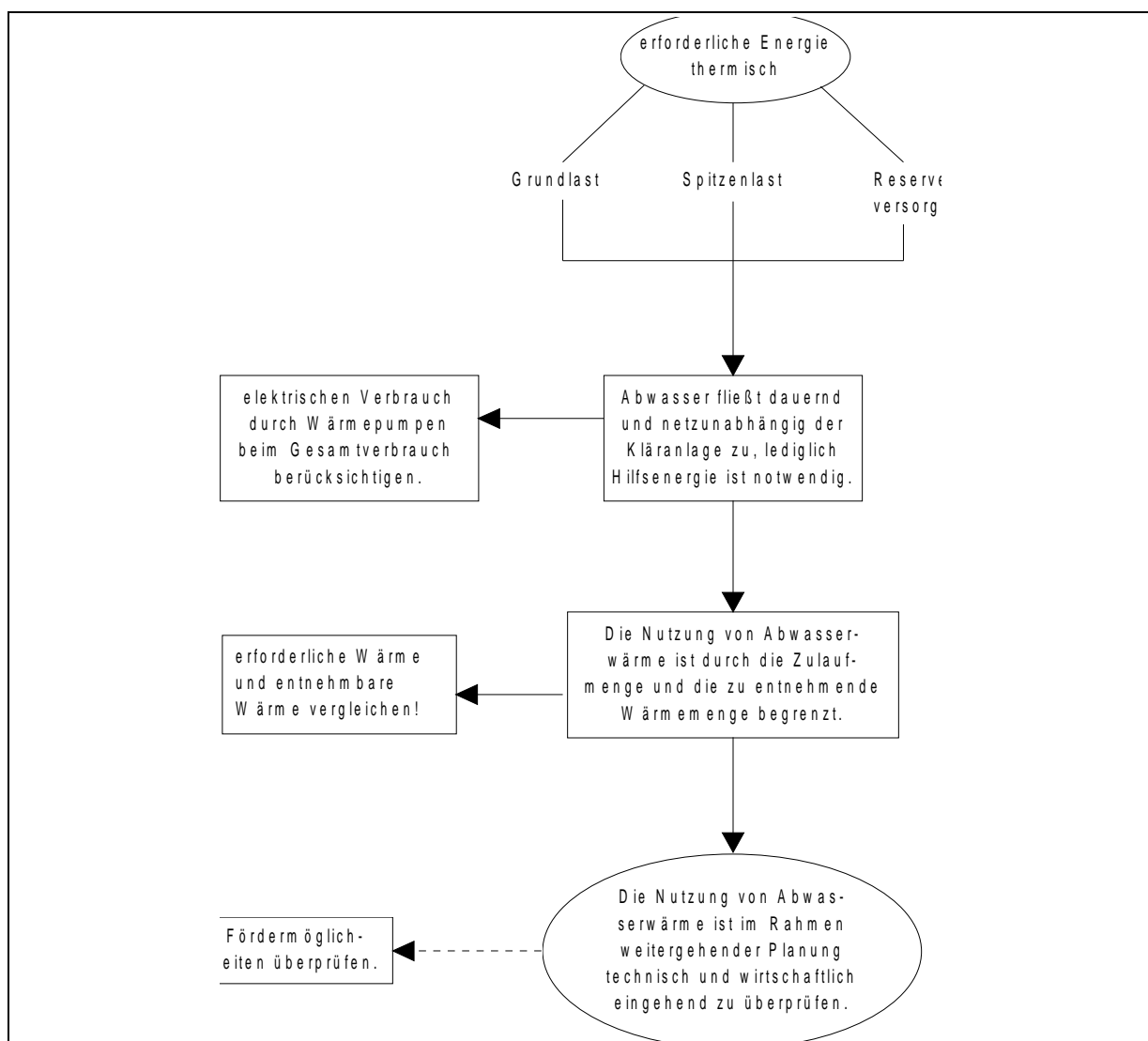


Abbildung 57: Entscheidungshilfe für die Abwasserwärmenutzung auf kommunalen Kläranlagen

2.4.7 Energieverbrauchsdeckung durch oberflächennahe Erdwärme

Für die Nutzung der oberflächennahen Erdwärme gibt die nachfolgende Graphik eine Entscheidungshilfe. Auch die Nutzung der Erdwärme ist nur erforderlich, soweit die Verbrauchsdeckung durch andere Energieträger nicht schon gegeben ist. Ebenfalls ist beim Einsatz einer Wärmepumpe die elektrische Verbrauchsdeckung erneut zu überprüfen. Bezüglich der Kosten von Erdwärmennutzungsanlagen wird auf Kapitel 6.10 in Band I verwiesen.

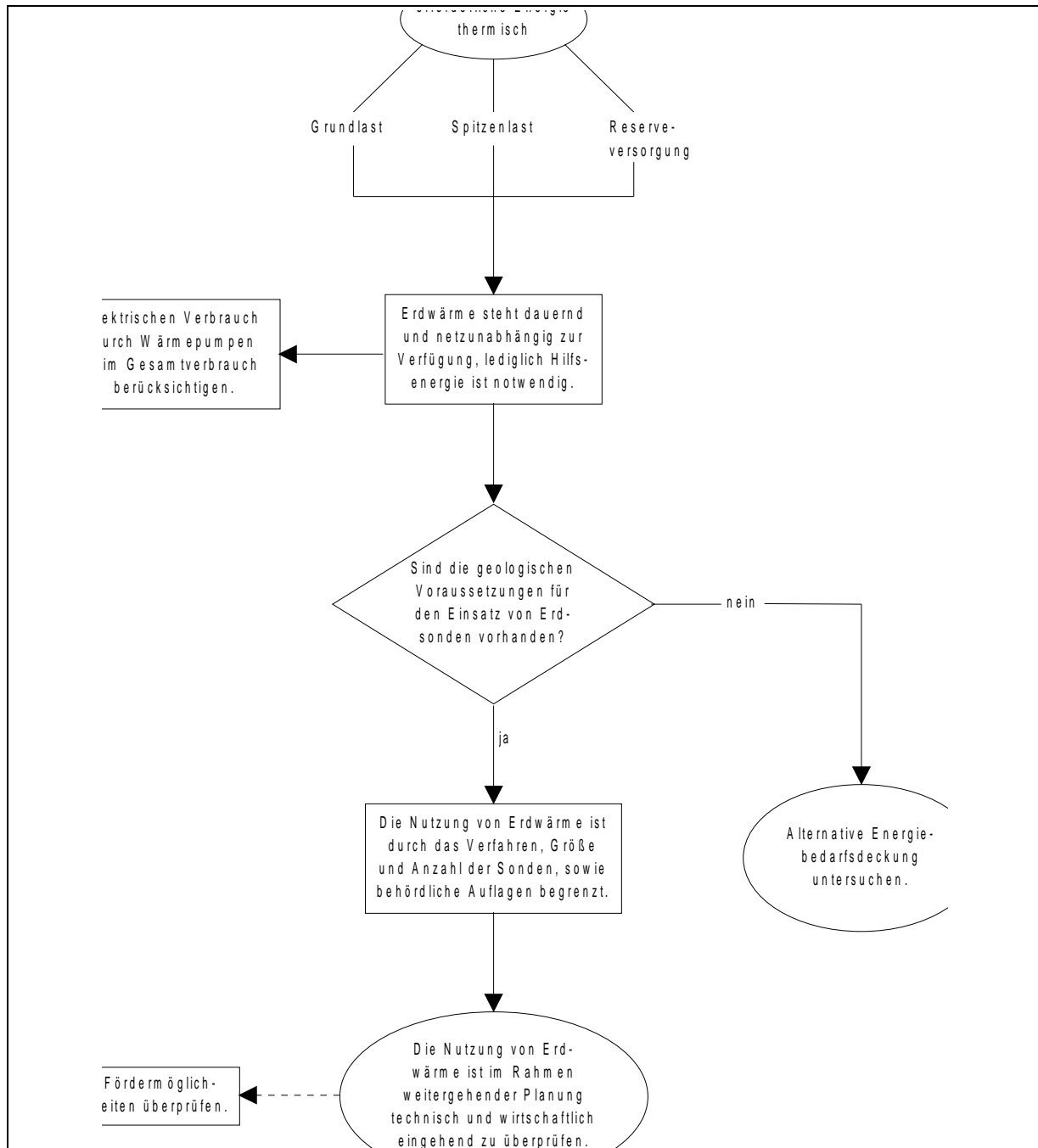


Abbildung 58: Entscheidungshilfe für die oberflächennahe Erdwärmennutzung auf kommunalen Kläranlagen

2.4.8 Baustein Energieverbrauchsdeckung im Simulationsprogramm Eman

Nach technischer Prüfung der ortsspezifischen Möglichkeiten zur Energieverbrauchsdeckung entsprechend den Kapiteln 2.4.1 bis 2.4.7 können durch das beiliegende Simulationsprogramm Eman die technisch/wirtschaftlichen Auswirkungen von bis zu **3 Energiebereitstellungsvarianten** im Vergleich zum **Status Quo** berechnet und deren Ergebnisse tabellarisch und graphisch vergleichend gegenübergestellt werden.

Hierzu können, wie in Abbildung 59 dargestellt, die spezifischen Eingangsdaten für die Schlammbehandlung, für das BHKW und die Gasspeicherung sowie für die Windkraft- und Solaranlage eingegeben werden. Die für die Energieverbrauchssimulation benötigten Daten werden im Feld „Kläranlage“ eingegeben, während das Feld „EVU“ die erforderlichen Daten für die im folgenden Kapitel 2.5 beschriebene Wirtschaftlichkeitsberechnung enthält.

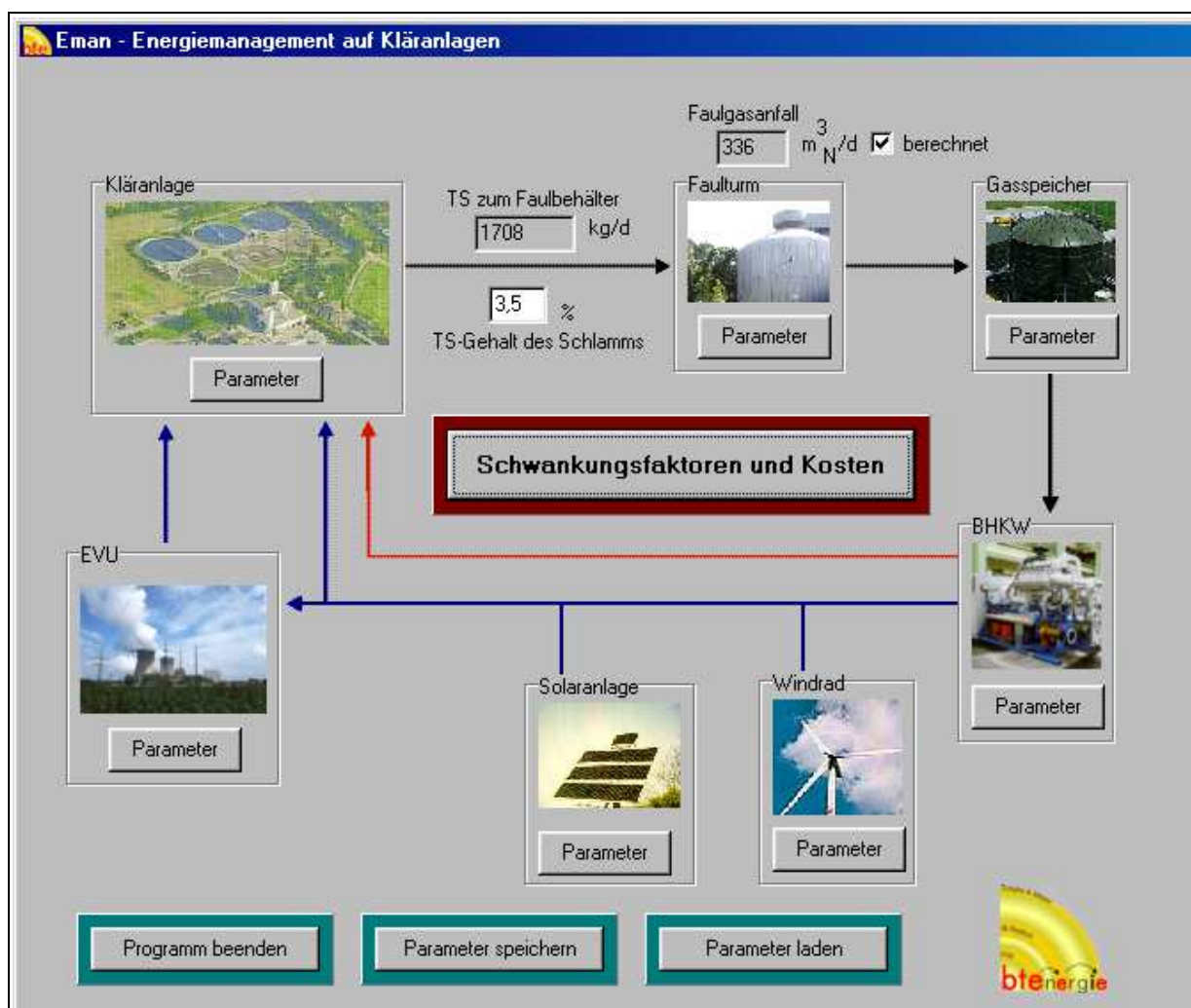


Abbildung 59: Eingabematrix des Programmes Eman zur Simulation der Energiebereitstellung verschiedener Varianten

2.5 Wirtschaftlichkeitsnachweis auf Jahreskostenbasis

Als Basis der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sind die Investitionen der konzipierten Energiebereitstellung zu ermitteln. Zweifellos sind jedoch nicht diese Investitionen, sondern insbesondere die Jahreskosten aus Kapital- und Betriebskosten für die Wirtschaftlichkeit maßgebend.

Neben der Wirtschaftlichkeit können auch andere Gründe (z. B. betriebliche Sicherheit, ökologische Verträglichkeit, langfristige Versorgungssicherheit, Faulgasverwertungsgebot) für die Entscheidungsfindung zur Energieverbrauchsdeckung von Kläranlagen maßgeblich sein.

Eine entscheidende Rolle spielen auch die Steuerungsmöglichkeiten der Energieträger und damit die Anpassungsfähigkeit an verschiedene Betriebsführungsstrategien. Es ist immer zu bedenken, daß z. B. Faulgas und die Zweitbrennstoffe in ihrem Einsatz gesteuert und damit flexibel in ein Managementkonzept eingebunden werden können. Ebenso können Faulgas und Zweitbrennstoffe in elektrische und/oder thermische Energie (Bereitstellung von Grund- und Spitzenlast) umgewandelt werden. Die Jahreskosten verschiedener Energieverbrauchsdeckungsvarianten sind somit nur eine von mehreren Entscheidungshilfen.

Als Anhaltswerte können die Investitionen (= K_I) einschließlich Peripherie von Eigenstromerzeugungsanlagen wie folgt abgeschätzt werden (Leistungsangaben beziehen sich, soweit nicht besonders vermerkt, auf die installierte elektrische Leistung). Für nähere Angaben zu den Kosten sowie deren Einflußfaktoren wird auf das Kapitel 6 in Band I verwiesen.

BHKW-Anlagen:	1.000 - 7.000 DM/kW
Windkraft-Anlagen:	1.200 - 3.000 DM/kW
Photovoltaik-Anlagen:	8.000 - 23.000 DM/kW _P
Solarthermische Anlagen:	100 - 3.500 DM/m ² Kollektorfläche
Wasserkraft-Anlagen:	12.000 - 18.000 DM/kW
Wärmepumpenanlagen:	1.000 – 3.000 DM/kW _{therm.}

Ausgehend von einem kalkulatorischen Zinssatz p [%] sowie aggregatspezifischen Lebensdauern n [a] werden über Annuitäten (= A) aus diesen Investitionen die jahresbezogenen Kapitalkosten (= K_K) in DM/a ermittelt.

Annuität (= A , von lateinisch anno = Jahr) ist die jährliche gleichbleibende Zahlungsrate zur Abtragung einer Geldschuld. Bei einer wirtschaftlichen Lebensdauer von

n Jahren, entsprechend n Zahlungsperioden und einem Zinssatz p [%] wird die Annuität wie folgt berechnet:

$$A = K_I \cdot q^n \cdot (q - 1) / (q^n - 1) \text{ [DM/a]} \quad \text{mit Zinsfaktor } q = 1 + p/100$$

Aus den Kapitalkosten werden zusammen mit den jährlichen Betriebskosten die Jahreskosten berechnet.

Für eine Abschätzung der Größenordnung der Energiekosten im Vergleich zu den gesamten Jahreskosten einer Kläranlage können die einwohnerspezifischen Jahreskosten durch die in der nachfolgenden Abbildung 60 dargestellte Funktion nach IMHOFF bestimmt werden.

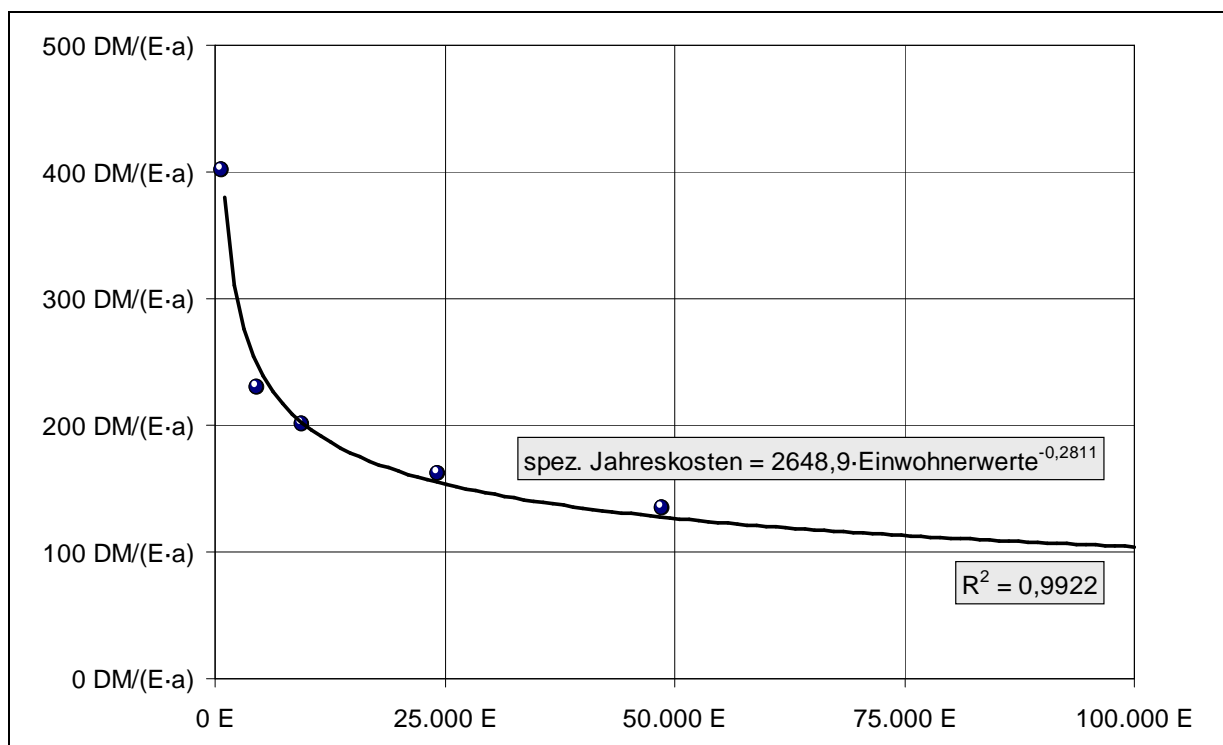


Abbildung 60: Einwohnerspezifische Jahreskosten von Kläranlagen für das Jahr 1991 [IMHOFF 1993, S. 95]

2.5.1 Einflußgrößen auf die Strombezugskosten

Die Einbeziehung verschiedener Energieträger und die unterschiedlichen Tarifstrukturen der Energieversorger bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten. In allen Fällen gilt, daß folgende Randbedingungen für eine Optimierung der Kosten des Energiebezuges über das EVU genauer zu untersuchen sind:

- Vertragsgestaltung, Vertragstyp (L 125, L 200, etc.)
- Vertragslaufzeit
- Rabattregelung
- Reserveleistungsregelung
- Notstromkonzept

Grundsätzlich kann festgestellt werden, daß bei großem Strombezug und hoher Gleichmäßigkeit der Abnahme ein geringerer Preis pro kWh gezahlt wird als für geringfügige Strommengen und Spitzenleistungen. Der Strompreis bewegt sich dabei im Bereich von ca. 10 - 20 DPf/kWh.

Wie aus Abbildung 61 ersichtlich können mit dem Programm Eman für EVU-orientierte Energiebereitstellungsvarianten die Auswirkungen der Strombezugskosten auf die Jahreskosten der Energieversorgung für verschiedene Stromtarifarten untersucht werden (Parameterknopf beim in Abbildung 59 dargestellten „Hauptmenüpunkt“ EVU). Dadurch ist das auf der CD-Rom beiliegende Simulationsprogramm in der Lage, eine Sensitivitätsprüfung verschiedener EVU-Tarife für die unterschiedlichen Versorgungsvarianten (Wind, Solar, BHKW mit Leistungsregelung) durchzuführen.

Arbeits- und Leistungspreise

Niedertarif				Hochtarif			
bis	240000	kWh	13,39 Pf/kWh	bis	240000	kWh	16,37 Pf/kWh
bis	1200000	kWh	9,1 Pf/kWh	bis	1200000	kWh	13,5 Pf/kWh
bis	2400000	kWh	7,7 Pf/kWh	bis	2400000	kWh	12,1 Pf/kWh
bis	4800000	kWh	6,5 Pf/kWh	bis	4800000	kWh	11,2 Pf/kWh
über	4800000	kWh	6,25 Pf/kWh	über	4800000	kWh	10,35 Pf/kWh

Beginn der Niedertarifzeit			Beginn der Hochtarifzeit		
Sommer	18	Uhr	Sommer	7	Uhr
Winter	18	Uhr	Winter	7	Uhr

Bereitgestellte Leistung	300	kW
Jahresleistungspreis	126	DM/(kW*a)

OK

Abbildung 61: Eingabematrix Eman für die Variation verschiedener Strombezugskosten

2.5.2 Einflußgrößen auf die Wärmebezugskosten

Bei den Kosten für den Bezug von Wärmeenergie, meist in Form eines Brennstoffs, gelten bei Bezug von EVU-Erdgas ähnliche Randbedingungen wie beim Strombezug vom EVU (vgl. Kap 6.3 in Band I). Die übrigen Brennstoffe werden zumeist vor Ort, z. B. in Tanks, gelagert. Der Verbrauch von Wärmeenergie ist jedoch deutlich vom Verbrauch elektrischer Energie zu unterscheiden, da z. B. Schwankungen träger erfolgen und ein Großteil über ggf. vorhandenes Faulgas abgedeckt werden kann. Des Weiteren werden beim Wärmeverbrauch wesentlich geringere Kosten verursacht (vgl. Tabelle 14, Band I).

Bei Nutzung von Erdgas, Heizöl, Rapsöl und Biodiesel ausschließlich für Heizzwecke wird keine Mineralölsteuer erhoben.

Die Kosten von Wärmeenergie bewegen sich geringfügig über den Primärenergiekosten; sie betragen zur Zeit ca. 4 - 5 DPf/kWh.

Wesentlich für eine optimale Energiebereitstellung und damit auch für die Wirtschaftlichkeit ist die weitestgehende Verwertung der verwendeten Primärenergien, was bei z. B. BHKW-Anlagen die vollständige Nutzung sowohl der erzeugten elektrischen als auch der thermischen Energie bedeutet. Die vollständige Nutzung der elektrischen Energie stellt meist kein Problem dar, weil evtl. überschüssige Energie in das Netz des EVU rückgespeist werden kann. Bei überschüssiger thermischer Energie ist die Möglichkeit eines Verbundes mit einem geographisch nah gelegenen Verbraucher wie beispielsweise einem Industriebetrieb, einem Gewächshaus, Freibad o. ä. zu prüfen, wobei in diesen Fällen sichergestellt sein muß, daß die überschüssige Menge kontinuierlich und gleichmäßig zur Verfügung steht.

2.5.3 Kalkulation der Einspeisevergütung

Für die Stromeinspeisung wurden nach dem Energieeinspeisungsgesetz in den letzten Jahren die Vergütungen gemäß Tabelle 10 in Band I bezahlt. Deutlich wird, daß die Strompreise infolge der Wettbewerbssituation der EVU gefallen sind und im Trend derzeit weiter fallen – insoweit fallen auch die Einspeisevergütungen und können somit eine Eigenstromerzeugung unwirtschaftlich machen.

Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wurden im März 2000 bessere wirtschaftliche Grundlagen für die Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien geschaffen. Insbesondere wurden die Abnahme- und Vergütungspflichten der Stromnetzbetreiber neu festgesetzt. Das Stromeinspeisungsgesetz von 1990, das zuletzt im April 1998 geändert wurde, tritt außer Kraft. [N.N 2000]

Die neuen Vergütungssätze nach EEG sind in Tabelle 19 aufgeführt. Für die im vorliegenden Vorhaben durchgeführten Beispielrechnungen wurde vereinbarungsgemäß von den zu Beginn der Bearbeitungszeit geltenden Einspeisevergütungen gemäß Energieeinspeisegesetz ausgegangen.

Es bleibt abzuwarten, ob evtl. politische Randbedingungen für die Einspeisevergütungen so geändert werden, daß eine Nutzung regenerativer Energien wirtschaftlich wird bzw. bleibt.

2.5.4 Jahreskosten von BHKW-Anlagen

Die jährlichen Betriebskosten eines BHKW setzen sich zusammen aus:

- Zweitenergiekosten (Erdgas, Propangas, Öl, ...)
- Personalbedarf
- Reparaturkosten
- Sonstige Betriebskosten (Material, Versicherung)

Für die im BHKW eigenerzeugte Wärmeenergie werden 3 DPf/kWh von den Jahreskosten in Abzug gebracht. Die Faulgaskosten, die entsprechend dem Heizwert von rd. 6 - 7 kWh/m³ bei rd. 3 DPf/kWh Primärenergie mit rd. 20 DPf/m³ zu veranschlagen wären, werden üblicherweise der Schlammbehandlung zugerechnet und bleiben im weiteren bei den Primärbrennstoffkosten unberücksichtigt.

Die Jahreskosten der BHKW-Anlage abzüglich der erzeugten Wärmeenergieerträge ergeben bezogen auf die eigenerzeugte elektrische Energie einen Durchschnittspreis pro kWh, der auf Grund der hohen Fixkostenanteile (Kapitalkosten der BHKW-Anlage) umso geringer ist, je höher die Jahresbenutzungsstunden der BHKW-Anlage sind.

Überschläglich kann man Strom in einer BHKW-Anlage bei Benutzungsstundenzahlen unter 4.000 h/a nicht kostengünstiger erzeugen als das EVU (vergleiche Kalkulationsbeispiel BHKW unten).

Warum ein Verbrennen des Faulgases in einem Heizkessel aus wirtschaftlicher Sicht ungünstiger ist als eine BHKW-Nutzung, läßt sich am einfachsten aus dem Vergleich der bewerteten Energieausbeuten aus 1 m³ Faulgas für beide Verfahren erkennen (s. nachfolgende Tabelle 18).

Ausgangsdaten	Heizwert Faulgas	6,4 kWh/m ³
	Strompreis ("Nutzen")	0,10 DM/kWh - 0,20 DM/kWh
	Wärmepreis ("Nutzen")	0,04 DM/kWh - 0,05 DM/kWh
Nutzen der Eigenenergieerzeugung	BHKW	Heizkessel
elektrischer Wirkungsgrad [%]	34	0
thermischer Wirkungsgrad [%]	55	90
Strompotential [kWh/m ³ _N]	2,18	0,00
Wärmepotential [kWh/m ³ _N]	3,52	5,76
Nutzen Strom [DM/m ³ _N]	0,22 - 0,44	0,00
Nutzen Wärme [DM/m ³ _N]	0,14 - 0,18	0,23 - 0,29
Summe Nutzen [DM/m³_N]	0,47 - 0,61	0,23 - 0,29
Kosten der Eigenenergieerzeugung		
Investitionen K_i [DM/kW _{primär}]	1.700	500
Annuität A [%]	8	8
Kapitalkosten (= $A \cdot K_i$) [DM/(kW _{primär} · a)]	136	40
Betriebskosten (2 % von K_i) [DM/(kW _{primär} · a)]	34	10
Jahreskosten [DM/(kW _{primär} · a)]	170	50
Jahresbenutzungsstunden [h/a]	5.000 - 2.350	5.000 - 2.350
Kosten [DM/kWh _{primär}]	0,03 - 0,07	0,01 - 0,02
Kosten [DM/m³_N]	0,22 - 0,46	0,06 - 0,14
Kosten - Nutzen - Vergleich		
Differenz Nutzen – Kosten [DM/m ³ _N]	0,25 - 0,15	0,17 - 0,15

Tabelle 18: Kosten-Nutzen-Vergleich der Eigenenergieerzeugung über Faulgas im BHKW und Heizkessel

Nur bei Jahresbenutzungsstunden des BHKW unter ca. 2.350 h/a ergibt sich ein Jahreskostenvorteil für die Nutzung von Faulgas im Heizkessel.

Bei Einsatz von Zweitbrennstoffen (Erdgas, Propangas, Diesel) kann ein BHKW im Falle eines EVU-Netzausfalles auch als Notstromaggregat fungieren. Zudem wird dadurch die Betriebssicherheit bei Faulgasmangel verbessert. Ein Zweitbrennstoffeinsatz kann wirtschaftlich wie folgt bewertet werden:

Zweitbrennstoffkosten liegen zwischen 4 und 5 DPf/kWh Primärenergie (vgl. Band I, Tabelle 13). Für die Erzeugung von 1 kWh elektrischer und rd. 1,5 kWh thermischer Energie sind rd. 3 kWh Zweitbrennstoff erforderlich.

Bringt man vom bewerteten Primärenergieeinsatz in Höhe von 12 bis 15 DPf die mit rd. 6 DPf zu bewertenden $1,5 \text{ kWh}_{\text{therm.}}$ in Abzug, ergeben sich Grenzkosten für einen Fremdenergieeinsatz von 6 bis 9 DPf/ $\text{kWh}_{\text{elektr.}}$.

Bezogen auf EVU-Stromkosten von beispielsweise 15 DPf/ kWh kann durch den Zweitbrennstoffeinsatz ein Deckungsbeitrag von 6 bis 9 DPf/ $\text{kWh}_{\text{elektr.}}$ für die BHKW-Anlage erwirtschaftet werden. Zweitbrennstoffe können, soweit diese nicht zu teuer eingekauft werden ($\leq 4 - 5 \text{ DPf/kWh}$), durch Erhöhung der Jahresbenutzungsdanzahl ($> 4.000 \text{ h}$, s. o.) die Wirtschaftlichkeit eines BHKW verbessern.

2.5.5 Jahreskosten von Wasserkraftanlagen

Mit einer kleinen Wasserkraftanlage von 2 kW (entsprechend $450 \text{ m}^3/\text{h}$ und 2 m Fallhöhe) können günstigstenfalls (keine Ausfälle und $450 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 2 m Fallhöhe stehen ganzjährig zur Verfügung)

$$24 \text{ h/d} \cdot 365 \text{ d/a} \cdot 2 \text{ kW} = 17.520 \text{ kWh/a}$$

Strom erzeugt werden. Die Gesamtinvestitionen incl. baulichen und maschinellen Installationen, MwSt., Nebenkosten etc. berechnen sich zu rd. 15.000 DM/kW (je nach baulichen Erfordernissen evtl. bis zu 20.000 DM/kW), entsprechend 30.000 - 40.000 DM. Unter Annahme der folgenden Randbedingungen:

Lebensdauer baulich:	50 Jahre
Lebensdauer maschinell:	20 Jahre
Kalk. Zinsen:	7,00 %
Annuität baulich:	6,77 %
Annuität maschinell:	8,82 %
gewichtete mittl. Annuität:	7,80 % (50 % baulich und 50 % maschinell)
Betriebskosten:	2,00 % der Investitionen

Die Jahreskosten betragen entsprechend:

Kapitalkosten (= Annuität · Investitionen)	= 2.340 - 3.120 DM/a
Betriebskosten (Personal, Reparatur, Wartung)	= <u>600 - 800 DM/a</u>
Summe Jahreskosten Wasserkraft	= <u>2.940 - 3.920 DM/a</u>

Die Stromerzeugungskosten betragen entsprechend

$$2.940 \text{ DM/a} / 17.520 \text{ kWh/a} = 16,8 \text{ DPf/kWh}$$

bis $3.920 \text{ DM/a} / 17.520 \text{ kWh/a} = 22,4 \text{ DPf/kWh.}$

Die Wasserkraftnutzung kann daher nur bei günstigen Bedingungen für die Wasserkraft (geringe spezifische Investitionen durch große Fallhöhe und Wassermenge, geringer baulicher Aufwand) bzw. hohen spezifischen Stromkosten des EVU wirtschaftlich werden.

Die Wirtschaftlichkeit von Wasserkraftanlagen kann bei Nutzung von Förderprogrammen von EU, Bund, Ländern oder Gemeinden verbessert werden, da die Jahreskosten im wesentlichen durch Kapitalkosten bestimmt sind.

2.5.6 Jahreskosten von Windkraftanlagen

Eine Windkraftanlage von z.B. 150 kW erzeugt je nach Windverhältnissen bei 1.000 bis 2.000 Vollaststunden pro Jahr ca. 150.000 bis 300.000 kWh/a Strom (i. M. 225.000 kWh/a).

Die Gesamtinvestitionen mit Mast, elektrotechnischer Anbindung, Trafo, Fundament, MWSt., etc. betragen bei rd. 2.000 DM/kW insgesamt 300.000 DM. Unter Annahme der folgenden Randbedingungen:

Lebensdauer baulich:	50 Jahre
Lebensdauer maschinell:	20 Jahre
Kalk. Zinsen:	7,00 %
Annuität baulich:	6,77 %
Annuität maschinell:	8,82 %
gewichtete mittl. Annuität:	8,41 % (20 % baulich und 80 % maschinell)
Betriebskosten:	2,00 % der Investitionen

betragen die Jahreskosten entsprechend:

Kapitalkosten (Annuität · Investitionen)	= 25.230 DM/a
Betriebskosten (Personal, Reparatur, Wartung)	= <u>6.000 DM/a</u>
Summe Jahreskosten Windkraft	= <u>31.230 DM/a</u>

Die Stromerzeugungskosten betragen entsprechend

$$31.230 \text{ DM/a} / 150.000 \text{ kWh/a} = 20,8 \text{ DPf/kWh}$$

bis $31.230 \text{ DM/a} / 300.000 \text{ kWh/a} = 10,4 \text{ DPf/kWh}.$

Bei der Windkraft muß berücksichtigt werden, daß die maximal erforderliche elektrische Leistung seitens des EVU oder der BHKW-Anlage durch die Windkraft nicht

reduziert werden kann, da die Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens von Windstille und elektrischem Spitzenleistungsbedarf immer gegeben ist.

Windenergie kann bei guten Windverhältnissen wirtschaftlicher als EVU-Strom sein. Die Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen kann bei Nutzung von Förderprogrammen von EU, Bund, Ländern oder Gemeinden verbessert werden, da die Jahreskosten im wesentlichen durch Kapitalkosten bestimmt sind.

2.5.7 Jahreskosten von Solaranlagen

2.5.7.1 Photovoltaik

Die Kosten für Photovoltaikkraftwerke sind sehr unterschiedlich. Kraftwerksgröße und Art der Module sind die entscheidenden kostenbeeinflussenden Faktoren. Die spezifischen Stromkosten aus Photovoltaikanlagen können wie folgt kalkuliert werden:

Eine Solarkraftanlage mit 200 kW_P erzeugt rd. 200.000 kWh/a, dies entspricht rd. 1.000 h/a Vollaststunden. Die mittlere Solarleistung beträgt bezogen auf 8.760 Jahresstunden 23 kW.

Bei Investitionen von rd. 15.000 DM/kW_P, entsprechend 3.000.000 DM, betragen die Jahreskosten bei einer mittleren Annuität von z.B. 8 % (7 % Zinsen, 25 Jahre Lebensdauer der Anlage):

Kapitalkosten (= Annuität · Investitionen):	240.000 DM/a
Betriebskosten (= Personal, Reparatur, Wartung): (geschätzt: 1,00 % der Investitionen)	<u>30.000 DM/a</u>
Summe Jahreskosten Photovoltaik:	<u>270.000 DM/a</u>
Spez. Stromkosten:	1,35 DM/kWh

2.5.7.2 Solarthermie

Die Nutzung solarthermischer Energie stellt sich in Jahreskosten ausgedrückt wie folgt dar:

Mit einem Systemwirkungsgrad von 18 % (Wärmeverluste in Kollektoren, Heizkreislauf und Ausfallzeiten) lassen sich von rd. 1.100 kWh/(m²-a) Solareinstrahlungsenergie 200 kWh/(m²-a) nutzen. Die Investitionen belaufen sich incl. Peripherie, Steuerungsanteilen und Nebenkosten auf rd. 500 DM pro m² Kollektorfläche.

Bei o.a. Annuität von 8 % sowie Betriebs-/Reparaturkosten von 2 % bezogen auf die Investitionen betragen die Jahreskosten je m² Kollektorfläche 50 DM/a. Die spezifischen Kosten der Wärmeenergie belaufen sich damit auf

$$50 \text{ DM}/(\text{m}^2\cdot\text{a}) / 200 \text{ kWh}/(\text{m}^2/\text{a}) = 0,25 \text{ DM/kWh}_{\text{therm.}}$$

Zu berücksichtigen ist, daß die Hauptnutzungszeit im Sommer liegt – dann steht jedoch meist genügend BHKW-Abwärme zur Verfügung.

Die Wirtschaftlichkeit von Solaranlagen kann bei Nutzung von Förderprogrammen von EU, Bund, Ländern oder Gemeinden verbessert werden, da die Jahreskosten im wesentlichen durch Kapitalkosten bestimmt werden.

2.5.8 **Schlußfolgerungen aus den Wirtschaftlichkeitsberechnungen**

Die Gesamtwirtschaftlichkeit der Energieversorgung einer Kläranlage läßt sich nur aus der Summe aller Jahreskosten beurteilen, da eine z. B. teilweise Eigenenergieversorgung die spezifischen Preise des EVU-Stroms beeinflusst. Die Stromversorgung einer geringfügigen Restmenge durch das EVU ist bedingt durch die geringen Jahresbenutzungsstunden spezifisch teurer (Leistungsspitzen) als eine Gesamtversorgung mit Strom durch das EVU. Es sind bei Variantenuntersuchungen also jeweils die sich ergebenden Jahreskosten von

- EVU-Reststromversorgung
- BHKW-Anlage
- Zweitbrennstoffeinsatz
- Wasserkraft
- Windkraft
- Solarenergieversorgung

detailliert für alle Energieversorgungseinrichtungen der Kläranlage zu berechnen. Dazu muß die sich ergebende Leistungsspitze und die Restarbeit der EVU-Versorgung auf der Basis des vorhandenen Wärme- und Strombedarfs möglichst genau je Variante ermittelt werden. Die Jahreskosten der eingebundenen Energieträger sind je Variante zu summieren. Eventuelle Einspeiseerlöse für Strom- und/oder Wärmeabgabe der Kläranlage an das EVU oder andere (z. B. Wärmebezugskunden) sind in Abzug zu bringen.

Zusammenfassend ist in Tabelle 19 die Bandbreite der spezifischen Energiekosten den Einspeisevergütungen gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, daß unter güns-

tigen Voraussetzungen und bei geschickter Planung eine wirtschaftliche Nutzung alternativer Energiequellen durchaus möglich ist. Der Solarstrom fällt hinsichtlich der spezifischen Kosten als besonders teuer auf. Wärmeenergie kostet spezifisch etwa 1/3 bis 1/6 der elektrischen Energie.

	spez. Energiekosten (DPf/kWh)		siehe u.a. Kapitel
	von	bis	
a) Thermische Energie			
Wärme	4,0 DPf/kWh	5,0 DPf/kWh	6.2 - 6.4, Bd I
BHKW-Abwärme	3,0 DPf/kWh	5,0 DPf/kWh	6.13, Bd I und 2.5.4, Bd II
Abwasserwärme	9,0 DPf/kWh	25,0 DPf/kWh	6.9, Bd I
Solarwärme	23,0 DPf/kWh	42,0 DPf/kWh	6.8, Bd I und 2.5.7.2, Bd II
b) Elektrische Energie			
BHKW-Strom	10,0 DPf/kWh	15,0 DPf/kWh	6.13, Bd I und 2.5.4, Bd II
EVU-Strom	10,0 DPf/kWh	20,0 DPf/kWh	6.1, Bd I und 2.5.1, Bd II
Windstrom	10,4 DPf/kWh	20,8 DPf/kWh	6.7, Bd I und 2.5.6, Bd II
Wasserkraft	10,0 DPf/kWh	35,0 DPf/kWh	6.6, Bd I und 2.5.5, Bd II
Solarstrom	100,0 DPf/kWh	200,0 DPf/kWh	6.8, Bd I und 2.5.7.1, Bd II
c) Einspeisevergütungen 1998			
Einspeisevergütung Strom aus Wind/Solar		17,6 DPf/kWh	4.3.2.3, Bd I 2.5.3, Bd II
Einspeisevergütung Strom aus Faulgas/Wasser		15,5 DPf/kWh	4.3.2.3, Band I 2.5.3, Band II
d) Einspeisevergütungen nach EEG ab 1.4.00			
EEG-Vergütung: Strom aus Wasserkraft, Deponie-, Gruben- und Klärgas		13,0 DPf/kWh	- 15,2 DPf/kWh
EEG-Vergütung: Strom aus Biomasse		17,0 DPf/kWh	- 20,0 DPf/kWh
EEG-Vergütung: Strom aus Geothermie		14,0 DPf/kWh	- 17,5 DPf/kWh
EEG-Vergütung: Strom aus Windkraft		12,1 DPf/kWh	- 17,8 DPf/kWh
EEG-Vergütung: Strom aus solarer Strahlungsenergie			89 DPf/kWh

Tabelle 19: Zusammenstellung der spezifischen Energiekostenbandbreiten und der Einspeisevergütungen

Den nachfolgenden Beispielrechnungen liegen als Vergleichswert die Einspeisevergütungen für 1998 zugrunde. Diese Daten werden in der folgenden Abbildung 62 graphisch veranschaulicht.

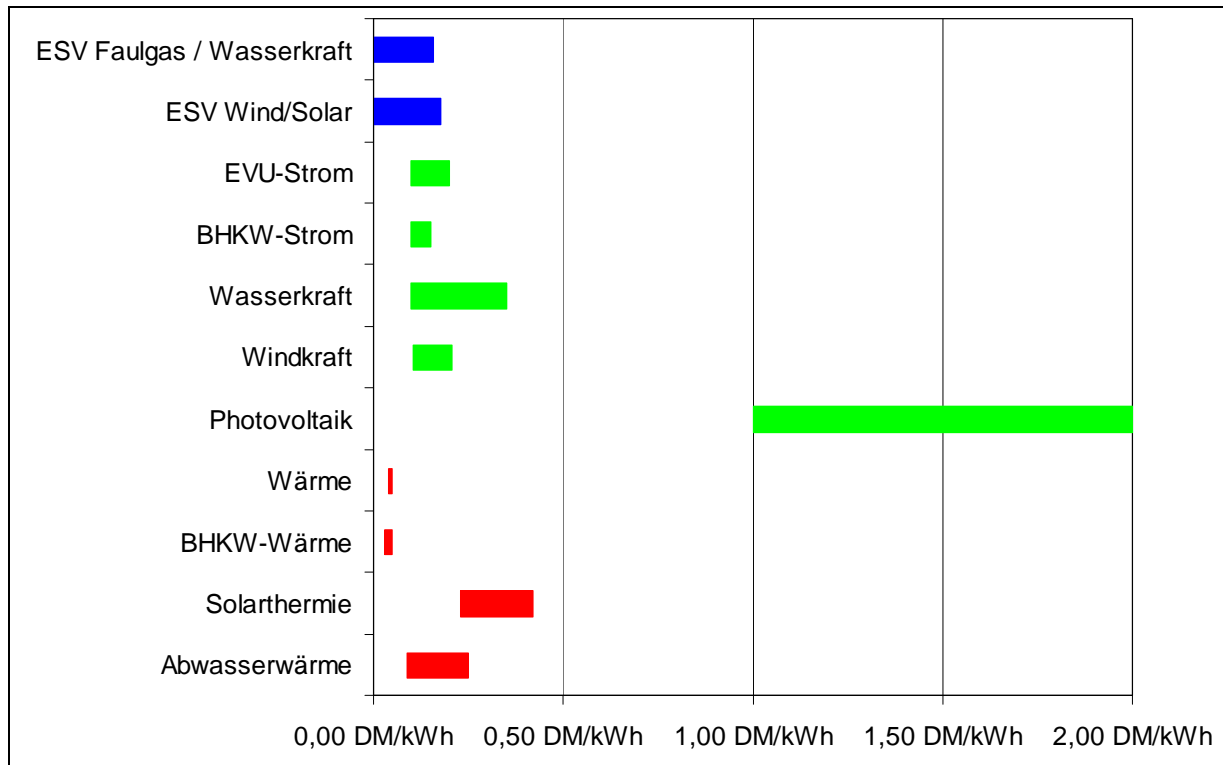


Abbildung 62: Gegenüberstellung der Einspeisevergütungen (ESV) für 1998 mit spezifischen Energiekosten

Bei der Auswahl der möglichen Varianten zur Energieverbrauchsdeckung ist nach derzeitiger Energiepreissituation eine Energieautarkie am wirtschaftlichsten und sichersten (3 Energiequellen) durch eine Kombination von BHKW ggf. mit Zweitbrennstoff (Strom und Wärmeenergie, optimale Faulgasverwertung), EVU (Strom und evtl. Erdgas) sowie Windenergie (Strom) realisierbar (vergleiche Tabelle 19 und Abbildung 62). Die Auswahl des Zweitbrennstoffes und der gewählten Energieversorgungsquellen muß nach lokaler Energiepreissituation, langfristiger Versorgungssicherheit sowie ökologischer Verträglichkeit erfolgen.

3 Beispielhafte Anwendung der Simulation mit Standardwerten (Genauigkeitsstufe 3)

Zur Veranschaulichung erfolgt die Anwendung des entwickelten Programms mit den in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Schritten:

- Energieverbrauchsermittlung
- Energieverbrauchsdeckung
- Wirtschaftlichkeitsnachweis

für die Kläranlage Vreden. Die Anlage war zu Beginn des Forschungsvorhabens noch in der Inbetriebnahmephase, und es lagen keine längerfristigen Verbrauchs- und Eigenenergiedaten vor. Deshalb war in diesem Stadium nur eine Vorgehensweise gemäß Genauigkeitsstufe 3 möglich. Für die Berechnung der Energieautarkiebasistdaten (Verbrauch Wärme und Strom, Gasanfall) ist jedoch auch keine Detailkenntnis der Kläranlage erforderlich. Es werden Werte aus der Kläranlagenplanung der neuen Kläranlage Vreden zu Grunde gelegt.

In Kapitel 4 werden anschließend konkrete Betriebswerte, die sich im Laufe der Bearbeitung des Forschungsvorhabens ergaben, für eine weitere Simulationsrechnung verwendet. Eine detailgenaue Abbildung im Viertelstundentakt aus praktischen Betriebswerten des PLS war nicht möglich; die erforderlichen Daten für eine Simulationsrechnung nach Genauigkeitsstufe 2 waren allerdings vorhanden.

In der ersten Beispielrechnung wird auch bewußt auf eine Optimierung der Verbrauchswerte durch Energiespartips verzichtet, um einen möglichst hohen Verbrauch abdecken zu können. Für den zweiten Rechendurchlauf der Genauigkeitsstufe 2 wurde begleitend eine energetische Feinanalyse gemäß Energiehandbuch NW durchgeführt [N.N. IN VORBEREITUNG].

Mit dieser Vorgehensweise können anhand des konkreten Beispiels Vreden die Auswirkungen einer veränderten Datenbasis und einer ganzheitlichen Ansatzes zur Energieoptimierung (vgl. Abbildung 50) anschaulich verdeutlicht werden.

3.1 Vorstellung der Kläranlage Vreden

Die Kläranlage Vreden ist eine für 33.000 externe Einwohnerwerte ausgelegte Kläranlage (Inbetriebnahme Januar 1998) und liegt damit im Bereich einer in NRW sehr häufig auftretenden Kläranlagengrößenordnung. Die Einleiteerlaubniswerte der Kläranlage betragen:

Biochemischer Sauerstoffbedarf	BSB ₅	=	10 mg/l
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB	=	60 mg/l
Ammonium-Stickstoff	NH ₄ -N	=	3 mg/l
Phosphor	P _{ges}	=	2 mg/l
Stickstoff (anorgan.)	N _{anorg}	=	15 mg/l

Die Kläranlage wurde in den Jahren 1997/1998 errichtet und hat folgende Elemente:

- Rechenanlage
- Belüfteter Sand-/Fettfang,
- 2 Vorklärbecken (davon 1 nur bei Regenwetter genutzt),
- 3 Belebungsbecken mit Druckluftbelüftung,
- 2 Nachklärbecken,
- Rücklaufschlammumpwerk,
- Ablaufmeßstation,
- Prozeßwasserbehandlung mit Fäkalschlammannahme,
- 1 Voreindicker (statisch, Durchlaufeindicker),
- 1 Faulbehälter,
- 1 Nacheindicker,
- Maschinelle Schlammwässerung mit Zentrifuge,
- Betriebsgebäude mit moderner Prozeßleittechnik,
- Blockheizkraftwerk mit 2 Faulgas-/Propangasmaschinen (je 125 kW elektrische Leistung mit Abgas- und Kühlwasserwärmenutzung für die Faulbehälter- und Betriebsgebäudeheizung); keine weitere Heizung,
- 300 m³ Faulgasspeicher (drucklos) sowie
- Propangasspeicher mit 64 m³ Volumen (für 27 t Propangas).

Die derzeitige Energieversorgung der Kläranlage Vreden erfolgt über das EVU und die Verwertung des anfallenden Faulgases im BHKW. Zur Sicherstellung einer maximalen EVU-Leistungsabnahme von 100 kW wird bei auftretendem Faulgasmangel Propangas eingesetzt.

3.2 Datenbasis und Genauigkeitsstufe der Beispielrechnung

Für die Kläranlage Vreden lagen zu Beginn des Forschungsvorhabens wegen der erst kurz vorher abgeschlossenen Baumaßnahmen weder Jahreswerte des Energieverbrauchs noch gemessene Werte für Tages-, Wochen- bzw. Monatsschwankungen vor. In einem ersten Schritt wird die Berechnung deshalb mit der Genauigkeitsstufe 3 durchgeführt. Die erforderlichen Daten für die 35.040 Viertelstundenwerte der gesamten verbrauchten elektrischen und thermischen Leistung werden somit aus Erfahrungswerten berechnet.

3.3 Energieverbrauchsermittlung

3.3.1 Stromverbrauchsermittlung

Die Kläranlage Vreden wurde auf eine Anschlußgröße $EW = 33.000 \text{ E}$ ausgelegt (85 %-Fraktilwert der Tagesfracht). Genaue Betriebsdaten zur tatsächlichen mittleren Belastung lagen noch nicht vor. Deshalb wurde die als BSB_5 -Frachtäquivalent ausgedrückte Belastung im Jahresmittel mit ca. **20.000 E** abgeschätzt. Diese Einwohnerwertebelastung darf nicht mit der Auslegungsgröße der Kläranlage verwechselt werden – die Auslegungsgröße der Kläranlage Vreden beträgt 33.000 E extern, d. h. sie liegt um den Faktor 1,7 über der angenommenen jahresmittleren Einwohnerwertebelastung.

Nach der in Band I, Abbildung 11 eingeführten Funktion $e_{\text{ges}} = 78,04 - 3,5332 \cdot \ln(20.000)$ wird der einwohnerspezifische Stromverbrauch bestimmt:

$$e_{\text{ges}} = 43 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a})$$

1. Aus der Multiplikation von Anschlußgrößen und spezifischem Stromverbrauch erhält man den Jahresstromverbrauch der Kläranlage:

$$E_{\text{ges}} = 43 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a}) \cdot 20.000 \text{ E} = \mathbf{860.000 \text{ kWh/a}}$$

2. Aus der Division des Jahresstromverbrauchs durch die Jahresstunden erhält man die Jahresmittelleistung:

$$P_{e, m} = 860.000 \text{ kWh/a} / 8.760 \text{ h/a} = \mathbf{98 \text{ kW}}$$

3. Für die Ermittlung der Jahresganglinie der elektrischen Leistung wurden die Schwankungsfaktoren wie in den nachfolgenden drei Abbildungen dargestellt als Tages-, Wochen- und Monatsganglinien der typischen Zulaufcharakteristik von Kläranlagen dieser Größenordnung nachempfunden.

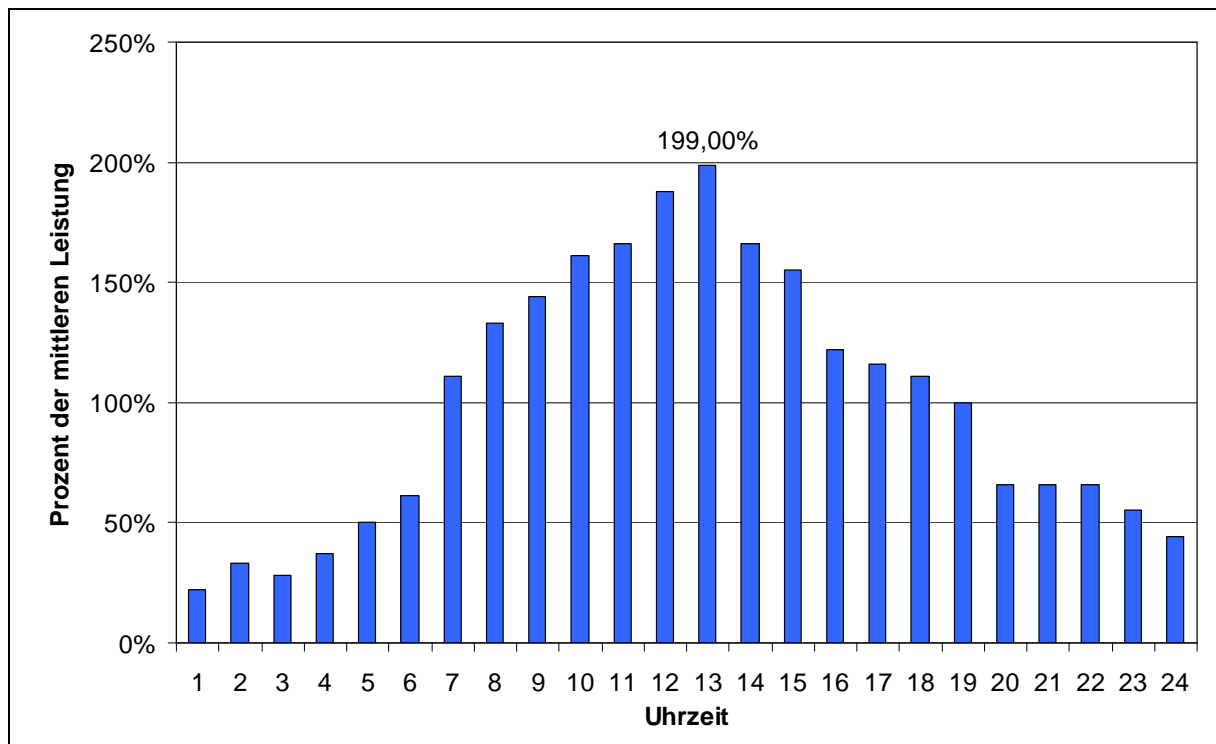


Abbildung 63: Stündliche Schwankungen der elektrischen Leistung in % der mittleren Leistung

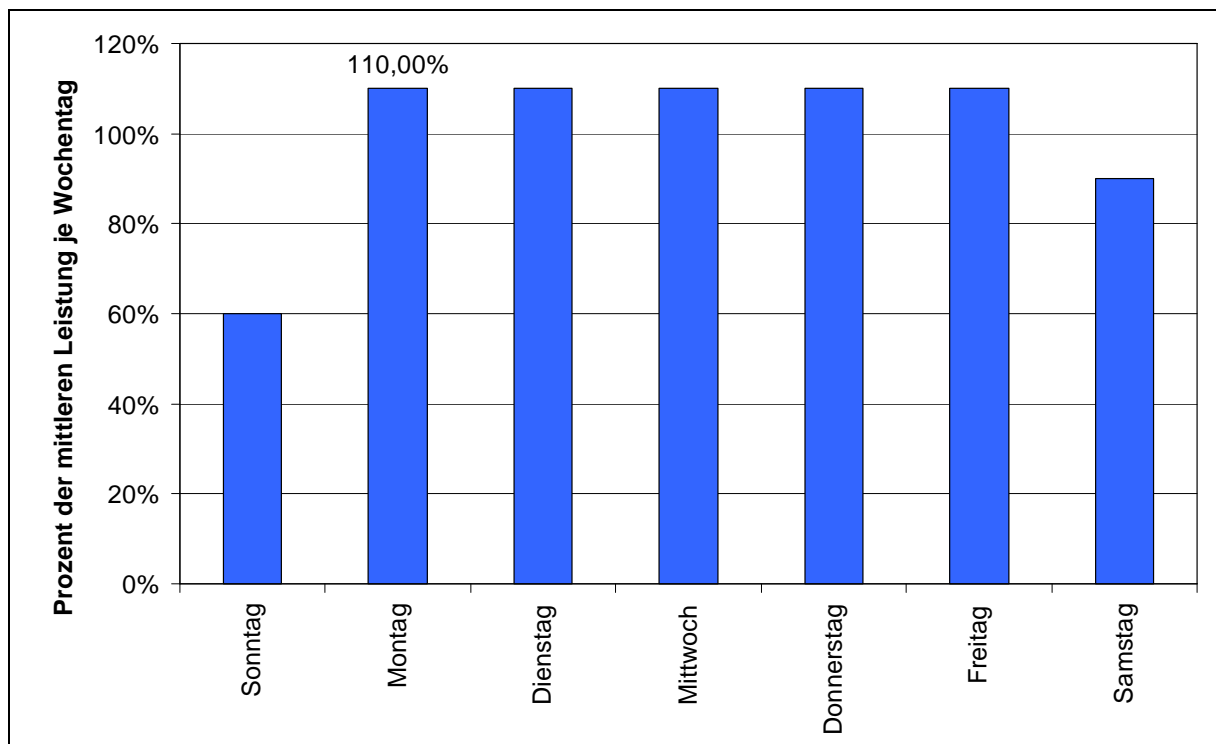


Abbildung 64: Wochentagsschwankungen der elektrischen Leistung bezogen auf die mittlere Leistung je Wochentag

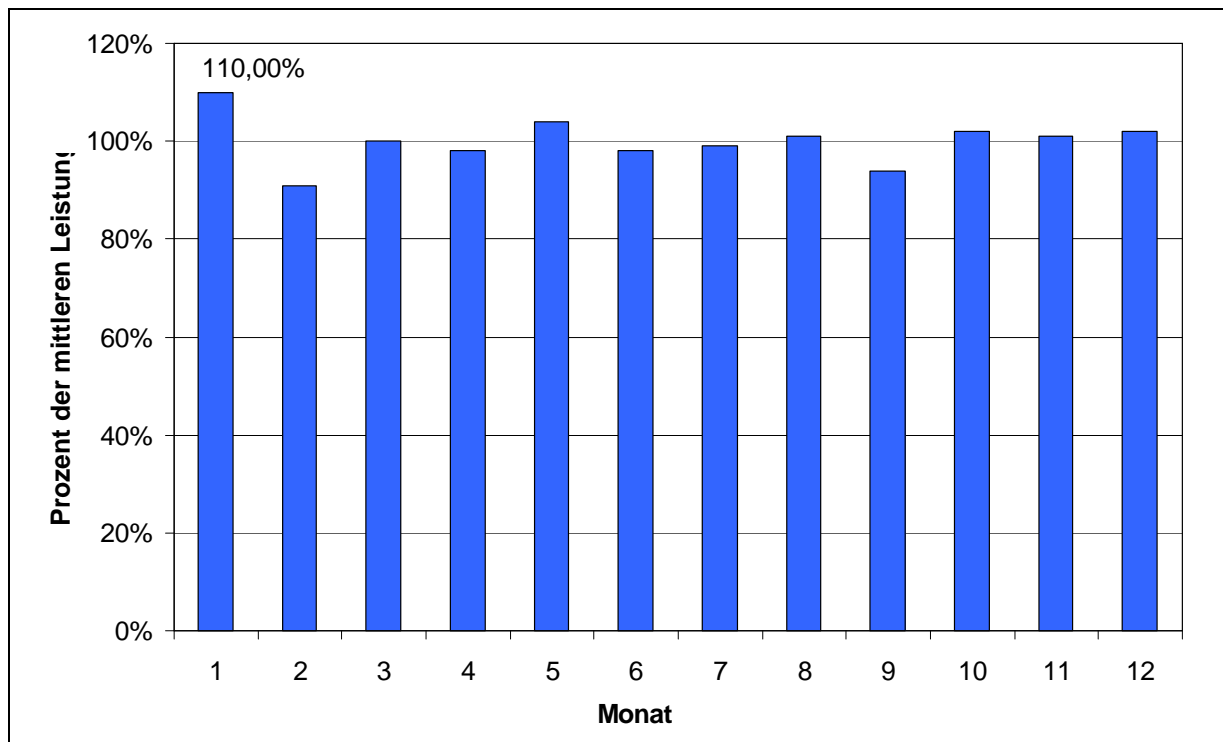


Abbildung 65: Monatliche elektrische Leistung in Relation zur mittleren monatlichen elektrischen Leistung

Als Ergebnis dieser Berechnungen und Ganglinienvorgaben beträgt die maximale Leistungsspitze entsprechend der Formel für die Viertelstundenleistungswerte in Kapitel 2.2:

$$\text{Leistungsspitze} = \text{Jahresmittelleistung} \cdot \text{Tagesspitzen-} \cdot \text{Wochenspitzen-} \\ \cdot \text{Monatsspitzenschwankungsfaktor}$$

$$P_{\max} = 98 \text{ kW} \cdot 200 \% \cdot 110 \% \cdot 110 \% = \text{ca. } \mathbf{240 \text{ kW}}.$$

Diese Schwankungsfaktoren werden anschließend in die in Abbildung 66 dargestellte Eman-Eingabematrix eingetragen. Das Programm simuliert damit den Schwankungsverlauf des identifizierten Stromverbrauches über das gesamte Jahr.

Eman - Energiemanagement auf Kläranlagen

Schwankungen des elektrischen Verbrauchs in % des mittleren Verbrauchs

Tageszeitliche Schwankungen		Wochentagsschwankungen		Monatsschwankungen			
0 - 1 Uhr	22	12 - 13 Uhr	199	Sonntag	60	Januar	110
1 - 2 Uhr	33	13 - 14 Uhr	166	Montag	110	Februar	91
2 - 3 Uhr	28	14 - 15 Uhr	155	Dienstag	110	März	100
3 - 4 Uhr	37	15 - 16 Uhr	122	Mittwoch	110	April	98
4 - 5 Uhr	50	16 - 17 Uhr	116	Donnerstag	110	Mai	104
5 - 6 Uhr	61	17 - 18 Uhr	111	Freitag	110	Juni	98
6 - 7 Uhr	111	18 - 19 Uhr	100	Samstag	90	Juli	99
7 - 8 Uhr	133	19 - 20 Uhr	66	Mittelwert	100	August	101
8 - 9 Uhr	144	20 - 21 Uhr	66			September	94
9 - 10 Uhr	161	21 - 22 Uhr	66			Oktober	102
10 - 11 Uhr	166	22 - 23 Uhr	55			November	101
11 - 12 Uhr	188	23 - 24 Uhr	44			Dezember	102
		Mittelwert	100			Mittelwert	100

OK

Abbildung 66: Eingabematrix der Schwankungen des elektrischen Energieverbrauchs (Genauigkeitsstufe 3)

3.3.2 Wärmeverbrauchsermittlung

Da keine konkreten Meßwerte für die Kläranlage Vreden vorlagen, wurde der Wärmebedarf gemäß den Erläuterungen aus Kap. 2.2.2 aus folgenden Anteilen errechnet:

a1) Beheizung von Gebäuden u. ä.:

Für die Kläranlage Vreden wurden die mittleren Leistungsbedarfswerte für die Gebäudebeheizungen wie folgt abgeschätzt:

- Betriebsgebäude mit rd. 500 m³ umbautem Raum:
87 W/m³ ⇒ 44 kW
- Maschinelle Schlammwässerung MSE, rd. 400 m³ frostfrei:
30 W/m³ ⇒ 12 kW

Im Winterhalbjahr werden zusammen $44 \text{ kW} + 12 \text{ kW} = 56 \text{ kW}$ und im Sommerhalbjahr 0 kW für die Gebäudeheizung benötigt. Im Jahresmittel sind entsprechend für Gebäudeheizungen $(56 + 0)/2 = \mathbf{28 \text{ kW}}$ Heizleistung erforderlich.

a2) Beheizung Faulbehälter

Die erforderliche Heizleistung für den gut isolierten Faulbehälter der Kläranlage Vreden wird wie folgt geschätzt:

- Eiform mit rd. 1.400 m^3 Inhalt, wenig Grundwasserbeeinflussung, tief im Erdreich eingebunden:
 $10 \text{ W/m}^3 \Rightarrow 0,01 \text{ kW/m}^3 \cdot 1.400 \text{ m}^3 = \mathbf{14 \text{ kW}}$

Im Sommer ist für den Faulbehälter im Gegensatz zur Beheizung des Betriebsgebäudes und der Schlammentwässerung ebenfalls ein Transmissionswärmebedarf vorhanden, da die Innentemperatur des Faulbehälters (ca. $35 \text{ }^\circ\text{C}$) auch im Sommer höher als die Außentemperatur ($21 \text{ }^\circ\text{C}$) ist. Die Temperaturdifferenz beträgt jedoch nur $1/3$ der maximalen Temperaturdifferenz im Winter; entsprechend ist nur $1/3 \cdot 14 \text{ kW} = \text{rd. } \mathbf{5 \text{ kW}}$ Heizleistung im Sommer für die Deckung der Transmissionsverluste des Faulbehälters erforderlich.

b) Rohschlammaufheizung

Gemäß Schlammengenkalkulation aus Kapitel 2.4.1.1 ergeben sich ausgehend von einer Trockensubstanzmenge $TS_0 = 70 \text{ g/(E}\cdot\text{d)}$ die aufzuheizenden Rohschlammengen wie folgt:

- Primärschlammfall bei $t_{VK} = 0,5 \text{ h}$:
 $TS_{VK} = 40 \% \cdot 0,070 \text{ kg/(E}\cdot\text{d)} \cdot 20.000 \text{ E} \Rightarrow \mathbf{TS_{VK} = 560 \text{ kg TS/d}}$
- Überschußschlamm aus dem Belebungsbecken:
 Bemessungstemperatur T: $10 \text{ }^\circ\text{C}$
 Schlammalter t_{TS} : $15,0 \text{ d}$

$$\frac{0,6 \cdot \left[\frac{0,6 \cdot 70 \text{ g } TS_0}{0,8 \cdot 60 \text{ g } BSB_5} + 1 \right] - 0,072 \cdot 0,6 \cdot 1,072^{(10-15)}}{\frac{1}{15} + 0,08 \cdot 1,072^{(10-15)}} \cdot 0,8 \cdot 20.000 \text{ E} \cdot 0,06 \text{ g } BSB_5$$

$$\Rightarrow \mathbf{\dot{U}S_{BB} = 842 \text{ kg TS/d}}$$

- Fällschlamm mit Eisenchloridsulfat:
 $\dot{U}S_P = 6,8 \cdot 20.000 \text{ E} \cdot 0,90 \cdot 0,025 \text{ kg P/(E}\cdot\text{d)} \Rightarrow \mathbf{\dot{U}S_P = 306 \text{ kg TS/d}}$

Die täglich zu beheizende Gesamtschlammmenge errechnet sich bei einem TS-Gehalt im Voreindicker von 3,5 % aus der gesamten täglichen TS-Fracht zu:

TS aus Vorklärung:	560 kg/d
TS aus Belebung:	842 kg/d
TS aus Fällschlamm:	306 kg/d
⇒ Summe TS-Anfall:	1.708 kg/d
⇒ Täggl. zu beheizende Schlammmenge:	49 m³/d

Die dafür erforderliche Heizenergie ergibt sich wie nachfolgend in Tabelle 20 berechnet; dabei wird von einer Heizzeit von 20 h/d ausgegangen. Je Liter Schlamm (ca. 1 kg) beträgt die erforderliche Heizenergie je °C Temperaturerhöhung 1 kcal.

	Sommer	Winter
Faulbehältertemperatur	37 °C	
Schlammtemperatur	20 °C	12 °C
Temperaturdifferenz	17 °C	25 °C
erf. Wärmeenergie [kcal/d]	17 °C · 49.000 kg/d = 833.000 kcal/d	25 °C · 49.000 kg/d = 1.225.000 kcal/d
erf. Wärmeleistung [kcal/h]	833.000 / 20 h/d = 41.650 kcal/h	1.225.000 / 20 h/d = 61.250 kcal/h
Wärmeleistung [kW]	41.650 / 860 kcal/kWh = 48 kW	61.250 / 860 kcal/kWh = 71 kW

Tabelle 20: Erforderliche Wärmeleistung für die Schlammaufheizung der Beispielkläranlage Vreden (Genauigkeitsstufe 3)

Im Mittel werden für die Schlammaufheizung entsprechend $(48 + 71)/2 = 60 \text{ kW}$ benötigt.

c) Wärmeleistung für den Warmwasserbedarf

Der maximale tägliche Warmwasserverbrauch von 3.000 l mit einer Temperaturdifferenz von 60 °C (Aufheizung von 10 °C auf 70 °C) erfordert über den angenommenen Zeitraum von ca. 20 h/d eine Heizleistung von:

$$3.000 \text{ kg/d} \cdot 60 \text{ °C} / 20 \text{ h/d} = 9.000 \text{ kcal/h}$$

$$9.000 \text{ kcal/h} / 860 \text{ kWh/kcal} = 10 \text{ kW}$$

Von dieser Spitzenleistung werden erfahrungsgemäß im Jahresmittel ca. 10 % = **1 kW** benötigt.

Die nachfolgende Tabelle 21 faßt den Rechengang zur Ermittlung der für die Simulation erforderlichen thermischen Eingangsdaten zusammen.

	Sommer	Winter	Leistung (i.M.)	Wärme [kWh/a]
	[1]	[2]	[3] =([1] + [2])/2	[4] =[3] · 8.760 h/a
a1) Beheizung Gebäude	0 kW	56 kW	28 kW	245.280 kWh/a
a2) Beheizung Faulbehälter	5 kW	14 kW	9,5 kW	83.220 kWh/a
b) Aufheizung Rohschlamm	48 kW	71 kW	59,5 kW	521.220 kWh/a
c) Warmwasserbedarf	10 kW	10 kW	1 kW	8.760 kWh/a
Summe	63 kW	151 kW	98 kW	858.480 kWh/a

Tabelle 21: Zusammenstellung der Wärmeleistungen und des Jahreswärmeverbrauchs für die Beispielkläranlage Vreden

Die erforderliche Jahreswärme in kWh/a liegt, wie bei den meisten Kläranlagen üblich, in der Größenordnung des elektrischen Energieverbrauchs:

858.480 kWh/a Wärmeverbrauch bei 860.000 kWh/a Stromverbrauch

Die Schwankungsfaktoren für die Wärmeleistung (siehe Abbildung 67) werden bei den Wärmeverbrauchsanteilen für die

- Gebäudebeheizung aus Lufttemperaturganglinien (= $S_{\text{Monat, TL (Jahr)}}$) und
- Schlammbeheizung aus Abwasser- und Faulbehältertemperaturganglinien (= $S_{\text{Monat, TS (Jahr)}}$)

bestimmt. Die Wärmebedarfsschwankungen sind direkt proportional zu den Differenzen zwischen Gebäudesolltemperatur und Außentemperatur [für a1) Betriebsgebäude und a2) Faulbehälterheizung] bzw. zwischen Faulschlammstolltemperatur im FB und Schlammtemperatur im Voreindicker [für b) Schlammaufheizung]. Aus diesem Grund sind die Schwankungsbereiche für a1) und a2) deutlich ausgeprägter als für b). Für den Warmwasserbedarf sind keine spezifischen Schwankungsfaktoren bestimmbar. Bei dem geringfügigen Anteil am Gesamtwärmeverbrauch sind diese auch vernachlässigbar.

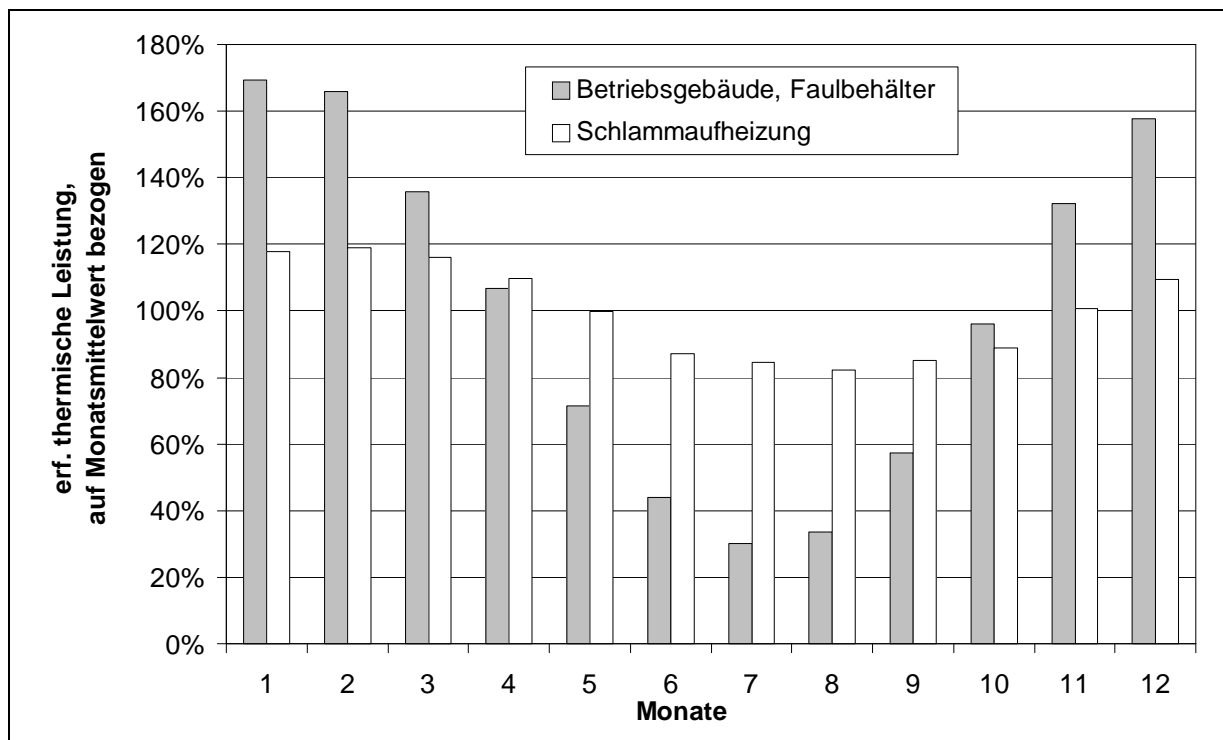


Abbildung 67: Auf Jahresmittelwerte bezogene thermische Leistung für Schlammaufheizung und Gebäudebeheizung

Wochentags- und Tagesschwankungsfaktoren wurden zu 100 % angenommen, da die Wärmeleistungsspitze stärker von der Schlammaufheizung als von der Gebäudebeheizung bestimmt wird. Die Schlammtemperatur verändert sich im Tages- und Wochenverlauf nur geringfügig.

In Abbildung 68 sind die mittleren monatlichen Temperaturen von Abwasserzulauf (für Schlammaufheizung) und der Außenluft (für Gebäude) entsprechend der Eingabematrix angegeben. Zugrunde gelegt wurden die Vorjahresdaten des ursprünglichen, alten Klärwerks Vreden.

The screenshot shows a software window titled "Eman - Energiemanagement auf Kläranlagen". Inside, there is a section titled "Monatliche Durchschnittstemperaturen" (Monthly Average Temperatures). It contains a table with two columns: "Außentemperatur" (Outdoor Temperature) and "Abwasserzulauftemperatur" (Wastewater Inlet Temperature). The rows represent the months from January to December. Each cell in the table contains a numerical value followed by "°C". At the bottom of the window, there is an "OK" button.

Monat	Außentemperatur (°C)	Abwasserzulauftemperatur (°C)
Januar	1,8	10
Februar	2,2	9,6
März	5,6	10,1
April	8,9	11,2
Mai	12,9	13,2
Juni	16	16
Juli	17,6	16,5
August	17,2	17,1
September	14,5	16,6
Oktober	10,1	15,5
November	6	12,8
Dezember	3,1	11,3

Abbildung 68: Eingabematrix der Schwankungen des thermischen Energieverbrauchs (Genauigkeitsstufe 3)

3.4 Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie

3.4.1 Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas

3.4.1.1 Faulgasanfall

Aus dem täglichen TS-Anfall (siehe Kap. 3.2.2) sowie den oTS-Anteilen (%) wird die tägliche oTS-Fracht zum Faulbehälter bestimmt. Bei der Kläranlage Vreden kann der oTS-Anteil genügend genau zu 66 % für den Primärschlamm und zu 50 % für den Überschussschlamm der biologischen Reinigungsstufe ($B_{TS} = 0,07 \text{ kg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$) angenommen werden. Der organische Anteil im Fällschlamm beträgt Null.

$$560 \text{ kg TS/d} \cdot 0,66 \text{ kg oTS/kg TS} + 842 \text{ kg TS/d} \cdot 0,50 \text{ kg oTS/kg TS} + 306 \text{ kg TS/d} \cdot 0 \text{ kg oTS/kg TS} = \mathbf{790,6 \text{ kg oTS/d}}$$

Mit einem oTS-spezifischen Faulgasertrag von $425 \text{ l}_N/\text{kg oTS}$ ergibt sich ein täglicher Gasertrag von $0,425 \text{ m}^3_N/\text{kg oTS} \cdot 790,6 \text{ kg oTS/d} = 336 \text{ m}^3_N/\text{d}$. Der spezifische Faulgasertrag wurde abweichend von den Werten der Tabelle 2 in Band I (Richtwert N_3 für spezifischen Faulgasanfall: $450 - 475 \text{ l}_N/\text{kg oTS}$) zu $425 \text{ l}_N/\text{kg oTS}$ angenom-

men, weil dieser Wert mit dem Erfahrungswert 17 l/(E·d) Faulgasanfall korrespondiert.

Im Jahr entspricht dies $365 \text{ d/a} \cdot 336 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{d} = 122.640 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{a}$ Faulgas; darin ist ein Primärenergieinhalt von $6,4 \text{ kWh}/\text{m}^3_{\text{N}} \cdot 122.640 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{a} = 784.896 \text{ kWh/a}$ enthalten.

Im vorhandenen BHKW der Kläranlage Vreden ($\eta_{\text{elektr.}} = 33 \%$, $\eta_{\text{therm.}} = 55 \%$) lassen sich daraus bei vollständiger Nutzung des Faulgases 259.016 kWh/a elektrische und 431.700 kWh/a thermische Energie erzeugen.

3.4.1.2 Faulgasverbrauch

Für die Simulation der Energiebereitstellung über Faulgas ist eine Eingabe der Schwankungsfaktoren des Faulgasanfalls erforderlich. Für die Beispielrechnung mit Genauigkeitsstufe 3 wurden die folgenden Faktoren angesetzt.

Schwankungen des Gasanfalls in % des mittleren Gasanfalls							
Tageszeitliche Schwankungen		Wochentagsschwankungen		Monatsschwankungen			
0 - 1 Uhr	100	12 - 13 Uhr	100	Sonntag	100	Januar	96
1 - 2 Uhr	100	13 - 14 Uhr	100	Montag	100	Februar	88
2 - 3 Uhr	100	14 - 15 Uhr	100	Dienstag	100	März	99
3 - 4 Uhr	100	15 - 16 Uhr	100	Mittwoch	100	April	97
4 - 5 Uhr	100	16 - 17 Uhr	100	Donnerstag	100	Mai	111
5 - 6 Uhr	100	17 - 18 Uhr	100	Freitag	100	Juni	110
6 - 7 Uhr	100	18 - 19 Uhr	100	Samstag	100	Juli	103
7 - 8 Uhr	100	19 - 20 Uhr	100			August	92
8 - 9 Uhr	100	20 - 21 Uhr	100	Mittelwert	100	September	96
9 - 10 Uhr	100	21 - 22 Uhr	100			Oktober	106
10 - 11 Uhr	100	22 - 23 Uhr	100			November	103
11 - 12 Uhr	100	23 - 24 Uhr	100			Dezember	99
		Mittelwert	100			Mittelwert	100

Abbildung 69: Eingabematrix der Schwankungen des Faulgasanfalles (Genauigkeitsstufe 3)

Die Faulgasspeichergröße beträgt in Vreden 300 m³. Es sind 2 BHKW mit einer elektrischen Leistung von jeweils 125 kW vorhanden. Bei dieser Leistung kann je Aggregat von 125 kW / 0,33 = 380 kW Primärleistung und damit 380 kW / 6,4 kWh/m³_N = 59 m³_N/h Faulgasverbrauch im Vollastbetrieb ausgegangen werden.

Die Steuerung der BHKW-Anlage erfolgt strombezugsgeregelt: Soweit Restenergiebedarf verbleibt und Zweitenergie (in diesem Beispiel Propangas) vorhanden ist, wird die elektrische Leistung soweit wie möglich vom BHKW eigenerzeugt.

Durch das Faulgas lassen sich bei 33 % mittlerem Wirkungsgrad (Wirkungsgrad im Teillastbereich niedriger als im Vollastbetrieb) 259.016 kWh/a / 860.000 kWh/a = 30,1 % des elektrischen Stromverbrauchs der Kläranlage Vreden abdecken.

3.4.2 Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffeinsatz (Status Quo-Lastfall)

Da nur rd. 30 % des elektrischen Energieverbrauchs der Kläranlage Vreden durch Faulgas abzudecken sind und

- die Leistung der vorhandenen BHKW-Anlage (2 · 125 kW) ausreichend ist, um die Verbrauchsleistungsspitze abzudecken (= 240 kW, Ergebnis aus Berechnungen mit Schwankungsfaktoren in Kapitel 3.3.1), sowie
- ein Propangastank (Zweitenergie) vorhanden und der BHKW-Betrieb mit Propan- gas möglich ist,

könnte die BHKW-Anlage auch den Gesamtstromverbrauch bereitstellen. Der Eigenstromversorgungsanteil durch die BHKW-Anlage läge dann bei 100 %, wobei jedoch rd. 70 % durch den Zweitbrennstoff Propangas gedeckt werden müßten.

Bei einer solchen Betriebsweise würden bei einem bereitzustellenden Bedarf von 860.000 kWh/a elektrischer Energie 860.000 kWh/a / 0,33 · 0,55 = 1.433.000 kWh/a thermische Energie anfallen. Dies deckt den vorhandenen thermischen Energieverbrauch (> 858.000 kWh/a) sowie die Lastspitzen im Winterbetrieb des thermischen Verbrauchs sicher ab.

Status Quo: Energieverbrauchsdeckung über BHKW		
Technische Kenndaten		
Erforderliche Spitzenleistung, elektrisch		240 kW
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
Erforderliche Spitzenleistung, thermisch		151 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	860.000 kWh/a	100 %
Gesamtwärmedeckung	1.433.000 kWh/a	167 %
Stromdeckung mit BHKW	860.000 kWh/a	100 %
davon Zweitenergie	602.000 kWh/a	70 %

Tabelle 22: Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für den Status Quo-Lastfall der Genauigkeitsstufe 3

Kritisch muß angemerkt werden, daß diese als „Status-Quo“-Lastfall bezeichnete Betriebsweise zwar „EVU-Autarkie“, jedoch keine Energieautarkie (gleichwelcher Qualitätsstufe) ist. Die Kläranlage ist noch von Fremdenergie in Form des Zweitbrennstoffs Propangas in nicht geringfügigem Ausmaß ohne Ausgleich durch Eigenenergie abhängig.

Es muß daher in einem weiteren Schritt nach unabhängiger Energieverbrauchsdeckung mit Alternativen gesucht werden, die die Zweitenergie reduzieren. Die meisten regenerativen Energieträger können jedoch nur entweder eine elektrische oder eine thermische Bedarfsdeckung leisten. Da die Präferenz auf der elektrischen Bedarfsdeckung liegt, könnte u. U. ein Zweitenergieeinsatz für die Beheizung notwendig werden. Um den in Tabelle 15 aufgeführten Qualitätsstufen der Energieautarkie Genüge zu leisten, müßte eine dem thermischen Verbrauch durch Zweitenergie entsprechende elektrische Energie aus den regenerativen Energieträgern eigenerzeugt und gegebenenfalls zeitweise in das EVU-Netz rückgespeist werden.

Durch die Faulgasnutzung wird bereits ein Anteil von 431.200 kWh/a der Wärmeenergie gedeckt. Die Restdeckung von $858.500 \text{ kWh/a} - 431.200 \text{ kWh/a} = 427.300 \text{ kWh/a}$ (thermische Lastspitzendeckung wird vorerst bewußt ignoriert) müßte über das Zweitgas erzeugt werden. Dadurch würde die erzeugte elektrische Energie um $427.300 \text{ kWh/a} / 0,55 \cdot 0,33 = 256.400 \text{ kWh/a}$ auf insgesamt $259.000 \text{ kWh/a} + 256.400 \text{ kWh/a} = 515.400 \text{ kWh/a}$ anwachsen.

Die restliche erforderliche elektrische Energie in Höhe von 860.000 kWh/a – 515.400 kWh/a = 344.600 kWh/a müsste aus anderen Energiequellen gedeckt werden.

Zusätzlich zu dem Reststromverbrauch sollte bei einer „echten Energieautarkie“ der „geringfügige Zweitgasanteil“ ebenfalls aus Eigenenergie erzeugt werden, d. h. der Bedarf der Kläranlage an alternativen Energien würde auf 344.600 + 256.400 kWh/a = 601.000 kWh/a anwachsen.

3.4.3 Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Wasserkraft

Auf der Kläranlage Vreden steht außer am Ablauf keine weitere Fallhöhe zur Nutzung des Energiepotentials aus der Wasserkraft des Abwassers zur Verfügung. Diese beträgt, solange der Vorfluter kein Hochwasser führt, ca. 1,5 m.

Bei 0,3 m³/(E · d) Schmutz- und Fremdwasser (als Dauerleistung i. M.) erbringt die Wasserkraftanlage gemäß der in Kapitel 2.3.3 vorgestellten Formel maximal

$$0,3 \text{ m}^3/(\text{E} \cdot \text{d}) \cdot 365 \text{ d/a} \cdot 1,5 \text{ m} / 367 \text{ m}^4 / \text{kWh} = 0,4 \text{ kWh}/(\text{E} \cdot \text{a});$$

entsprechend rd. 8.000 kWh/a.

Tatsächlich ist diese elektrische Arbeit um die Verluste (rd. 5 - 10 %) der Wasserkraftanlage geringer. Zudem schwankt die Ablaufwassermenge im Tagesverlauf stark.

Die Verluste werden durch die Faustformel $8 \cdot Q \cdot H$ berücksichtigt. Danach wäre - ausgehend von $Q = 0,3 \text{ m}^3/(\text{E} \cdot \text{d}) \cdot 20.000 \text{ E} = 6.000 \text{ m}^3/\text{d} = 250 \text{ m}^3/\text{h} = 0,069 \text{ m}^3/\text{s}$ - eine installierte Wasserkraftleistung von maximal $8 \text{ kW}/(\text{m}^4/\text{h}) \cdot 0,069 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,5 \text{ m} = 0,8 \text{ kW}$ möglich. Daraus wären rd. $0,8 \text{ kW} \cdot 365 \text{ d/a} \cdot 24 \text{ h/d} = 7.008 \text{ kWh/a}$ erreichbar, was einen Anteil von < 1 % des Jahresstromverbrauchs der Kläranlage Vreden ausmacht. In Anbetracht der hohen spezifischen Kosten eines solchen Kleinstwasserkraftwerkes und der Notwendigkeit einer Stromzuführung von rd. 400 m zum Ablauf ist ein Wasserkraftwerk für die Kläranlage Vreden nicht zu empfehlen.

3.4.4 Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft (Variante 1)

Ausgehend von dem Jahresstrombedarf der Kläranlage kann die Eigenerzeugung mit Faulgas 30,1 %, entsprechend 259.000 kWh/a, abdecken. Mit Windkraft wäre der restliche Energieverbrauch von $860.000 - 259.000 = 601.000$ kWh/a abzudecken.

Die für die Kläranlage Vreden vorliegenden Windmessungen weisen rd. 1.600 Jahresvollaststunden aus. Für die erforderliche Restenergie wäre eine Nennleistung von $(601.000 \text{ kWh/a}) / (1.600 \text{ h/a}) = 376 \text{ kW}$, d. h. rd. 400 kW erforderlich.

Die Energieverbrauchsdeckung mit BHKW-Betrieb und Windenergie wurde als Variante 1 mit windindexbedingten Schwankungen in Viertelstundenschritten für ein Jahr simuliert. Die Monatsschwankungen wurden als Verhältniswerte (Mittelwert 100 %) der monatsdurchschnittlichen Winderträge von Vredener Windanlagen bezogen auf den jahresdurchschnittlichen monatlichen Windertrag in Eman eingegeben (siehe Abbildung 70).

Monat	Schwankung (%)
Januar	48,83
Februar	257,49
März	112,1
April	103,22
Mai	75,47
Juni	74,36
Juli	39,96
August	41,07
September	53,27
Oktober	101,22
November	97,67
Dezember	195,34
Mittelwert	100

Abbildung 70: Eingabematrix zur Abbildungen der Schwankungen des Windenergiedargebotes (Genauigkeitsstufe 3)

Die technischen Kenndaten der Variante 1 sowie die sich aus der Simulationsrechnung ergebende energetische Bewertung ist in der folgenden Tabelle 23 dargestellt.

Im Ergebnis zeigt sich, daß durch eine stromverbrauchsorientierte Steuerung (BHKW aus, wenn ausreichend Windenergie vorhanden ist) eine geringere Wärmeenergie durch das BHKW erzeugt würde als im Winter erforderlich ist. Für diese Variante wäre also eine strom- und wärmebedarfsorientierte Steuerung des BHKW erforderlich.

Variante 1: Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft		
Technische Kenndaten		
Erforderliche Spitzenleistung, elektrisch		240 kW
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
Windkraftanlage		376 kW
Erforderliche Spitzenleistung, thermisch		151 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	1.046.000 kWh/a	122 %
Gesamtwärmedeckung	750.000.kWh/a	87 %
Stromdeckung mit BHKW	455.000.kWh/a	53 %
davon Zweitenergie	195.000.kWh/a	23 %
Stromdeckung mit Wind	590.000.kWh/a	69 %

Tabelle 23: Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 1 der Genauigkeitsstufe 3

Der über den Stromdeckungsgrad von 100 % hinausgehende Anteil ist etwa gleich der Energiezufuhr über den Zweitbrennstoff Propangas. Es ist also für diese Variante eine Energieautarkie der Qualitätsstufe 2 gegeben.

3.4.5 Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Solarenergie (Variante 2)

Bei dieser Variante wird der in Kapitel 3.4.4 identifizierte Reststrombedarf von 601.000 kWh/a über Photovoltaik gedeckt. Dies ist grundsätzlich möglich, wenn der Nachtstrombedarf über die leistungsgeregelte Eigenerzeugung durch BHKW mit Faulgas erfolgen würde.

Bei rd. $1.000 \text{ kWh}/(\text{a} \cdot \text{kW}_{\text{P, installiert}})$ wäre eine Photovoltaikanlage von insgesamt rd. $600 \text{ kW}_{\text{P}}$ zusätzlich erforderlich, um eine Energieautarkie der Qualitätsstufe 1 zu erreichen.

Damit wäre jedoch in jedem Fall ein Leistungsdefizit bei der thermischen Verbrauchsdeckung verbunden. Aus diesem Grund wird die Deckung des thermischen Energieverbrauches durch den Zweitbrennstoff Propangas gewährleistet. Die dabei überschüssig eigenerzeugte elektrische Energie kann jedoch nicht zu einer Reduzierung der erforderlichen Photovoltaikleistung führen, da sonst kein dem Zweitbrennstoff energetisch entsprechender Anteil eigenerzeugt wird (rd. 34 %, vgl. Tabelle 29).

Die Eingabematrix der in dieser Variante angenommenen Schwankungsfaktoren zeigt Abbildung 71.

Tageszeitliche Schwankungen		Monatsschwankungen				
0 - 1 Uhr	0	12 - 13 Uhr	596,8	Januar	32,87	
1 - 2 Uhr	0	13 - 14 Uhr	558,58	Februar	49,48	
2 - 3 Uhr	0	14 - 15 Uhr	162,58	März	89,27	
3 - 4 Uhr	0	15 - 16 Uhr	26,71	April	145,33	
4 - 5 Uhr	0	16 - 17 Uhr	0	Mai	166,09	
5 - 6 Uhr	0	17 - 18 Uhr	0	Juni	152,25	
6 - 7 Uhr	0	18 - 19 Uhr	0	Juli	166,09	
7 - 8 Uhr	3,2	19 - 20 Uhr	0	August	153,98	
8 - 9 Uhr	38,28	20 - 21 Uhr	0	September	100,35	
9 - 10 Uhr	151,14	21 - 22 Uhr	0	Oktober	81,31	
10 - 11 Uhr	304,8	22 - 23 Uhr	0	November	40,14	
11 - 12 Uhr	557,91	23 - 24 Uhr	0	Dezember	22,84	
	Mittelwert		100		Mittelwert	100

Abbildung 71: Eingabematrix zur Abbildungen der Schwankungen des Solarenergiedargebotes (Genauigkeitsstufe 3)

Die technischen Kenndaten sowie die sich aus der Simulationsrechnung ergebende energetische Bewertung ist in der folgenden Tabelle 24 dargestellt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnung zeigen eine vollständige Deckung sowohl des Wärme- als auch des Strombedarfs. Die vor allem im Nachtbetrieb erforderliche Zweitbrennstoffzufuhrung ist im Jahresmittel geringer als die über die 100 % Stromverbrauchsdeckung hinausgehende Energieeinspeisung in das EVU-Netz.

Die Energieautarkie der Qualitätsstufe 2 ist für diese Variante somit gewährleistet.

Variante 2: Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Photovoltaik		
Technische Kenndaten		
Erforderliche Spitzenleistung, elektrisch		240 kW
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
Solaranlage (kW _p)		600 kW
Erforderliche Spitzenleistung, thermisch		151 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	1.153.000 kWh/a	134 %
Gesamtwärmedeckung	905.000.kWh/a	105 %
Stromdeckung mit BHKW	549.000 kWh/a	64 %
davon Zweitenergie	288.000.kWh/a	34 %
Stromdeckung mit Photovoltaik	603.000.kWh/a	70 %

Tabelle 24: Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 2 der Genauigkeitsstufe 3

Infolge der spezifisch hohen Investitionen von Photovoltaikmodulen ist diese Variante sowohl bei den Investitionen als auch bei den Jahreskosten, siehe Abbildung 73 und Abbildung 74, die teuerste unter den gewählten Varianten.

3.4.6 Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Solarenergie (Variante 3)

Es ist naheliegend, neben der Bedarfsdeckung durch Wind (Nachteil: infolge zeitweiliger Strombedarfsdeckung durch Wind zeitweilige Wärmedefizite; Vorteil: günstige Jahreskosten) oder Photovoltaik (Nachteil: sehr teuer) auch eine Kombination der beiden alternativen Energiequellen zu untersuchen.

Gewählt wurde als Variante 3 eine Leistung von 250 kW Windenergie und 201 kW Solarenergie (neben der vorhandenen BHKW-Anlage von zusammen 250 kW).

201 kW Photovoltaikleistung ergeben sich aus dem Restbedarf an elektrischer Bedarfsdeckung durch das BHKW und die Windkraftanlage, wenn man von zu erzeugenden 601.000 kWh/a die durch das Windrad erzeugte Energie von 250 kW · 1.600 h/a = 400.000 kWh/a in Abzug bringt und anschließend den verbleibenden Deckungsbedarf von 201.000 kWh/a durch die Jahresbenutzungszahl der Solarenergie von 1.000 h/a teilt.

Auch bei dieser Lösung ergibt sich ein geringfügiges Wärmeleistungsdefizit. Eine Energieautarkie der Qualitätsstufe 2 ist jedoch annähernd gegeben, da der Betrag der Zweitgasenergiedeckung (rd. 15 %) ungefähr der über 100 % hinausgehenden Verbrauchsdeckung entspricht. Die technischen Kenndaten der Variante 3 sowie die sich aus der Simulationsrechnung ergebende energetische Bewertung ist in der folgenden Tabelle 25 dargestellt.

Variante 3: Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Photovoltaik		
Technische Kenndaten		
Erforderliche Spitzenleistung, elektrisch		240 kW
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
Windkraftanlage		250 kW
Solaranlage (kW _P)		201 kW
Erforderliche Spitzenleistung, thermisch		151 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	984.000 kWh/a	115 %
Gesamtwärmedeckung	644.000 kWh/a	75 %
Stromdeckung mit BHKW	389.000 kWh/a	45 %
davon Zweitenergie	128.000 kWh/a	15 %
Stromdeckung mit Wind	400.000 kWh/a	47 %
Stromdeckung mit Photovoltaik	201.000 kWh/a	23 %

Tabelle 25: Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 3 der Genauigkeitsstufe 3

3.5 Wirtschaftlichkeitsnachweis für alle Varianten

Für die vier besprochenen und in der nachfolgenden Tabelle 26 nochmals zusammengefaßten Varianten wurde mit Hilfe des entwickelten Simulationsprogrammes eine Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Jahreskostenbasis durchgeführt.

Technische Kenndaten	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Erforderliche Spitzenleistung, elektrisch	240 kW	240 kW	240 kW	240 kW
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)	250 kW	250 kW	250 kW	250 kW
Windkraftanlage	0 kW	376 kW	0 kW	250 kW
Solaranlage (kW _p)	0 kW	0 kW	600 kW	201 kW
Wasserkraft	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
Erforderliche Spitzenleistung, thermisch	151 kW	151 kW	151 kW	151 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)	417 kW	417 kW	417 kW	417 kW

Tabelle 26: Technische Kenndaten der untersuchten Varianten zur Energiebereitstellung der Kläranlage Vreden (Genauigkeitsstufe 3)

Für die einzelnen Bausteine des Energiemanagementkonzeptes (BHKW, Windkraft- und Photovoltaikanlage) können von dem Programm benutzer sämtliche Kosten und systemspezifischen Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung eingegeben werden. Eman ermittelt mit diesen Angaben anschließend die erforderlichen Kosten der einzelnen Varianten.

Die Eingabematrix mit den wirtschaftlichen Grundlagen, auf denen die in diesem Vorhaben vorgestellten Berechnungen basieren, zeigt folgende Abbildung 72.

Eman - Energiemanagement auf Kläranlagen

Investitions- und Betriebskosten

BHKW		Windkraftanlage	
Maschinenkosten	2500 DM/kW elektr.	Investitionskosten	2000 DM/kW elektr.
Elektroanbindung	30 % der Maschinenkosten	Maschinelle Lebensdauer	20 Jahre
Gebäudeanteil	1300 DM/kW elektr.	Bauliche Lebensdauer	50 Jahre
Ingenieurleistungen	10 % der Gesamtkosten	Kalkulatorische Zinsen	7 %
Maschinelle Lebensdauer	20 Jahre	Kapitalkosten	9,000 % der Invest.-Kosten
Bauliche Lebensdauer	50 Jahre	Betriebskosten	2 % der Invest.-Kosten
Kalkulatorische Zinsen	7 %		
Kapitalkosten Baul.	7,245 % der Gebäudekosten	Solaranlage	
Kapitalkosten Techn.	9,439 % der Investition ohne Gebäudeanteil	Investitionskosten	17000 DM/kW peak
Personalkosten	2 % der Investition	Maschinelle Lebensdauer	20 Jahre
Reperatur und Wartung	2 % der Maschinenkosten	Bauliche Lebensdauer	40 Jahre
Erdgas	0,4 DM/Nm ³	Kalkulatorische Zinsen	7 %
Propangas	0,65 DM/kg	Kapitalkosten	8,470 % der Invest.-Kosten
Diesel	0,45 DM/kg	Betriebskosten	1 % der Invest.-Kosten
Wärmeenergie-Vergütung	0,04 DM/kWh		

Abbildung 72: Grundlagen der Investitions- und Betriebskostenermittlung für die Beispielkläranlage Vreden

Danach ergeben sich für die vorgestellten Varianten die in Tabelle 27 bzw. graphisch in Abbildung 73 dargestellten Investitionen.

Investitionen [DM]	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
BHKW-Anlage	1.251.250	1.251.250	1.251.250	1.251.250
Windkraftanlage	0	752.000	0	500.000
Solaranlage	0	0	10.217.000	3.417.000
Summe Investitionen	1.251.250	2.003.250	12.468.250	5.168.250

Tabelle 27: Investitionen der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 3)

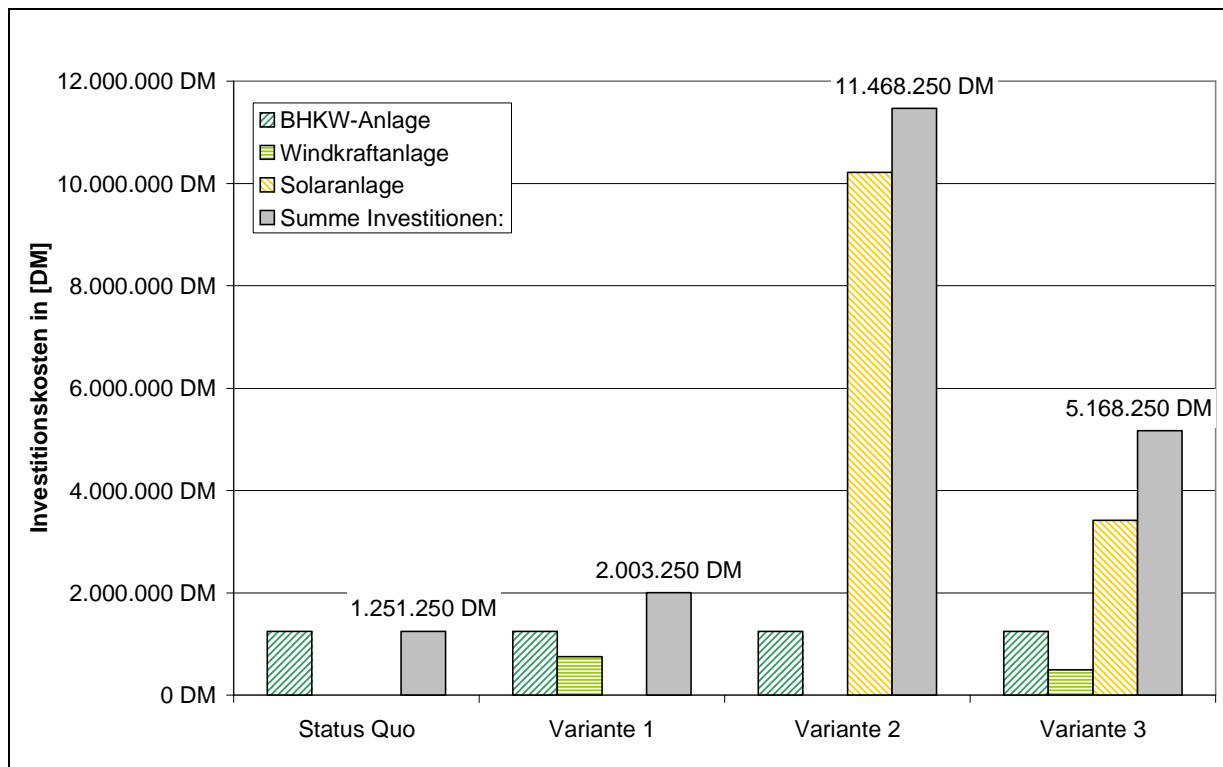


Abbildung 73: Investitionen der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 3)

Ausgehend von dem vorgebbaren kalkulatorischen Zinssatz sowie aggregatespezifischen Lebensdauern werden über diese Investitionen und Annuitäten **die jahresbezogenen Kapitalkosten** ermittelt. Zusammen mit den **jährlichen Betriebskosten** bestehend aus

- bewertetem Primärenergieeinsatz (Faulgas, Erdgas, Propangas, Öl, ...)
- Personalbedarf
- Fremdenergieeinsatz EVU (Leistungspreis und Arbeitspreis nach Tarifvorgabe)
- Reparaturkosten
- sonstigen Betriebskosten (Material, Versicherung)

wurden **Jahreskosten** berechnet, die in Tabelle 29 und der nachfolgenden Abbildung 74 zusammengestellt sind. Die Jahreskosten an das EVU in Höhe von 593 DM/a sind vertraglich bedingte Zählergebühren ohne Stromverbrauch. Es fällt auf, daß die Varianten 2 und 3 mit Photovoltaik gravierend höhere Jahreskosten aufweisen als die Windkraftvariante 1.

Jahreskosten [DM/a]	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
BHKW-Anlage	164.706	139.935	143.712	132.167
Windkraftanlage	0	78.193	0	52.059
Solaranlage	0	0	910.946	304.659
Wasserkraft	0	0	0	0
Stromeinspeisevergütung (17,6 DPf/kWh)	0	-32.842	-51.657	-21.806
EVU-Stromkosten	593	593	593	593
Summe Energiekosten:	165.299	185.878	1.003.594	467.672
Summe Gesamtjahreskosten (Abbildung 60)	3.274.000	3.294.579	4.112.295	2.738.078
Anteil Energiekosten an Gesamtjahreskosten [%]	5,77 %	5,64 %	24,40 %	17,08 %

Tabelle 28: Tabellarische Zusammenfassung der Jahreskosten [DM/a] für Genauigkeitsstufe 3

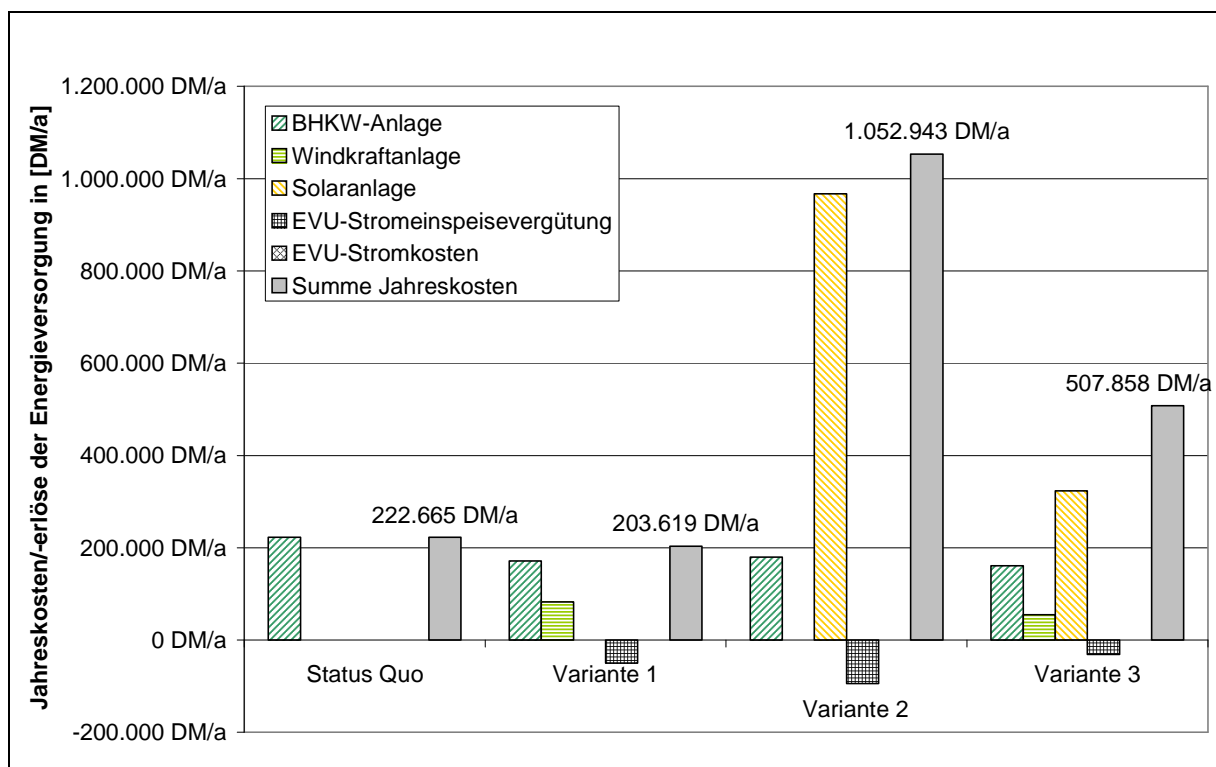


Abbildung 74: Jahreskosten der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 3)

Die nachfolgende tabellarische Zusammenfassung der energetischen Bewertung zeigt auf, daß die Varianten 1 - 3 im Gegensatz zum „Status Quo“-Lastfall energieau-

tarke Lösungen darstellen, da der über 100 % hinausgehende Stromdeckungsgrad jeweils größer bzw. annähernd gleich dem Zweitgasverbrauchsanteil ist.

Bei den Varianten 1 und 3 tritt ein Wärmedeckungsdefizit auf (BHKW-Steuerung ist stromgeführt). Dieses Wärmedefizit kann durch zeitweilige Senkung der Faulbehältertemperatur ausgeglichen werden.

Eine Senkung der Faulbehältertemperatur um 1 °C repräsentiert in der Kläranlage Vreden einen Wärmeinhalt von $1 \text{ °C} \cdot 1.400 \text{ m}^3 \cdot 1.000 \text{ kcal} / (\text{m}^3 \cdot \text{°C}) = 1.400.000 \text{ kcal}$, d. h. 1.627 kWh bei der tagesdurchschnittlichen erforderlichen Wärmemenge von rd. 2.400 kWh. Die Wärmeenergie ist daher hinsichtlich kurzfristiger Schwankungen im Angebot und Verbrauch unkritischer als die elektrische Energie zu bewerten. Eine Deckung des Bedarfs innerhalb der Viertelstundenzyklen ist für die Wärmeenergie nicht zwingend erforderlich.

Hinsichtlich der CO₂-Emissionen aus Herstellung und Verbrauch des Stroms können die Varianten 1 - 3 für sich in Anspruch nehmen, einen deutlich geringeren CO₂-Ausstoß zu verursachen als die Energieversorgung der Kläranlage ausschließlich über Propan- und Faulgas (= Status Quo).

Energetische Bewertung	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Gesamtstromdeckungsgrad	100 %	122 %	134 %	115 %
Gesamtwärmedeckungsgrad	167 %	87 %	105 %	75 %
Stromdeckung mit BHKW	100 %	53 %	64 %	45 %
davon Zweitenergie	70 %	23 %	34 %	15 %
Stromdeckung mit Wind	0 %	69 %	0 %	46 %
Stromdeckung mit Wasserkraft	0 %	0 %	0 %	0 %
Stromdeckung mit Photovoltaik	0 %	0 %	70 %	23 %

Tabelle 29: Zusammenfassung der Energieverbrauchsdeckungsgrade der einzelnen Varianten sowie Beiträge der einzelnen Energieträger

Die sich aus der theoretischen Simulation ergebenden Strom- und Wärmedeckungsgrade sind natürlich nur charakteristisch für die angenommene Belastung der Kläranlage (Schmutzfracht, Wassermengen, etc.). Zufallsbedingte und saisonale (z. B. Ferien) Schwankungen des Energieverbrauchs sind im Modell nicht nachgebildet.

Ausfälle beim BHKW, bei der Windkraftanlage oder der Photovoltaikanlage kann das Simulationsprogramm nicht hinreichend berücksichtigen.

Insoweit sind die Ergebnisse aus den Berechnungen mit der Genauigkeitsstufe 2 bzw. 3 um 5 - 10 % zu relativieren. Die Abbildung einer höheren Genauigkeit führt wegen der natürlichen jährlichen Schwankungen beim Wind- und Solardargebot zu einem nicht vertretbarem Aufwand.

4 Anwendung der Simulation nach energetischer Optimierung der Kläranlage Vreden (Genauigkeitsstufe 2)

Nachdem in Kapitel 3 beispielhaft die Anwendung mit Genauigkeitsstufe 3 vorgeführt wurde, werden nun konkrete Betriebswerte, die sich im Laufe der Bearbeitung des Forschungsvorhabens ergaben, für eine weitere Simulationsrechnung verwendet. Damit ist eine Berechnung mit Genauigkeitsstufe 2 möglich

Begleitend wurde für die Kläranlage Vreden eine energetische Feinanalyse nach Energiehandbuch NW mit einem Betrachtungszeitraum von September 1998 bis August 1999 durchgeführt [N.N. IN VORBEREITUNG]. Deren Ziel lag neben dem Aufzeigen von Sparmaßnahmen (sog. Sofortmaßnahmen, kurzfristige und abhängige Maßnahmen) in der Erfassung notwendiger Gangliniendaten für die Eingabe in das Simulationsprogramm Eman.

Durch die wirklichkeitsnähere Vorgabe der typischen Tages-, Wochen- und Monatschwankungen beim thermischen und elektrischen Energieverbrauch der KA Vreden können die Bedarfsdeckungsvarianten auf einer besseren Datenbasis berechnet und damit die Ergebnisse in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht genauer vorhergesagt werden.

4.1 Wesentliche Ergebnisse der energetischen Feinanalyse

Nach der in Kapitel 3 vorgestellten Beispielberechnung mit der Genauigkeitsstufe 3 wurde auf der Datenbasis 20.000 E mit empirischen Funktionen ein elektrischer und ein thermischer Energieverbrauch von jeweils rd. 860 MWh/a berechnet.

Die tatsächliche BSB₅-Belastung betrug im Betrachtungszeitraum der Feinanalyse jedoch rd. 30.000 E (29.939 E, vgl. Energetische Feinanalyse für das Klärwerk Vreden, Abb. 1 [N.N. IN VORBEREITUNG]), d. h. sie war rd. 50 % höher als ausschließlich auf den Planungsdaten prognostiziert.

Dies war überraschend, da nennenswerte abwasserproduzierende Gewerbe- und Industriebetriebe in Vreden nicht vorhanden sind.

Die tatsächliche TS-Fracht zum Faulbehälter und damit die tägliche Schlammmenge ist geringer als nach den Formeln aus A 131 prognostiziert. Tatsächlich wurden lt. Datenauswertung im Prozeßleitsystem der KA Vreden im Betrachtungszeitraum rd. 15.817 m³/a Schlamm auf den Faulbehälter gefördert. Bei i. M. 3,65 % TS-Gehalt ergeben sich 577.321 kg TS/a mit einem organischen Anteil von 399.280 kg oTS/a.

Die Energieverbrauchsdaten und Faulgasanfalldaten wurden ebenfalls im Rahmen der energetischen Feinanalyse erfaßt. Sie werden in den folgenden Kapiteln eingehend behandelt.

Die Wochentagsschwankungen waren für alle Verbrauchsdaten (Strom, Wärme) sowie auch für Gasanfall, TS-Anfall etc. nach Auswertung der PLS-Daten in Vreden unbedeutend gering (< 5 %).

4.2 Energieverbrauchsermittlung

4.2.1 Stromverbrauchsermittlung

Der Stromverbrauch der KA Vreden betrug von September 1998 bis August 1999 rd. 742 MWh/a und ist damit deutlich geringer als mit der Funktion in Kapitel 3.3.1 prognostiziert (860 MWh/a).

Gemäß der energetischen Feinanalyse könnten davon durch eine Drehzahländerung der Gebläse sowie auch Abschaltung des Reservetrafos noch rd. 10 + 4 MWh/a eingespart werden [N.N. IN VORBEREITUNG]. Der verbleibende abzudeckende Stromverbrauch beträgt somit

$$742 \text{ MWh/a} - 14 \text{ MWh/a} = \mathbf{728 \text{ MWh/a.}}$$

Die im Rahmen der energetischen Feinanalyse ermittelte Verteilung des Stromverbrauchs über den Tag bzw. über das Jahr ist Abbildung 75 und Abbildung 76 zu entnehmen [N.N. IN VORBEREITUNG].

Bei der Tagesstromverbrauchskurve fällt ein frachtbedingter geringerer Verbrauch in der Nacht auf. Der relativ gleichbleibende höhere Verbrauch über Tag ist auf den bereits in der elektrotechnischen Planung vorgesehenen Lastwächter und eine relativ gleichbleibende Schmutzfracht der KA Vreden zurückzuführen.

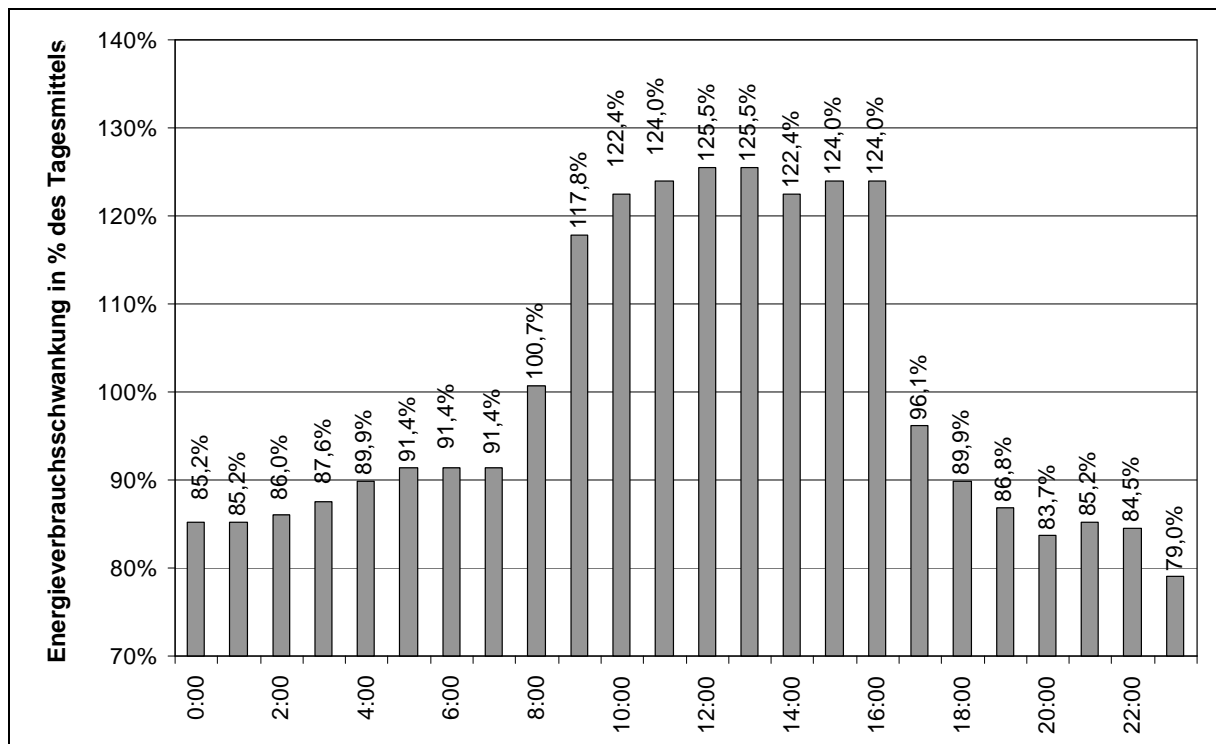


Abbildung 75: Stündlicher elektrischer Energieverbrauch der Kläranlage Vreden in % des arithmetischen Tagesmittels

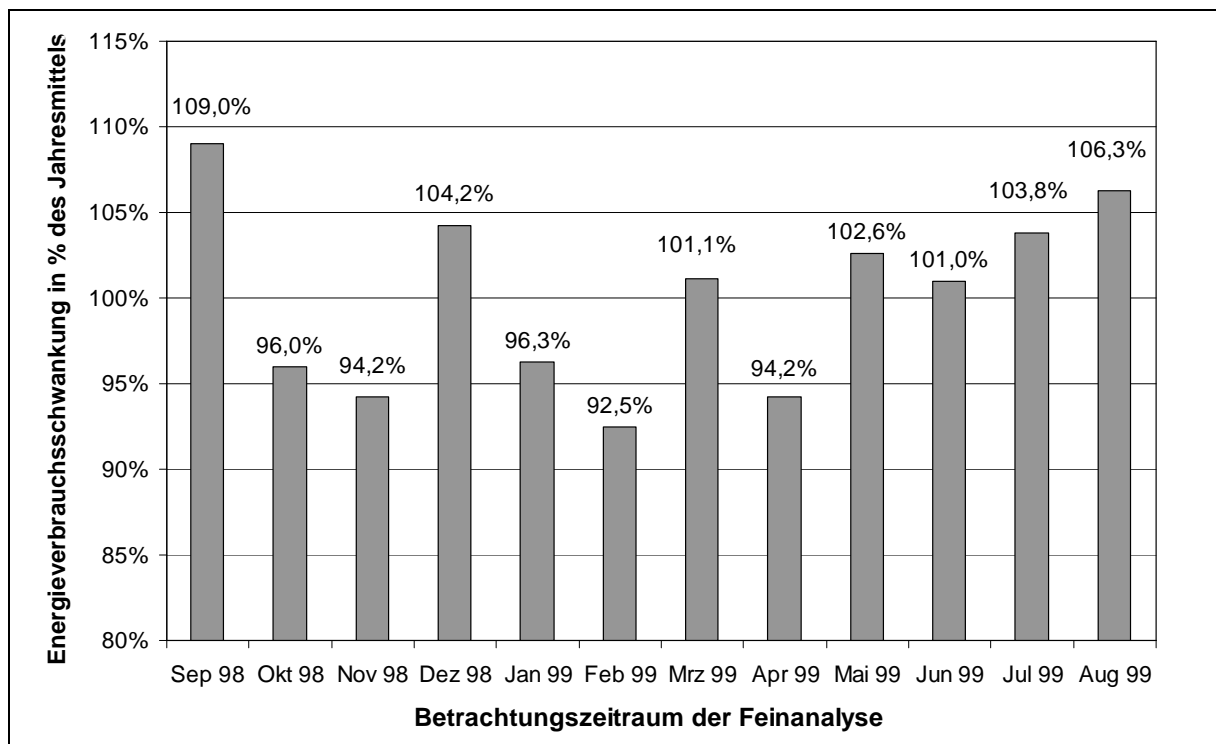


Abbildung 76: Monatliche Schwankungen des elektrischen Energieverbrauchs der Kläranlage Vreden in % des arithmetischen Jahresmittels

4.2.2 Wärmeverbrauchsermittlung

Der Wärmeverbrauch der KA Vreden betrug gemäß Feinanalyse im Untersuchungszeitraum rd. **411 MWh/a** und ist damit nur rd. halb so groß wie mit den empirischen Funktionen in Kap. 3.3.2 berechnet. Die Ursachen liegen sowohl in geringeren spezifischen Schlammengen als auch in einer nach der neuesten Wärmeschutzverordnung bemessenen Gebäudewärmedämmung. Zudem sind bereits Wärmegewinne durch die energetisch günstige Planung aus Maschinenabwärme (Gebläse und Pumpen im Betriebsgebäudekeller, Schaltschränke im Obergeschoß) sowie solare Wärmegewinne (Fensterflächen zur Südseite) möglich. [N.N. IN VORBEREITUNG]

Im Jahresverlauf sind die Wärmeverbrauchswerte näherungsweise proportional zur Differenz zwischen Faulbehältersolltemperatur (rd. 35 °C) und der Temperatur des zum Faulbehälter geförderten Schlammes. Der Schlamm hat infolge der geringen Aufenthaltszeit im Voreindicker annähernd die gleiche Temperatur wie das Belebungsbecken. Die Ermittlung dieser für die Verteilung des thermischen Energiebedarfs der Gebäude- und Schlammheizung erforderlichen Daten erfolgte ebenfalls im Rahmen der energetischen Feinanalyse [N.N. IN VORBEREITUNG]. Die Ergebnisse faßt Abbildung 77 zusammen.

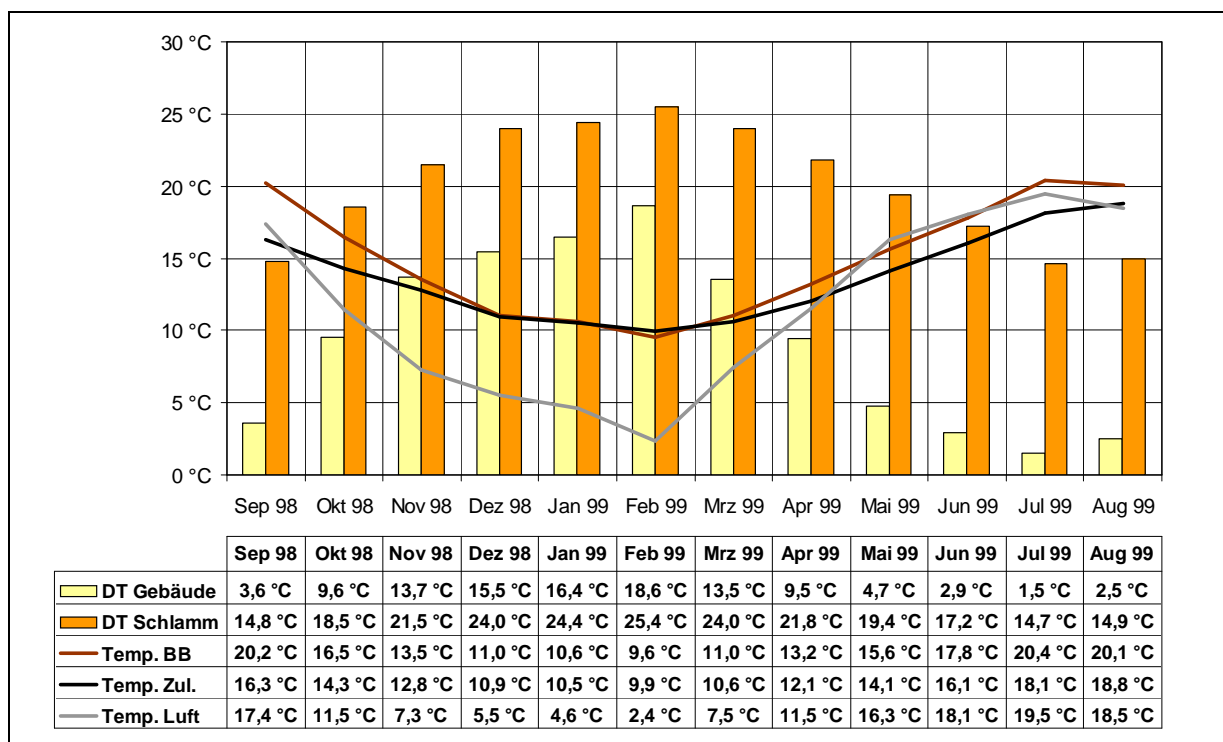


Abbildung 77: Mittlere monatliche Abwasser- und Lufttemperaturen sowie deren Abweichungen von den Solltemperaturen

Tagesschwankungen im Wärmeverbrauch sind für die Systemauslegung und den thermischen Leistungsbedarf nicht relevant, da der wesentliche Verbrauch an Wärme durch die Schlammaufheizung bedingt ist. Bei der auf der KA Vreden durch ein Regelprogramm zeitlich über den Tag verteilten Schlammzugabe zum Faulbehälter ist ein ausgeprägter stündlicher thermischer Spitzenleistungsbedarf nicht vorhanden.

4.3 Energieverbrauchsdeckung mit dem Ziel der Energieautarkie

4.3.1 Energieverbrauchsdeckung durch Faulgas

4.3.1.1 Faulgasanfall

Der im Betrachtungszeitraum der Feinanalyse gemessene Faulgasanfall auf der Kläranlage Vreden betrug $139.664 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{a}$. Bezogen auf den in Kapitel 4.1 bereits erläuterten organischen Anteil von $399 \text{ t oTS}/\text{a}$ ergibt sich eine spezifische Faulgasproduktion von rd. $350 \text{ l}_{\text{N}}/\text{kg oTS}$. [N.N. IN VORBEREITUNG]

Die Faulgaserzeugung beträgt somit derzeit rd. $383 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{d}$. Bei der aktuellen Belastung von 29.939 E (siehe ebenfalls Kapitel 4.1) ergibt sich der einwohnerspezifische Faulgasanfall zu auffällig geringen $12,8 \text{ l}_{\text{N}}/(\text{E} \cdot \text{d})$. Durch eine im Rahmen der Feinanalyse vorgeschlagene Umstellung der Faulbehälterbeschickung soll der Faulgasanfall um rd. 5 % gesteigert werden. Dadurch ergäben sich $13,4 \text{ l}_{\text{N}}/(\text{E} \cdot \text{d})$. [N.N. IN VORBEREITUNG]

Auf den Tag bezogen sind dies $383 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{d} \cdot 1,05 = 402 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{d}$, die als Meßwert in Eman eingegeben werden (siehe Abbildung 59, „Faulgasanfall“, „berechnet“ ausschalten).

Die in die Simulation eingehenden Schwankungen des Gasanfalls gemäß Feinanalyse [N.N. IN VORBEREITUNG] sind in Abbildung 78 dargestellt.

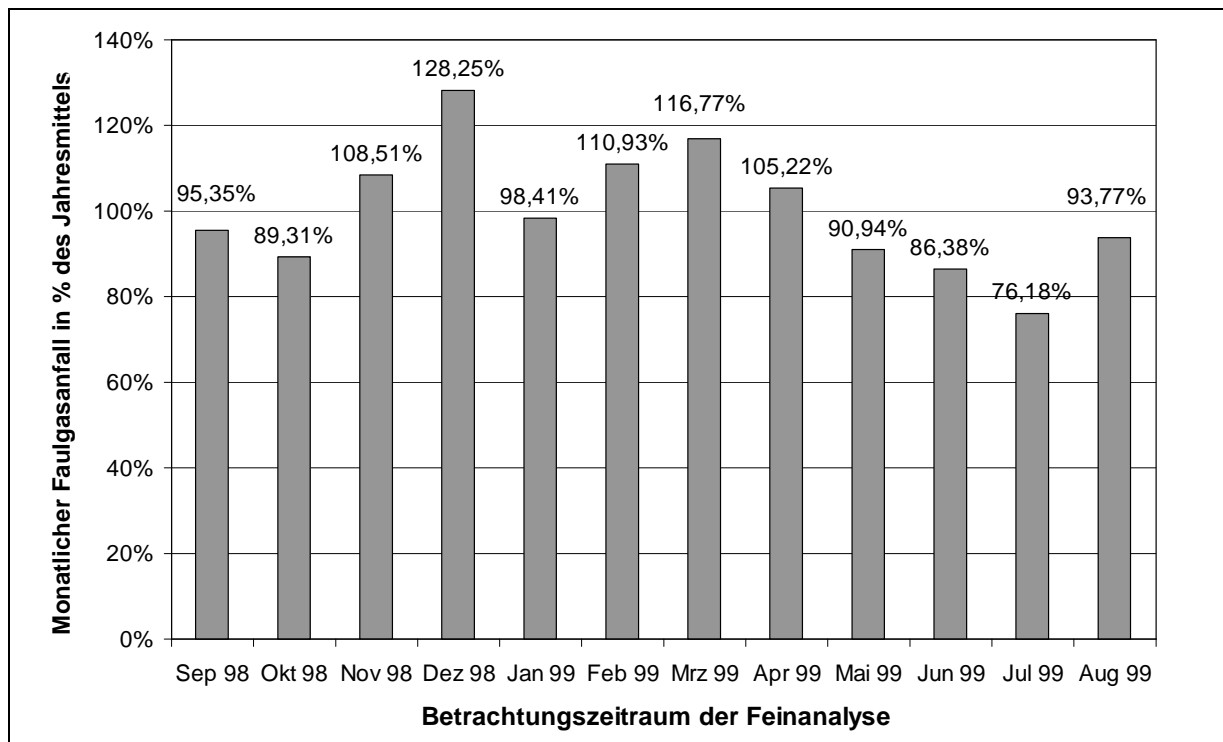


Abbildung 78: Monatliche Schwankungen des Gasanfalls der Kläranlage Vreden in % des arithmetischen Jahresmittels

4.3.1.2 Faulgasverbrauch

Das im Betrachtungszeitraum anfallende Faulgas wurde ausnahmslos im BHKW der KA Vreden genutzt; Fackelverluste traten nicht auf. Durch das Faulgas wurden lt. Auswertung der Daten des Prozeßleitsystems rd. 263 MWh/a Strom und entsprechend 507 MWh Wärme erzeugt.

Der auf die im Faulgas enthaltene Primärenergie bezogene elektrische Gesamtsystemwirkungsgrad des BHKW beträgt entsprechend

$$\begin{aligned} & 263 \text{ MWh/a} / (139.664 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{a} \cdot 6,4 \text{ kWh/m}^3_{\text{N}}) / 1.000 \text{ kWh/MWh} \\ & = 263 \text{ MWh/a} / 894 \text{ MWh/a} = 29,5 \%. \end{aligned}$$

Dieser Wirkungsgrad ist bedingt durch zeitweisen Teillastbetrieb geringer als die bei Volllast erreichbaren Wirkungsgrade von 33 – 34 %.

Bei Steigerung des Faulgasanfalls um 5 % könnten rd. $1,05 \cdot 263 \text{ MWh/a} = 276 \text{ MWh/a}$ elektrische Energie eigenerzeugt werden. Für die Restenergiebedarfsdeckung würden dann $728 - 276 = 452 \text{ MWh/a}$ elektrische Energie benötigt.

4.3.2 Energieverbrauchsdeckung durch Zweitbrennstoffeinsatz (analog Status Quo-Lastfall)

Mit den genauer ermittelten Energieverbrauchs- und Faulgasanfalldaten nach Durchführung von Energieoptimierungsmaßnahmen gemäß Feinanalyse [N.N. IN VORBEREITUNG] sowie mit den gemessenen typischen Ganglinien wurde analog zum Lastfall in Kapitel 3.4.2 mit dem Simulationsmodell Eman eine vollständige Eigenstromversorgung durch Einsatz von Propangas im BHKW über ein Jahr simuliert. Die Ergebnisse zeigt nachfolgende Tabelle 30.

Status Quo: Energieverbrauchsdeckung über BHKW		
Technische Kenndaten		
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	728.000 kWh/a	100 %
Gesamtwärmedeckung	1.200.000 kWh/a	292 %
Stromdeckung mit BHKW	728.000 kWh/a	100 %
davon Zweitenergie	415.000 kWh/a	57 %

Tabelle 30: Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für den Status Quo-Lastfall der Genauigkeitsstufe 2

Diese simulierte Variante („EVU-Autarkie“) ist jedoch durch den nicht ausgeglichenen Zweitbrennstoffeinsatz keine echte Autarkie im Sinne von Kapitel 2.1.1.

Eine nachhaltige und wirklich autarke Versorgung der KA Vreden mit der benötigten Strom- und Wärmemenge sowie eine sichere Bereitstellung der im Betrachtungszeitraum benötigten elektrischen und thermischen Leistungen werden durch die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen 3 Varianten der Energiebedarfsdeckung (analog der 3 Varianten aus Kapitel 3.4.4 - 3.4.6) technisch und wirtschaftlich simuliert.

4.3.3 Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft (Variante 1)

Der in Kapitel 4.3.1.2 dargelegte Reststrombedarf von 452 MWh/a wäre durch eine Windkraftanlage bei 1.600 Volllaststunden/a mit einer Nennleistung von

$$452.000 \text{ kWh/a} / 1.600 \text{ h/a} = 283 \text{ kW}$$

zu decken. Die technischen Kenndaten sowie die sich aus der Simulation ergebende energetische Bewertung sind in Tabelle 31

Variante 1: Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft		
Technische Kenndaten		
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
Windkraftanlage		283 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	852.000 kWh/a	117 %
Gesamtwärmedeckung	666.000 kWh/a	162 %
Stromdeckung mit BHKW	400.000 kWh/a	55 %
davon Zweitenergie	95.000 kWh/a	13 %
Stromdeckung mit Wind	451.000 kWh/a	62 %

zusammengefaßt.

Variante 1: Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft		
Technische Kenndaten		
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
Windkraftanlage		283 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	852.000 kWh/a	117 %
Gesamtwärmedeckung	666.000 kWh/a	162 %
Stromdeckung mit BHKW	400.000 kWh/a	55 %
davon Zweitenergie	95.000 kWh/a	13 %
Stromdeckung mit Wind	451.000 kWh/a	62 %

Tabelle 31: Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 1 der Genauigkeitsstufe 2

Bei dieser Variante erfolgt bei überschüssiger Windenergie entsprechend in den windstarken Monaten im Winter eine Stromeinspeisung in das EVU-Netz. Der Eigenenergieüberschuß ist jedoch größer als der Fremdenergiebeitrag durch Propan- gas in den windschwachen Monaten im Sommer, womit die Qualitätsstufe 2 der Energieautarkie erreicht ist.

4.3.4 Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Solarenergie (Variante 2)

Bei ausschließlicher Reststrombedarfsdeckung durch Photovoltaik wäre bei 1.000 kWh/kW_P eine Nennleistung von

$$452.000 \text{ kWh/a} / 1.000 \text{ h/a} = 452 \text{ kW}$$

erforderlich. Auch hier wird zeitweilig wie bei der Windkraft eine Stromeinspeisung in das EVU-Netz erforderlich. Bei Photovoltaikstromdeckung würde die Stromeinspeisung entsprechend in den sonnenstarken Monaten im Sommer und nur tagsüber erfolgen. In den durch tiefen Sonnenstand und kurze Sonnenscheindauer pro Tag gekennzeichneten Monaten im Winter wird Propangas eingesetzt.

Die technischen Kenndaten sowie die sich aus der Simulation ergebende energetische Bewertung sind in Tabelle 32 zusammengefaßt.

Variante 2: Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Photovoltaik		
Technische Kenndaten		
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
Solaranlage (kW _P)		452 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	976.000 kWh/a	134 %
Gesamtwärmedeckung	863.000 kWh/a	210 %
Stromdeckung mit BHKW	524.000 kWh/a	72 %
davon Zweitenergie	211.000 kWh/a	29 %
Stromdeckung mit Photovoltaik	451.000 kWh/a	62 %

Tabelle 32: Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 2 der Genauigkeitsstufe 2

4.3.5 Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Solarenergie (Variante 3)

Wenn man entsprechend der Vorgehensweise im Kapitel 3.4.6 eine Kombination aus Windkraft und Solarenergie wählt, könnten die Vorteile der beiden Energieträger Sonne (optimal mit Solarenergie tagsüber und BHKW vorwiegend nachts im Sommer) und Wind (günstig zusammen mit BHKW im Winter) genutzt und die Nachteile (Solarenergie sehr teuer) in vertretbaren Grenzen gehalten werden.

Der Reststrombedarf macht bei 1.600 Vollaststunden/a eine Windkraftanlage mit einer Nennleistung von 250 kW (Nennleistung gewählt für rd. 90 % der Restarbeit)

$$250 \text{ kW} \cdot 1.600 \text{ h/a} = 400.000 \text{ kWh/a} (= 400 \text{ MWh/a})$$

erforderlich. Entsprechend wäre ein Reststrombedarf von

$$452 \text{ MWh/a} - 400 \text{ MWh/a} = 52 \text{ MWh/a}$$

durch eine Photovoltaikanlage zu decken. Bei 1.000 kWh/kW_P würde eine Photovoltaikanlage mit einer Nennleistung von

$$52.000 \text{ kWh/a} / 1.000 \text{ h/a} = 52 \text{ kW}$$

zusätzlich zum BHKW und zu der vorgenannten Windkraftanlage mit einer Nennleistung von 250 kW erforderlich. Gewählt wurden 50 kW_P.

Die technischen Kenndaten sowie die sich aus der Simulation ergebende energetische Bewertung zeigt Tabelle 33 auf.

Variante 3: Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Photovoltaik		
Technische Kenndaten		
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)		250 kW
Windkraftanlage		250 kW
Solaranlage (kW _P)		50 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)		417 kW
Energetische Bewertung		
Gesamtstromdeckung	830.000 kWh/a	114 %
Gesamtwärmedeckung	637.000 kWh/a	155 %
Stromdeckung mit BHKW	386.000 kWh/a	53 %
davon Zweitenergie	73.000 kWh/a	10 %
Stromdeckung mit Wind	393.000 kWh/a	54 %
Stromdeckung mit Photovoltaik	51.000 kWh/a	7 %

Tabelle 33: Technische Kenndaten sowie energetische Bewertung für Variante 3 der Genauigkeitsstufe 2

4.4 Wirtschaftlichkeitsnachweis für alle Varianten (Genauigkeitsstufe 2)

Die mit den tatsächlichen Betriebsdaten der Kläranlage Vreden nach Durchführung der energetischen Feinanalyse berechneten Varianten fassen Tabelle 34 und Tabelle 35 zusammen. Für die Bewertung der Strom- und Wärmebedarfsdeckungsgrade gelten die in Kapitel 3.5 gemachten Erläuterungen gleichbedeutend.

Technische Kenndaten	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
BHKW-Anlage (elektr. Gesamtleistung)	250 kW	250 kW	250 kW	250 kW
Windkraftanlage	0 kW	280 kW	0 kW	250 kW
Solaranlage (kW _P)	0 kW	0 kW	452 kW	50 kW
Wasserkraft	0 kW	0 kW	0 kW	0 kW
BHKW-Anlage (therm. Gesamtleistung)	417 kW	417 kW	417 kW	417 kW

Tabelle 34: Technische Kenndaten der untersuchten Varianten zur Energiebereitstellung der Kläranlage Vreden (Genauigkeitsstufe 2)

Energetische Bewertung	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Gesamtstromdeckungsgrad	100 %	117 %	134 %	114 %
Gesamtwärmedeckungsgrad	292 %	162 %	210 %	155 %
Stromdeckung mit BHKW	100 %	55 %	72 %	53 %
davon Zweitenergie	57 %	13 %	29 %	10 %
Stromdeckung mit Wind	0 %	61 %	0 %	54 %
Stromdeckung mit Photovoltaik	0 %	0 %	62 %	7 %

Tabelle 35: Zusammenfassung der Energieverbrauchsdeckungsgrade der einzelnen Varianten und Beiträge der einzelnen Energieträger (Genauigkeitsstufe 2)

Die mit dem entwickelten Simulationsprogramm durchgeführten Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für Genauigkeitsstufe 2 basieren ebenfalls auf den in Abbildung 72 dargestellten Grundlagen. Die sich daraus ergebenden Investitionen und Jahreskos-

ten sind in der nachfolgenden Tabelle 36 und Tabelle 37 tabellarisch sowie in Abbildung 79 und Abbildung 80 graphisch dargestellt.

Investitionen [DM]	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
BHKW-Anlage	1.251.250	1.251.250	1.251.250	1.251.250
Windkraftanlage	0	566.000	0	500.000
Solaranlage	0	0	7.684.000	850.000
Summe Investitionen	1.251.250	1.817.250	8.935.250	2.601.250

Tabelle 36: Investitionen der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 2)

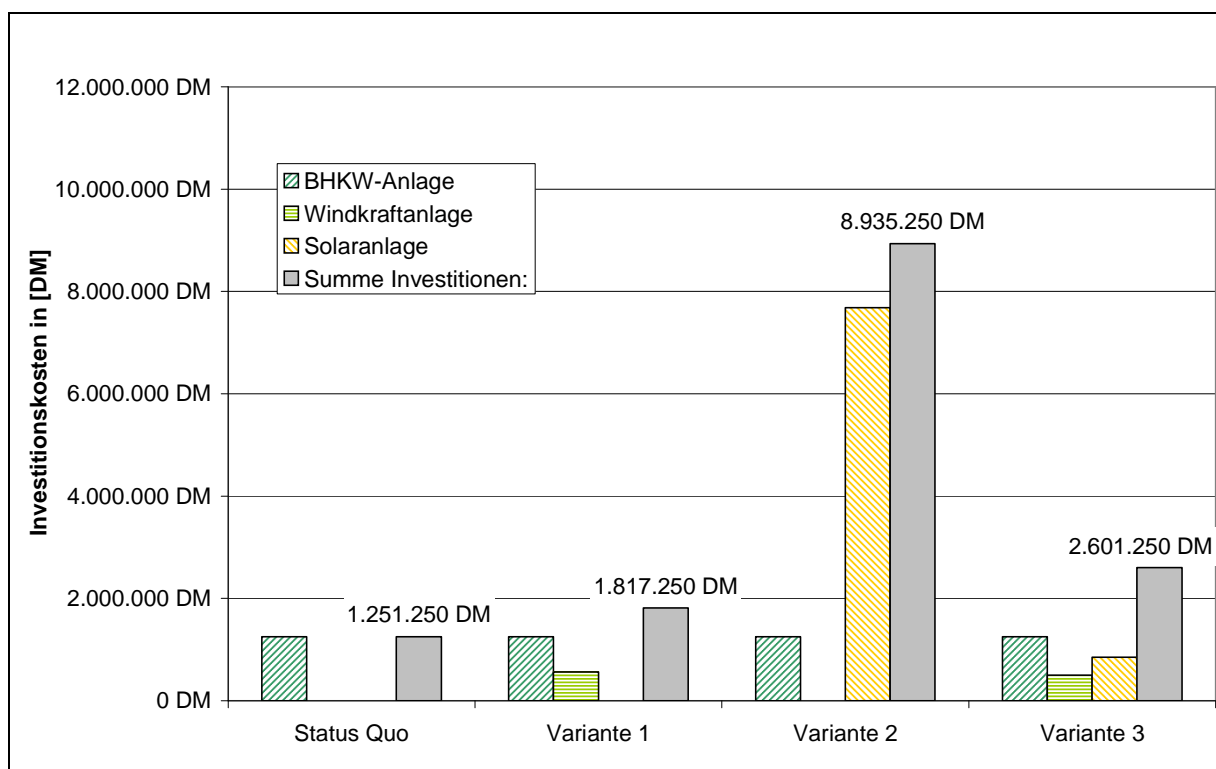


Abbildung 79: Investitionen der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 2)

Jahreskosten [DM/a]	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
BHKW-Anlage	207.785	162.928	179.040	159.755
Windkraftanlage	0	62.264	0	55.003
Solaranlage	0	0	727.683	80.496
Stromeinspeisevergütung (17,6 DPf/kWh)	0	-28.034	-82.072	-22.430
EVU-Stromkosten	0	0	0	0
Summe Energiekosten:	207.785	197.158	824.651	272.824
Summe Gesamtjahreskosten (Abbildung 60)	4.375.549	4.364.922	4.992.414	4.440.587
Anteil Energiekosten an Gesamtjahreskosten [%]	4,7 %	4,5 %	16,5 %	6,1 %

Tabelle 37: Tabellarische Zusammenfassung der Jahreskosten [DM/a] für Genauigkeitsstufe 2

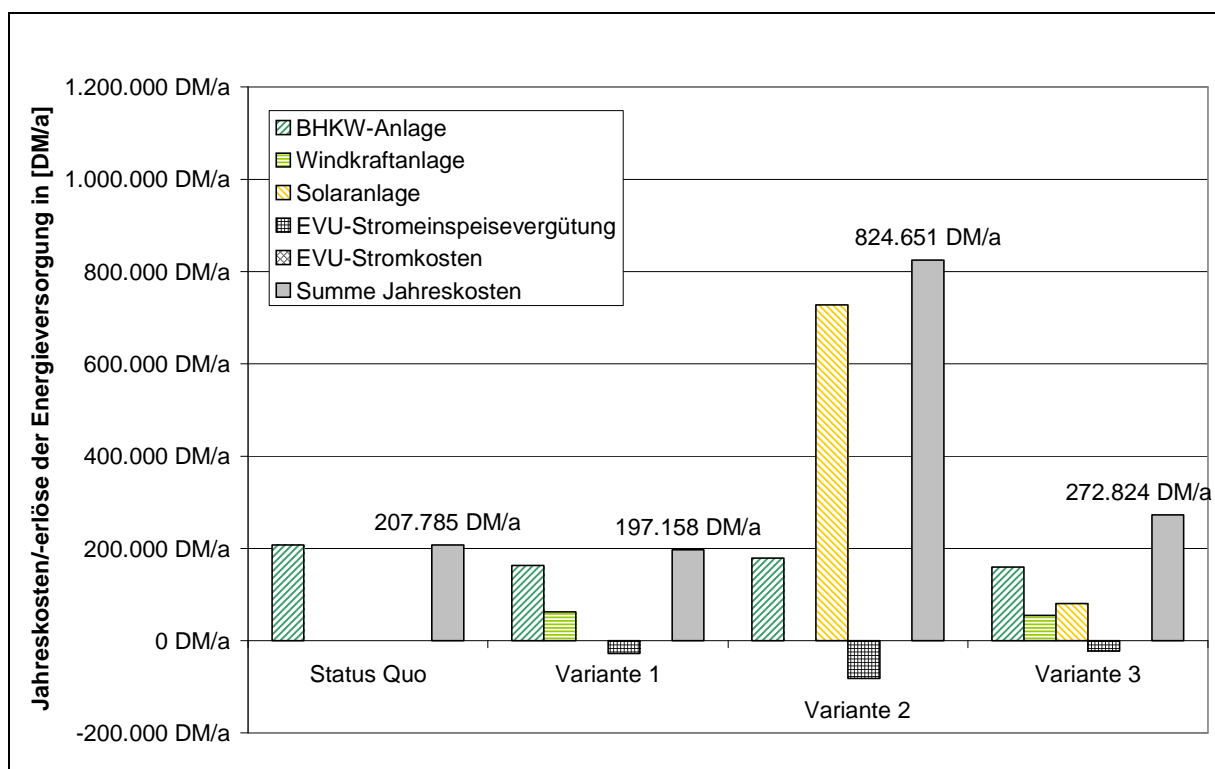


Abbildung 80: Jahreskosten der untersuchten Varianten (Genauigkeitsstufe 2)

Danach stellt sich Variante 1 (Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft) hinsichtlich der Jahreskosten als die günstigste Variante dar; sogar noch vor dem Status-Quo (Energieverbrauchsdeckung über BHKW mit Propangaszuführung). Zudem erfüllt sie im Gegensatz zum Status Quo die definierten Vorausset-

zungen für eine tatsächlich energieautarke Lösung. Die Eigenstromerzeugung aus Wind und aus faul- und propangasbetriebenem BHKW ist größer als der Energieverbrauch der Kläranlage zuzüglich des zu substituierenden Energieäquivalents aus dem Zweitbrennstoff Propangas.

5 Vergleich der Ergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle 38 werden für die vier untersuchten Varianten die Kosten der höheren Genauigkeitsstufe 2 (Kapitel 4) mit denen der Genauigkeitsstufe 3 (Kapitel 3) verglichen.

Investitionen [%]	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
BHKW-Anlage	0 %	0 %	0 %	0 %
Windkraftanlage	0 %	25 %	0 %	0 %
Solaranlage	0 %	0 %	25 %	75 %
Summe Investitionen:	0 %	9 %	22 %	50 %
Jahreskosten [%]	Status Quo	Variante 1	Variante 2	Variante 3
BHKW-Anlage	7 %	5 %	0,4 %	0,7 %
Windkraftanlage	0 %	25 %	0 %	0 %
Solaranlage	0 %	0 %	25 %	75 %
EVU-Stromeinspeisevergütung	0 %	44 %	13 %	29 %
EVU-Stromkosten	0 %	0 %	0 %	0 %
Summe Jahreskosten	7 %	3 %	22 %	46 %

Tabelle 38: Prozentuale Einsparungen der Genauigkeitsstufe 2 gegenüber Genauigkeitsstufe 3

Der Vergleich der mit unterschiedlicher Berechnungsgenauigkeit gewonnenen Ergebnisse läßt folgende wesentliche Schlußfolgerungen zu:

- Eine Abschätzung des Energieverbrauchs nur aus der Kenntnis der Einwohnerwerte einer Kläranlage sowie der verfahrenstechnischen Kenngrößen ist für grob überschlägliche Berechnungen möglich. Ein darauf aufbauendes Energieverbrauchsdeckungsmodell kann allerdings nur einen qualitativen Anhaltswert für mögliche Energieverbrauchsdeckungsvarianten liefern.
- Mit zunehmender Genauigkeit (Kenntnis des thermischen und elektrischen Energieverbrauchs sowie typische Leistungsbedarfsganglinien) können die eingesetzten Erfahrungswerte durch reale Zahlen ersetzt werden; dadurch werden die Ergebnisse der berechneten Energiebedarfsdeckungsvarianten (erforderliche Leistungsdaten und daraus resultierende Kosten) verlässlicher.

- Es ist unter Berücksichtigung der für den Notstromfall dimensionierten BHKW-Anlage sogar eine nach Jahreskosten geringfügig günstigere Energieverbrauchsdeckungsvariante mit Energieautarkie möglich. Die Eigenerzeugung ist größer als der Energieverbrauch zuzüglich des zu substituierenden Energieäquivalents Propangas.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß das angestrebte Ziel einer energieautarken Kläranlage im Sinne der getroffenen Definition durchaus erreichbar ist.

6 Zusammenfassung

Nachdem mit Band I dieses Berichtes eine umfangreiche Darstellung der Eignung verschiedener Energieträger und deren Kombinationsmöglichkeiten auf Kläranlagen vorliegt, wird aufbauend auf diesen Erkenntnissen im vorliegenden Band II ein Managementkonzept für die Energiebereitstellung mit dem Ziel der Energieautarkie entwickelt.

Beginnend mit der Fragestellung, was unter dem Begriff der Energieautarkie auf einer Kläranlage zu verstehen ist, werden in Abhängigkeit von der Fremdenergiezufuhr vier Qualitätsstufen der Energieautarkie definiert.

Die Erstellung von Energiebereitstellungskonzepten setzt aufgrund der vielfältigen und damit unterschiedlichen Ausgangssituationen auf kommunalen Kläranlagen eine systematische Vorgehensweise voraus. Eine Bilanzierung des Wärme- und Stromverbrauchs bildet dabei die Grundlage. Die Vorgehensweise zur Ermittlung dieser Daten wird ausführlich erläutert. Als Ergebnis dieser Bestandsaufnahme liegen anschließend sowohl für den elektrischen als auch den thermischen Leistungsverbrauch Ganglinien über ein vollständiges Jahr vor. Darauf aufbauend kann die Einbindung zusätzlich zu installierender Energieträger untersucht werden.

Für sämtlich dafür einsetzbare Energieträger wurden Entscheidungsbäume entwickelt. Die wesentlichen Randbedingungen, die einer Nutzung der einzelnen Energieträger auf Kläranlagen zugrunde liegen, werden damit abgefragt. Die Entscheidungsbäume bieten dem Betreiber eine Entscheidungshilfe, welcher Energieträger ihm grundsätzlich zur Deckung des Energieverbrauchs zur Verfügung steht. Sie ersetzen zwar keine nachfolgende Untersuchung, zeigen jedoch tendenzielle Möglichkeiten auf.

Nach dieser technischen Prüfung der ortsspezifischen Möglichkeiten zur Energieverbrauchsdeckung können durch das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Simulationsprogramm Eman die technisch/wirtschaftlichen Auswirkungen von bis zu 4 Energiebereitstellungsvarianten berechnet und deren Ergebnisse tabellarisch und graphisch vergleichend gegenübergestellt werden. Das Programm liegt diesem Bericht auf CD bei.

Zur Veranschaulichung wird die Anwendung des entwickelten Modells beispielhaft für die Kläranlage Vreden mit zwei unterschiedlichen Genauigkeitsstufen vorgeführt. Mit Hilfe von Eman konnten für die 4 Varianten

- Status Quo: Energieverbrauchsdeckung über BHKW,
- Variante 1: Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Windkraft,
- Variante 2: Energieverbrauchsdeckung über BHKW und Photovoltaik sowie
- Variante 3: Energieverbrauchsdeckung über BHKW, Windkraft und Photovoltaik

die notwendigen Investitionen und Jahreskosten zur Sicherstellung einer autarken Energiebereitstellung der Kläranlage Vreden ermittelt werden.

Im ersten Rechengang wird von standardisierten Erfahrungswerten ausgegangen, falls noch keine konkreten Verbrauchs- und Eigenenergiedaten aus dem längerfristigen Kläranlagenbetrieb vorliegen.

Um diese eher theoretische Betrachtung zu verifizieren, wurde als Grundlage für einen weiteren zweiten Rechengang eine energetische Feinanalyse für die Kläranlage Vreden [N.N. IN VORBEREITUNG] durchgeführt. Durch die damit vorliegenden konkreten Betriebsdaten und die wirklichkeitsnähere Vorgabe der typischen Tages-, Wochen- und Monatsschwankungen beim thermischen und elektrischen Energieverbrauch können die Bedarfsdeckungsvarianten auf einer besseren Datenbasis berechnet werden. Damit waren auch die Ergebnisse in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht verlässlicher.

Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, daß die erste Berechnung auf der Grundlage der Eckdaten der Kläranlage bereits einen groben Anhaltswert für mögliche Energieverbrauchsdeckungsvarianten liefern kann. Für eine detailgenauere Betrachtung ist allerdings die Kenntnis der genauen Einwohnerwerte aus tatsächlicher mittlerer BSB₅-Belastung, des thermischen und elektrischen Energieverbrauchs sowie typischer Leistungsbedarfsganglinien erforderlich.

Vor einer eingehenden Analyse der Energiebereitstellung sollte deshalb für einen ganzheitlichen Ansatz in allen Fällen begleitend eine Energieanalyse zur Optimierung des Energieverbrauchs durchgeführt werden. Danach stehen die für eine sinnvolle Betrachtung der Energiebereitstellung notwendigen Daten zu Verfügung.

Die Beispielrechnung zeigt, daß mit dieser Vorgehensweise für die betrachtete Kläranlage Vreden bei Einsatz einer Windkraftanlage und des bereits vorhandenen BHKW eine auch unter Beachtung von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen autarke Energiebereitstellung gemäß der getroffenen Definition möglich ist.

Mit den im Rahmen des vorliegenden Vorhabens erzielten Erkenntnissen und dem entwickelten Simulationsprogramm Eman konnte somit ein wirksames Instrument zur

technischen und wirtschaftlichen Beurteilung der Energiebereitstellung und eine Entscheidungshilfe für eine sich anschließende Planung einer Kläranlage mit möglichst weitgehender Eigenenergieversorgung geschaffen werden.

7 Literatur

Allnoch (1993):

Wind messen und auswerten
Praxis Geographie, H. 7-8, S. 59-62 (verändert)

Allnoch (1998):

IWR-Windindex Forschungsgruppe Windenergie

Allnoch (1999):

Zur Entwicklung der deutschen und europäischen Windenergienutzung 1998
Windkraft Journal, Ausgabe 2/1999, 19. Jahrgang, S. 24 - 28

Abwassertechnische Vereinigung e.V. - ATV (1978):

Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik
Band III, Zweite Auflage, Abschnitt B: Gewinnung und Verwertung von Faulgas, Kapitel 2.6, S. 496 - 497

Abwassertechnische Vereinigung e.V. -ATV (1999):

ATV-Arbeitsblatt A 131, Bemessungen von Kläranlagen über 5.000 E

ARA-BER Vers. 4.16 (1998):

Das EDV-Programm ARA-BER für Windows, rechnerunterstützte Dimensionierung von Kläranlagen nach dem Hochschulgruppenansatz oder nach der ATV A-131, Revision 16 von 1998

BDI-VIK-VDEW (1999):

Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Netznutzungsentgelten für elektrische Energie vom 13.12.1999, Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. Berlin, VIK Verband der Industriellen Energie und Kraftwirtschaft, Essen, Vereinigung deutscher Elektrizitätswerke - VDEW - e.V., Frankfurt am Main, veröffentlicht im Internet unter www.vik-online.de

BINE (1997):

Förderfibel Energie - Öffentliche Finanzhilfen für den Einsatz erneuerbarer Energiequellen und die rationelle Energieverwendung, 5. Auflage
Fachinformationszentrum Karlsruhe, Forum für Zukunftsenergie e.V.
ISBN 3-87156-211-4

BINE (1998):

Erneuerbare Energien in Deutschland; Projektinfo Nr. 5/September 1998
Herausgeber: Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftliche Information mbH, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1997):

Klimaschutz in Deutschland: Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderung, April 1997

Böhnke, B. (1991):

Bemessungsgrundlagen und –ansätze zur Stickstoffelimination – Ergebnisse eines Hochschulerfahrungsaustausches
Gewässerschutz · Wasser · Abwasser, Band 119, Seiten 447 - 457

Brockhaus (1994):

Der Große Brockhaus, ISBN 2-7653 11 00 6, 19. völlig neu bearbeitete Auflage, Brockhaus GmbH, Mannheim

Brautlecht, P. (2000):

Technische und ökonomische Aspekte kommunaler Klärschlamm-trocknungsanlagen; Dissertation an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft e.V. - BGW (1997):

Erdgasheizung und solare Warmwasserbereitung, Ausgabe 10/1997; herausgegeben vom BGW Bonn

Bundesverband WindEnergie (1994):

Windenergie 1996
5. Ausgabe; herausgegeben vom Bundesverband WindEnergie e.V.

Bundesverband WindEnergie (1998):

Windenergie 1998
9. Ausgabe; herausgegeben vom Bundesverband WindEnergie e.V.

Dichtl, N.; Koppetsch, J. (1989):

Einfluß weitergehender Abwasserreinigungsmaßnahmen auf die Energiesituation von Kläranlagen, abwassertechnik, Heft 2/1989, S. 7-12

Dichtl, N. (1996):

Energiewirtschaft und Energiebilanz auf Kläranlagen
Schriftenreihe des Forschungsinstitutes für Wasser- und Abfallwirtschaft (FiW)
an der RWTH Aachen, Band 2, Kapitel 4

Dichtl, N.; Meyer, H.; Niehoff, H.-H. (1997):

Technisch/wirtschaftliche Aspekte der Faulgasverwertung in Gasmotoren auf
Kläranlagen im Zusammenwirken von Abwasserreinigung, Schlammbehand-
lung, Energieautarkie und Berücksichtigung weitergehender Emissionsaspek-
te, Mitteilungen der Oswald-Schulze-Stiftung, Heft 22

Drodt, W.; Koglin, B.; Dünnebeil (1998):

Zweistufige Klärschlamm-trocknungsanlage in Groß-Gerau mit integrierter
Wärmerückgewinnung, Korrespondenz Abwasser 11/98, S. 2115-2122

Energieagentur NRW (1998):

Solaratlas für Nordrhein-Westfalen, S. 40; Wuppertal 1998

Europäische Union – Der Rat (1998):

Geänderter Vorschlag für eine Richtlinie des Rates zur Schaffung eines Ord-
nungsrahmens der Gemeinschaft im Bereich Wasserpolitik vom 26.6.1998
Dokument 9710/98 ENV 300 PRO-COOP 104

Fischer, T. (1998):

Kleine Geschichte der Biogastechnik, EntsorgungsPraxis 5/98, S. 69-70

Günther, T. (1997):

Das Turas Wasserrad, ein einseitig gelagertes Wasserrad
Wasserkraft & Energie 2/97, S. 52-56

Grünebaum, Th.; Weyand, M.; Schmitt, F.; Schröter, D. (1996):

Analyse der Betriebskosten von Kläranlagen
Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 32, S. 5-30

Hahn, H. H.; Kordes, B. (1984):

Energiebilanz bei der Abwasserreinigung - Grenzen und Möglichkeiten der
Energieautarkie, Korrespondenz Abwasser 3/84, S. 158-166

Heinloth, K. (1997):

Die Energiefrage, Bedarf und Potentiale, Nutzung, Risiken und Kosten,
Vieweg, ISBN 3-52803106-9

HessenEnergie (1994):

Klärgas-BHKW-Anlagen in Hessen – Auswertung von Anlagen, die nach dem hessischen Energiegesetz gefördert wurden. Hrsg. vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten

Hohmann, R. (1981):

Technik der Methangas-Tankstelle auf der KA Essen-Frohnhausen, GWA Band 45, S. 269-276

Hoffmann, J. (1982):

Energiehaushalt auf Kläranlagen; Bilanzierung und Wirtschaftlichkeit, Korrespondenz Abwasser 12/82, S. 896-904

Imhoff, Karl und Klaus (1993):

1993, 28. Auflage
Taschenbuch der Stadtentwässerung

Kapp, H. (1997):

Abhängigkeit der Energiebilanz von der Verfahrenstechnik der Abwasserreinigung, VDI-Seminar „Energiekonzepte mit BHKW für Kläranlagen“ am 25. und 26. November in Neuss

Kiess, Fr. (1966):

Über die Eigenstromversorgung auf Kläranlagen unter besonderer Berücksichtigung der Stromerzeugung aus Klärgas und Wasserkraft in Wuppertal-Buchenhofen, Sonderdruck aus der Zeitschrift Kommunalwirtschaft, Heft 9, S. 1-6, Deutscher Kommunal-Verlag GmbH

König, P.; Rossmann, A. (1999):

Ratgeber für Gasturbinenbetreiber
Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Koglin, B. (1999):

Rückgewinnbare Wärme bei der Kondensation der Brüden der Klärschlamm-trocknung, Korrespondenz Abwasser 5/96, S. 848-860

Komorowski, K. (1992):

Einsatz Erneuerbarer Energien als Energieversorgung bei der kommunalen Abwasserbehandlung, GWA Band 131, S. 415-424

Kuhnert, H. (1988):

Energie aus Wasserkraft, Wasserwirtschaft 78, 1988

Kunz, P. (1988):

Prozeßführung von Kläranlagen – technisch-wirtschaftliche Optimierung am Beispiel der biologischen Vorklämung, Springer Verlag, Berlin

MAN (1998):

persönliche Firmeninformation

Marutzky, R; Strecker, M. (1999):

Moderne Feuerungstechnik, Energetische Verwertung von Gebrauchtholz, Umwelt Nr. 1/2 – Januar/Februar 1999

Meliß, M. (1999):

REGLOB 99 – Globale Betrachtung regenerativer Energieressourcen und ihre technischen Nutzungsmöglichkeiten, April 1999
Solar-Institut der Fachhochschule Aachen, Ginsterweg 1, 52428 Jülich

Meyer H., Kaudelka A., Podewils W. (1983):

Technisch/wirtschaftliche Aspekte der Klärgasverwertung auf Kläranlagen im Zusammenwirken von Abwasserreinigung und Energieautarkie; Mitteilungen der Oswald-Schulze-Stiftung, Heft 4, 1983

Möller, U. (1986):

Wechselwirkung zwischen Abwasserbeschaffenheit, Abwasserbehandlung und Schlammmenge und –beschaffenheit
ATV-Fortbildungskurs E/3, Schlammbehandlung und –beseitigung
19.-21.02.1986 in Essen

Müller, E.A. (1997):

ARA-externe Wärmenutzung: Erfahrungen realisierter Anlagen und Einsatzmöglichkeiten
„Energie in ARA“, Verbandsbericht Nr. 517 der 205. Mitgliederversammlung des VSA (Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute) am 27. Nov. in Bern, Seiten 135-139

Müller, E.A.; Kobel, B.; Künti, Th.; Pinnekamp, J.; Seibert-Erling, G.; Schaab, R.; Böcker, K. (1999):

Handbuch Energie in Kläranlagen
im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen

MWMTV – Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (1999):

Energiebroschüre Nordrhein-Westfalen 1999; Daten und Fakten

N.N. (in Vorbereitung):

Energetische Feinanalyse für das Klärwerk Vreden
durchgeführt durch Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft, Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen und Ingenieurbüro Redlich und Partner

N.N. (2000):

Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) vom 29. März 2000
BGBl. I 2000, S. 305

N.N. (1998):

Umfrage „Energie auf Kläranlagen“
im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen

Poweska, M. (1998):

Windkraftvorsorgeplanung in Bochum
Diplomarbeit an der Ruhr-Universität Bochum

Riegler, G.; Bau, K. (1989):

Auswirkungen der N-Elimination bei der Abwasserreinigung auf die Energiewirtschaft einschl. Faulgasverwertung, Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Band 14, S. 21-29

Roth, M. (1998):

Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen
Handbuch Wasser 4, Band 13, Herausgeber: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg

RWE (1995):

RWE Energie Bau-Handbuch
11. Ausgabe, 4/1995, 2. Auflage
Herausgeber: RWE Energie Aktiengesellschaft, Bereich Anwendungstechnik, 45117 Essen

Ryssel, W. (1938):

Die Klärgastankstelle in Stuttgart, Städtereinigung, Jahrgang 30, Heft 5, S. 99 und Heft 6, S. 116

Schleswag AG (1998):

Geschäftsbericht 1997

STAWAG Aachen (1998):

Stromlieferungsvertrag Preisregelung L 200

Straubel, D.; Ehrlich, H.; Huenges, E.; Wolff, H. (1998):

Rechenmodell zur Analyse der Wärmegestehungskosten bei hydrothormaler Nutzung

zitiert in: Ehrlich, H.; Erbas, K.; Huenges, E. (eds.): Angebotspotential sowie rechtliche und wirtschaftliche Aspekte der Nutzung hydrothormaler Ressourcen, Geothermie Report 98-1

Strunkheide J., Witte, H. und Berger Ch. (2000):

Wärmerückgewinnung aus Belebungsanlagen, wwt awt 2/2000, S. 19-22

Umweltbundesamt (1997):

Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland, S. 94

hrsg. vom Umweltbundesamt, Fachgebiet I 4.3 „Umweltberichterstattung, Umweltstatistik“, Ausgabe 1997

Vahrenholt, F. (1998):

Globale Marktpotentiale für erneuerbare Energien; Deutsche Shell AG, Abt. Information und Presse, aus der Reihe: Analysen und Vorträge, 1/1998

VDEW (1999):

VDEW-Pressekonferenz, Düsseldorf, 24.03.1999

Welzel, B.; Gentner, C. (1998):

Drosseln mit Energiegewinn, UmweltMagazin, März 1998

Wiebusch, J.; Seyfried, F.; Johnke, B.; Credo, S. (1997):

Stand der Mono-Klärschlammverbrennung in Deutschland, Korrespondenz Abwasser 3/97, S. 473-492

Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (1999):

NRW 2030: Nachhaltig mit Energie wirtschaften; herausgegeben vom Ministerium für Bauen und Wohnen des Landes NRW (MBW)

Wöffen, B. (1991):

Wirtschaftlichkeitsstudie zur Schlammentsorgung, Tuttahs & Meyer Ingenieurgesellschaft mbH, März 1991

Wörsdörfer, A. (1997):

Dualgasbetrieb von Deponiegas-Blockheizkraftwerken – Einsatz von Biogas und Holzgas, Neue Aspekte bei der Deponiegasnutzung: Innovation in Forschung und Verfahren, hrsg. von G. Rettenberg und R. Stegmann, Economica Verl., 1997

Zhang, J. (1999):

Stoff- und Energieflußanalyse bei der Planung thermischer Klärschlammbehandlung, Korrespondenz Abwasser 5/99, S. 743-755

ZV Balingen (1998):

Eigenangabe Zweckverband Abwasserreinigung Balingen, Mühlhalde 3, 72336 Balingen, Tel. 07433 / 900-40, div. Broschüren 1997 / 1998