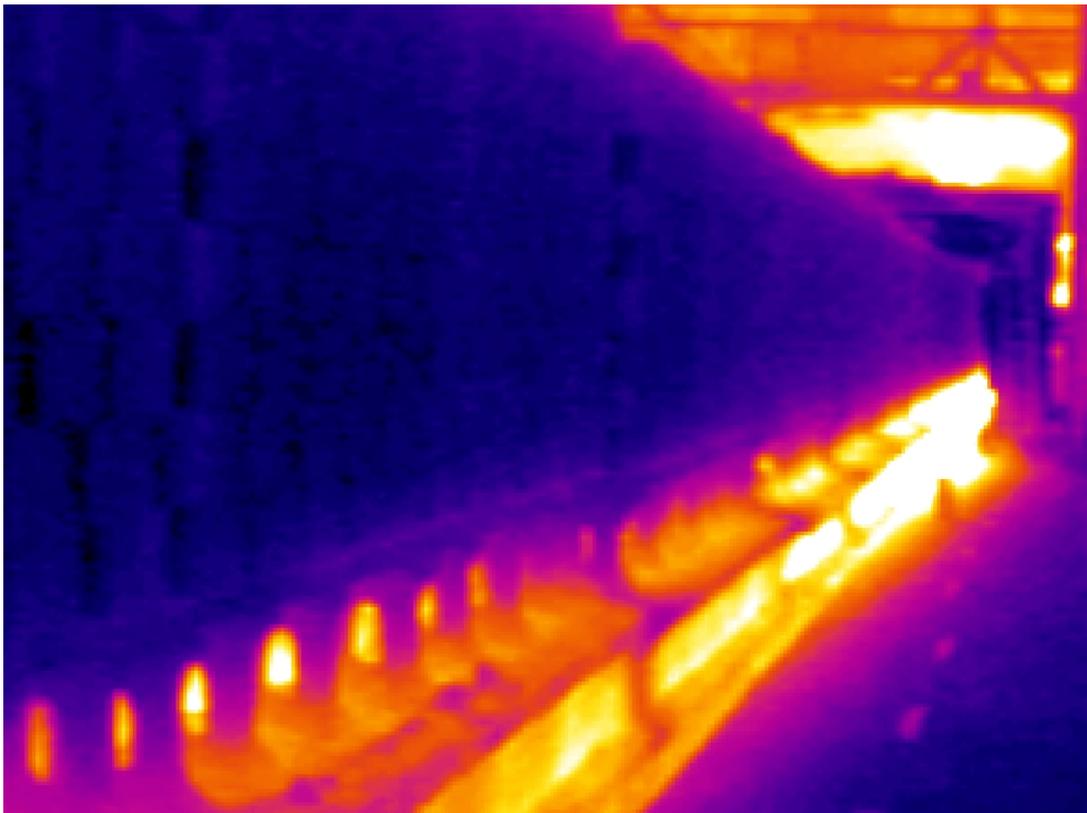


Leitfaden

zur Integration von Blockheizkraftwerken in den Herstellungsprozess grobkeramischer Erzeugnisse

THOMAS FREITAG, DIRK DEPPE, HAGEN RAUH, ULF NIERSMANN, SEBASTIAN SÜß



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die in diesem Leitfaden veröffentlichten Erfahrungen basieren auf einem Verbundforschungsprojekt, welches durchgeführt wurde von:

Steinbeis-Innovationszentrum Energie und Umwelttechnik

Hauptstraße 17

09376 Oelsnitz

www.stz-energie.de

Das Steinbeis-Innovationszentrum Energie und Umwelttechnik wurde 1996 von Mitarbeitern der Professur Technische Thermodynamik der Technischen Universität Chemnitz im Rahmen des Steinbeis-Verbundes gegründet. Die Schwerpunkte der Tätigkeit liegen im Bereich des rationellen Energieeinsatzes und der Nutzung regenerativer Energien. Das Aufgabenspektrum reicht dabei von der Erstellung von Studien, der Planung komplexer Energieerzeugungs- und Verteilsysteme bis hin zur Durchführung von Forschungsprojekten.

und

Deppe Backstein Keramik GmbH

Neuenhauser Straße 52

49843 Uelsen-Lemke

www.deppe-backstein.de

DEPPE ist eine innovative und leistungsfähige Ziegelei mit Tradition. Die Familie Deppe produziert am heutigen Standort in Lemke bei Uelsen in der Grafschaft Bentheim bereits seit 1888 Ziegelsteine. Heute produziert DEPPE so viele Produkte wie noch nie zuvor auf qualitativ höchstem Niveau. Bei Vollaustlastung werden ca. 25 Millionen Ziegel (bezogen auf das Format NF) produziert.

Das Projekt wurde dankenswerter Weise vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), unter den Förderkennzeichen 01LY0812A und 01LY0812C gefördert. Der Nachdruck, die Vervielfältigung und die Wiedergabe des Leitfadens bzw. von Teilen des Leitfadens sowie die Übersetzung ist nur mit schriftlicher Genehmigung der Verfasser zulässig.

Inhaltsverzeichnis

1	BLOCKHEIZKRAFTWERKE.....	1
1.1	Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung	1
1.2	Funktionsprinzip von BHKWs	3
1.3	Aufbau von BHKWs	5
1.3.1	Prinzipieller Aufbau von Wärmeversorgungssystemen mit BHKWs	5
1.3.2	Motoren	5
1.3.3	Generatoren.....	8
1.3.4	Peripherie von BHKWs	10
1.4	Betriebsweisen von BHKWs.....	11
1.4.1	wärmegeführte Varianten	11
1.4.2	stromgeführte Varianten	12
1.4.3	strom- und wärmegeführte Varianten.....	12
1.5	Energieträger	13
1.5.1	gasförmige Energieträger	13
1.5.2	flüssige Energieträger	15
1.6	Energiepreise	22
1.6.1	bezogene Elektroenergie	22
1.6.2	eingespeiste Elektroenergie.....	23
1.6.3	Erdgas.....	23
1.6.4	Bioerdgas	24
1.7	Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	25
1.7.1	Fördermöglichkeiten.....	25
1.7.2	Emissionen	29
2	ZIEGELEI.....	30
2.1	Produktionsprozess einer Ziegelei für Vollmauerziegel	30
2.2	Energiebedarf des Produktionsprozesses einer Ziegelei	34
2.2.1	Primär- und Elektroenergie.....	34
2.2.2	Erdgasbedarf und Abwärmenutzung bzw. Wärmerückgewinnung	35
2.2.3	Energieanalyse der Herstellungsprozesse und der technologischen Abläufe	37
3	EINBINDUNG EINES BHKWS IN EINE ZIEGELEI.....	39

3.1	Einbindung der BHKW Abwärme in den Tunnelofen	41
3.2	Nutzung der BHKW-Abwärme für die Verbrennungsluftvorwärmung des Tunnelofens.....	43
3.3	Einbindung der BHKW-Abwärme in die Verbundluft	45
3.4	Einbindung der BHKW-Abwärme in den Trockner	46
3.5	Einbindung des BHKWs in den Vorwärmer	47
3.6	Einbindung der erzeugten Elektroenergie	48
3.7	Beeinflussung der Ziegelqualität durch die direkte Einbindung der Abgasabwärme eines BHKWs .	50
3.8	Besonderheiten beim Einsatz eines BHKWs in einem Ziegeleibetrieb	54
3.8.1	Abgasklappen in den Abgasleitungen	54
3.8.2	Lärmemission	55
3.8.3	Staubimmission.....	56
4	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE BETRACHTUNGEN	60
4.1	Einflussfaktoren auf einen wirtschaftlichen BHKW-Einsatz	60
4.2	Dimensionierung des BHKWs	60
4.3	Investitionskosten.....	62
4.4	Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener BHKW-Varianten.....	65
5	ZUSAMMENFASSUNG	68
6	LITERATUR	69

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
BHKW	Blockheizkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
HKW	Heizkraftwerk
EMSR	Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
EEX	European Energy Exchange
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
KWK-Gesetz	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
HD	Hochdruck
MD	Mitteldruck
ND	Niederdruck
m_N^3	Normkubikmeter
Heizöl EL	Heizöl extra leicht
IZ	Jodzahl
SZ	Säurezahl
atro	absolut trocken
IZF	Institut für Ziegelforschung Essen e.V.
SCR	selektive katalytische Reduktion (engl. Selective Catalytic Reduction)
CRT	kontinuierlich regenerierende (Partikel-) Falle (engl. Continuous Regenerating Trap)
low SAPS	bei der Verbrennung stark begrenzte Anteile an Sulfat-Asche, Phosphor, Schwefel
ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz

Vorwort

Mit der Herstellung grobkeramischer Produkte gehören Ziegeleien zur Branche der Baustoffindustrie und somit zu den energieintensiven Wirtschaftszweigen in Deutschland. Die Auswirkungen steigender Energiepreise sind gravierender als in anderen Industriezweigen und die Betreiber sind somit ständig auf der Suche nach Möglichkeiten einer Kostenreduktion.

In einer Ziegelei werden Elektroenergie sowie Wärmeenergie auf unterschiedlichen Temperaturniveaus in den verschiedenen Produktionsstufen für das Trocknen, Vorwärmen und Brennen der Ziegel verbraucht. Neben dem Ziel der Einsparung fossiler Primärenergie durch die generelle Optimierung der Produktionsprozesse wird in diesem Leitfaden in erster Linie betrachtet, ob eine Einsparung von Primärenergie durch den Einsatz von pflanzenöl- oder biogasbetriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) in der Ziegelproduktion möglich ist.

Im Vergleich zur konventionellen Energieerzeugung ist mit dem BHKW eine Primärenergieeinsparung von bis zu 40% möglich. Die CO₂-Einsparung liegt beim Einsatz von Erdgas bei bis zu 58% und beim Einsatz von Biogas bei bis zu 100%. Es liegt daher nahe, einen Teil der fossilen Primärenergie durch die Abwärme eines BHKWs zu ersetzen und gleichzeitig Strom für den Eigenbedarf oder auch zum Verkauf zu erzeugen.

Die genaue technische Umsetzung und die dabei einzuhaltenden Parameter sind noch nicht erforscht. Daher wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes des BMBF Möglichkeiten der Substitution fossiler Primärenergieträger bei der Herstellung hochwertiger Vormauerziegel durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken untersucht. Speziell in diesem Projekt wurde dazu die Eignung der Abwärme aus Blockheizkraftwerken im Produktionsprozess der grobkeramischen Industrie untersucht. Es wurde die wissenschaftliche und technische Basis für den BHKW-Einsatz in der grobkeramischen Industrie erarbeitet.

1 Blockheizkraftwerke

1.1 Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung

Bei allen marktgängigen auf Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) basierenden Systemen wird ein Stoff verbrannt. Die beim Verbrennungsprozess frei werdende Energie wird über Wärmekraftmaschinen in mechanische Energie umgewandelt. Durch nachgeschaltete Generatoren erfolgt eine Umwandlung der mechanischen in elektrische Energie.

Findet der Verbrennungsprozess innerhalb der Wärmekraftmaschine statt, spricht man von einer Verbrennungskraftmaschine. Beispiele hierfür sind Otto- und Dieselmotoren. Beispiele mit Wärmekraftmaschine und äußerem Verbrennungsprozess sind z.B. Heizkraftwerke (HKW) mit Dampfturbinen, Gasturbinen oder Stirlingmotoren.

Sind solche KWK-Systeme modular aufgebaut und werden stationär in Gebäuden oder Containern betrieben, werden sie als Blockheizkraftwerke bezeichnet. Diese liefern zeitgleich Wärme- und Elektroenergie.

Systeme mit Brennstoffzellen erzeugen ebenfalls Strom und Wärme und können stationär betrieben werden. Deswegen darf hier ebenfalls der Begriff „BHKW“ verwendet werden.

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird mit dem reinen Begriff „BHKW“ ein System mit Verbrennungskraftmaschine bezeichnet. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht zu üblichen Systemen zur Kraft-Wärme-Kopplung.

	HKW	HKW u. BHKW	HKW	BHKW	BHKW	BHKW	BHKW
	Dampf- turbine	Gas- turbine	Gas- und Dampf- turbine	Otto- motoren	Diesel- motoren	Stirling- motor	Brenn- stoffzelle
elektrische Leistung	5MW bis 800MW	50kW bis 250MW	20MW bis 800MW	1kW bis 5MW	5kW bis 20MW	1kW bis 40kW	1kW bis 250kW
Gesamtwirkungsgrad	90%	85%	90%	90%	90%	85%	90%
elektrischer Wirkungsgrad	15% bis 25%	25% bis 30%	30% bis 45%	25% bis 42%	28% bis 44%	10% bis 30%	30% bis 47%
Stromkennzahl	0,1 bis 0,4	0,3 bis 0,6	0,4 bis 1,0	0,4 bis 1,1	0,5 bis 1,1	0,1 bis 0,4	0,3 bis 0,7
möglicher Brennstoff	<ul style="list-style-type: none"> • fest • flüssig • gasfg. 	<ul style="list-style-type: none"> • flüssig • gasfg. 	<ul style="list-style-type: none"> • (fest) • gasfg. 	<ul style="list-style-type: none"> • gasfg. 	<ul style="list-style-type: none"> • flüssig • (gasfg.) 	<ul style="list-style-type: none"> • fest • flüssig • gasfg. 	<ul style="list-style-type: none"> • gasfg.
Brennstoffqualität	gering	gering	gering	mittel	mittel	gering	sehr hoch
spezifische Investitionskosten	gering	gering	mittel	mittel bis hoch	mittel bis hoch	hoch bis sehr hoch	hoch bis sehr hoch
Vollwartungskosten	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	1 bis 2 ct/kW _{el}	2 bis 3 ct/kW _{el}	keine Angabe	keine Angabe
Lebensdauer	25 Jahre	25 Jahre	25 Jahre	20Jahre	20Jahre	keine Angabe	keine Angabe
Marktgängigkeit	Stand der Technik	Stand der Technik	Stand der Technik	Stand der Technik	Stand der Technik	Kleinserien	Kleinserien

Tabelle 1: Übersicht von KWK-Systemen

1.2 Funktionsprinzip von BHKWs

Blockheizkraftwerke mit Verbrennungskraftmaschinen sind modular aufgebaute Anlagen, die Strom und Wärme gleichzeitig erzeugen (siehe Abbildung 1). Der erzeugte Strom (Generator) kann selbst verbraucht oder in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden.

Die erzeugte Wärme teilt sich in zwei verschiedene Temperaturniveaus auf. Die Niedertemperaturwärme aus der Motorkühlung mit Temperaturen bis ca. 80°C eignet sich für die Beheizung von Räumen oder zur Trinkwassererwärmung.

Die Hochtemperaturwärme, welche aus dem Abgas gewonnen wird, kann bei direkter Nutzung mit Temperaturen bis ca. 600°C als Prozesswärme genutzt werden.

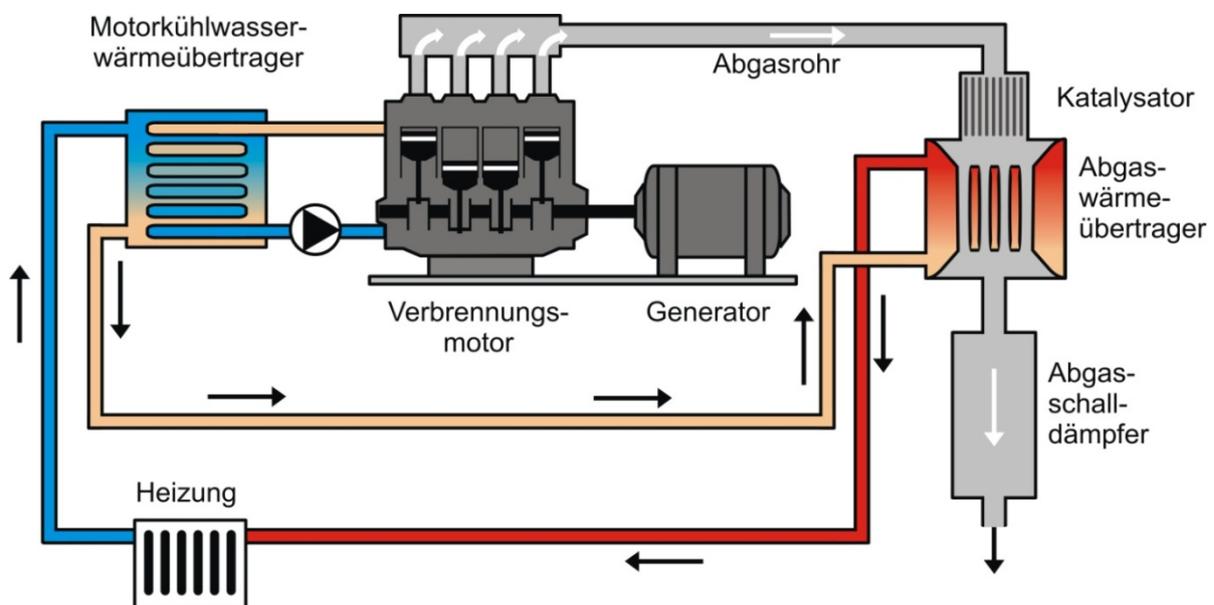


Abbildung 1: Prinzip eines Blockheizkraftwerkes

Der Wirkungsgrad der Stromerzeugung eines BHKWs ist abhängig von der Anlagengröße und liegt zwischen 30% und 45%. Das Verhältnis der im Betrieb gleichzeitig anfallenden Elektro- und Wärmeenergien beträgt für Blockheizkraftwerke mit Dimensionen ab 100kW_{el} etwa 1:1 bis 1:1,3. Die Wärmemengen, welche über das Abgas und die Motorkühlung gewonnen werden können, sind in etwa gleich groß.

Durch die Nutzung der Abwärme bei einem BHKW kann die eingesetzte Primärenergie zu über 90% genutzt werden (siehe Abbildung 2).

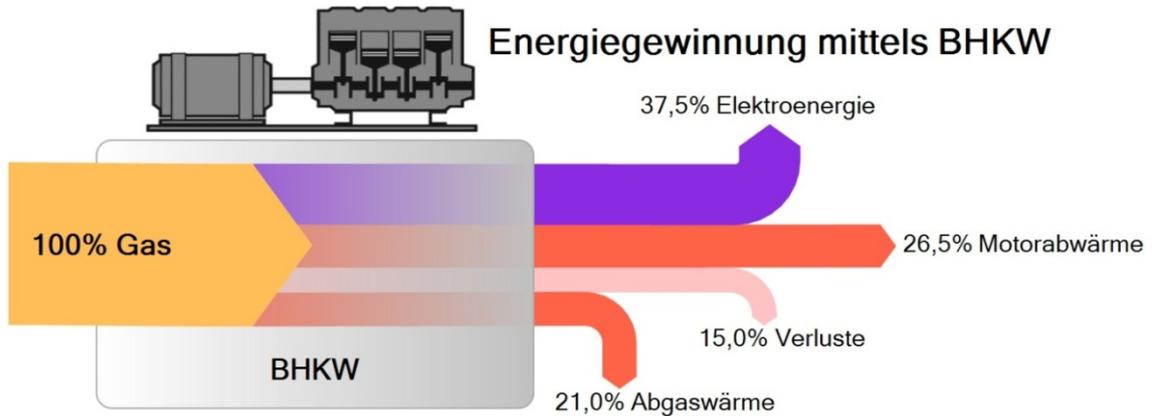


Abbildung 2: prinzipielle Energiebilanz eines ausgewählten Blockheizkraftwerkes (Beispiel: Erdgas-BHKW)

4

Ein höherer Gesamtnutzungsgrad gegenüber der herkömmlichen Kombination von lokalem Heizungssystem und zentralem Großkraftwerk resultiert aus der Nutzung der Abwärme der Stromerzeugung direkt am Ort der Entstehung, während die Abwärme eines zentralen Großkraftwerkes in der Regel als Verlust an die Umwelt abgegeben wird.

Im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung können dabei bis zu 40% Primärenergie und 60% CO₂ eingespart werden (siehe Abbildung 3).

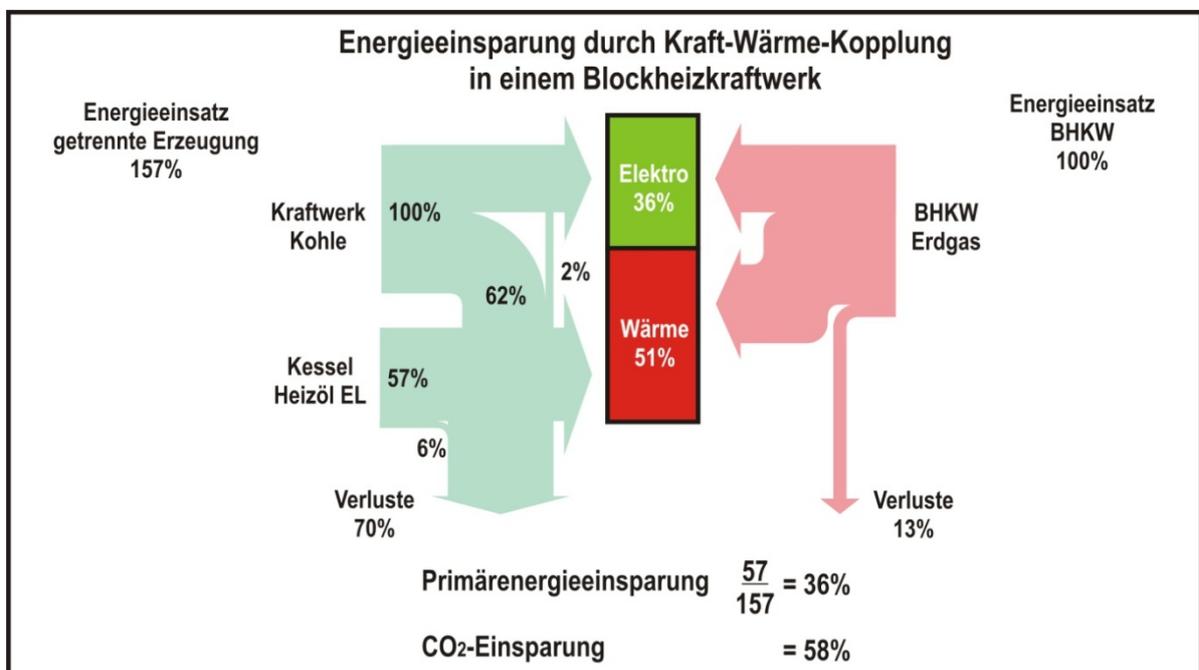


Abbildung 3: Vergleich des Primärenergieflusses von getrennter Energieerzeugung und KWK mit BHKW

1.3 Aufbau von BHKWs

1.3.1 Prinzipieller Aufbau von Wärmeversorgungssystemen mit BHKWs

Wärmeversorgungssysteme mit BHKWs können grob in vier Bereiche unterteilt werden:

- das eigentliche **BHKW-Aggregat** umfasst den Motor, den Generator und die Kupplung.
- das **BHKW-Modul** umfasst das BHKW-Aggregat, die Kraftstoffzuleitung, die Abgasanlage, die Regelungstechnik des Aggregates und die Wärmeübertrager für Kühlwasser und Abgas.
- die **BHKW-Anlage** (BHKW-Zentrale) umfasst die baulichen Einrichtungen, ein oder mehrere BHKW-Module, Be- und Entlüftungsanlagen, die Schaltanlage und die Leittechnik (Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik – EMSR)
- zur **Peripherie eines BHKWs** gehören alle zusätzlichen Einrichtungen, welche die produzierten Energien dem Verbrauchersystem zur Verfügung stellen, wie bspw. Pufferspeicher, zusätzliche Wärmeübertrager zur Be- und Entladung, die zusätzliche EMSR, Rohrleitungssysteme mit Pumpen, Elektrokabelsysteme u.a.

Alle aufgezählten Bereiche verursachen sowohl Investitions- als auch Betriebskosten und beeinflussen somit die Wirtschaftlichkeit.

1.3.2 Motoren

In BHKWs werden zurzeit überwiegend die beiden Hubkolbenmotorarten Otto- bzw. Dieselprinzip verwendet. Vereinzelt finden auch Rotationskolbenmotoren (Wankelmotoren) Anwendung.

Ottomotor (Gasmotor)

Industrie-Gasmotoren arbeiten nach dem Otto-Prinzip. Der Kraftstoff wird vor dem Entzünden in einem Vergaser, im Ansaugtrakt oder im Brennraum (Einspritzung) mit der Luft gemischt und verdunstet. Da die geringeren Verdichtungsverhältnisse nicht die erforderlichen Zündtemperaturen produzieren, muss immer eine Fremdzündung erfolgen, um das Gas-Luft-Gemisch zu entzünden. Eine Selbstentzündung ist unerwünscht, da sie durch die niedrigen Zündtemperaturen der verwendeten Kraftstoffe schlecht kontrollierbar ist. Die Leistungsregelung erfolgt über eine Drosselklappe, welche die zugeführte Menge des Gas-Luft-Gemisches steuert.

Gas-Ottomotoren haben mit ca. 30% einen etwas schlechteren mechanischen Wirkungsgrad als Dieselmotoren, können diesen aber im Teillastbereich bis 50% annähernd beibehalten. Die Abgastemperaturen von Gasmotoren liegen mit ca. 500°C unter denen von Dieselaggregaten. Gasmotoren werden häufig mit Aufladung betrieben, um beispielsweise bei Verwendung von Schwachgasen einen höheren Füllungsgrad der

Zylinder und damit eine höhere Leistungsdichte zu erreichen. Der Luftüberschuss ist im Vergleich zum Dieselmotor sehr gering und tendiert bei ausgereifter Technik speziell bei Erdgasmotoren gegen Null, so dass nahezu $\lambda=1$ gilt.

Biogasmotoren werden als Magermotoren bei $\lambda \approx 1,6$ betrieben. Ursache ist die meist höhere Schwefelwasserstoffkonzentration, die die Verwendung von Katalysatoren nur eingeschränkt erlaubt.

Alternativ zum eher preisgünstigen Gas-Ottomotor werden teure Umrüstungsvarianten von Dieselmotoren mit Gas-Otto-Betrieb angeboten. Diese zeichnen sich durch einen hohen mechanischen Wirkungsgrad (ca. 40%) aus.

Der Wartungsaufwand für Gasmotoren ist wesentlich geringer als bei Dieselmotoren. Ein weiterer Vorteil liegt in der Lebensdauer von Gasmotoren. Laufzeiten von mehr als 100.000 Vollbetriebsstunden sind dabei realistisch. Auch bei den Emissionswerten schneiden die Gasmotoren wesentlich besser ab. Die starke Verbreitung von Industrie-Gasmotoren ist ein Indiz für deren Wirtschaftlichkeit.

Dieselmotor und Dieseldieselmotor

Zur motorischen Verbrennung von Diesel und Pflanzenöl eignen sich ausschließlich Dieselmotoren. Ein wichtiges Merkmal von Dieselmotoren besteht in der Nutzung von flüssigen Kraftstoffen. Beim Verbrennungsverfahren nach Diesel steigt durch ein hohes Verdichtungsverhältnis die Temperatur im Brennraum auf über 700°C, so dass sich der Luft-Kraftstoffnebel beim Eindüsen selbst entzündet. Der mechanische Wirkungsgrad ist mit ca. 40% höher als bei Ottomotoren.

Eine Sonderform des Dieselmotors stellen Dieseldieselmotoren (Zündstrahlmotoren) dar. Diese werden insbesondere zur Verwendung von Schwachgasen genutzt. Die Zündung muss hier weiterhin durch eine Dieselöleinspritzung erfolgen. Es wird ein Zündölanteil von minimal 5% der eingesetzten Energie benötigt. Zündstrahlmotoren eignen sich somit für Schwach- oder Biogas. Bei Dauerbetrieb mit Erdgas überhitzen diese Motoren.

Während Gasottomotoren und Zündstrahlmotoren bis unter 50% modulierend betrieben werden können, ist dies beim Dieselmotor nicht möglich. Ihm sind diesbezüglich wesentlich engere Grenzen gesetzt. Dieselmotoren erreichen etwa 60.000 Vollbetriebsstunden. Pflanzenölmotoren müssen nach 30.000 – 40.000 Vollbetriebsstunden einer Revision unterzogen werden.

Der höhere technische Aufwand für pflanzenölbetriebene BHKWs führt zu höheren Investitionskosten als bei gasbetriebenen BHKW-Anlagen.

Dieselmotoren unterscheiden sich im Wesentlichen durch das Einspritzverfahren und die Brennraumcharakteristik. Kammermotoren mit geteiltem Brennraum, wie beispielsweise Vorkammer- und Wirbelkammermotoren, sind sehr robust. Einteilige Brennräume

werden mit Direkteinspritzung betrieben und sind daher auf eine hohe gleichbleibende Kraftstoffqualität angewiesen. Die Luft und der Kraftstoff werden erst im Brennraum bzw. in einer Kammer am Brennraum gemischt. Dabei ist der Luftüberschuss sehr hoch. Eine Leistungsregelung erfolgt ausschließlich über die Menge des eingespritzten Kraftstoffes.

Vor- und Wirbelkammermotoren stellen aus technischer Sicht Motoren mit veraltetem Einspritzverfahren dar. Die Einspritzung wird hier durch Einzel-, Verteiler- und Reihen-Einspritzpumpen realisiert. Moderne Motoren mit Direkteinspritzung werden zusätzlich mit hocheffizienten Einspritzsystemen hergestellt. Motoren mit Direkteinspritzung haben eine effektivere Verbrennung und erreichen dadurch höhere Wirkungsgrade, einen geringeren Kraftstoffverbrauch und bessere Abgaswerte. Die aktuelle Entwicklung bei Dieselmotoren geht in den letzten Jahren zu Systemen wie „Pumpe-Düse“ und „Common-Rail“. Beides sind elektronisch gesteuerte Systeme, bei denen der Kraftstoff über feine Düsen und mit sehr hohem Druck direkt in den Brennraum eingespritzt und fein zerstäubt wird.

Bei Pumpe-Düse-Systemen sind jeweils eine Pumpe und eine Düse für jeden Zylinder in einem Bauteil verbaut. Es werden Drücke bis zu 2.000bar erreicht. In Common-Rail-Motoren erzeugt eine Hochdruckpumpe dauerhaft bis zu 1.600bar. Per Steuerung kann der Einspritzzeitpunkt und die Menge für jeden Zylinder in Abhängigkeit von Motordrehzahl und Betriebszustand eingestellt werden. Beide Verfahren führen zu deutlich verbesserten Abgaswerten und einem geringerem Kraftstoffverbrauch.

Beim Betrieb von Dieselmotoren gelangen insbesondere während der Aufwärmphase, aber auch im regulären Betrieb, geringste Mengen unverbrannter Kraftstoff über die Zylinderlaufbuchse und die technisch nie 100%ig dichten Kolbenringe in das Motorenöl. Durch die hohen Temperaturen verdampft der Dieselmotorkraftstoff wieder vollständig, so dass es zu keiner Anreicherung von Diesel im Motorenöl kommen kann. Wird der Motor allerdings mit Pflanzenöl betrieben, sammelt sich dieser unverbrannte Kraftstoffanteil im Motorenöl an, da die im normalen Betrieb auftretenden Temperaturen nicht genügen, um das Pflanzenöl zu verdampfen. Da das Pflanzenöl keine ausreichenden Schmiereigenschaften besitzt und es bei der Vermischung von Pflanzenöl und Motorenöl zusätzlich zur Polymerisation (Verklumpung) kommen kann, können bei Nichtbeachtung der vom Hersteller vorgegebenen Ölwechselintervalle gravierende Motorschäden auftreten. Beim Betrieb mit Pflanzenöl wird dieses Problem durch die sehr hohe Viskosität von Pflanzenöl bei niedrigen Temperaturen noch verstärkt. Deshalb werden pflanzenölbetriebene Motoren in der Regel mit Spülkraftstoff (z.B. Biodiesel) an- und abgefahren und erst bei Erreichen der Betriebstemperatur automatisch auf Pflanzenöl umgeschaltet.

Bei Vor- und Wirbelkammermotoren wird der Kraftstoff in die im Zylinderkopf angeordnete Vor- oder Wirbelkammer, die durch Kanäle mit dem Hauptbrennraum verbunden ist, eingespritzt. Die Einspritzung erfolgt meist über eine Ein-Loch Einspritzdüse. In der Vor- bzw. Wirbelkammer herrschen zum Einspritzzeitpunkt starke Luftwirbel vor, die durch die Geometrie der Vorkammer und durch das Einströmen der Luft durch sehr kleine Eintrittsöffnungen zustande kommen. Der Kraftstoffstrahl wird tangential zum Luftwirbel eingespritzt, wodurch eine feine Vermischung der Kraftstofftröpfchen und der Verbrennungsluft zustande kommt. Vor- und Wirbelkammermotoren eignen sich gut für den Pflanzenölbetrieb, da die höhere Viskosität von Pflanzenöl gegenüber Diesel bei diesen Motoren keinen Nachteil darstellt. Allerdings verläuft die Verbrennung eher unkontrolliert, so dass die Nutzung der im Kraftstoff enthaltenen Energie geringer ausfällt. Diese Motoren werden aufgrund des geringeren Wirkungsgrades kaum noch angeboten.

Grundsätzlich kann die Leistung und das Drehmoment aller Motoren durch Aufladung mittels Abgasturbolader erhöht werden. Eine Turbine im Abgas treibt einen Verdichter an, der Luft ansaugt und verdichtet. Die verdichtete Luft wird dem Ansaugtrakt des Motors zugeführt und über Ventile in den Brennraum geleitet. Da sich die zugeführte Luftmasse dabei erhöht, werden gleichzeitig größere Mengen Kraftstoff zugeführt, um den Luftüberschuss konstant zu halten. Derartige Motoren besitzen eine deutlich höhere Leistungsdichte als Motoren ohne Aufladung.

1.3.3 Generatoren

Zur Stromerzeugung in BHKWs werden sowohl Asynchron- als auch Synchrongeneratoren eingesetzt. Eine Auswahl wird in Abhängigkeit des Anwendungszwecks, der örtlichen Netzsituation und den Anforderungen des Netzbetreibers getroffen.

Üblicherweise werden bei BHKWs Generatoren eingesetzt, welche Drehstrom (3-phasig, 400V) liefern. Bei sehr kleinen BHKWs ($<10\text{kW}_{\text{el}}$) finden sich auch oft 1-phasige Generatoren, die Wechselstrom (230V) erzeugen. Sehr große BHKWs ($>1\text{MW}_{\text{el}}$) besitzen wiederum häufig Generatoren, welche Mittelspannung von 10kV (3-phasig) abgeben.

Synchrongeneratoren

Ein Synchrongenerator muss für die Einspeisung in das Netz des Energieversorgungsunternehmens (EVU) eine bestimmte Drehzahl in Abhängigkeit der Netzfrequenz besitzen, also synchronisiert werden, da er sonst Schaden nehmen kann. Vor dem Koppeln müssen die Amplituden und Frequenzen der Netz- und Generatorspannungen sowie die Phasenlagen und -folgen fest eingestellt sein. Nach Herstellung der Synchronisation wird der Generator lastfrei ans Netz geschaltet und erst danach elektrisch belastet.

Es werden zusätzliche Geräte für die Erregung und Netzsynchronisierung benötigt. Dadurch erhöhen sich die Kosten solcher Anlagen. Synchrongeneratoren können Wirkungsgrade von über 98% erreichen.

Vorteile:

- höherer Wirkungsgrad (95% bis 99%)
- wartungsarm
- Drehzahl von Belastung unabhängig
- Blindleistungssteuerung bzw. -erzeugung bei elektrischer Erregung möglich

Nachteile:

- hoher Regelaufwand
- kein Selbstanlauf
- Erregerleistung notwendig oder permanenterregt

Asynchrongeneratoren

Anders als beim Synchrongenerator können Asynchrongeneratoren ohne besondere Vorkehrungen aufs Netz geschaltet werden. Eine Synchronisation ist nicht erforderlich.

Asynchrongeneratoren sind sehr robust, preiswert und können, abgesichert über einen Schutzschalter, direkt ans Drehstromnetz angeschlossen werden. Man benötigt keine zusätzliche Einrichtung für die Erregung und Synchronisation. Aus diesen Gründen arbeiten die meisten kleineren BHKWs (<50kW_{el}) mit Asynchrongeneratoren. Die erreichbaren Wirkungsgrade bis etwa 90% sind etwas geringer als bei Synchrongeneratoren. Asynchrongeneratoren können bei kleineren Blockheizkraftwerken auch als Anlaufhilfe (Anlasser) genutzt werden.

Ein Merkmal netzerregter Asynchrongeneratoren ist der Blindleistungsbedarf, der das Netz zusätzlich belastet. Je nach Absprache mit dem lokalen EVU kann deswegen eine zusätzliche Blindleistungskompensation oder Blindleistungsmessung erforderlich werden. Ein Inselbetrieb oder eine Notstromversorgung ist mit Asynchrongeneratoren nur sehr bedingt und mit erhöhtem technischem Aufwand möglich.

Vorteile:

- robust
- wartungsarm
- keine Synchronisation erforderlich
- kostengünstig

Nachteile:

- geringerer Wirkungsgrad (88% bis 90%)
- Blindleistungsbedarf aus dem Netz
- keine $\cos \varphi$ -Regelung
- erhöhter Regelaufwand bei Inselbetrieb

1.3.4 Peripherie von BHKWs

Pufferspeicher

Die Erzeugung von Elektroenergie mit einem BHKW ist immer an die gleichzeitige Erzeugung von Wärme gekoppelt. Daher stellt sich ein wirtschaftlicher Betrieb nur dann ein, wenn eine gleichzeitige Abnahme von Wärme und Strom erfolgt und diese in gleichen Größenordnungen besteht.



Abbildung 4: Bau eines 25m³ Pufferspeichers aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) für ein BHKW

Sollten Abweichungen hinsichtlich Zeit und Menge des Energiebedarfs bestehen, werden Pufferspeicher eingesetzt. Für überschüssige Elektroenergie dient das öffentliche Stromnetz als Verbraucher bzw. „Zwischenspeicher“. Für überschüssige Wärme wird ein Pufferspeicher zur Speicherung genutzt.

Durch den Einsatz von Pufferspeichern wird der Betrieb des BHKWs als thermisches Energieversorgungssystem vom Verbrauchssystem bezüglich Zeit und Last entkoppelt. Demzufolge kann zu viel produzierte Wärme aufgefangen und für Starklastzeiten vorgehalten werden. Das BHKW kann länger im Volllastbetrieb arbeiten, wodurch sich der Nutzungsgrad des BHKWs erhöht. Einen weiteren Vorteil bietet die Verlängerung der Betriebsintervalle des BHKWs. Die Verluste der Ein- und Ausschaltvorgänge und ebenso der Maschinenverschleiß werden dadurch minimiert.

Üblicherweise werden Pufferspeicher aus Stahl, Edelstahl oder aus GFK angeboten.

Speicher aus Kunststoff sind nicht druck- und temperaturbeständig und können deshalb nur drucklos und nur bis zu Temperaturen von 85°C betrieben werden. Ihr Vorteil besteht in der einfachen Einbringung an Aufstellorte mit engem Zugang, da die Montage vor Ort erfolgt. Stahlspeicher wiederum können mit höheren Speichertemperaturen und -drücken arbeiten. Mit entsprechender Sicherheitstechnik sind somit Temperaturen von mehr als 100°C möglich.

Zur Gewährleistung der Kühlung des BHKW-Motors sind die Temperaturen im unteren Speicherbereich auf maximal 70°C beschränkt.

Backup-Systeme für das BHKW

Die Notwendigkeit des Einsatzes eines Backup-Systems hängt vom gewünschten Grad der Versorgungssicherheit ab. Üblicherweise werden diese Systeme so dimensioniert, dass die Deckung von Lastspitzen und im Falle einer Havarie des BHKWs die Gesamtversorgung gewährleistet ist. Die sicherste und preiswerteste Möglichkeit stellt die Anbindung an vorhandene Energieversorgungsnetze für beispielsweise Gas (Wärmeversorgung über einen Heizkessel) und Elektroenergie (Stromversorgung) dar.

1.4 Betriebsweisen von BHKWs

1.4.1 wärmegeführte Varianten

Der wärmegeführte Betrieb eines BHKWs orientiert sich am tatsächlichen Wärmebedarf des Objektes. Das BHKW arbeitet dann, wenn Wärme abgefordert wird. Durch den Einsatz eines Pufferspeichers zwischen Wärmeerzeuger und –verbraucher wird der Wärmebedarf durch den Beladungsgrad des Puffers bestimmt. Der Pufferspeicher dient hierbei lediglich dazu, die Betriebsintervalle des BHKWs zu verlängern.

Die erzeugte Elektroenergie wird bei verhältnismäßig hohen Einkaufspreisen für Elektroenergie selber verbraucht. Überschüsse werden in das Stromnetz des örtlichen EVU eingespeist und anhand der aktuellen Preise der „Leipziger Strombörse“ (European Energy Exchange – EEX) vergütet.

Bei Nutzung regenerativer Kraftstoffe erfolgt eine Förderung des eingespeisten Stroms nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), so dass die gesamte erzeugte Elektroenergie eingespeist wird. Zurzeit liegt diese Förderung weit über den Preisen der EEX und den Einkaufspreisen industrieller Abnehmer (siehe auch Abschnitte 1.6.2 und 1.7).

1.4.2 stromgeführte Varianten

Der stromgeführte Betrieb eines BHKWs orientiert sich am tatsächlichen Strombedarf des Objektes. Das BHKW arbeitet dann, wenn Elektroenergie benötigt wird. Dies bedeutet in der Regel, dass eine permanente Wärmeabnahme bestehen sollte. Besonders hier kann ein entsprechendes Speichermanagement hilfreich sein.

Überschüssige Wärme, welche nicht weiter gespeichert werden kann, muss über einen Notkühler an die Umwelt abgegeben werden. Da dies den Gesamtwirkungsgrad der Anlage mindert, werden solche Betriebsweisen nur in speziellen Fällen (z.B. Notstromversorgung) angewendet. Falls die Wärmeabgabe an die Umwelt nicht möglich oder erwünscht ist, muss das BHKW abgeschaltet werden.

1.4.3 strom- und wärmegeführte Varianten

Bei einem strom- und wärmegeführten BHKW wird der Betrieb gleichzeitig sowohl auf den tatsächlichen Wärmebedarf als auch auf den tatsächlichen Strombedarf des Objektes so abgestimmt, dass keine Überschüsse an Elektroenergie produziert und in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Auch hier wird der Wärmebedarf durch den Beladungsgrad des Pufferspeichers bestimmt.

Solch eine Betriebsweise wird gewählt, wenn die Einkaufspreise für den Kraftstoff gegenüber den Verkaufspreisen für die produzierte Elektroenergie relativ hoch sind und keine ausreichende Förderung für den eingespeisten Strom erfolgt.

Solche Anlagen können eine Förderung über das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWK-Gesetz) erhalten.

1.5 Energieträger

1.5.1 gasförmige Energieträger

Gasförmige Energieträger sind Erdgas, Biogas, Flüssiggas, Deponiegas oder Klärgas. Deponie- und Klärgas sind nicht frei verfügbar und werden nur für sehr spezielle Anwendungsfälle in Betracht gezogen.

Für den Betrieb eines BHKWs finden sich auf dem deutschen Markt Erdgas als fossiler und Biomethangas als regenerativer Rohstoff. Beide Gase können aus dem Energieversorgungsnetz bezogen werden. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, BHKWs direkt mit Gas aus Biogasanlagen zu betreiben, welches in der Regel lokal verwertet wird.

Erdgas

Erdgas, welches in Deutschland erhältlich ist, stammt hauptsächlich aus Russland, Norwegen, Niederlande, Deutschland, Dänemark und Großbritannien.

Frisch gefördert Erdgas ist ein Gasgemisch, dessen chemische Zusammensetzung je nach Herkunft stark schwankt. Es besteht zum größten Teil aus Methan. Weitere brennbare Anteile können Wasserstoff, Ethan, Propan, Butan, Pentan, Ethen u.a. sein. Zusätzlich sind Stoffe wie Schwefelwasserstoff, Stickstoff, Kohlendioxid, Helium, Wasser u.a. zu finden.

Nach der Aufbereitung, wie z.B. der Trocknung, der CO₂-Abtrennung und der Entschwefelung, wird das Gas in ein überregionales Verteilnetz mit Drücken bis zu 100bar eingespeist. Die regionalen Verteilnetze können ebenfalls noch Drücke über 50bar aufweisen. Schließlich bieten die örtlichen Energieversorgungsunternehmen Erdgas bei unterschiedlichen Drücken an. Maßgeblich für die Erdgassorte sind Methangehalt und Herkunft. So besitzt H-Gas aus Nordseeförderung Anteile von ca. 89% Methan und ca. 3% Inertgas, H-Gas aus den GUS-Staaten ca. 98% Methan und ca. 1% Inertgas und L-Gas ca. 85% Methan und ca. 11% Inertgas.

Bezogen werden kann das Gas bei Hochdruck (HD) mit mehr als 1bar Überdruck, bei Mitteldruck (MD) mit Drücken zwischen 100mbar und 1bar und bei Niederdruck (ND) mit Drücken kleiner 100mbar. Die Verbrauchsgeräte arbeiten meistens mit Drücken von 20 oder 50mbar, weshalb in der Regel Gasdruckregelsysteme benötigt werden.

Je nach Sorte besitzt Erdgas Brennwerte von 36 bis 50MJ/kg bzw. 30 bis 40MJ/m³. Die Heizwerte liegen um etwa 10% bis 11% darunter. Im Normzustand (20°C und Umgebungsdruck) besitzt Erdgas Dichten zwischen 0,7 und 0,85kg/m³. Bei der Verbrennung von Erdgas entsteht ca. 0,243kg CO₂ je kWh. Informationen über das angebotene Gas geben die örtlichen Energieversorgungsunternehmen.

Schwach- oder Biogas

Als Schwachgas bzw. Biogas wird Gas bezeichnet, welches aus biogenen Stoffen durch biologische Verfahren, also in Biogasanlagen, gewonnen wurde. Es existieren auch Anlagen, welche durch thermische Verfahren Pyrolysegas produzieren. Dieses Gas ist ebenfalls ein Schwachgas. Die bestehenden Anlagen sind allerdings nur vereinzelt und größtenteils als Pilotanlagen anzutreffen.

Vor der Verwendung wird das produzierte Schwach- bzw. Biogas nur leicht aufbereitet. Eine Erhöhung des Methangehaltes durch die Separierung von Inertgasen wie Kohlendioxid oder Stickstoff findet nicht statt. Durch diese unzureichende Konditionierung darf Schwachgas nicht in das öffentliche Gasverteilnetz eingespeist werden.

Schwachgas besitzt Methangehalte von etwa 50% bis 70%. Die verbleibenden Anteile sind inerte Gase, hauptsächlich Kohlendioxid. Des Weiteren sind recht hohe Mengen an Schwefelverbindungen vorhanden. So kann der Schwefelwasserstoffanteil bis zu 0,5% betragen und vor der Nutzung eine Entschwefelung erforderlich sein. Die Heizwerte liegen in der Regel unter $8,5 \text{ MJ/m}_N^3$.

Schwachgase sind nur in BHKWs mit Gasmotoren oder Dieselmotoren (Zündstrahlmotoren) verwendbar.

Bioerd- bzw. Biomethangas

Als Bioerd- bzw. Biomethangas wird Gas mit einem Methananteil von ca. 95% bezeichnet, welches aus Schwachgas gewonnen wurde. Das produzierte Schwachgas wird durch die Separierung von unerwünschten Gasbestandteilen so aufbereitet, dass es Erdgasqualität besitzt. Somit ist eine Einspeisung in das öffentliche Gasverteilnetz möglich. Eingespeist werden muss das Gas mindestens auf der Niederdruckebene des Endverbrauchers. Das eingespeiste Gas kann an jeder beliebigen Stelle des Erdgasnetzes entnommen werden. Dabei sind lediglich die vom Netzbetreiber festgelegten und der Bundesregulierungsbehörde bestätigten Netzdurchleitungsgebühren zu entrichten. Praktisch ist damit an jeder Abnahmestelle, an der ein Erdgasanschluss existiert, der Bezug von aufbereitetem Biogas möglich. Ein weiterer Vorteil besteht in der Nutzung des Gasnetzes als Speicher.

Die Brenn- bzw. Heizwerte entsprechen denen des jeweilig angebotenen Erdgases. Da es sich um einen regenerativen Energieträger handelt, sind bei der Verwendung in einem BHKW auch entsprechende Fördermöglichkeiten vorhanden. Die Belastung der Umwelt durch CO_2 entsteht lediglich durch die Gasaufbereitung und beträgt ca. $0,075 \text{ kg/kWh}$.

1.5.2 flüssige Energieträger

Diesel / Heizöl EL

Dieselmotorkraftstoff, benannt nach Rudolf Diesel – dem Erfinder des Dieselmotors, basiert auf Mineralöl. Es ist ein Gemisch aus Kerosin und Gasöl. Dies sind Destillationsprodukte, welche bei der Erdölverarbeitung anfallen und entschwefelt wurden. Da Erdöl als Ausgangsprodukt starken Qualitätsschwankungen unterliegt, sind für Dieselmotorkraftstoffe bestimmte Spezifikationen in Normen festgelegt. Prinzipiell ist Heizöl EL Diesel gleichzusetzen.

Weiterhin werden dem Dieselmotorkraftstoff verschiedene Additive beigemischt, um Eigenschaften wie Zündwilligkeit oder Viskosität zu verbessern. Der Unterschied der angebotenen Dieselmotorkraftstoffsorten basiert auf der Menge und die Art der beigemischten Additive.

Pflanzenöl

Die energetische Nutzung von Pflanzenölen unterliegt teilweise gewissen Vorurteilen. Insbesondere wenn es sich um Öl handelt, welches außerdem als Nahrungsmittel geeignet ist, wird oftmals die sogenannte „Teller – Tank Diskussion“ geführt. Diese Diskussion wird teilweise sehr emotional und einseitig geführt. Insbesondere die durch den Ölfurchtanbau zweifellos gegebene Einnahmequelle für die Bevölkerung ärmerer Länder wird oftmals vernachlässigt. Auch die Verfügbarkeit und damit der Preis kann zu gewissen Nutzungseinschränkungen führen. Aus diesem Grund sollen hier preislich attraktive Pflanzenöle kurz vorgestellt werden. Teilweise sind diese Öle zurzeit nur in den Erzeugerländern in ausreichenden Mengen verfügbar. Prinzipiell eignen sich für die Nutzung in BHKWs zahlreiche Pflanzenöle. In der Praxis gibt es jedoch chemische und physikalische Eigenschaften, die entscheidend für eine motorische Nutzung sind.

Relativ einfach nutzbare Öle sind z.B. Palm-, Raps-, Sonnenblumen- und Sojaöl. Da diese Öle als Nahrungsmittel geeignet sind, treten die o.g. Probleme bezüglich der energetischen Nutzung auf. Aus diesem Grund werden stetig alternative Öle, welche nicht als Nahrungsmittel genutzt werden können, gesucht. So könnten z.B. Jatropha-, Cashewschalen- oder auch Kautschuköl für BHKW-Motoren verwendet werden. Diese Öle sind relativ preiswert, da sie z.T. aus Abfallprodukten gewonnen werden. Lediglich der Transport nach Europa und die Raffination stellen erhöhte Kostenfaktoren dar. Das Öl wird am Anbauort gewonnen, so dass nur das Öl transportiert werden muss. Die Raffination findet meist in Europa statt. Dabei werden unerwünschte Begleitstoffe, welche die rohen Öle enthalten und deren Verwertbarkeit einschränken, entfernt.



Abbildung 5: Cashewschalen (Ölgehalt ca. 39%)



Abbildung 6: Kautschuknüsse (Ölgehalt ca. 18%)



Abbildung 7: Jatrophanüsse (Ölgehalt ca. 37%)

Cashewschalen sind die Schalen von Cashewnüssen. Diese fallen beim Schälen der Nüsse in großen Mengen an. Die Schalen sind giftig und für den Verzehr vollkommen ungeeignet. Aufgrund der Tatsache, dass es sich um ein Abfallprodukt handelt, sind die Schalen sehr preiswert zu erhalten. Lediglich der Transport nach Europa würde einen erhöhten Kostenfaktor darstellen. Daher wird das Öl am Ort der Cashewnussverarbeitung durch Heißextraktion (kochen der Schalen im Öl) gewonnen, so dass nur das Öl nach Europa transportiert werden muss.

Kautschuknüsse sind die Früchte des Kautschukbaumes. Während der Saft des Kautschukbaums als Ausgangsstoff für die Kautschukherstellung genutzt wird, werden die Früchte des Baumes zurzeit in keinem nennenswerten Umfang genutzt. So entstand während des Projektes die Idee, diese Nüsse auf ihre Eignung zur Erzeugung eines Öles zu untersuchen. Kautschuknussöl ist grundverschieden zu Kautschuköl (Kautschukin) und darf nicht miteinander verwechselt werden. Kautschukin wird durch die Destillation des Kautschuks gewonnen.

Jatrophaöl wird aus den Nüssen der immergrünen Jatropha-Pflanze (auch als Brechnuss bekannt) gewonnen. Im Gegensatz zu vielen anderen Ölpflanzen wächst diese auch auf schlechten Böden und in trockenen Savannengebieten. Die Nüsse haben einen Ölgehalt von über 30%. Da das Öl ungenießbar ist, besteht nicht die Konkurrenz zu Nahrungsmitteln. Neuen Studien zufolge besteht weltweit ein Anbaupotenzial von zirka 30 Millionen Hektar.

Ölkennzahlen und deren Einfluss auf die motorische Nutzung

Es gibt zahlreiche für die motorische Nutzung entscheidende Kennzahlen. Zulässige Grenzwerte für Biodiesel sind in der Norm EN 14214 zusammengefasst. Für Pflanzenöle gibt es die DIN 51605 (Kraftstoffe für pflanzenöлтаugliche Motoren – Rapsölkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren). Darin sind folgende Kennzahlen aufgelistet.

Eigenschaften / Inhaltsstoffe	Einheit	Grenzwerte		Prüfverfahren
		min	max	
Dichte bei 15°C	kg/m ³	900	930	EN ISO 3675, EN ISO 12185
Flammpunkt nach Pensky-Martens	°C	220	-	EN 2719
Heizwert	kJ/kg	36.000	-	DIN 51900-1, -2, -3
Kinematische Viskosität bei 40°C	mm ² /s	-	36,0	EN ISO 3104
Kälteverhalten	-	-	-	Rotationsviskosimetrie (Prüfbedingungen werden erarbeitet)
Zündwilligkeit (Cetanzahl)	-	39	-	(Prüfverfahren wird entwickelt)
Koksrückstand	Masse-%	-	0,40	EN ISO 10370
Jod-Zahl	g/100g	95	125	EN 14111
Schwefelgehalt	mg/kg	-	10	ISO 20884 / 20864
Gesamtverschmutzung	mg/kg	-	24	EN 12662
Säurezahl	mg KOH/g	-	2,0	EN 14104
Oxydationsstabilität bei 110°C	h	6,0	-	EN 14112
Phosphorgehalt	mg/kg	-	12	EN 14107
Magnesium und Calcium	mg/kg	-	20	EN 14538
Aschegehalt	Masse-%	-	0,01	EN ISO 6245
Wassergehalt	Masse-%	-	0,075	EN ISO 12937

Tabelle 2: Übersicht entscheidender Kennzahlen von Öl zur motorischen Nutzung

Die wichtigsten Kennzahlen neben dem Heiz- bzw. Brennwert sind Viskosität, Jod- und Säurezahl. Diese sollen im Folgenden etwas näher betrachtet werden.

Viskosität

Zur Gewährleistung des Transports der Öle in den Kraftstoffleitungen ist die Viskosität zu beachten. Am wichtigsten ist diese allerdings für die Zerstäubung des Kraftstoffes durch die Einspritzdüse. Öle mit einer hohen Viskosität lassen sich schlecht zerstäuben, welches wiederum zu einer unzureichenden Verbrennung im Motor führt.

Ergebnisse einiger Viskositätsmessungen sind im folgenden Diagramm 1 dargestellt. Dabei zeigt sich, das Cashewschalenöl bei niedrigen Temperaturen (<70°C) eine vielfach höhere Viskosität als alle anderen Öle aufweist. Damit ist zu erwarten, dass Transport und motorische Verbrennung eine Erwärmung des Öls voraussetzen.

Der Schmelzpunkt für Palmöl liegt zwischen 30°C und 40°C. Für die Transportfähigkeit ist eine permanente Temperatur von ca. 50°C im Tank und in den Kraftstoffleitungen erforderlich.

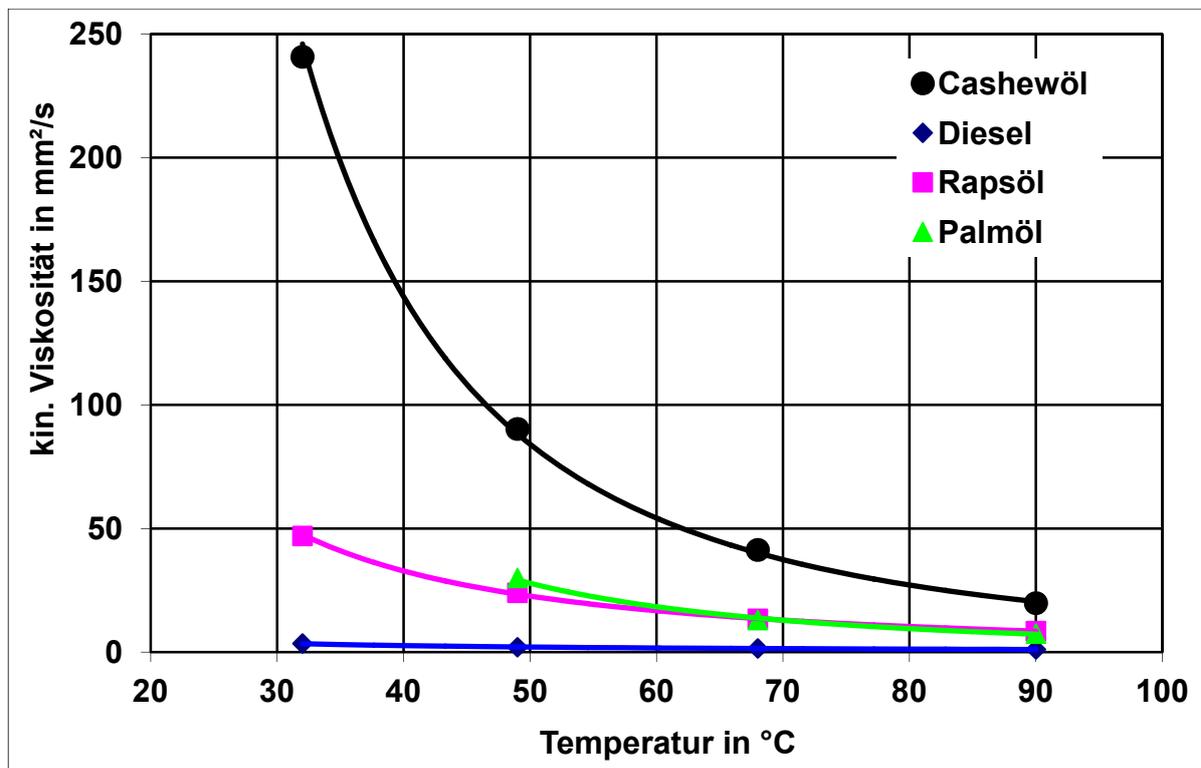


Diagramm 1: Verlauf der Viskositäten von verschiedenen Pflanzenölen im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff

Jodzahl

Die Jodzahl (IZ) ist eine chemische Kennzahl zur Charakterisierung von Fetten und Ölen. Sie ist ein Maß für den Gehalt eines Fettes an ungesättigten Verbindungen. Eine hohe Jodzahl kann zu Ablagerungen im Brennraum eines Motors führen. Dieses kann sowohl zu einer unvollkommenen Verbrennung als auch zu schweren Motorschäden führen.

Säurezahl

Die Säurezahl (SZ) ist eine chemische Größe zur Charakterisierung von sauren Bestandteilen in Fetten. Hohe Säurezahlen führen zu Korrosion und Ablagerungen im Motor. Die ermittelten freien Fettsäuren geben einen Rückschluss auf Zersetzungsprozesse oder Vorbehandlungen. Nicht raffinierte Rohöle weisen eine hohe, raffinierte Öle dagegen eine sehr kleine Säurezahl auf.

Phosphorgehalt

Da der Phosphorgehalt eine entscheidende Rolle bezüglich der Sauberkeit des Verbrennungsvorganges spielt, sollte dieser bestimmt werden. Hohe Phosphorzahlen führen zu Ablagerungen an der Einspritzdüse, Schädigungen des Oxikats und zum Anstieg der Partikelemissionen.

Ein Versuch mit vorgewärmtem unraffiniertem Cashewschalenöl zeigte nach etwa 40h eine signifikante Verkockung an den Einspritzdüsen (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9). Der Grund dafür liegt neben dem hohen Phosphorgehalt auch an der hohen Jodzahl und der geringen Viskosität von unraffinierten Cashewschalenöl.



Abbildung 8: neue Einspritzdüse



Abbildung 9: verkockte Einspritzdüse

Verwendung von Pflanzenölen in Motoren

In der folgenden Tabelle 3 sind die erläuterten Kennzahlen einiger Pflanzenöle im Vergleich zu Diesel dargestellt. Bei den Angaben der Kennzahlen ist zu beachten, ob sie sich auf rohe, teilraffinierte oder vollraffinierte Öle beziehen. Oftmals werden die Werte vermischt angegeben.

Ölsorte	mittlerer Heizwert (kJ/g)	Jodzahl -	Säurezahl (mgKOH/g)	Phosphorgehalt (mg/kg)
Palmöl	37,0*	51**	3 (Rohöl)**	5**
Rapsöl	37,6*	94 bis 113*	0,15 (raff. Öl)***	5***
Sonnenblumenöl	37,1*	118 bis 144*	4 (Rohöl)***	0,02***
Sojaöl	37,1*	114 bis 138*	0,2 (raff. Öl)***	5***
Jatrophaöl	40,5**	190**	3,5 (Rohöl)**	5**
Cashewschalenöl	34**	232**	34 (Rohöl)**	48**
Kautschuknussöl	33	138**	27 (Rohöl)**	162**
Diesel	42,5***	-	-	-

Quellen: *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., **eigene Messung, ***sonstige Literatur

Tabelle 3: Übersicht wichtiger Eigenschaften verschiedener Pflanzenöle

Es wird deutlich, dass Jatrophaöl gut in Verbrennungsmotoren genutzt werden kann. Cashewschalenöl ist zwar sehr preiswert erhältlich, kann aber in der motorischen Nutzung aufgrund zahlreicher kritischer Werte zu Problemen führen. Mit dem derzeitigen Wissensstand wird allerdings davon ausgegangen, dass Cashewschalenöl problemlos in Schwerölmotoren verwendet werden kann. Aufgrund der untersuchten Eigenschaften erscheint es möglich, Kautschuknussöl in Verbrennungsmotoren zu nutzen.

Sowohl Kautschuknussöl als auch Cashewschalenöl wurden als Rohöl untersucht. Durch Raffinieren könnten die Werte für Phosphorgehalt, Säure- und Jodzahl deutlich verbessert werden.

1.6 Energiepreise

1.6.1 bezogene Elektroenergie

Elektroenergiepreise setzen sich meist aus dem Arbeitspreis und dem Leistungspreis zusammen. Beim Arbeitspreis können tageszeitabhängige Tarife bestehen. Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird der Leistungspreis meist nicht hinzugezogen, da mit einer Ausfallzeit des BHKWs gerechnet werden muss und in dieser eine Lastspitze vorhanden sein kann.

Neben den reinen Strombezugspreisen fallen beim Stromeinkauf verschiedene Nebenkosten an. In Diagramm 2 ist die Entwicklung der Stromnebenkosten für die Industrie dargestellt. Bei einer Stromeigenerzeugung sind diese Abgaben nicht zu entrichten. Da in den nächsten Jahren von einem deutlichen Anstieg dieser Kosten ausgegangen wird, ergibt sich somit ein weiterer Anreiz für den Einsatz eines BHKWs. Die EEG-Umlage kann für verschiedene Industriezweige in Abhängigkeit des jährlichen Elektroenergieverbrauchs ab einer bestimmten Energiemenge erlassen werden.

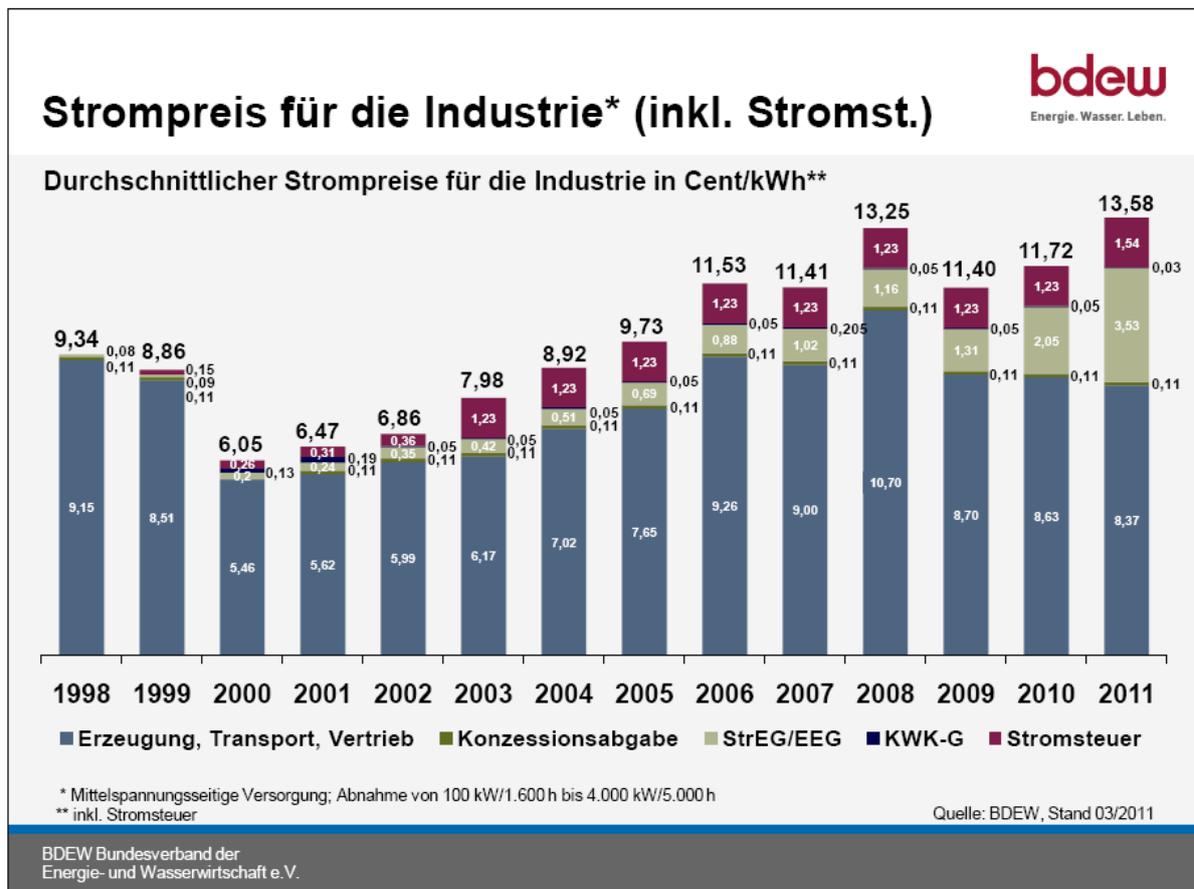


Diagramm 2: Entwicklung der Stromnebenkosten, insbesondere der EEG Umlage, BDEW 2011

1.6.2 eingespeiste Elektroenergie

Bei einer Überproduktion von Elektroenergie durch ein BHKW wird der Überschuss in das EVU-Netz eingespeist. Der spezifische Erlös ist abhängig vom eingesetzten Primärenergieträger und den damit verbundenen Förderbedingungen. Ein regenerativ betriebenes BHKW, welches mit Biogas oder Bioerdgas (bei Altanlagen auch Pflanzenöl) arbeitet, bekommt nach EEG-Richtlinien Subventionen in Form eines garantierten Verkaufspreises der eingespeisten Elektroenergie. Diese Vergütung wird nach Leistungsklassen berechnet und wird für die Dauer von 20 Jahren gewährt.

Ohne Förderung nach EEG gelten die aktuellen Verkaufspreise nach EEX („Leipziger Strombörse“). Eine Tendenz der Verkaufspreise für Elektroenergie nach EEX lässt sich im folgenden Diagramm 3 abschätzen:

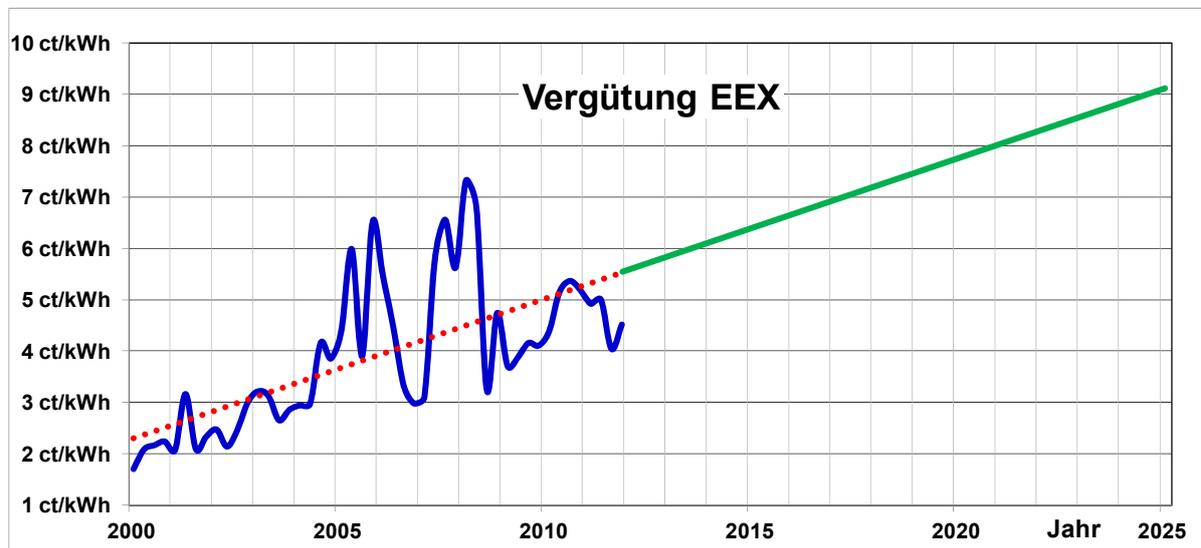


Diagramm 3: Preisprofil für Verkauf von Elektroenergie an der „Leipziger Strombörse“ (EEX)

1.6.3 Erdgas

Der Preis für Erdgas setzt sich aus einem Arbeitspreis, einem Steuer- und einem Netznutzungsanteil zusammen. Die Arbeitspreise und Netznutzungsanteile sind regional verschieden. Während die Arbeitspreise über den jeweiligen Gasversorger verhandelt werden können, sind die Steueranteile für bestimmte Zeiträume fixiert und vom Kunden nicht beeinflussbar. Der Netznutzungsanteil ist ebenfalls nicht verhandelbar. Die Berechnungsgrundlage für die Netzentgelte wird von den einzelnen Netzbetreibern jährlich festgelegt und von der Bundesregulierungsbehörde genehmigt. Die Gebühren variieren in Abhängigkeit der Abnahmecharakteristik und der Lastspitzen.

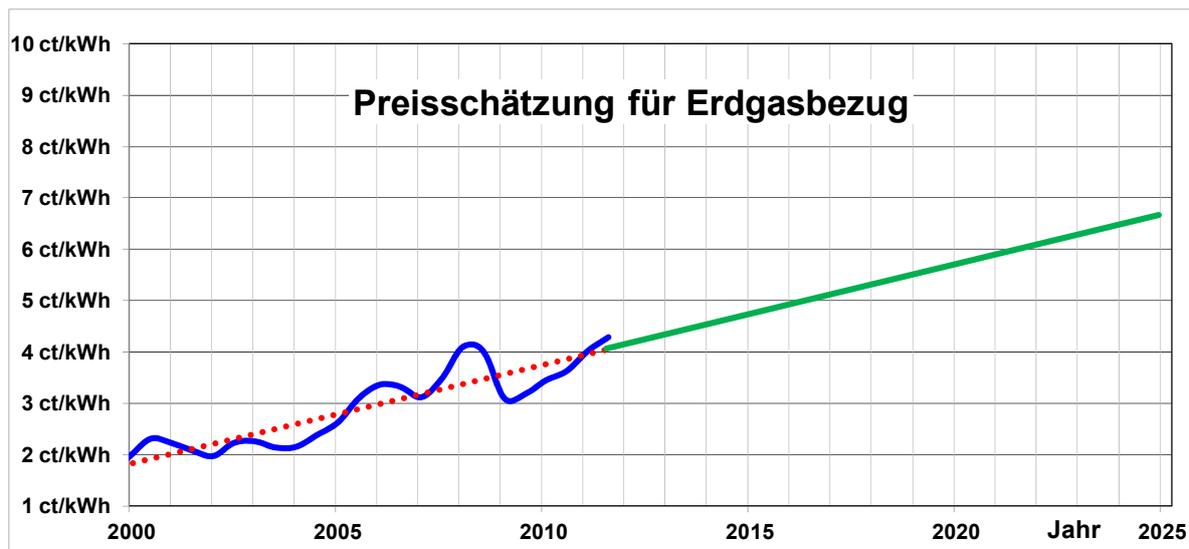


Diagramm 4: Preisprofil für den Bezug von Erdgas (inkl. Verbrauchssteuern, ohne MwSt.),
Quelle: Statistisches Bundesamt

1.6.4 Bioerdgas

Die Preise für Bioerdgas setzen sich ebenfalls aus dem Arbeitspreis, einem Steueranteil und einem Anteil für die Netznutzung zusammen. Die Steueranteile und Durchleitungsgebühren sind auch hier vom Kunden nicht verhandelbar und werden analog dem Verfahren für Erdgas ermittelt.

Da das Bioerdgas aus verschiedenen Arten von Biomasse produziert werden kann, sind unterschiedliche Arbeitspreise und somit auch unterschiedliche Bezugspreise zu entrichten. Dies wird in der Förderung nach dem EEG durch unterschiedliche Einsatzstoffvergütungsklassen bei der Biogasproduktion berücksichtigt. In der Regel orientiert sich die Preissteigerung für Bioerdgas an der Preisentwicklung für Heizöl EL oder Erdgas. Abhängig vom Lieferanten existieren verschiedene Strategien der Preisgestaltung. So können langfristige Lieferverträge (bis zu 15 Jahre) abgeschlossen werden, bei denen für bestimmte Zeiträume Preiszusicherungen ohne Steigerungsraten fixiert werden. Bei der Kopplung der Preissteigerung an den Erdgas- oder Heizölpreis wird meist nur eine anteilige Preiserhöhung vereinbart. Üblich sind hier Werte von 20%. Das heißt: Steigt der Erdgas- oder Heizölpreis um 10 %, so steigt der Bioerdgaspreis lediglich um 2%. Andere Lieferverträge legen vornherein prozentuale Steigerungsraten pro Jahr fest. Meist liegt die prozentuale Preissteigerung deutlich unter der der fossilen Energieträger. Damit ist eine sehr gute Kalkulierbarkeit der Bezugspreise für Bioerdgas auch bei steigenden Primärenergiepreisen gegeben.

Eine Auswahl von Angeboten verschiedener Lieferanten für Bioerdgas (Einsatzstoffvergütungsklasse 1) wurde ausgewertet. Die Preise (ohne Durchleitungsgebühr) lagen hierfür innerhalb des in Diagramm 5 dargestellten Bereiches. Im blauen Bereich liegen die bisher gültigen Preise (ohne Durchleitungsgebühr). Der grüne Bereich stellt eine Schätzung der künftigen Preise dar, welche auf den untersuchten Angeboten basiert.

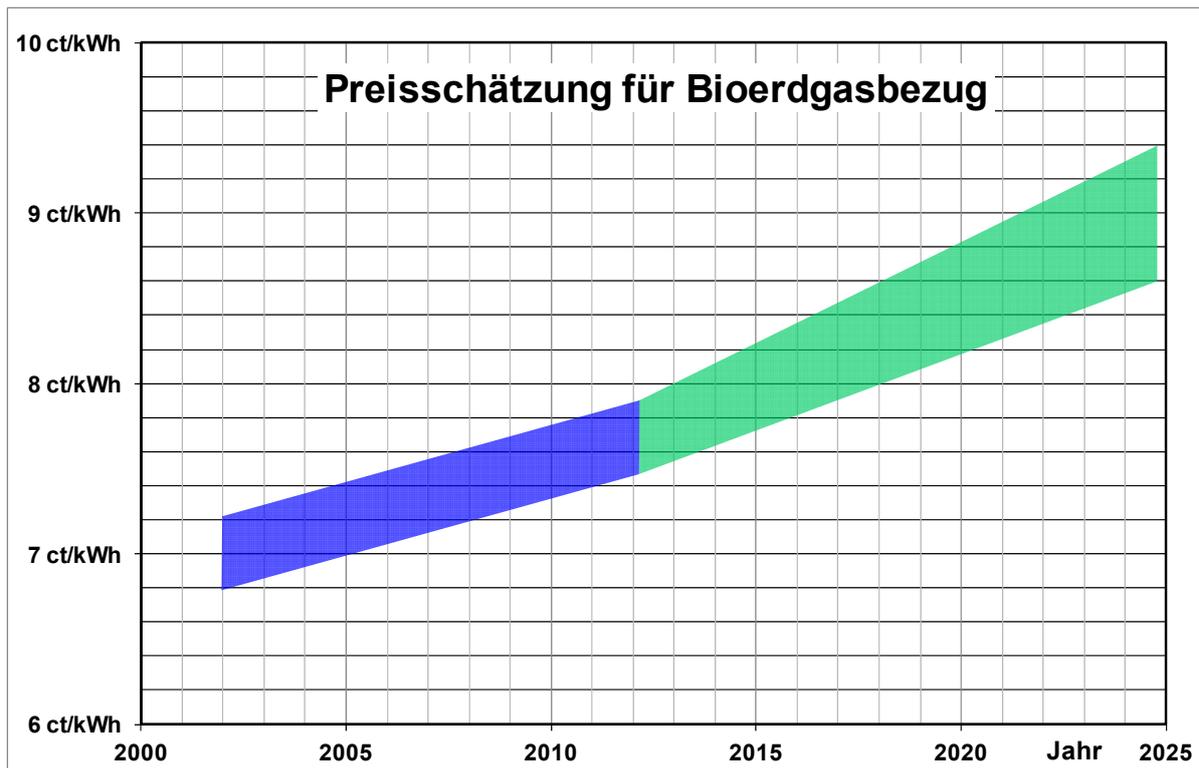


Diagramm 5: geschätzter Kostenrahmen für den Bezug von Bioerdgas (ohne Durchleitungsgebühr), (Stand 8/2012)

1.7 Gesetzliche Rahmenbedingungen

1.7.1 Fördermöglichkeiten

Ein BHKW kann grundsätzlich mit verschiedenen Primärenergieträgern betrieben werden. Sowohl Erdgas oder Biogas, als auch Heizöl oder Pflanzenöl sind möglich. Da die energetische Ausnutzung der eingesetzten Kraftstoffe sehr hoch sein kann und somit im Vergleich zum Heizkraftwerk CO_2 eingespart wird, bietet der Staat finanzielle Anreize durch spezielle Förderungen an. Beim Einsatz regenerativer Energieträger fällt die CO_2 -Einsparung deutlich höher aus, weshalb hierfür die finanziellen Anreize höher ausfallen. Bezüglich des Betriebs eines BHKWs gibt es daher zwei mögliche Varianten mit unterschiedlicher Gesetzesgrundlage. Zum einen besteht die Fördermöglichkeit über das KWK-Gesetz (Einsatz von fossilen Brennstoffen) und zum anderen über das EEG (Einsatz von erneuerbaren Brennstoffen). Weitere zu berücksichtigende Regularien sind:

- Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)
- Ökosteuern (Strom- und Energiesteuer)
- Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV)
- Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung (BioSt-NachV)
- Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG)
- Energieeinsparverordnung (EnEV)

- Treibhausgas-Emissionshandels-Gesetz (TEHG)
- Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz (BDEW)
- EU-Richtlinien
- Förderprogramme

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Gesetzliche Grundlage der Förderbedingungen regenerativ betriebener BHKWs ist das EEG. Damit wurde eine gesetzliche Basis für den Ausbau der Erneuerbaren Energien geschaffen.

Durch den Vorrang für Strom aus Biomasse bei der Einspeisung und die festgelegten Vergütungssätze über eine Laufzeit von 20 Jahren hat der Gesetzgeber sichere Investitionsbedingungen geschaffen. Allerdings sind hier Gesetzesänderungen für Neuanlagen hinsichtlich der Förderfähigkeit spezieller Betriebsstoffe als Hemmnis mit zu berücksichtigen.

Größe des BHKWs	Grundvergütung	Einsatzstoffvergütungs-klasse		Vergütung für die Vergärung von Bioabfällen	Gasaufbereitungsbonus
		I	II		
	[ct/kWh _{el}]	[ct/kWh _{el}]		[ct/kWh _{el}]	
≤ 75kW _{el}	25,0		-		3ct/kWh _{el} bis 700m _N ³ /h 2ct/kWh _{el} bis 1000m _N ³ /h 1ct/kWh _{el} bis 1400m _N ³ /h (Nennleistung der Gasaufbereitungsanlage)
≤ 150kW _{el}	14,3	6,0	8,0	16,0	
≤ 500kW _{el}	12,3	6,0	8,0	16,0	
≤ 750kW _{el}	11,0	5,0 2,5*	8,0 6,0**	14,0	
≤ 5MW _{el}	11,0	4,0 2,5*	8,0 6,0**	14,0	
≤ 20MW _{el}	6,0	-	-	14,0	
* Die Absenkung auf 2,5 ct/kWh _{el} gilt für Strom aus Rinde oder Waldrestholz					
** Die Absenkung auf 6,0 ct/kWh _{el} gilt für Strom aus Gülle (Geflügel, Rind, Schwein, Pferd, Schaf, Ziege)					

Tabelle 4: Orientierung zur Vergütung von Biogas nach dem EEG-Gesetz (Stand: 2012)

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Vergütung von Elektroenergie, welche in einem BHKW mit Biogas als Brennstoff produziert wurde. Hier gelten umfangreiche Ausnahmeregelungen, welche bei der Planung des BHKWs konkret beachtet werden sollten. Die Vergütung erfolgt nur dann in voller Höhe, wenn die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme vollständig genutzt wird. Wird die Wärme nur anteilig genutzt, verringert sich die Vergütung.

Die Preisformel für BHKWs größer 150kW_{el} ergibt sich dann wie folgt:

Vergütung = Grundvergütung + Einsatzstoffklassenvergütung + Gasaufbereitungsbonus

oder

Vergütung = Vergütung für die Vergärung von Bioabfällen + Gasaufbereitungsbonus.

Anhand der Einsatzstoffvergütungsklassen 0, I und II findet eine Bewertung der Ausgangsstoffe zur Biogasproduktion statt. Unter die Einsatzstoffvergütungsklasse 0 fallen Stoffe, die keinen Anspruch auf eine einsatzbezogene Vergütung begründen, wie z.B. Obst-, Gemüse-, Getreide-, Speisenabfälle, Überreste aus Fettabscheidern, Grünschnitt aus der Gartenpflege usw. Unter die Einsatzstoffvergütungsklasse I fallen Stoffe wie z.B. Getreide, Mais, Gras, Zuckerrüben usw. Der Anteil an Maissilage, Getreidekorn, Corn-Cob-Mix (CCM) und Lieschkolbensilage (LKS) in einer Biogasanlage darf dabei zusammen höchstens 60 Masseprozent betragen. Unter die Einsatzstoffvergütungsklasse II fallen Einsatzstoffe wie Blühstreifen, Landschaftspflegematerial, Leguminosen als Zwischenfrüchte sowie Gülle und Festmist aus der Tierhaltung.

Die Einspeisevergütung für Strom aus pflanzenölbetriebenen BHKWs ist ebenfalls im EEG geregelt. Zurzeit werden neue pflanzenölbetriebene („flüssige Biomasse“) BHKWs nicht gefördert.

Da der Strom durch die relativ hohe Vergütung nicht selbst verbraucht werden muss, wird er in der Regel eingespeist. EEG-Anlagen werden deshalb fast überwiegend in wärmegeführter Betriebsweise gefahren.

Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWK-Gesetz)

Der Betrieb eines BHKWs mit fossilen Energieträgern (Gas, Heizöl ...) unterliegt dem KWK-Gesetz. Der Betrieb nach KWK-Gesetz ist insbesondere dann interessant, wenn im Objekt ein hoher Strom- und Wärmebedarf existiert und gleichzeitig günstige Kosten für den fossilen Energieträger bestehen. Für den durch solche Anlagen erzeugten Strom wird der KWK-Bonus gezahlt. Dieser wird nur unter der Voraussetzung gezahlt, dass mindestens 70% der mit dem BHKW erzeugten Wärme genutzt werden.

KWK-Anlagen werden für insgesamt 30.000 Vollbenutzungsstunden gestaffelt nach der jährlichen elektrischen Dauerleistung mit einem Bonus gefördert. Bei kleinen Anlagen bis 50kW_{el} besteht darüber hinaus die Wahl, stattdessen eine Förderung über einen Zeitraum von 10 Jahren unabhängig von der Laufzeit des BHKWs zu beantragen. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Vergütungsklassen nach dem KWK-Gesetz.

Der KWK Zuschlag wird auch bei Eigenverbrauch des Stroms gewährt. Findet eine Einspeisung in das öffentliche Netz statt, wird der Strom zusätzlich zu den aktuellen Verkaufspreisen nach EEX („Leipziger Strombörse“) vergütet.

Größenbereich des BHKWs	KWK-Zuschlag	Förderdauer
$\leq 50\text{kW}_{\text{el}}$	5,41ct/kWh _{el}	Wahlrecht, ob 10 Jahre oder 30.000 Vollbenutzungsstunden
$> 50\text{kW}_{\text{el}}$ und $\leq 250\text{kW}_{\text{el}}$	4,00ct/kWh _{el}	30.000 Vollbenutzungsstunden (unabhängig von der Zeitdauer)
$> 250\text{kW}_{\text{el}}$ und $\leq 2\text{MW}_{\text{el}}$	2,40ct/kWh _{el}	
$> 2\text{MW}_{\text{el}}$	1,80ct/kWh _{el}	

Tabelle 5: Vergütungsklassen nach KWK-Gesetz (Stand: Juni 2012)

Anlagen, die nach dem KWK-Gesetz gefördert werden, sind oftmals nur dann wirtschaftlich, wenn Strom und Wärme annähernd komplett selbst verbraucht werden, da die Einspeisevergütung nach EEX erfahrungsgemäß zu gering ist, um die hohen Investitionskosten in einem akzeptablen Zeitraum zu amortisieren. Nur eine Wirtschaftlichkeitsanalyse mit der Dimensionierung eines BHKWs kann für die jeweilige Situation Aufschluss darüber geben.

Einschätzung der zukünftigen Situation

Mit 40% CO₂-Minderung und dem Ausbau des Anteils der Erneuerbaren Energien auf mindestens 14% hat sich die Bundesrepublik Deutschland bis 2020 ehrgeizige Ziele gesetzt. Die Rahmengesetzgebung enthält allerdings erhebliche Hemmnisse. Insbesondere die im EEG 2012 reglementierte Biokraftstoffgesetzgebung wird allgemein als widersprüchliches Signal wahrgenommen. Ebenfalls hinderlich für das Erreichen der Klimaziele ist der nunmehr gesetzlich festgelegte Atomausstieg. Trotz dieses klaren Signals für Erneuerbare Energien fehlen noch Anreize für deren aktiven Ausbau.

2012 wurde das EEG neu gefasst. Es enthält tiefgreifende Änderungen für die Verwendung von Pflanzenöl zur Energiegewinnung. Während Bestandsanlagen weiterhin eine Vergütung erhalten, sind Neuanlagen nicht mehr förderfähig. Hier wird die Politik zum existenzbedrohenden Hemmnis und lässt jegliche Kontinuität in ihrem Handeln vermissen. Selbst erbringt sie den Nachweis, dass die Abholzung des Regenwaldes nicht in der energetischen Nutzung von Palmöl zu suchen ist (Abbildung 10). Trotzdem wird die energetische Palmölnutzung politisch und medial verteufelt. Branchenweit wird gefordert, dass diesbezüglich eine Nachbesserung erfolgt.

2010 wurden 53 Mio. Tonnen Palmöl genutzt. Davon fanden über 71% in der Nahrungsmittelindustrie Verwendung. Über 24% wurden für Seifen und andere kosmetische Industrieerzeugnisse benötigt. Nur 4,7% dienen der energetischen Nutzung, also der Strom-, Wärme- und Kraftstoffproduktion.

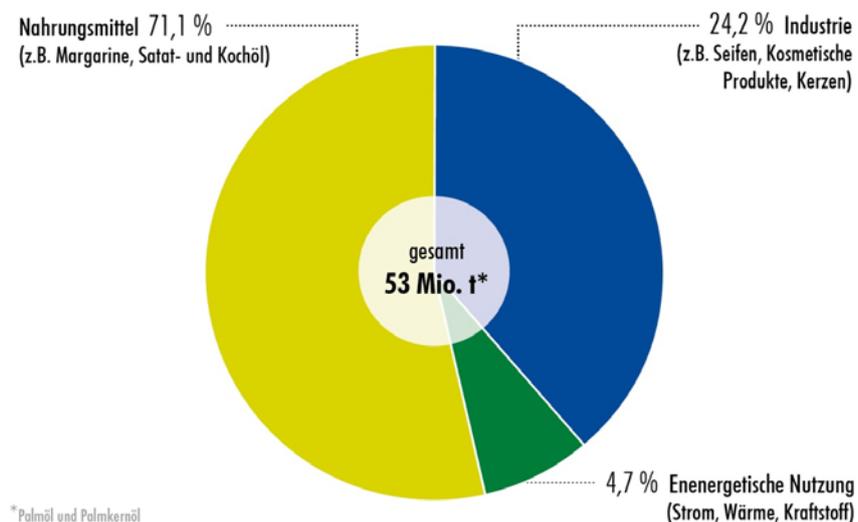


Abbildung 10: weltweite Verwendung von Palmöl (Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2011)

1.7.2 Emissionen

Die Aufstellung und der Betrieb eines BHKWs unterliegt Vorschriften. Emissionen jeglicher Art sind durch Gesetze, Richtlinien, Verordnungen und Anleitungen reglementiert. Speziell für ein pflanzenölbetriebenes BHKW stellt dabei die Einhaltung der jeweiligen Werte gegenüber einem gasbetriebenen BHKW besondere Anforderungen.

Die einzelnen Anforderungen sind abhängig vom der jeweiligen Situation. Deswegen erfolgt an dieser Stelle nur eine Aufzählung der zu beachtenden Regularien:

- Bundes-Immissionsschutzgesetz Gesetz (BImSchG)
- Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft)
- Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm)
- Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAWS)
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
- Wasserschutzgesetz (WSG)

Mit neuen oder geänderten EU-Richtlinien kann zu jeder Zeit gerechnet werden.

2 Ziegelei

2.1 Produktionsprozess einer Ziegelei für Vormauerziegel

Ziegel werden aus Ton oder tonhaltigem Lehm geformt, getrocknet und gebrannt. Ziegeleien befinden sich in der Regel sehr nah an Gruben, in welchen die Ausgangsstoffe oberflächennah abgebaut werden. Anschließend wird das Ausgangsmaterial zur Aufbereitung in die Ziegelei transportiert.

Hier wird der Ton in einem Kollergang durch schwere Walzen zerkleinert und homogenisiert. Zusätzlich können noch weitere Zusatzstoffe beigemischt werden, um gewünschte Eigenschaften einzustellen.

Das aufbereitete Rohmaterial wird auf den für die Formgebung notwendigen Wasseranteil von bis zu 27%_{atro} befeuchtet. Die Rohmasse wird durch Strangpressen gedrückt und auf die gewünschte Größe zu Ziegelrohlingen geschnitten.

Bevor die Rohlinge gebrannt werden können, muss ihnen das Wasser annähernd vollständig entzogen werden. Zur effektiveren Trocknung werden die feuchten Rohlinge auf Gestellen platziert, sodass ihre Oberfläche möglichst frei liegt. Anschließend werden sie 1 bis 2 Tage lang durch Zufuhr von Wärme getrocknet. Die getrockneten Ziegelrohlinge verlassen den Trockner mit einer Temperatur von mehr als 70°C und einer Restfeuchte von unter 3%_{atro}.

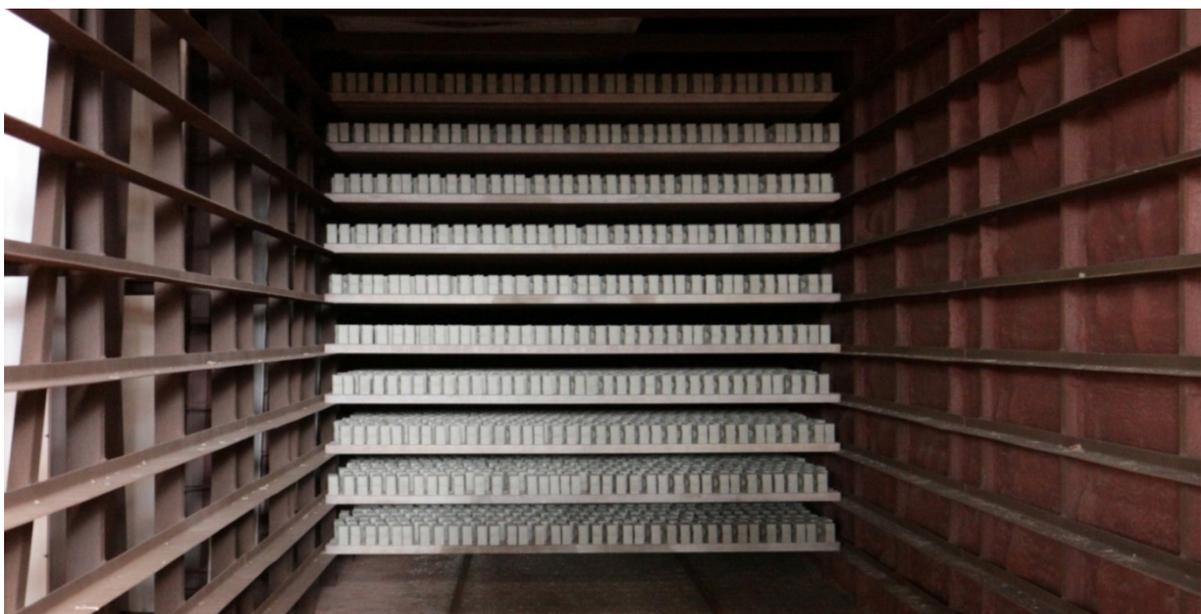


Abbildung 11: Ziegelrohlinge im Trockner

Nach dem Verlassen des Trockners werden die Ziegelrohlinge auf Ofenwagen gestapelt. Die Ofenwagen dienen zum Transport der Ziegelrohlinge durch den Tunnelofen. Zur thermischen Entkopplung des Wagengestells dienen Schichten aus Schamottesteinen. Darüber sind Formstücke aus Schamottestein so platziert, dass Kanäle zur Flammführung entstehen. Hier wird die Wärme für den Brennvorgang zugeführt, weswegen die Schamottesteine in diesem Bereich eine höhere Feuerfestigkeit besitzen müssen.



Abbildung 12: Ofenwagen mit Brennhilfsmitteln (Schamottesteine) und Ziegelbesatz

Im praktischen Betrieb kann zwischen dem Trocknen und Brennen der Ziegel eine Wartezeit entstehen. Für diese Zeit werden die Ofenwagen mit den getrockneten Ziegelrohlingen in den Vorwärmer gebracht. Mit Hilfe des Vorwärmers werden diese auf eine bestimmte Temperatur erwärmt und anschließend auf dieser gehalten. Des Weiteren wird ein Wiederanstieg der Feuchtigkeit in den Ziegelrohlingen unterbunden. Mit dieser Vorkonditionierung können später im Tunnelofen gleichbleibende Bedingungen garantiert werden. Ein weiterer Vorteil des Vorwärmers ist die zeitliche Entkopplung der Ausfahrraten der Trockner von der Einfahrrate des Tunnelofens.



Abbildung 13: Vorwärmer mit Ofenwagen

Nach einer gewissen Wartezeit, die einige Tage betragen kann, werden die Wagen mit den Ziegelrohlingen aus dem Vorwärmer sofort in den Tunnelofen eingefahren.



Abbildung 14: Blick in den leeren Tunnelofen

Im Tunnelofen wird die meiste Wärmeenergie benötigt. Er besitzt mehrere Zonen. Wenn die Ofenwagen in den Tunnelofen einfahren, befinden sie sich in der Aufheizzone und werden durch Rauchgase so weit wie möglich aufgeheizt.

Ein wichtiger Aspekt beim Aufheizen und Abkühlen ist das Durchfahren des Quarzsprungbereiches. Der Quarzanteil im Ziegelton ist bei niedriger Temperatur als Alpha-Quarz vorhanden. Bei einer Temperatur von 573°C wandelt sich dieser verbunden mit einer sprunghaften Volumenvergrößerung von bis zu 1% zu Beta-Quarz um. Um Span-

nungsrisse bzw. eine Zerstörung der Ziegel zu vermeiden, ist im Temperaturbereich des Quarzsprungs eine langsame Aufheizrate erforderlich.

Das gleiche gilt für das Durchfahren des Temperaturbereiches, in dem der Kohlenstoffausbrand, das Verbrennen organischer Reststoffe im Ziegelrohling, stattfindet.

In der darauffolgenden Brennzone werden die Ziegel zwischen 900°C und 1200°C gebrannt. Bevor die Ofenwagen den Tunnelofen verlassen, geben sie in der Abkühlzone einen Großteil ihrer Wärme an die den gesamten Tunnelofen in umgekehrter Richtung durchströmende Luft ab.



Abbildung 15: Ofenwagen beim Verlassen des Tunnelofens

Nach dem Verlassen des Tunnelofens werden die abgekühlten Ziegel von den Ofenwagen genommen, einer Qualitätskontrolle unterzogen, verpackt und gelagert.

2.2 Energiebedarf des Produktionsprozesses einer Ziegelei

2.2.1 Primär- und Elektroenergie

Die Produktion von Grobkeramik ist mit einem hohen Energieaufwand verbunden, wobei der Wärmebedarf gegenüber dem Bedarf an Elektroenergie mit dem ca. 10 bis 20-fachen sehr viel höher liegt. Im Folgenden ist die übliche prozentuale Verteilung des Verbrauchs von Gas und Elektroenergie einer typischen Ziegelei aufgezeigt.

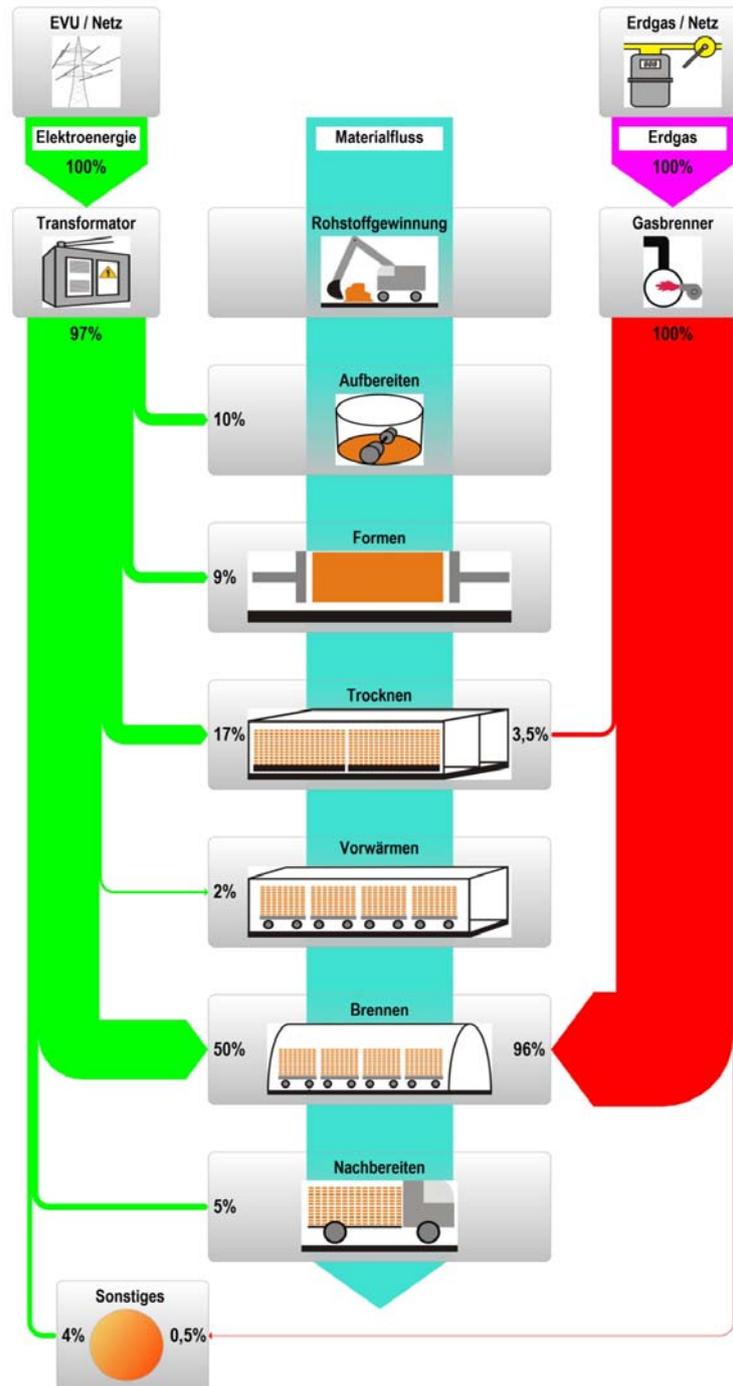


Abbildung 16: Energieflüsse von Primär- bzw. Elektroenergie im Ziegelproduktionsprozess einer typischen Ziegelei

2.2.2 Erdgasbedarf und Abwärmenutzung bzw. Wärmerückgewinnung

Der absolute Bedarf an Wärmeenergie ist stark abhängig vom Ziegelprodukt. Beispielsweise wird für die Herstellung von Hochlochziegel nur etwa die Hälfte an Energie benötigt als für die Herstellung von Vormauerziegeln.

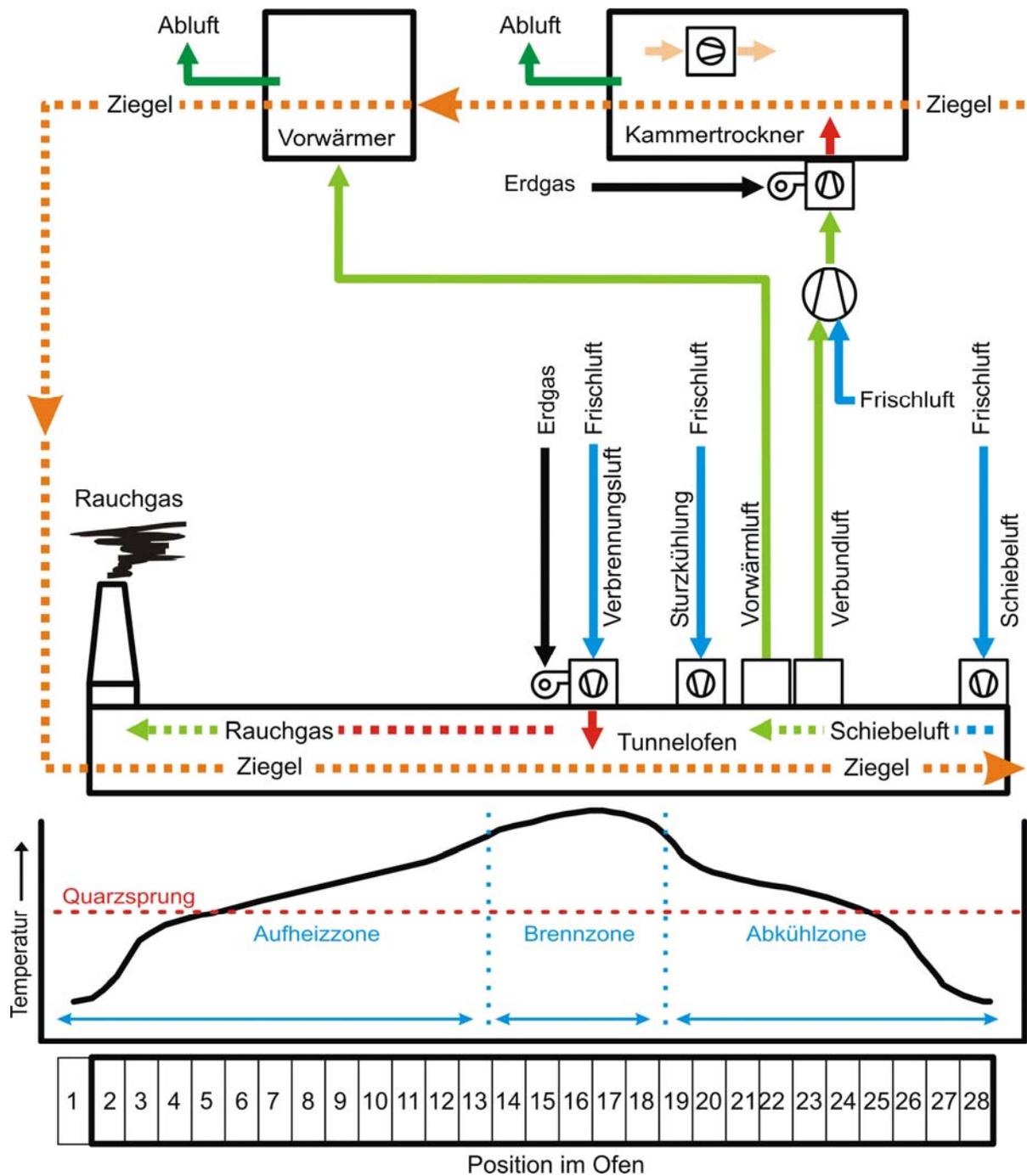


Abbildung 17: Stoffströme bei der Ziegelherstellung in der betrachteten Ziegelei

Der größte Wärmebedarf besteht beim Trocknungs- und natürlich beim Brennprozess. Die höchsten Temperaturen und damit auch Gasverbräuche entstehen in der Brennzone im Tunnelofen. Dem Trockner werden etwa ein Drittel und dem Tunnelofen zwei Drittel der benötigten Wärmeenergie zugeführt. Für das Vorwärmen wird etwa 5% der Wärmeenergie benötigt.

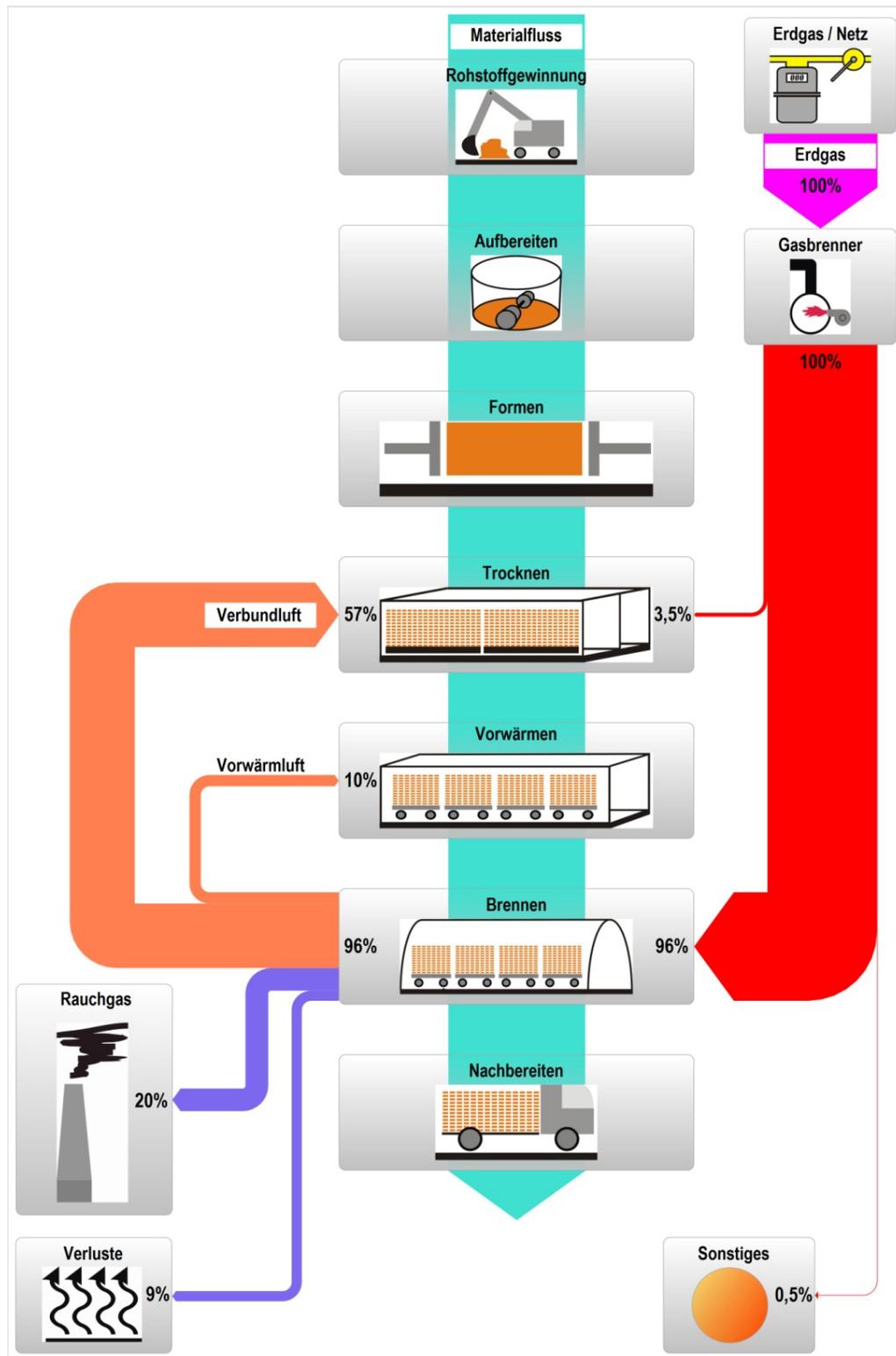


Abbildung 18: Energieflüsse zur Wärmeversorgung im Ziegelproduktionsprozess nach der Optimierung

Grundsätzlich funktioniert der Tunnelofen wie ein Wärmeübertrager nach dem Gegenstromprinzip. Ein Massenstrom wird durch die Ofenwagen mit den Ziegeln dargestellt, der entgegen gerichtete Massenstrom durch die Schiebeluft bzw. durch das Rauchgas. Ein Blick in Abbildung 17 lässt erkennen, dass die Luftführung in einem Tunnelofen sehr komplex ist. In dieser Abbildung ist des Weiteren auch der prinzipielle Temperaturverlauf der beladenen Ofenwagen in Abhängigkeit ihrer Position im Tunnelofen abgebildet.

Das Trocknen und Vorwärmen wird mit vergleichsweise niedrigen Prozesstemperaturen betrieben. Deswegen werden dort die aus der Abkühlzone des Tunnelofens abgesaugten Luftmengen genutzt. In der Abkühlzone werden dazu die Ofenwagen mit den gebrannten Ziegeln an der kalten Schiebeluft abgekühlt und im Gegenzug die Schiebeluft aufgeheizt und als Abwärme genutzt. Diese bis zu 200°C heißen Vorwärm- und Verbundluftmengen werden über entsprechende Luftkanäle zum Vorwärmer und Trockner geführt.

Neben dieser Abwärmenutzung findet eine weitere Wärmerückgewinnung im Tunnelofen selbst statt. In der Aufheizzone werden die Ofenwagen mit den Rohziegeln an den heißen Rauchgasen aufgeheizt und im Gegenzug die Rauchgase abgekühlt. Abbildung 18 zeigt die prinzipiellen Energieflüsse zur Wärmeversorgung einer typischen Ziegelei nach der Optimierung.

2.2.3 Energieanalyse der Herstellungsprozesse und der technologischen Abläufe

Generell steht vor jeder Planung eines BHKWs eine Energieanalyse der betreffenden Prozesse mit den beiden Zielen, schon im Vorfeld mögliche Einsparpotentiale optimal zu nutzen und weiter eine Ausgangssituation für eine Einbindung (Planung) und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu schaffen.

Da die Abwärmenutzung in Ziegeleien schon auf hohem Niveau erfolgt, kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass sich der Einsatz weiterer technischer Anlagen zur Wärmerückgewinnung erübrigt. Somit beschränken sich energetische Optimierungsmöglichkeiten überwiegend auf die technologischen Abläufe, wie zum Beispiel die Verbesserung des Zeitmanagements oder der Temperaturprofile.

Da das Hauptaugenmerk immer auf dem Erhalt der Produktqualität liegen sollte, sind bei den Analysen zur Optimierung nicht nur Messungen direkt in den Prozessen dienlich, sondern auch die Benutzung entsprechender Simulationsprogramme. Beispielsweise finden sich Programme zur Ermittlung von Stoffdaten und Kenngrößen für feuchte Luft und Rohlingsmassen, welche wiederum in Programmen zur verfahrenstechnischen Darstellung verschiedener Prozesse benötigt werden. Ein Beispiel für solch ein Simulationsprogramm des Instituts für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF) zeigt Abbildung 19.

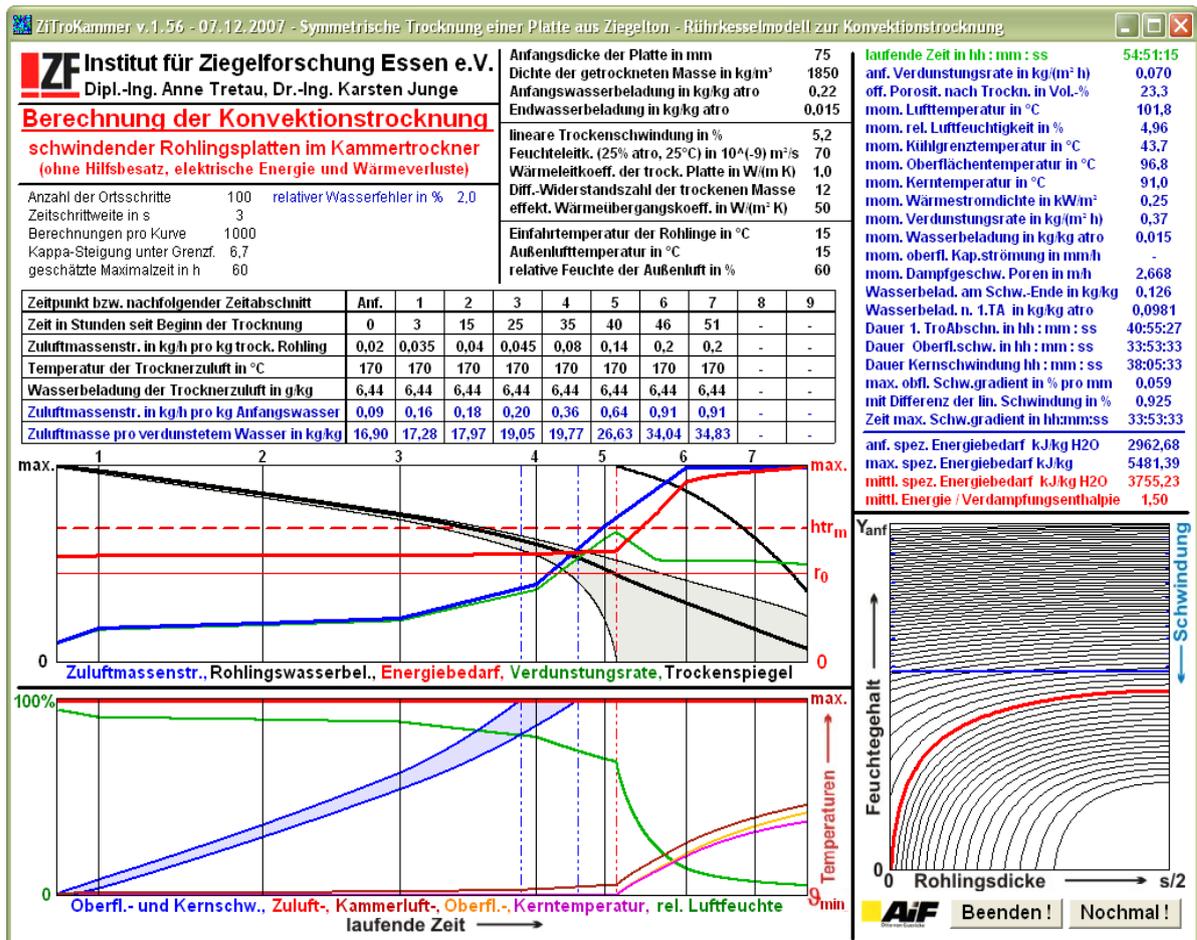


Abbildung 19: Beispiel für ein Simulationsprogramm zur Optimierung des Trockners der Ziegelei (Quelle: Institut für Ziegelforschung Essen e.V.)

3 Einbindung eines BHKWs in eine Ziegelei

Nach einer Energieanalyse und der damit verbundenen Optimierung erfolgt die Planung zur Einbindung eines BHKWs. Dabei sind drei Grundsätze zu beachten:

Ziegelqualität

Die Einbindung des BHKWs muss unter Maßgabe der Qualitäts- und Produktionssicherheit erfolgen.

Wärmerückgewinnungsgrad

Der Wärmerückgewinnungsgrad des gesamten Produktionsprozesses muss beibehalten werden.

Der Wärmerückgewinnungsgrad des Tunnelofens steigt mit sinkenden Austrittstemperaturen des Rauchgases oder der Ofenwagen.

Eine Vorwärmung der Schiebeluft hingegen wirkt sich negativ aus. Diese soll die Wärme der Wagen aufnehmen.

Ebenso negativ kann sich eine zu hohe Eintrittstemperatur der Ofenwagen auswirken, da die Gefahr besteht, dass sich die Austrittstemperaturen des Rauchgases erhöhen.

Abnahmemöglichkeiten für Energie

Es muss Abnahmemöglichkeiten für Niedertemperaturwärme (Motorkühlung), Hochtemperaturwärme (Abgaswärme) und Elektroenergie geben. Alle drei genannten Energien werden gleichzeitig erzeugt (siehe Kapitel 1.2, S.3).

Der Verbrauch von Elektroenergie muss bei nach KWKG-Gesetz geförderten BHKWs bei der Planung beachtet werden. Bei der Förderung nach EEG ist dies nicht der Fall, da das EVU-Netz einen unendlichen Verbraucher darstellt.

Die Niedertemperaturwärme aus der Motorkühlung eignet sich für Wärmeabnehmer, welche Temperaturen bis ca. 85°C benötigen. Zwingend hierbei ist, dass die Rücklauftemperaturen zum BHKW ein Maximum nicht überschreiten dürfen, da sonst keine Motorkühlung stattfinden kann. In der Regel liegen diese Temperaturen bei 70°C.

Die Hochtemperaturwärme des Abgases kann bei direkter Nutzung mit Temperaturen bis ca. 500°C genutzt werden. Grundsätzlich kann die Hochtemperaturwärme auch in die Prozesse, welche Niedertemperaturwärme nutzen, eingebracht werden.

In Abbildung 20 sind 5 mögliche Punkte für die Einbindung der Abwärme des BHKWs aufgezeigt.

1. Tunnelofen (anstelle der Gasbrenner)
2. Verbrennungsluftvorwärmung für die Gasbrenner des Tunnelofens
3. Verbundluft
4. Trockner (Regelenergie anstelle der Gasbrenner)
5. Vorwärmer

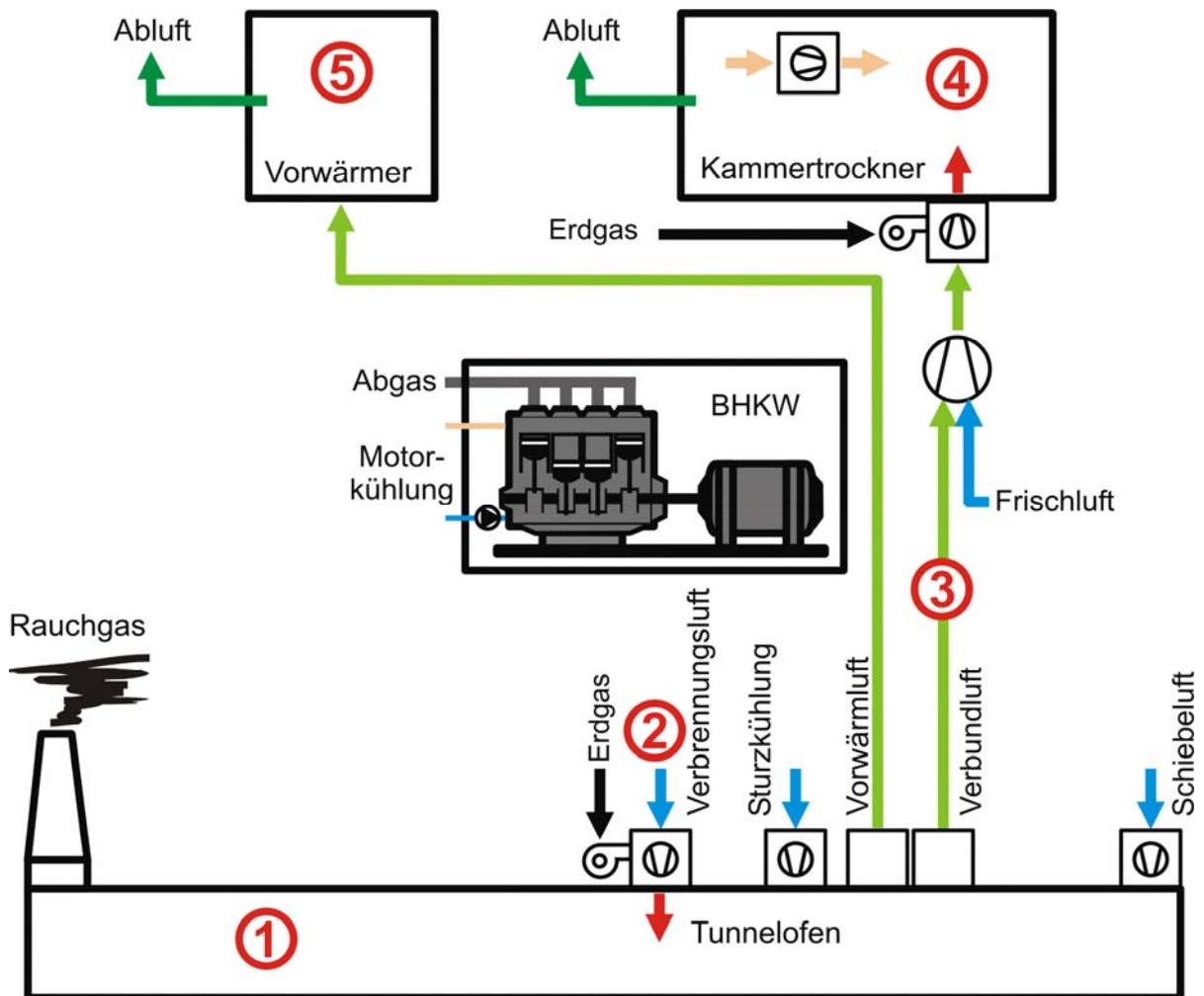


Abbildung 20: Positionen der untersuchten Stellen für die Einbindung der Abwärme des BHKWs

3.1 Einbindung der BHKW Abwärme in den Tunnelofen

Eine direkte Einleitung der BHKW-Abgase in den Tunnelofen kann nur in Bereichen stattfinden, in denen die Ofentemperatur unter der Abgastemperatur des BHKWs liegt. In den übrigen Bereichen würde das BHKW-Abgas zu einer Abkühlung der Tunnelatmosphäre führen. Im Bereich der Ofenwagenpositionen 2 bis 4 sind die Ofentemperaturen entsprechend niedrig (siehe Abbildung 21). Allerdings wäre dort der Nutzen einer Abgaseinleitung auf Grund der Nähe zur Rauchgasabsaugung nur gering. Der Wärmerückgewinnungsgrad würde sich verschlechtern, da sich das Rauchgas nicht mehr entsprechend an den kühleren Ziegeln abkühlen könnte und folglich den Ofen mit höherer Temperatur verlassen würde. Insgesamt würden damit die Rauchgasverluste ansteigen.

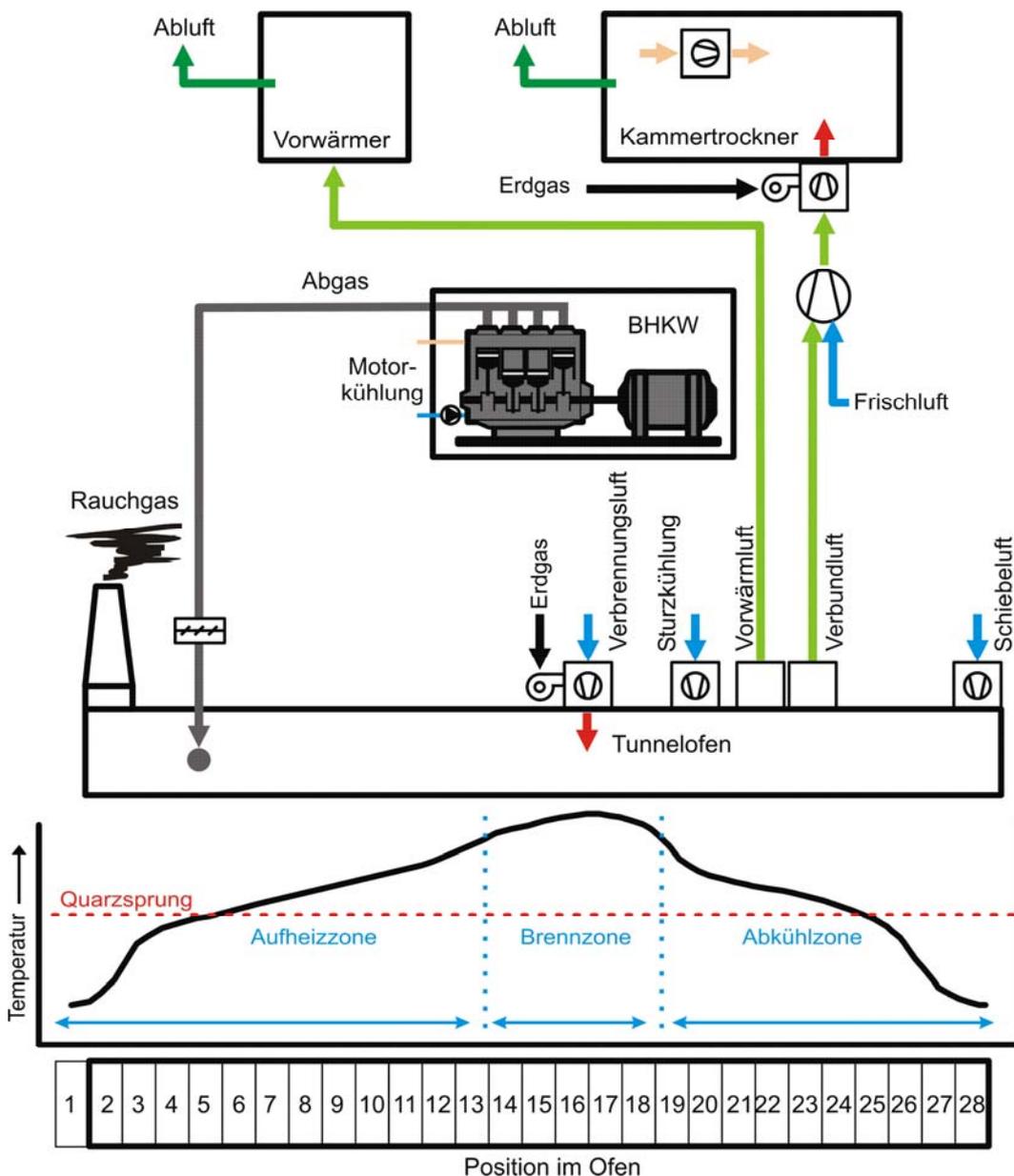


Abbildung 21: Einbindung der BHKW-Abwärme in den Tunnelofen

Im Ofen selbst müsste die Abgaseinleitung in Höhe der Brennhilfsmittel realisiert werden. Um eine Regelbarkeit der BHKW-Abgaswärme zu erreichen, sollten beidseitig vom Ofen mehrere Öffnungen in die Ofenwand eingebracht werden. Ebenfalls zum Zwecke der Regelbarkeit, und um eine Rückkopplung auf den Motor zu verhindern, müssten hochtemperaturbeständige Klappen an jedem Einlass vorgesehen werden. Somit würde die direkte Einleitung des ca. 500°C heißen BHKW-Abgases an lüftungstechnische Geräte und Vorrichtungen generell sehr hohe Anforderungen stellen und zu hohen Kosten dieser Einbindungsvariante führen.

Bei Auslegung der Abgaszuleitung ist zu beachten, dass der maximale Abgasgegen- druck des Motors (40...50mbar) durch Strömungswiderstände in den Abgaszuleitungen nicht überschritten wird. Da die Abgase über beide Ofenseiten eingeleitet werden müssten, wäre auf einen Druckabgleich zu achten. Die Abwärme aus der Motorkühlung des BHKWs kann aufgrund der geringen Temperatur nicht direkt in den Tunnelofen eingebracht werden.

Eine Substitution von Gasbrennern durch die Abgaseinleitung aus einem BHKW würde zur Einleitung von deutlich höheren Gasvolumenströmen in der Aufheizzone des Tunnelofens führen. Es wäre etwa das 6-fache Gasvolumen erforderlich, um die gleiche Energiemenge wie mit den Gasbrennern durch die Abgase eines BHKWs in den Ofen einzubringen. Für die Verbrennung von 10kWh Erdgas, dies entspricht einem Volumen von 1m_n^3 , sind etwa 10m_n^3 Luft erforderlich. Um die gleiche thermische Energie in Form von unbrennbaren Gasen in den Ofen einzubringen, sind hingegen mindestens 63m_n^3 (von ca. 60°C auf die Abgastemperatur von 580°C) erforderlich. Damit der aus sicherheits- und verfahrenstechnischen Gründen im Ofen geforderte Unterdruck erhalten bleibt, müsste der abgesaugte Rauchgasvolumenstrom um diesen Betrag erhöht werden. Dies würde die Ofenströmung derartig beeinträchtigen, dass der ordnungsgemäße Brennprozess nicht mehr gewährleistet werden könnte.

Im Bereich der Abgaseinleitung lässt sich eine Reduzierung des Gaseinsatzes mit Sicherheit realisieren. Der drastisch erhöhte Rauchgasvolumenstrom kann aber auch Auswirkungen auf die anderen Zonen des Ofens haben, wodurch Rückkopplungseffekte auftreten können, die sich in einer Erhöhung der Rauchgastemperatur im Einleitungsbereich äußern. Durch eine Regelung ist dem sehr schwer entgegenzutreten. Das Risiko von Qualitätseinbußen wäre entsprechend hoch.

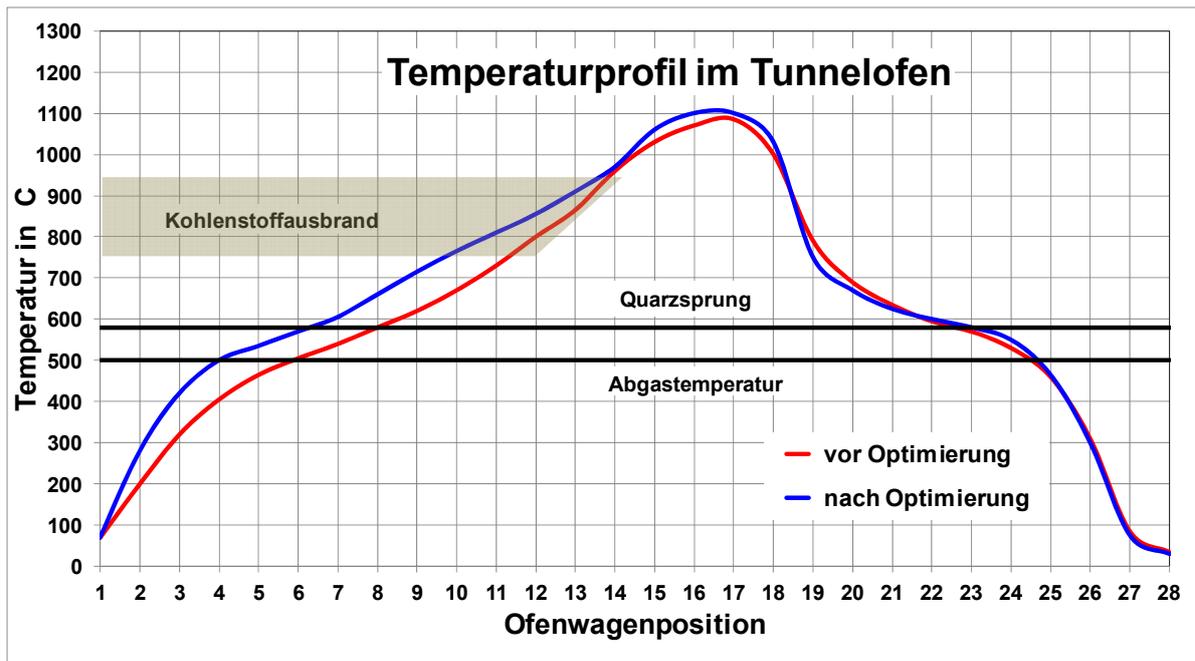


Abbildung 22: Temperaturprofile im Tunnelofen vor und nach der Optimierung

Zur Absaugung der höheren Rauchgasvolumenströme müsste zusätzlich ein größerer Ventilator eingesetzt werden.

Eine direkte Einleitung der Abgase in den Tunnelofen (siehe Abbildung 21) wird aus den erläuterten Gründen nicht empfohlen und wurde im Rahmen des Projektes aufgrund des hohen technischen Risikos und den geringen Erfolgsaussichten nicht erprobt.

3.2 Nutzung der BHKW-Abwärme für die Verbrennungsluftvorwärmung des Tunnelofens

Eine weitere Möglichkeit der Nutzung der Motorabwärme am Tunnelofen würde in der Vorwärmung der Verbrennungsluft bestehen. Die Verbrennungsluft wird dem Ofen über Brennerlanzen zugeführt. Die Brennerlanzen bestehen aus zwei koaxialen Rohren. Im Innenrohr strömt das Erdgas und im äußeren Ringspalt die Luft. Dieser Aufbau der Brennerlanzen ermöglicht eine Kühlung durch die Verbrennungsluft. Weiterhin wird mit Hilfe der Verbrennungsluft die Flamme bzw. das Flambild eingestellt. Zu wenig Verbrennungsluft verursacht zu kurze Flammen, wodurch die Ziegel nicht gleichmäßig erwärmt bzw. gebrannt werden.

Da die Verbrennungsluft meist zentral bereitgestellt wird, kann durch einen Wärmeübertrager die Verbrennungsluft aufgewärmt werden. Bei Nutzung der Motorabwärme könnte die Erwärmung vom Außentemperaturniveau auf die maximale Kühlkreislauf-temperatur des BHKWs erfolgen. Die Nutzung der Motorabwärme könnte durch ein einfaches Heizregister mit entsprechender Leistung ohne großen Aufwand leicht umge-

setzt werden. Im konkreten Fall der beispielhaft untersuchten Ziegelei könnten ca. 2800kg/h Verbrennungsluft von 35°C auf 85°C erwärmt werden. Dazu wäre theoretisch eine Leistung von 39kW_{th} erforderlich. Bei 3MW_{th} Ofenleistung entspräche dies einer Energieeinsparung von 1,3%.

Bei der Nutzung der Energie aus den BHKW-Abgasen könnte abhängig vom Brenner-typ die Verbrennungsluft auf bis zu 400°C aufgeheizt werden. Es müsste aber sicher-gestellt sein, dass Brennerlanze, Luftzuführung und Wärmedämmung der erhöhten Temperaturbelastung standhalten können. Die Erwärmung der zugeführten Luft würde mittels Gas-Gas-Wärmeübertrager erfolgen. Hierbei müsste das Material des Wärmeübertragers für partielle Kondensation geeignet sein. Der Ventilator muss zur Vermeidung von Überhitzung vor dem Wärmeübertrager angeordnet werden. Deswei-teren ist zu beachten, dass mit einer Vorwärmung der Verbrennungsluft eine erhebliche Reduzierung der Dichte einhergeht. Infolge dessen müssen für gleichbleibende Verbrennungsluftmassen deutlich vergrößerte Rohrquerschnitte für die Zuleitungen eingesetzt werden. Die genauen Dimensionen sind für den konkreten Einsatzfall zu berechnen.

Bei der Erwärmung der Verbrennungsluft durch die BHKW-Abgase auf 400°C würde die Einsparung im Fall der untersuchten Ziegelei bei etwa 280kW_{th} liegen. Dies ent-spräche einer Reduzierung des Gesamtverbrauches von 9%.

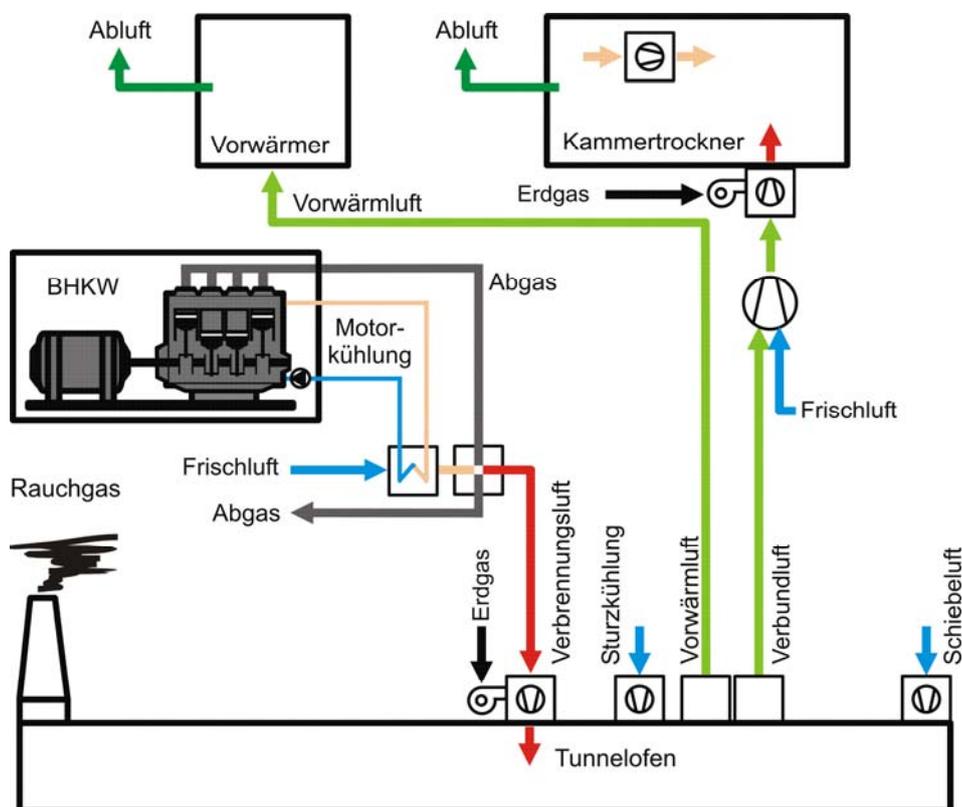


Abbildung 23: Einbindung der gesamten BHKW-Abwärme zur Vorwärmung der Verbrennungsluft des Tunnelofens

3.3 Einbindung der BHKW-Abwärme in die Verbundluft

Die Einbindung der Wärme aus dem BHKW in die Verbundluft ist von der Betriebsweise der betrachteten Ziegelei abhängig. So gibt es Betriebe, in denen die Trockner ausschließlich mit Verbundluft betrieben werden. Das heißt, die anfallende Verbundluft deckt den Wärmebedarf vollständig. In diesem Fall weitere thermische Energie in die Verbundluft einzubringen brächte keinerlei Einsparung und wäre nicht zielführend. Der beschriebene Fall liegt meist dann vor, wenn eine ausreichend große Trocknerkapazität vorhanden ist, so dass der Trockenprozess selber verlängert und dem Energieanfall angepasst werden kann.

Ist dies nicht der Fall, benötigt der Trockner zusätzliche Energie, die über Gasbrenner eingebracht wird. Würde man in diesem Fall die Verbundluft thermisch aufwerten, könnte der Gasverbrauch der Brenner im gleichen Zuge verringert werden. Möglich wäre dies durch eine direkte Einleitung der BHKW-Abgase in die Verbundluft. Sollte keine weitere Nutzungsmöglichkeit für die Abwärme des Motors vom BHKW gegeben sein, könnte zusätzlich die Zuführung von Frischluft in die Verbundluft erfolgen. Dies hätte eine Aufwärmung der Frischluft zur Folge.

Sollte es aber Zeiten geben, in denen nicht getrocknet und folglich keine Verbundluft benötigt wird, könnte auch die anfallende Abwärme aus dem BHKW nicht genutzt werden. Der Nutzen des BHKWs würde sich dabei um diese nicht genutzte Wärmemenge verringern.

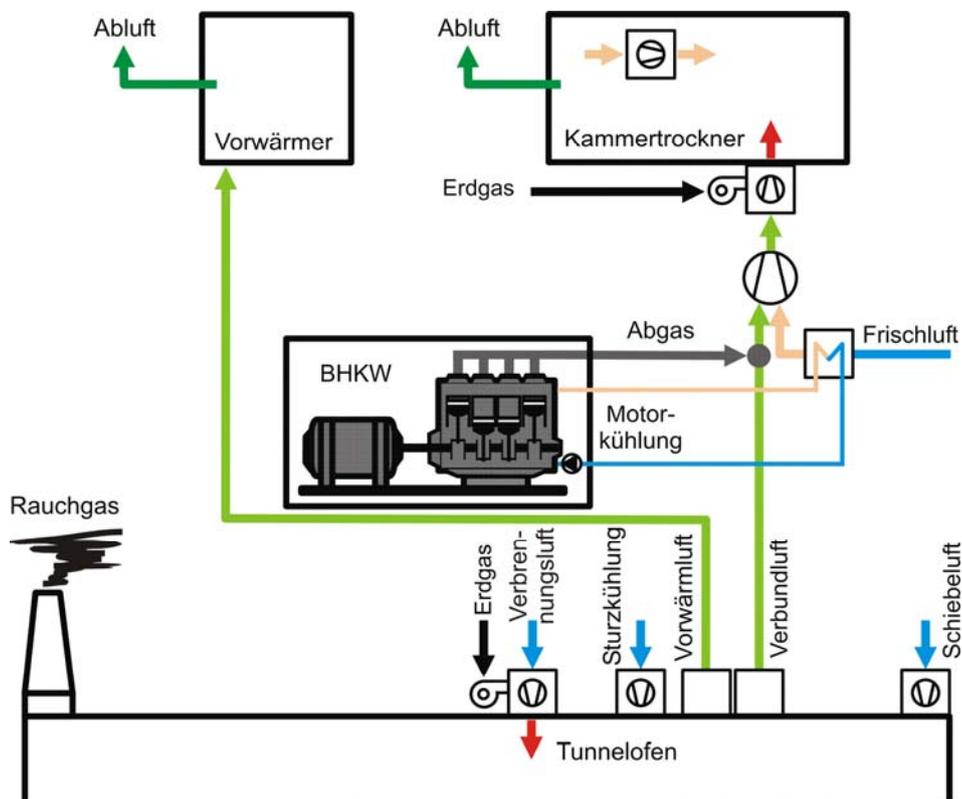


Abbildung 24: Einbindung der Abwärme des BHKWs in die allgemeine Verbund- bzw. Frischluft der Trockner

Der Vorteil dieser Einbindung läge insbesondere darin, dass die gesamte Trocknerregelung unverändert beibehalten werden könnte. Bei dieser sehr kostengünstigen Variante wäre nur eine standardisierte Abgasleitung nötig.

3.4 Einbindung der BHKW-Abwärme in den Trockner

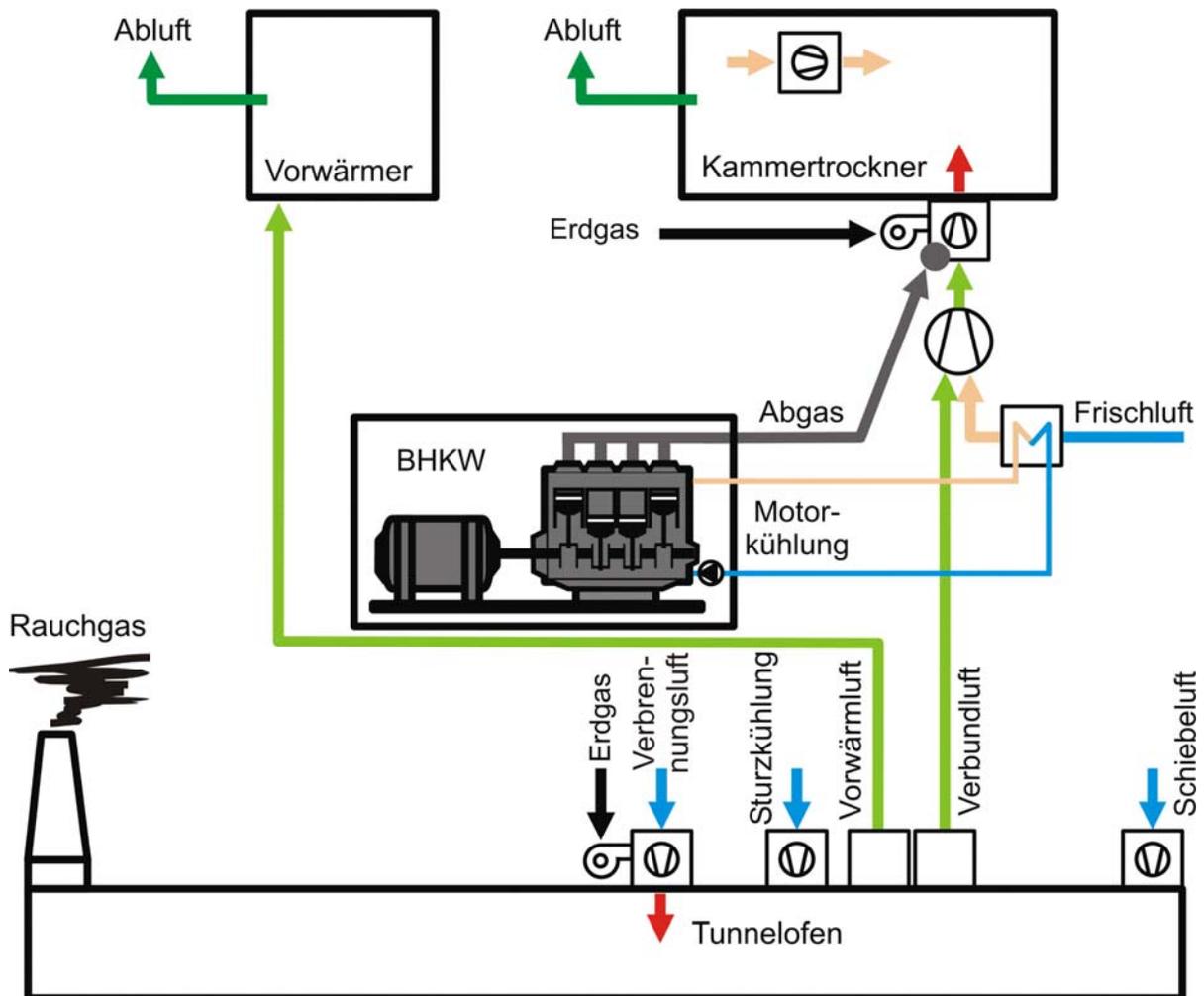


Abbildung 25: Einbindung der Abwärme des BHKWs in die Verbund- bzw. Frischluft eines Trockners

Alternativ könnten die zur Temperaturregelung eingesetzten Gasbrenner am Trockner direkt ersetzt werden. Dazu müsste die Abgasleitung des BHKWs an jede einzelne Mischkammer der Kammertrockner angeschlossen und mit einer motorisch gesteuerten Hochtemperaturabgasklappe versehen werden. Bei zusätzlichem Energiebedarf würde die Klappe geöffnet und die BHKW-Abgase könnten dem Trockner zugeführt werden. Vom Standort des BHKWs bis zu den Mischkammern wären allerdings längere Leitungswege zu überwinden. Der dadurch entstehende Druckverlust müsste bei der Rohrdimensionierung berücksichtigt werden. Gleiches gälte für die Hochtemperatur-

Hat der Tunnelofen einen baulich getrennten Vorwärmer oder Warmhalter, so wird dieser in der Regel mit Verbundluft oder Erdgas beheizt. Die Abwärme eines BHKWs könnte idealerweise diese Energiemenge komplett ersetzen. Die nicht mehr benötigte Verbundluft könnte für die Trockner genutzt werden. Der Aufwand der Einbindung wäre gering und würde mit Hilfe von Heißluftgebläsen erfolgen. Eine Einbringung der Energie über statische Strahlungsheizflächen ist nicht möglich, da die Ziegel im Vorwärmer bereits auf dem Ofenwagen stehen und sehr dicht aufgestapelt sind. Die Beheizung mit Strahlungsheizkörpern würde nur die jeweils äußere Ziegelreihe erfassen und damit keine effektive Erwärmung des gesamten Ziegelbesatzes ermöglichen. Da im Vorwärmer ein niedriges Temperaturniveau vorherrscht, wäre der Einsatz des BHKW-Kühlwassers zu empfehlen. Es könnte allerdings auch das Abgas direkt in den Vorwärmer eingeleitet werden.

Würden die Ofenwagen mit Ziegelbesatz durch den Einsatz eines BHKWs wärmer in den Tunnelofen gefahren, könnten die Rauchgase des Ofens diesen u.U. wärmer verlassen als ohne BHKW-Vorwärmung, da die Abkühlung der Abgase an den nun nicht mehr so kalten ungebrannten Ziegeln weniger effektiv erfolgen würde. Blicke die Ofeneinfahrtstemperatur allerdings konstant, würde der Tunnelofen nicht beeinflusst.

3.6 Einbindung der erzeugten Elektroenergie

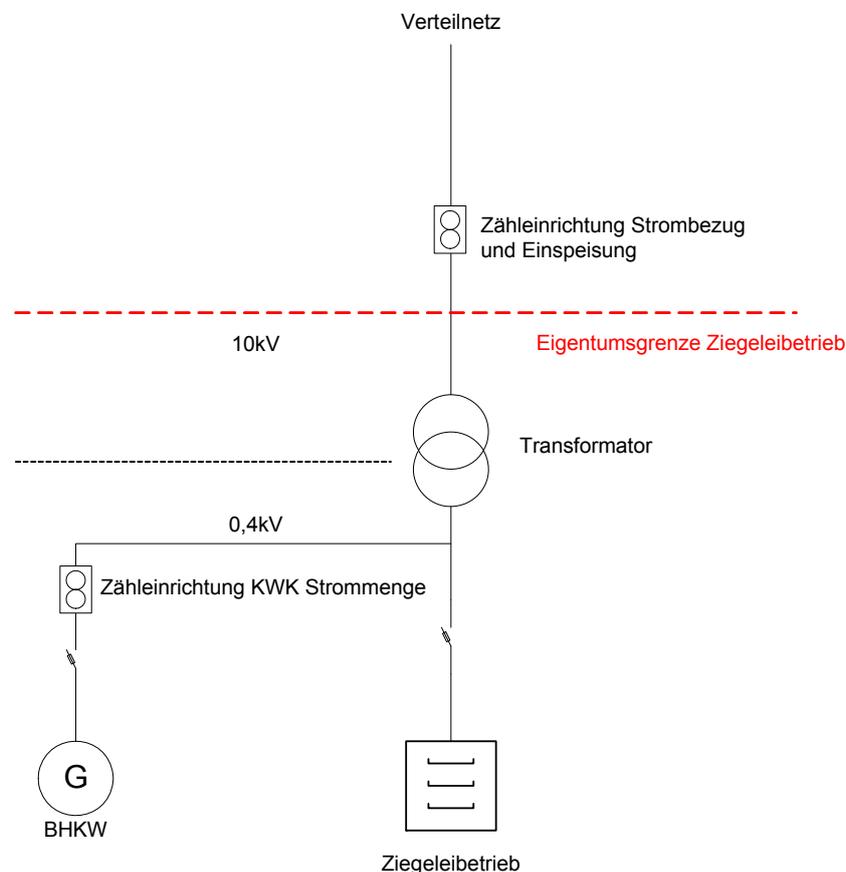


Abbildung 27: Einbindung eines KWK BHKWs auf Niederspannungsebene

Der vom BHKW produzierte Strom sollte in Abhängigkeit von Brennstoff und Wirtschaftlichkeit verkauft bzw. komplett selbst verbraucht werden. Die elektrische Einbindung wäre in beiden Fällen relativ einfach möglich. Ein BHKW, welches den erzeugten elektrischen Strom ins Netz des EVU einspeist, benötigt einen Einspeise- bzw. Zweirichtungszähler. Ziegeleien haben hohe elektrische Anschlussleistungen, sodass ein zusätzlicher Transformator für das BHKW im Normalfall nicht notwendig ist. Die Einbindung kann entsprechend Abbildung 27 erfolgen.

Einen Sonderfall kann die Einbindung einer EEG Anlage darstellen, wenn sich der installierte Transformator im Eigentum des Ziegeleiunternehmens befindet und die Elektroenergiemessung auf Mittelspannungsebene (10kV) erfolgt. In diesem Fall kann das EVU auch eine Zählung der eingespeisten Elektroenergie auf Mittelspannungsebene fordern. Diese wäre nur mit einem zusätzlichen Transformator möglich. Diese Kosten würden die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflussen und müssten unbedingt in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt werden. Die Einbindung müsste dann entsprechend der Abbildung 28 erfolgen.

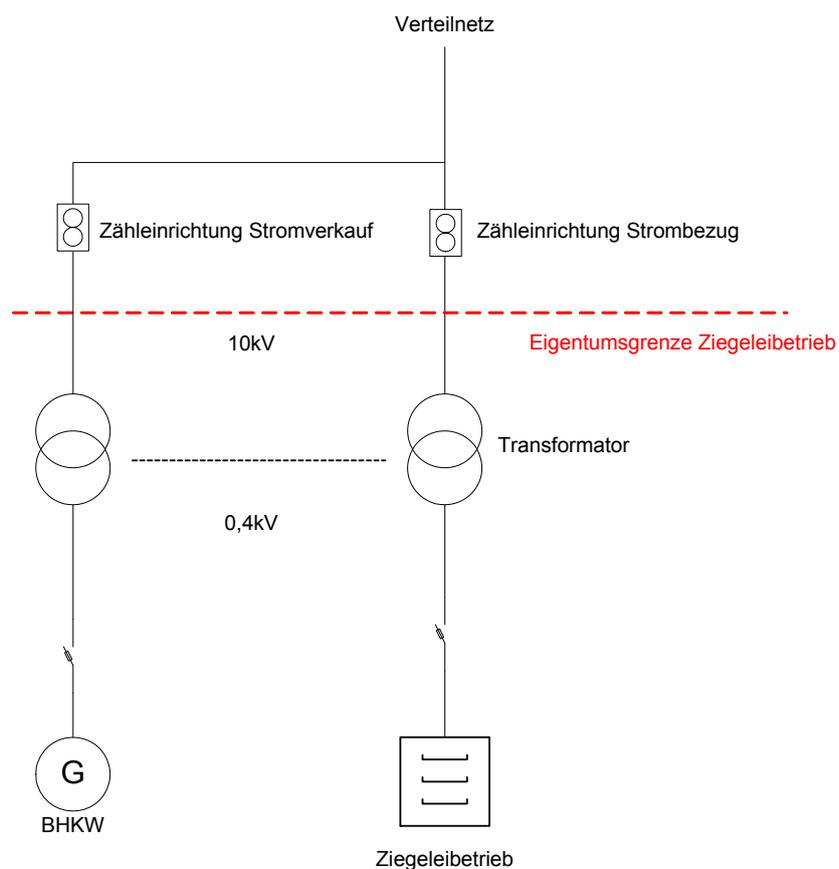


Abbildung 28: Einbindung eines EEG BHKWs auf Mittelspannungsebene

3.7 Beeinflussung der Ziegelqualität durch die direkte Einbindung der Abgasabwärme eines BHKWs

Bei Betrachtung der direkten Einbindung der Abgasabwärme eines BHKWs in die Verbundluft und den Trockner stellt sich natürlich die Frage nach einer möglichen negativen Beeinflussung der Ziegelqualität durch die Abgase des BHKWs. Dazu wurden im Rahmen des dieser Veröffentlichung zu Grunde liegenden Projektes umfangreiche Untersuchungen mit Versuchsbränden durchgeführt. Mit Hilfe eines Pflanzenöl- / Diesel-BHKWs wurden Ziegel getrocknet und nach dem anschließenden Brand auf ihre Qualität hin untersucht.

Wie in Abschnitt 1 dargestellt, werden bei dem Betrieb eines BHKWs verschiedene Schadstoffe frei. Zum großen Teil sind das die gleichen Verbindungen, die auch bei der Verbrennung von Erdgas entstehen. Der Unterschied zur Verbrennung von Erdgas besteht darin, dass bei der Verbrennung von Diesel/Heizöl bzw. Pflanzenöl Ruß (Kohlenstoff) entsteht. Dieser setzt sich im Abgassystem, aber auch auf den zu trocknenden bzw. zu erwärmenden Ziegelrohlingen ab. In Versuchen wurde dies bestätigt.



Abbildung 29: Nach dem Trocknen mit schwefelarmem Heizöl (unterer Ziegel) ist im Vergleich zum konventionell getrockneten Ziegel (oben) deutlich die nicht verfärbte Auflagefläche, mit der der Ziegelrohling auf dem Trocknergestell auflag, zu sehen.

Die nach dem Trocknen festgestellte Verfärbung war nach dem Brennen der Ziegel vollständig verschwunden. Das heißt, die Verfärbung der Ziegel durch den im Abgas enthaltenen Ruß hatte keinen Einfluss auf die Ziegelqualität.

Während der Versuche kam es in der Trockenkammer zu deutlichen Rußablagerungen. Diese Verschmutzungen ermöglichen keinen Dauerbetrieb eines BHKWs zur Ziegeltrocknung. Daher wurde in einem nächsten Schritt versucht, die Abgase eines Diesel- / Pflanzenöl BHKWs mit einem Partikelfilter zu reinigen.

Reinigung der BHKW-Abgase zur Nutzung dieser für die Ziegel Trocknung



Abbildung 30: Partikelfilter (Firma Fischer)



Abbildung 31: Partikelfilter, eingebaut



Abbildung 32: Partikelfilter, ausgebaut (externe Regeneration)

Während Gasmotoren (auch Bio-, Klär- und Deponiegasmotoren) nur mit einem Katalysator zur Minderung von Stickoxiden (NO_x) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) auszuführen sind, müssen Dieselmotoren zusätzlich mit Partikelfiltern ausgerüstet werden. In der Praxis sind SCR- und CRT-Systeme am stärksten verbreitet. Bei SCR-Katalysatoren (selektive katalytische Reduktion) wird synthetisch hergestellter Harnstoff in den Abgasstrom eingespritzt. Dies führt zur Minderung der Stickoxide um bis zu 90%. Der Harnstoff wird im Rahmen der turnusmäßigen Wartung nachgefüllt oder als Additiv dem Kraftstoff zugesetzt.

Der CRT-Partikelfilter (kontinuierlich regenerierende (Partikel-) Falle) reduziert sowohl gasförmige Schadstoffe wie Kohlenmonoxid (bis zu 95%) und Kohlenwasserstoffe (bis zu 90%) als auch bis zu 99% der im Abgas enthaltenen Partikel. Die Partikel werden dabei zunächst gefiltert und zusammen mit den gasförmigen Stoffen in oxidierender Atmosphäre zu Kohlendioxid und Stickstoffoxid katalytisch umgewandelt. Die Filtration erfolgt durch die erzwungene Durchströmung der porösen Kanalwände des monolithischen Blocks, welcher beispielsweise aus Siliziumcarbit besteht. Die mikroskopischen Poren der Kanalwände halten bis zu 99% des Rußes zurück. Dieser muss kontinuierlich oder in regelmäßigen Abständen nachverbrannt (regeneriert) werden, um eine Erhöhung des Abgasgedruckes zu vermeiden. Folgende Möglichkeiten der Regeneration sind möglich:

- Regeneration durch Additivzugabe zum Treibstoff (Harnstoff)
- externe Regeneration (Brennofen)
- on board Regeneration (passive Regeneration im Betrieb)
- brennergestützte Regeneration (Kraftstoffüberschusseinspritzung)

Durch die katalytische Beschichtung (passive Regeneration) wird die Endzündungstemperatur des Rußes auf circa 270°C bis 300°C herabgesetzt, sodass ein kontinuierlicher Rußabbrand erfolgen kann. Es reicht aus, wenn diese Abgastemperatur für ca. 30% der Betriebszeit konstant anliegt. Naturgemäß liegt die Endzündungstemperatur von Ruß bei 600°C. Durch die Edelmetallbeschichtung werden weiterhin sehr wirkungsvoll Kohlenmonoxid und unverbrannte Kohlenwasserstoffe verringert. Steigt der Abgasgedruck trotz Regeneration über einen motorabhängigen Grenzwert, muss die Durchströmungsrichtung des Filters umgekehrt bzw. der Filter von Ascherückständen gereinigt werden. Erfahrungsgemäß wirkt sich ein niedriger Gegendruck der Abgasanlage auf die Standzeiten des Partikelfilters positiv aus. Wird eine Abgastemperatur von 250°C dauerhaft unterschritten, setzt sich der Filter zu. Infolge dessen steigt der Abgasgedruck, der Motor verliert an Leistung, und muss abgeschaltet werden. Liegen dauerhaft über 400°C am Partikelfilter an, wird vermehrt hochgiftiges NO₂ produziert. Da Sekundäremissionen von Abgasreinigungssystemen untersagt sind, muss NO₂ weitgehend vermieden werden. Dies ist beispielsweise durch den Einsatz eines SCR-Katalysators möglich. Die Abgastemperaturen von mineralöl- oder pflanzenölbetriebenen Selbstzündermotoren liegen in der Regel bei 500 bis 550°C, so dass eine NO_x-Reduzierung zwingend erforderlich ist.



Abbildung 33: regenerierter Partikelfilter

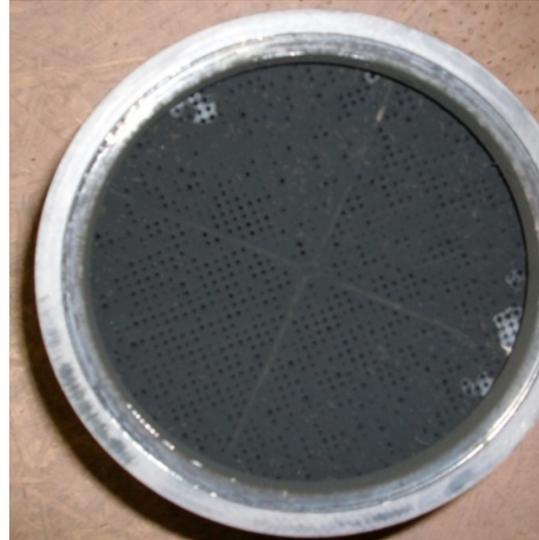


Abbildung 34: verstopfter Partikelfilter

Alle Partikelfilter, sowohl offene als auch geschlossene Systeme, stellen hohe Anforderungen an die verwendeten Motorenöle. Eine Vielzahl an Klassifikationen und Spezifikationen, sowohl allgemein als auch motorenherstellerspezifisch, sind zu berücksichtigen. Um die Standzeiten der Partikelfilter zu erhöhen, sind beispielsweise unbedingt aschearme Motorenöle vom Typ Low SAPS (bei der Verbrennung stark begrenzte Anteile an Sulfat-Asche, Phosphor und Schwefel) und nach ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) C1, C2, C3, E6 zu verwenden. Es gelten ebenfalls hohe Anforderungen für den Brennstoff. Ein zu hoher Schwefelgehalt würde die Wirksamkeit des Partikelfilters aufheben.

Zur Vervollständigung sei erwähnt, dass Klär-, Bio- und Deponiegasmotoren mit einer Gasentschwefelung auszustatten sind, da andernfalls die Motoren inklusive Abgasreinigungsanlage zerstört werden können. Chemische Katalysatoren können durch eine Reihe von Stoffen beschädigt werden, darunter Schwermetalle, Halogene, Polymere, Schwefel oder Kohlenstoffmonoxid. Solche Katalysatorgifte werden vom Katalysator statt des Stoffes, dessen Reaktion er beschleunigen soll, gebunden. Sie blockieren dadurch die Adsorptionsfähigkeit der großen Oberfläche des Katalysators. Der Grenzwert für Formaldehyd (CH_2O) wird trotz Abgasreinigung bei Biogasanlagen oft überschritten.

Nach Einbau des Partikelfilters konnten keine Verfärbungen der Ziegelrohlinge und keine Ablagerungen in der Trockenkammer festgestellt werden. Somit wurde nachgewiesen, dass die Einbindung der Abgase ohne Beeinträchtigung der Ziegelqualität oder der Produktionssicherheit möglich ist.

Da die Abgase eines Gas BHKWs bis auf erhöhte Anteile von Stickoxiden und unverbrannten Kohlenwasserstoffen eine ähnliche Zusammensetzung aufweisen wie die Abgase der bereits genutzten Gasbrenner, muss beim Einsatz eines Gas BHKWs nur ein Katalysator zur Reduzierung dieser Schadstoffe vorgesehen werden.

3.8 Besonderheiten beim Einsatz eines BHKWs in einem Ziegeleibetrieb

Aufgrund der Eigenarten des Produktionsprozesses in Ziegeleibetrieben gibt es einige nur hier auftretende Probleme, die beim Einsatz eines BHKWs beachtet werden müssen. Im Folgenden sollen die wesentlichen Besonderheiten und deren Lösungen erläutert werden.

3.8.1 Abgasklappen in den Abgasleitungen

In den vorhandenen Kammertrocknern ist im Betrieb ein Überdruck von circa 10Pa gegenüber der Umgebung vorhanden. Dieser wird durch den Ventilator in der Verbundluft erzeugt. Da die Abluft die Trockenkammer durch freies Ausströmen verlässt, ist dieser Überdruck nahezu konstant. Durch den Überdruck in der Trockenkammer kommt es bei Stillstand des BHKWs zum Eintritt feuchtheiße Luft in die Abgasleitung. Um Korrosion im BHKW zu verhindern, müssen für jeden angeschlossenen Kammertrockner Abgasklappen in die Abgasleitungen eingebaut werden. Bei Versuchen wurde festgestellt, dass Abgasklappen und deren Lagerung trotz Edelstahlausführung komplett festfrieren können. Grundsätzlich sind die Klappen regelmäßig zu betätigen (mind. 1x täglich), um ein Festsitzen zu vermeiden. Bei der Auswahl ist auf die Temperaturbeständigkeit zu achten. Abhängig vom Motorprinzip (Diesel oder Otto) müssen die Klappen Temperaturen von 600°C bzw. 500°C im Dauerbetrieb standhalten. Sie sind thermisch vom Stellmotor zu entkoppeln. In der Abgasleitung sollten möglichst wenig Klappen verbaut werden, da mit ihnen der Abgasgegendruck erheblich ansteigt. Da die Klappen zum Teil aus Edelstahl gefertigt sind, ist mit entsprechenden Beschaffungskosten zu rechnen. Für jede Trockenkammer ist eine separate Klappe vorzusehen, sowie eine Klappe für das direkte Ableiten der Abgase in die Umwelt. Da die feuchte Atmosphäre der Trockenkammer unter Überdruck steht, ist bei geschlossener Klappe mit erheblichem Feuchteintritt in der Abgasleitung zu rechnen. Gleiches gilt bei abgeschaltetem BHKW. Dauerhaft führt dies zu Schäden an den Rohrleitungen sowie den Klappen und kann nur durch einen regelmäßigen Betrieb des BHKWs vermieden werden. Um dieses Problem grundsätzlich zu umgehen, kann die Abgasleitung bei geeigneter Anordnung der Verbundluftzuleitung auch in die Zuleitung jeder einzelnen Trockenkammer integriert werden, sodass keine feuchte Trockenkammerluft in das Abgassystem und zum BHKW gelangen kann.



Abbildung 35: Abgasklappe, festgerostet



Abbildung 36: Abgasklappe, instandgesetzt (stark korrodiert)

3.8.2 Lärmemission

In Ziegeleien und dessen Umfeld sind Schalldruckpegel von weit über 40dB(A) üblich, sodass der Lärm eines BHKWs zu vernachlässigen ist. Ist der Aufstellungsort jedoch so gewählt, dass es zur Beeinträchtigung benachbarter Wohngebäude kommen kann, muss dem Rechnung getragen und das BHKW in einer Schalldämmhaube aufgestellt werden (siehe Abbildung 37). Der übliche Schallpegel eines BHKWs liegt ohne Schallhaube bei über 100dB(A). Durch eine Einhausung im Container, Schallkabine oder Fertigarage wird der Schalldruckpegel auf unter 60dB(A) reduziert. Bei der Aufstellung in Gewerbebezonen muss daher kein zusätzlicher Lärmschutz vorgesehen werden. Handelt es sich jedoch baurechtlich um ein Mischgebiet, sind lärmindernde Maßnahmen zu treffen. Insbesondere ist der nächtliche Schalldruckpegel auf unter 40dB(A) zu begrenzen. Bei geringer Entfernung zu Wohngebäuden muss zusätzlich auf die Vermeidung von Körperschall geachtet werden, da dieser oft auch unterhalb der zulässigen Schalldruckpegel als sehr unangenehm wahrgenommen wird. Lärmdämmende Maßnahmen sind beispielsweise Schalldämpfer für Abgas, Zuluft und Abluft, entkoppelte Fundamente, Schallschutztüren sowie eine schalldämmende Bauweise des BHKW-Aufstellraums bzw. Gebäudes (zweischalige Bauweise). In kritischen Fällen empfiehlt es sich, einen Schallschutzgutachter vor Bau der Anlage hinzuzuziehen. Nachträgliche Maßnahmen zur Schallemissionsminderung sind in der Regel mit erhöhten Kosten verbunden.



Abbildung 37: Schalldämmhaube eines BHKWs mit 140kW_{el} Leistung, geplant vom SIZ

3.8.3 Staubimmission

In Backsteinbetrieben wird außerordentlich viel Staub frei, z.B. durch abtrocknenden Lehm, Transport, Lehmaufbereitung im Kollergang, Schneidarbeiten und vieles mehr. Das Ausgangsmaterial (tonhaltiger Lehm) weist Korngrößen von unter einem Mikrometer (Ton) bis über 60 Mikrometer (Feinsand) auf, wobei man Korngrößen zwischen 2 und 63µm als Schluff bezeichnet. Beim Abtrocknen des Ausgangsmaterials und mechanischer Vereinzlung entsteht Staub unterschiedlicher Fraktion. Je kleiner die Partikel sind, desto länger verbleiben sie in der Umgebungsluft. Eine Filterung der BHKW-Zuluft ist daher zwingend erforderlich. Ungünstigerweise ist der Feinstaubanteil unter 2µm sehr hoch. Die Staubkonzentration ist an exponierten Lagen im Betrieb so hoch, dass es nur mit Mehraufwand möglich ist, ein BHKW zuverlässig zu betreiben. Die hohe Staubbelastung lässt die Zuluftfilter in wenigen Stunden verstopfen und das BHKW schaltet sich fehlerbedingt ab. Es entstehen nicht unerhebliche Kosten für Luftfilter bzw. die für die Zuleitung sauberer Frischluft zu installierenden Rohrleitungen. Daher ist es notwendig, den Standort für ein BHKW so zu wählen, dass die Entfernung zur potentiellen Wärmeabnahme möglichst gering ist und gleichzeitig ein staubarmer Standort im Backsteinbetrieb vorliegt. Die Zuluft sollte nicht aus Bodennähe, sondern über Dach angesaugt werden. Der Standort der Absaugung darf nicht an Fahrwegen auf dem Be-

triebsgelände liegen. Speziell an diesen Stellen werden an trockenen Tagen große Mengen Staub aufgewirbelt. Grundsätzlich ist es nicht ausreichend, die BHKW-Zuluft mit der Filterklasse F5 zu filtern, da die Partikel auch vom BHKW-Filter nicht zurückgehalten werden. Partikel in der Verbrennungsluft haben einen Einfluss auf die Standzeit und Lebensdauer des Motors und werden nur zum Teil mit den Abgasen ausgetragen. Dort verkürzen Sie die Standzeit des Partikelfilters.



Abbildung 38: Staubbelastung nach 2 monatigem Betrieb an einer BHKW-Anlage in einem Ziegeleibetrieb (trotz G4 Filter und Frischluftansaugung über Dach)

In einer Versuchsanlage setzten sich trotz Filterung im BHKW-Container bzw. Aufstellraum zunehmend große Mengen Feinstaub ab. Eine Lösung des Staubproblems ist mit dem im folgenden Abschnitt beschriebenen Filtersystem möglich.

Lösung des Staubproblems

Die üblicherweise für die Zuluftfilterung eingesetzten Kanallufttaschenfilter sind für das staubige Umfeld eines Backsteinbetriebes ungeeignet. Die Taschen müssen unter ungünstigen Bedingungen täglich gereinigt werden. Ein BHKW mit 250 kW_{el} Leistung benötigt ca. 8000m³ Frischluft pro Stunde. Dafür sind alternative Filtermethoden zu bevorzugen, die kontinuierlich und möglichst vollständig Staub abscheiden können.

Zyklonfilter können kontinuierlich Staub abscheiden. Sie sind für geringe Luftmengen und Partikel $>10\mu\text{m}$ geeignet. Je kleiner jedoch die Partikel sind, desto geringere Abscheidegrade werden erreicht. Der für Ziegeleien typische Staub ist sehr fein. Etwa 40% des Staubes weist eine Korngröße von weniger als $2\mu\text{m}$ auf. Diese Tatsache kombiniert mit den sehr hohen Investitionskosten schließen den Einsatz von Zyklonfiltern aus.

Wesentlich besser geeignet sind selbstreinigende Schlauchfilter. Sie zeichnen sich durch sehr große Filterflächen aus. Die Kompakt-Jetfilter der Firma GEA-Deichmann eignen sich durch ihre Modulbauweise für Volumenströme von 2.000 bis 60.000 m^3/h .

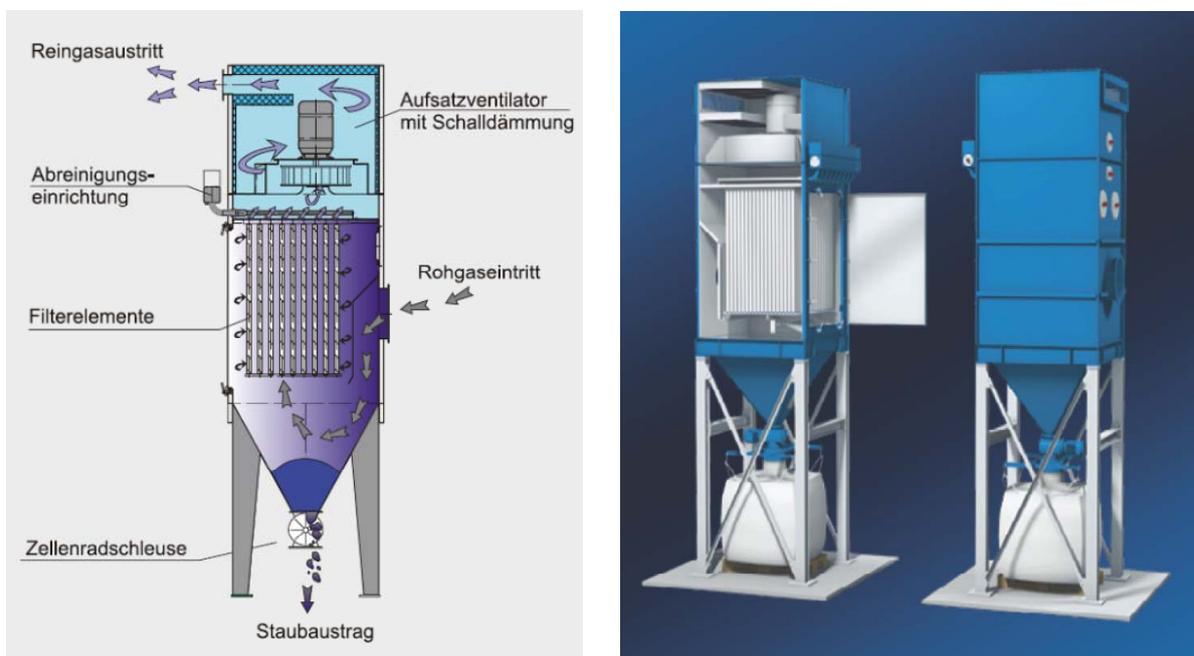


Abbildung 39: Funktionsschema Kompakt-Jetfilter (Quelle: Produktunterlagen GEA-Deichmann)

Die zu reinigende Luft wird mittels Aufsatzventilator durch vertikal angeordnete Filterelemente angesaugt. Die Filterelemente werden kontinuierlich gereinigt, teilweise mechanisch und teilweise mit Druckluft. Über eine Zellenradschleuse wird der abgeschiedene Staub ausgetragen. Aufgrund der kontinuierlichen Selbstreinigung ist der Wartungsaufwand für diese Entstauber gering. Abhängig von der Ausführung der Druckluftpatrone sind Standzeiten von 1 bis 5 Jahren realistisch. Dabei wird der Reststaubgehalt auf bis zu $0,1\text{mg}/\text{m}^3$ reduziert. Der Abscheidegrad ist sehr hoch und der Platzbedarf relativ gering.

Für ein 250kW_{el} BHKW mit $7.500\text{m}^3/\text{h}$ Zuluftvolumenstrom ist für einen Kompakt-Jetfilter inklusive Ventilator mit Investitionskosten zwischen 20.000 und 30.000€ zu rechnen. Für ein 150kW_{el} BHKW mit einem Zuluftvolumenstrom von $4.500\text{m}^3/\text{h}$ entstehen Kosten zwischen 15.000 und 20.000€ . Im speziellen Anwendungsfall kann der Kühlbedarf des BHKWs auch höher ausfallen. Dabei sind in erster Linie die Angaben der BHKW-Hersteller zu beachten. In Diagramm 6 ist der zu erwartende Volumenstrom in Abhängigkeit der BHKW-Leistung überschlägig dargestellt.

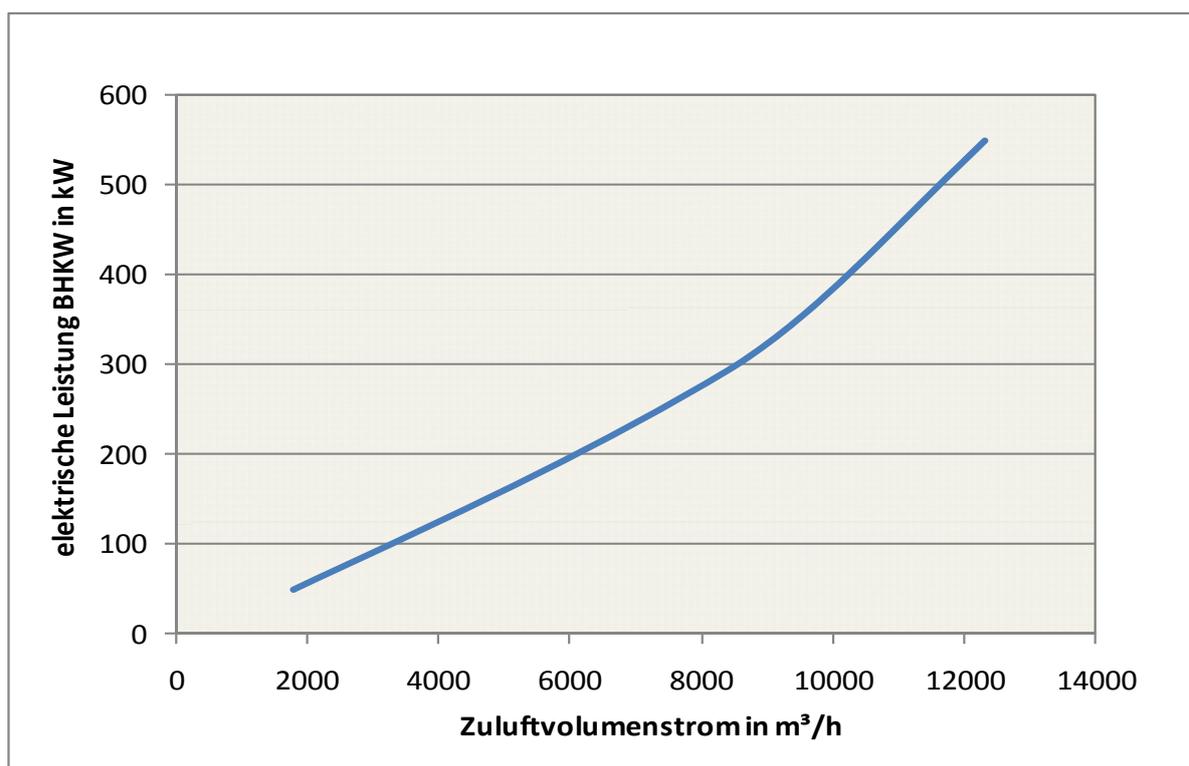


Diagramm 6: überschlägige Darstellung des Zuluftvolumenstroms in Abhängigkeit der elektrischen Leistung des BHKWs

4 Betriebswirtschaftliche Betrachtungen

4.1 Einflussfaktoren auf einen wirtschaftlichen BHKW-Einsatz

Der wirtschaftliche Einsatz eines BHKWs ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Großen Einfluss haben die Wahl des Kraftstoffs, mit welchem das BHKW betrieben werden soll, und die Verbrauchsprofile für Wärme und Elektroenergie. In Abhängigkeit dieser Parameter wird das BHKW dimensioniert sowie die Betriebsweise und die Art der Förderung festgelegt.

Werden fossile Kraftstoffe gewählt, ist lediglich eine Vergütung nach dem KWK-Gesetz möglich. Waren bis 2009 noch alle regenerativen Kraftstoffe nach dem EEG förderbar, so gilt dies derzeit nur noch für Biogas und Biomethangas. Für Pflanzenöl gelten zurzeit die gleichen Bedingungen wie für fossile Energieträger.

Mit Hilfe eines Simulationsprogramms, in welches verschiedene Parameter wie Energiepreise und -verbrauchsprofile, die Größe des BHKWs, die Betriebsweise, die Pufferspeichergröße, Wartungs-, Betriebs- und Investitionskosten, die Lebensdauer, der Zinssatz und die Förderungsart einfließen, können unterschiedliche Varianten berechnet werden. Die Resultate, wie z.B. die zu erwartende jährliche Rendite bzw. der zu erwartende jährliche Gewinn, lassen einen objektiven Vergleich der betrachteten Varianten zu. Anhand dessen erfolgt die Wahl des BHKWs sowie die Festlegung der Betriebsweise.

4.2 Dimensionierung des BHKWs

Oftmals wird zur wirtschaftlichen BHKW-Dimensionierung die Auslegung nach der Grundlast eines Objektes oder eine Mindestlaufzeit des BHKWs von 5000h/a empfohlen. Dies ist aber nur bedingt richtig. Für ein BHKW zur Unterstützung der Raumheizung von Gebäuden treffen diese Auslegungskriterien zu. Für andere Verbrauchssituationen können auch abweichende Laufzeiten einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage ermöglichen.

Bei einer Ziegelei ist das Wärmelastprofil mit nahezu konstantem Leistungsbedarf anzunehmen. Das Verhältnis zwischen Elektroenergie- und Wärmebedarf liegt bei 1 zu 10 bis 1 zu 20. Allerdings muss bei einer Ziegelei beachtet werden, dass es nicht möglich ist, die Wärme des BHKWs überall einzusetzen. Von Interesse sind somit nur die Wärmelastprofile der Trockner (Verbundluft), des Vorwärmers und der Verbrennungsluftvorwärmung.

In der beispielhaft betrachteten Ziegelei können im Vorwärmer ca. 150kW_{th} aus der Wärme der Motorkühlung und mehr als 200kW_{th} für die Verbrennungsluftvorwärmung aus der Wärme der Motorabgase genutzt werden. Zusätzlich könnte in dieser Ziegelei

Wärme sowohl aus der Motorkühlung als auch aus dem Motorabgas in die Verbundluft eingebracht werden.

Allein durch die thermische Nutzung im Vorwärmer und in der Verbrennungsluft könnte demnach ein BHKW mit einer Leistung von 375kW_{el} eingesetzt werden. Aufgrund des geringeren Bedarfs an Elektroenergie läge eine solche Auslegung in der betrachteten Ziegelei über dem wirtschaftlichen Optimum. Darüber hinaus ist der Gasbezugspreis in Ziegeleien aufgrund des sehr hohen Gasverbrauchs meist äußerst gering. Dagegen liegen die Strombezugspreise nur auf mittlerem Niveau.

Die Jahresdauerlinie in Diagramm 7 stellt eine Häufigkeitsverteilung für den Bezug von elektrischer Leistung in einer Ziegelei dar. Das zeitliche Integral der Leistungskennlinie, also die Fläche unterhalb der Linie, entspricht dem Energieverbrauch im jeweils betrachteten Zeitraum (hier ein Jahr). Zum Vergleich sind zur Jahresdauerlinie die Betriebskennlinien von drei BHKWs verschiedener Dimensionierung dargestellt. Analog zur Jahresdauerlinie entspricht die Fläche unterhalb der BHKW-Betriebskennlinien der vom jeweiligen BHKW erzeugten Elektroenergie. Anhand des Diagramms kann man weiterhin die Betriebszeit des BHKWs ablesen. Ein BHKW mit einer Leistung von 250kW_{el} weist demnach eine Betriebszeit von 7.300h auf.

Wie in Diagramm 7 deutlich wird, wäre ein BHKW mit einer Leistung von 250kW_{el} (rot) wirtschaftlicher als ein BHKW mit einer Leistung von 375kW_{el} (blau). Die erzeugten Energiemengen sind zwar annähernd gleich, allerdings liegen die Investitionskosten beim größeren BHKW deutlich höher. Ein BHKW mit einer Leistung von 100kW_{el} (grün) zeigt, dass die erzeugten Energiemengen kleiner sind. Eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit kann allerdings nicht ohne Weiteres getroffen werden, da auch die Investitionskosten entsprechend niedriger sind.

Ein wichtiger Aspekt ist die Art der Förderung. Die bisherigen Betrachtungen zur Auslegung bezogen sich auf Varianten mit Förderung nach dem KWKG-Gesetz. Das Einspeisen ins öffentliche Netz erweist sich oftmals als unwirtschaftlich, da die aktuellen Verkaufspreise für Elektroenergie („Leipziger Strombörse“) sehr niedrig sind. Wenn keine Elektroenergie benötigt wird, sollte das BHKW daher abgeschaltet werden.

Ein Betrieb des BHKWs nach dem EEG ermöglicht durch die relativ hohen Vergütungssätze einen wirtschaftlichen Betrieb bei der Einspeisung des vom BHKW produzierten Stroms ins Netz des EVU. In diesem Fall wäre lediglich der Wärmebedarf der Ziegelei relevant für die Auslegung eines BHKWs.

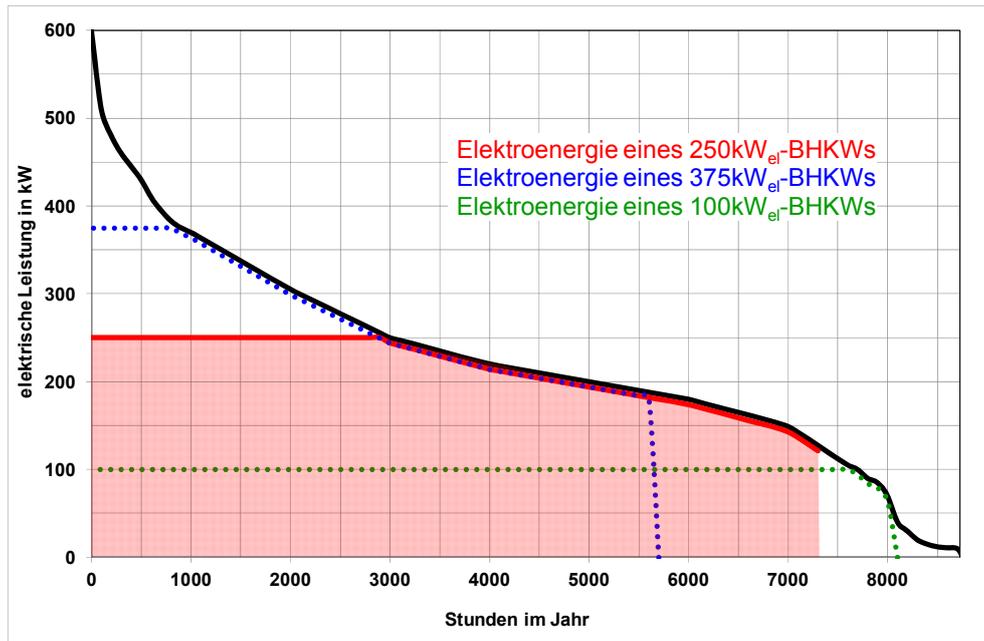


Diagramm 7: Jahresdauerlinie Elektroenergie einer Ziegelei im Vergleich mit den Betriebskennlinien von verschiedenen BHKWs

4.3 Investitionskosten

Die spezifischen BHKW-Kosten wurden aus den „BHKW-Kenndaten 2011“ der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE) ermittelt (siehe Diagramm 8). Die dort aufgezeigten Kosten decken sich mit den Erfahrungen der Autoren bei der Planung zahlreicher BHKW-Anlagen. Am Beispiel eines Erdgas-BHKWs sind die Kosten für einzelne Komponenten prozentual zu den gesamten Anlagenkosten angegeben (siehe Tabelle 6). Zusätzlich entstehen Kosten für den Aufstellungsraum (Container oder Gebäude), die elektrische Einbindung, den Gasanschluss, die Wärmeauskopplung, den Luftfilter (Entstaubung) und die Planung (siehe Tabelle 7).

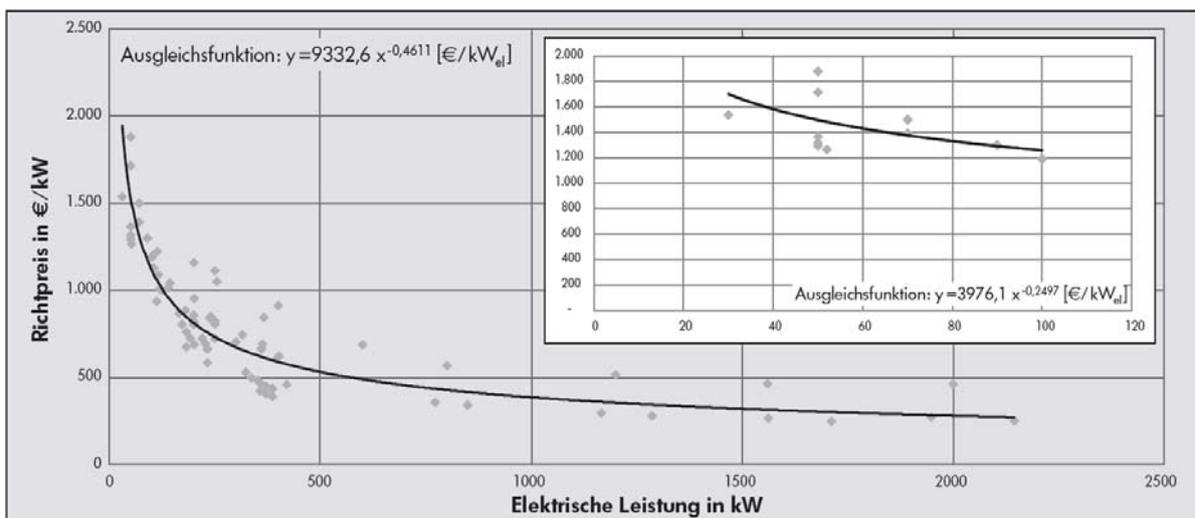


Diagramm 8: spezifische Richtpreise von Erdgas-BHKWs (Quelle: „BHKW-Kenndaten 2011“, ASUE e.V.)

Elektrische Leistung des BHKWs in kW	50	100	250	500	1000
Schalldämpfung	2,8 %	3,5 %	2,6 %	3,0 %	2,3 %
Katalysator	1,0 %	1,4 %	0,8 %	0,9 %	0,8 %
Schmierölver-und-entsorgung	1,7 %	2,7 %	2,4 %	2,5 %	1,2 %
Schaltschrank	6,0 %	10,9 %	11,2 %	10,4 %	3,4 %
Be-und Entlüftung	2,7 %	3,3 %	4,1 %	3,4 %	3,6 %
Transport und Montage	3,2 %	2,3 %	1,9 %	1,6 %	0,7 %
Inbetriebnahme	3,5 %	2,3 %	2,4 %	2,0 %	0,9 %

Tabelle 6: Prozentuale Kostenverteilung Erdgas-BHKW (Quelle: „BHKW-Kenndaten 2011“, ASUE e.V.)

Elektrische Leistung des BHKWs	kW	50	100	250	500	1000
BHKW-Kosten (nach ASUE e.V.)	€	77.000	111.600	183.000	266.000	386.000
Kosten für Entstaubung	€	10.000	15.000	20.000	25.000	35.000
Kosten für Wärme-Einbindung	€	8.000	15.000	20.000	25.000	35.000
Kosten für Elektro-Einbindung	€	5.000	10.000	14.000	20.000	25.000
Aufstellraum	€	2.000	3.000	3.500	4.000	5.000
Planungskosten	€	10.200	15.460	24.050	34.000	48.600
Gesamtkosten	€	112.200	170.060	264.550	374.000	534.600

Tabelle 7: Aufteilung der Gesamtkosten bei Installation eines Erdgas BHKWs in einer Ziegelei

Deutlich mehr Anlagenperipherie ist beim Einsatz von Pflanzenöl-BHKWs notwendig. Diese benötigen u.a. einen doppelwandigen Pflanzenöltank (evtl. beheizt), eine Kraftstoffaufbereitung, ein Spülkraftstoffsystem, eine Abgasreinigung (Partikelfilter) und einen erweiterten Grundwasserschutz. Bei Anwendung der Ausgleichsfunktion aus den „BHKW-Kenndaten 2005“ der ASUE e.V. (siehe Diagramm 9) ist mit Kosten nach Tabelle 8 zu rechnen.

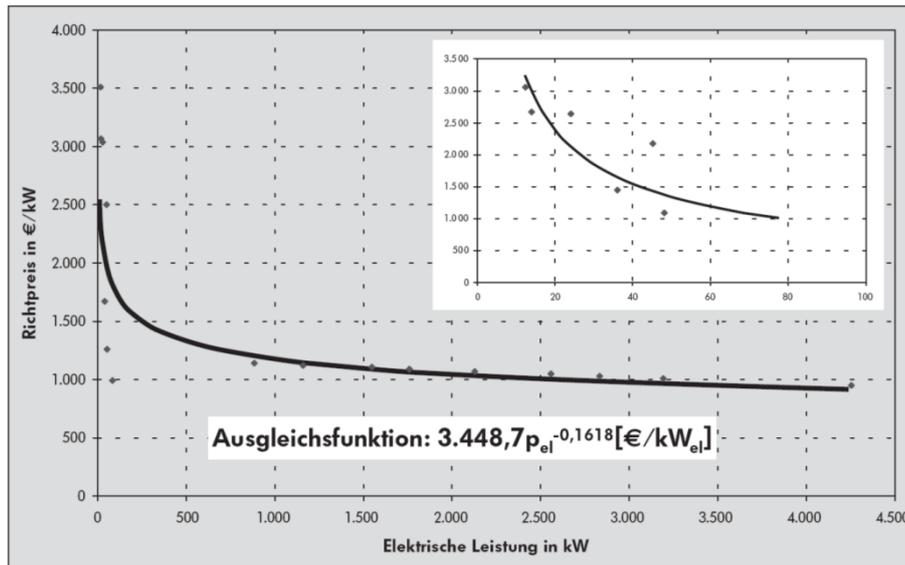


Diagramm 9: spezifische Richtpreise Pflanzenöl-BHKW-Anlagen („BHKW-Kenndaten 2005“, ASUE e.V.)

Elektrische Leistung des BHKWs	kW	50	100	250	500	1000
BHKW-Kosten (nach ASUE)	€	92.000	164.000	353.000	631.000	1.128.000
Kosten für Entstaubung	€	10.000	15.000	20.000	25.000	35.000
Kosten für Wärme-Einbindung	€	8.000	15.000	20.000	25.000	35.000
Kosten für Elektro-Einbindung	€	5.000	10.000	14.000	20.000	25.000
Aufstellraum	€	2.000	3.000	3.500	4.000	5.000
Planungskosten	€	11.700	20.700	41.050	70.500	122.800
Gesamtkosten	€	128.700	227.700	451.550	775.500	1.350.800

Tabelle 8: Aufteilung der Gesamtkosten bei Installation eines Pflanzenöl-BHKWs in einer Ziegelei

Wird das BHKW mit Biogas direkt aus der Biogasablage betrieben, sind die Investitionskosten der Biogasproduktion in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einzubeziehen. Die eigentlichen Kosten der BHKW-Anlage können leicht unter 20% der Gesamtinvestition sinken. Die Anlage zur Biogasproduktion nimmt den weitaus überwiegenden Kostenanteil ein.

Um den Brennstoff inklusive Brennwert zu nutzen, sind aufwändige technische Erweiterungen erforderlich. Für ein Erdgas-BHKW mit einer Leistung von 250kW_{el} entsteht ein Mehrkostenaufwand von wenigstens 12.500€. Für die Ziegelherstellung werden vorwiegend hohe Temperaturen benötigt, sodass Niedertemperaturwärme wenn überhaupt nur für sanitäre Zwecke oder zur Deckung eines Heizwärmebedarfs eingesetzt werden kann. Eine Kosten-Nutzen-Analyse sollte diesbezüglich vorgenommen werden.

Sowohl die Errichtung einer Biogasanlage als auch die Brennwertnutzung sind sehr speziellen Einsatzfällen vorbehalten. Beide Fälle werden an dieser Stelle nicht detaillierter betrachtet.

4.4 Wirtschaftlichkeitsvergleich verschiedener BHKW-Varianten

Der wirtschaftliche Betrieb eines BHKWs stellt sich ein, wenn die Kosten für Wärme- und Elektroenergie mit BHKW geringer ausfallen als ohne BHKW. Das heißt, die Wirtschaftlichkeit hängt entscheidend von den Energieeinkaufskosten des konkreten Betriebes und den Betriebskosten ab.

Entsprechend Diagramm 7 wird zum Vergleich verschiedener Betriebsarten eines BHKWs eine Anlage mit einer elektrischen Nennleistung von 250kW_{el} ausgewählt. Wird das BHKW modulierend (minimal 50% der Nennleistung) betrieben, stellt sich bei der tatsächlichen Laufzeit von mehr als 7000h/a eine mittlere elektrische Leistung von etwa 217kW_{el} ein. Für die Gegenüberstellung der BHKW-Varianten wurden aktuelle Energiebezugspreise und aktuelle Brennstoffpreise für Ziegeleibetriebe angenommen. Die Investitionskosten wurden überschlägig nach den „BHKW-Kenndaten 2011“ der ASUE e.V. ermittelt und die erforderlichen Mehrkosten im Fall der Aufstellung in einer Ziegelei addiert (siehe Kapitel 4.3).

Die Betriebskosten eines BHKWs setzen sich im Wesentlichen aus den Kosten für Brennstoff, Wartung und Kapitalkosten zusammen. In den spezifischen Brennstoffkosten sind die Netzdurchleitungskosten und die Energiesteuer enthalten. Da die letztere für KWK-Anlagen entfällt, ist der spezifische Erdgaspreis für das BHKW um $0,55\text{ct/kWh}$ geringer. Der günstige Erdgaspreis für Großabnehmer hat zur Folge, dass ein wesentlich wirtschaftlicherer Betrieb des BHKWs mit Erdgas möglich ist, als mit anderen Brennstoffen. Zudem sind die Investitionskosten am niedrigsten.

BHKW 250kW_{el}/280kW_{th}		Gas-	BHKW	BHKW	BHKW	Gas-
Kostenstand 2012		brenner	KWK	KWK	EEG	brenner
Inbetriebnahme 2012		Erdgas	Pflanzenöl	Erdgas	Biomethangas	Erdgas
BHKW-Laufzeit*	h/a	6400	6400	6400	7500	7500
Bedarf Wärmeenergie**	MWh/a	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Bedarf Elektroenergie**	MWh/a	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
vom BHKW gelieferte Wärmeenergie	MWh/a	1.792	1.792	1.792	2.100	2.100
vom BHKW gelieferte Elektroenergie	MWh/a	-	1.600	1.600	1.875	-
elektrischer Wirkungsgrad	%	-	40	40	40	-
thermischer Wirkungsgrad	%	100	45	45	45	100
Brennstoffbedarf	MWh/a	1.792	3.968	3.968	4.650	2.100
spez. Brennstoffkosten (Hs)	ct/kWh	3,70	8,30	3,70	8,75	3,70
Energiesteuerrückerstattung	ct/kWh	0,00	0,00	0,55	0,55	-
spez. Brennstoffkosten (Hi)	ct/kWh	4,11	9,21	3,50	9,10	4,11
Ausgaben	T€/a	80,2	449,8	190,0	470,1	93,4
Brennstoffkosten	T €/a	73,6	365,6	138,7	423,2	86,2
spezifische Wartungskosten	ct/kWh	-	3,00	1,30	1,30	-
Wartungskosten (Zähler, BHKW)	T €/a	3,0	51,0	23,8	27,4	3,0
Tilgungs-/Abschreibungsdauer	a	-	20	20	20	-
Annuitätsfaktor***	%	-	7,358	7,358	7,358	-
Annuität & Kapitaldienst	T€	-	33,26	19,50	19,50	-
Kosten Emissionszertifikate	T€/a	3,6	-	7,9	-	4,2
Einnahmen	T€/a	-	224,1	224,1	436,9	-
Strompreis / Vergütung (2012)	ct/kWh	-	13,00	13,00	23,30	-
Stromverkauf / Einsparung	T€/a	-	208,0	208,0	436,9	-
mittlere KWK-Gesetz Förderung	T€/a	-	16,1	16,1	-	-
resultierende Wärmekosten	T€/a	80,2	225,8	-34,1	33,2	93,4
Gesamtinvestitionskosten	T€	-	452,0	265,0	265,0	-
Wärmegestehungskosten	ct/kWh	4,47	12,60	-1,90	1,58	4,45
Einsparung / Verlust	T€/a	0,00	-145,59	114,26	60,21	0,00

Tabelle 9: Gegenüberstellung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher BHKW-Varianten,

* Vollbetriebsstunden, **Betriebszeit der Ziegelei 10 Monate, *** 4% Kapitalkosten

Als regenerativer Energieträger ist derzeit unter bestimmten Voraussetzungen nur der Einsatz von Biomethangas wirtschaftlich, da für Biomethangas keine CO₂-Zertifikate erworben werden müssen. Pflanzenöl als Brennstoff für BHKWs zu nutzen ist nach aktueller Gesetzeslage nur in Bestandsanlagen wirtschaftlich möglich, wenn die Brennstoffkosten signifikant unter 8ct/kWh fallen. Bei Preisen von aktuell 8,5ct/kWh für Pflanzenöl ist ein wirtschaftlicher Betrieb ebenfalls nicht möglich. Neue Pflanzenölanlagen fallen ausdrücklich nicht mehr unter das EEG, erhalten daher auch keine Einspeisevergütung nach EEG. Nach KWK-Gesetz ist der Betrieb grundsätzlich möglich, jedoch nicht wirtschaftlich. Der substituierte Strom müsste aktuell wenigstens 23ct/kWh kosten, um eine Wirtschaftlichkeit nachzuweisen.

Nicht unwesentlich ist die zum Teil erheblich unterschiedliche liquide Geldmenge für den Betrieb einer BHKW-Anlage. Während für Erdgas-BHKWs Mittel in Höhe von 180.000€/a notwendig sind, benötigt man für ein Pflanzenöl-BHKW mindestens 400.000€/a. Da der Brennstoff zum Teil vorfinanziert werden muss, ist Liquidität für mindestens eine Lieferung Pflanzenöl (Preis 30t: ca. 30.000€) bei Pflanzenölanlagen erforderlich.

Die Übersicht in Tabelle 9 zeigt, dass nur der Einsatz eines Biomethangas-BHKWs oder eines Erdgas-BHKWs wirtschaftlich sinnvoll ist. Das Erdgas-BHKW verhilft zu einer jährlichen Energiekosteneinsparung von 114.260€. Mit einem Biomethangas-BHKW spart dagegen nur 60.210€/a. Der wirtschaftliche Vorteil der Biomethangas-Variante verringert sich fortlaufend, da die Einspeisevergütung konstant bleibt, obwohl die Energiebezugspreise steigen. Eine sichere und dauerhafte Rentabilität wird hingegen nur mit einem Erdgas-BHKW erreicht, da hierbei steigende BHKW-Betriebskosten zwangsläufig zu einer höheren Einsparung führen.

KWK-BHKWs erhalten in den ersten 30.000 Betriebsstunden eine Förderung (KWK-Zuschlag) für jede erzeugte Kilowattstunde Strom. Bei in Ansatz gebrachten 6400 Vollbetriebsstunden pro Jahr und einer Leistung von 250kW_{el} wird dem Betreiber in den ersten 30.000 Betriebsstunden zusätzlich eine Förderung von durchschnittlich ca. 4,5ct/kWh gezahlt. In Tabelle 9 wurde diese Förderung zur besseren Vergleichbarkeit auf den Zeitraum der Abschreibung gleichmäßig verteilt.

Die einseitige Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des BHKWs unter Annahme der aktuellen Betriebskostenbedingungen ist nicht ausreichend. Die Preisbildung der Energieversorger ist stark vom vorhandenen Lastprofil des Abnehmers abhängig. Bei fehlender bzw. verringerter Grundlastabnahme ändert sich der Arbeitspreis. Im Gegensatz zum Erdgas, bei dem keine Preisänderungen zu erwarten sind, wird der Energieversorger zusätzlich höhere Kosten für den Spitzenlaststrom in Ansatz bringen als bei einer Vollversorgung. Dies wirkt sich auf die Energiekosten des Backsteinbetriebes aus.

Es wird davon ausgegangen, dass sich der Bezugspreis für die nach Errichtung eines BHKWs eingekaufte Strommenge (im Beispielfall 400MWh) um etwa 2 Cent erhöhen wird. Damit reduziert sich die Einsparung eines Gas-BHKWs von 114.260€/a um 8.000€/a auf 106.260€/a. Für die um 2.200MWh/a gestiegene Gasbezugsmenge sind zusätzliche CO₂-Zertifikate für 500t zu kaufen. Bei einem derzeitigen Preis von 10€/t ergibt dies Mehrkosten von 5.000€/a, die wiederum den Gewinn verringern.

5 Zusammenfassung

Es wurde dargestellt, unter welchen Rahmenbedingungen ein BHKW in einer Ziegelei wirtschaftlich betrieben werden kann. Neben der Einsparung von Betriebskosten ist es mit einem BHKW in erheblichem Maße möglich, Treibhausgase einzusparen. Damit kann ein BHKW neben einer finanziellen Entlastung auch zur Entlastung der Umwelt beitragen. Kurz vor der Veröffentlichung dieses Berichtes wurden von der Bundesregierung die neuen Zahlen für die bei Strombezug zu entrichtenden Nebenkosten bekanntgegeben. Dabei erhöht sich die EEG-Umlage von bisher 3,592ct/kWh auf 5,277ct/kWh. Eine neue Abgabe ist die ab 01.01.2013 zu entrichtende Offshore-Haftungsumlage nach §17f Energiewirtschaftsgesetz (EnWG). Diese beträgt 0,25ct/kWh für einen Stromverbrauch von 1.000.000kWh, danach 0,05ct/kWh. Durch diese Änderungen erhöht sich die Einsparung für die betrachtete Ziegelei durch den Einsatz eines BHKWs um etwa 30.000€/a.

6 LITERATUR

- [1] Agentur für Erneuerbare Energien, AGEB, ZSW: Der Strommix in Deutschland im Jahr 2010, www.unendlich-viel-energie.de, 2011
- [2] Ahlborn: ALMEMO – Handbuch, 6.Auflage, Holzkirchen, 2005
- [3] AiF – ZUTECH: Produktbezogene Referenzwerte zur Bestimmung von Emissionsintensitäten und zugehörigen Kostenreduktionspotenzialen in KMU – Teil B4 – Analyse der Keramikindustrie, 2008
- [4] Alt, L.: Praxisbezogene Ansätze zur Verbesserung der Wärmebilanz von Tunnelöfen, *Keramische Zeitschrift*, 44. Jg., 2/1992
- [5] ASUE: BHKW-Kenndaten 2005
- [6] ASUE: BHKW-Kenndaten 2011
- [7] BDEW Bundesverband Berlin, Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken, 2011
- [8] Bender, W.; Händle F.: Handbuch für die Ziegelindustrie, Bauverlag Wiesbaden und Berlin, 1982
- [9] Bittner, H.-G.; Jeschar, R.: Energetische Optimierung von Tunnelofenprozessen in der keramischen Industrie, *cfi / DKG-Berichte*, 67. Jg., 11/1990
- [10] BMFVEL: Biogas – eine Einführung; www.nachwachsende-rohstoffe.de; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.; Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft; 2011
- [11] BMWI: Energie in Deutschland – Trends und Hintergründe zur Energieversorgung, www.bmwi.de, 2010
- [12] Bruck, M.: Ökobilanz Mauerziegel, Ökobilanz und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Außenwandkonstruktionen, Abschlussbericht, Wien, 1997
- [13] Deppe, D.: Mechanismus und Beeinflussung von Trockenausblühungen aus Kalziumsulfat bei der Konvektionstrocknung von Ziegelrohlingen, Diss., 2005
- [14] Durst, F.: Grundlagen der Strömungsmechanik, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006
- [15] Eder, B.; Eder, F.: Pflanzenöl als Kraftstoff, 2. Auflage, Ökobuch Verlag, 2005
- [16] Energetik und Kinetik der Trocknung von Ziegelrohlingen und ähnlichen Gütern in Kammertrocknern, Institut für Ziegelforschung Essen e. V., www.izf.de, 2010
- [17] Energiesteuergesetz (EnergieStG), Ausfertigungsdatum: 15.07.2006
- [18] Erneuerbare-Energien-Gesetz, 2009
- [19] FfE: Basisdaten von Energieträgern, <http://www.ffe.de>, 2011
- [20] FfE: Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Teil 2 – Baustoffe, 1999
- [21] FfE: Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung, Endbericht, 2007
- [22] Fischer Abgastechnik GmbH & Co. KG: Katalysator, Abgasreinigung, Rußpartikelfilter, <http://www.fischer-imz.de>, 2010

- [23] Fischer, F.; Lack, A.: Biokraftstoffe, Vogel Buchverlag, 2007
- [24] Förstner, U.: Umweltschutztechnik, 7.Auflage, Springer Berlin Heidelberg, 2008
- [25] Fraschini, G.: Kraft-Wärme-Kopplung – eine rationelle Alternative für die Ziegelindustrie, ZI, 11/1992
- [26] Funke, T.: Temperatur- und Spannungsberechnungen zur Analyse und Optimierung der Aufheiz- und Abkühlphase beim Brand von Schamottesteinen, Diss., 2007
- [27] GEA Deichmann: CompactJet – Typ KJF, Firmenunterlagen, <http://www.gea-deichmann.com>, 2011
- [28] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz), Konsolidierte (unverbindliche) Fassung des Gesetzestextes in der ab 1. Januar 2012 geltenden Fassung
- [29] Glück, B.: Hydrodynamische und Gasdynamische Rohrströmung – Druckverluste, VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1988
- [30] Göring, J.: Wärme- und Stofftransport während der konvektiven Trocknung, Diss., 1995
- [31] Grömling, M.: Volkswirtschaftliches Porträt der deutschen Baustoffindustrie, Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., 2011
- [32] Gubler, C.; Wurche, J.-P.: Steigerung der Energieeffizienz in der Backsteinproduktion, Zwischenbericht, 2005
- [33] Güteschutzverzeichnis, Prüfergebnisse grobkeramischer Erzeugnisse, Ausgabe 2006
- [34] Gütling; Kamm: Blockheizkraftwerke – Technik, Ökologie, Ökonomie, LfU Baden-Württemberg, Karlsruhe, 2001
- [35] Hauck, D.; Ruppik, M.; Telljohann, U.: Optimierung des Trocknungsprozesses zur Verminderung der Trockenrissgefährdung von Ziegelrohlingen, Ziegelindustrie International 55, 2002
- [36] Herrmann, H.-O.; Lang, O.; Mikulic, I.; Scholz, V.: Partikelfiltersystem für Diesel-PKW, MTZ 9/2001, S. 652 – 660
- [37] Herwig, H.: Strömungsmechanik, 2. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006
- [38] Herwig, H.; Moschallski, A.: Wärmeübertragung, Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006
- [39] Hoffmann, J.: Taschenbuch der Messtechnik, 4. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hansen Verlag München Wien, 2004
- [40] Hoffmann, U.; Marchand, H.; Neisen, H.-J.; Schneider, W.; Schwämmlein, W.; Weibel, G.: Möglichkeiten zur Energieeinsparung in der keramischen Industrie, BmfFT Forschungsbericht T 82-027, Technologische Forschung und Entwicklung, Fachinformationszentrum Karlsruhe, 1982
- [41] <http://wko.at/ooe/energie/Branchen/keramik/keramik-ges.htm>, Energiekennzahlen und Energiesparpotentiale in der Stein- und keramischen Industrie, 2003 (2010)

- [42] Jeschar, R.: Optimierung von Industrieöfen mittels Teilbilanzen, Institutsbericht: Methoden der Energieeinsparung bei Industrieöfen, Institut für Energieverfahrenstechnik, TU Clausthal, 1990
- [43] Jeschar, R.; Schröder, U.; Bredehöft, R.: Einfluß des Randspaltes auf die Strömungsverteilung im Tunnelofen – Teil 1 und 2, DKG-Berichte, 49. Jg., 8/1972-10/1972
- [44] Junge, K.: Auswirkungen des Sonntagsarbeitsverbots auf den Energiebedarf von Ziegeleien, ZI, 6/1998
- [45] Junge, K.: Energiebedarf zur Ziegelherstellung, ZI, 4/2002
- [46] Junge, K.: Erhöhung der Rohlingstemperatur zur Verminderung der Trockenrissgefährdung, ZI-Jahrbuch, 1993
- [47] Junge, K.; Telljohann, U.: Entkopplung von Ofen und Trockner durch Verbrennungsluftvorwärmung und Zwischenspeicherung der Verbundwärme, Ziegelindustrie International 55, 2002
- [48] Junge, K.; Telljohann, U.: Zeit- und Energieoptimierung der Trocknung von Ziegelrohlingen unter besonderer Berücksichtigung des zweiten Trocknungsabschnitts, Abschlussbericht IfZ, 2004
- [49] Junge, K.; Hauck, D.; Ruppik, M.: Brennfärbenbeeinflussung zur Qualitätsverbesserung von Ziegeln, Projektbericht, 2003
- [50] Kainer, H.; Willmann, G.: Die Herausforderung an Hersteller von Brennhilfsmitteln – Die Funktionen der Brennhilfsmittel im Prozeß, Keramische Zeitschrift, 37. Jg., 3/1985
- [51] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren, 2. Auflage, Springer Dordrecht Heidelberg London NewYork, 2009
- [52] Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, 01. April 2002, zuletzt geändert 12. Juli 2012
- [53] Krischer, O.; Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Band 1., Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1978
- [54] Kröll, W.; Kast, W.: Trocknen und Trockner in der Produktion, Band 3., Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1989
- [55] Lucas: Thermodynamik, Kapitel – Die Energiebilanz, Springer, 2008
- [56] Maier, P.: Messen und Regeln der Prozeßgrößen beim keramischen Brand, Keramische Zeitschrift, 49. Jg., 9/1997
- [57] Maute, D.: Technische Akustik und Lärmschutz, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hansen Verlag München Wien, 2006
- [58] Mersmann, A.: Stoffübertragung, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1986
- [59] Mödinger, F.; Mayr, J.: Möglichkeiten des Einsatzes regenerativer Brennstoffe für den Tunnelofen, ZI, Jg.: 59, 08/2006
- [60] Möllenhauer, K.; Tschöke, H.: Handbuch Dieselmotoren, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007
- [61] Motoruntersuchungen mit Abgasnachbehandlungssystemen zum Forschungsprojekt Abgasnachbehandlung bei RME-Betrieb, 2002
- [62] Mühlbacher, H.: Leistungs- und Energiebilanzen von KWK-Anlagen in der Praxis, BWK, 3/2007

- [63] Müller, W.: Erklärung der deutschen Ziegelindustrie zur Energieeinsparung und Klimavorsorge, Bauverlag Wiesbaden, ZI, 9/1996
- [64] Münzer, T.; Leis, U.: Rationelle Stromanwendung in der Ziegelindustrie, Fraunhofer ISI, 1999
- [65] Nörtershäuser, M.: Pflanzenöl und mein Dieselmotor, 2. Auflage, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2005
- [66] Pels Leusden, C. O.: Über die Temperaturverteilung in Tunnelöfen mit verschiedenen Besatzarten, DKG- Berichte, 49. Jg., 8/1972
- [67] Programm zur Berechnung von h-x-Diagrammen nach Mollier im frei wählbaren Temperatur- und Feuchtebereich, Institut für Ziegelforschung Essen e. V., 2010, www.izf.de
- [68] Programm zur Ermittlung aller wesentlichen Stoffdaten feuchter Luft, Institut für Ziegelforschung Essen e. V., 2010, www.izf.de
- [69] Programm zur Ermittlung der trocknungstechnisch wichtigen Kenngrößen von Rohlingsmassen, Institut für Ziegelforschung Essen e. V., 2010, www.izf.de
- [70] Rebstadt, G.: Brennerwagenaufbauten und Brennhilfsmittel für die Grobkeramik, ZI 52., Jg. 8/1999
- [71] Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizungs- und Klimatechnik, Oldenbourg Industrieverlag, 75. Auflage, 2011/2012
- [72] Rentz; Schmittinger; Jochum; Schultmann: Exemplarische Untersuchung der praktischen Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Keramischen Industrie unter Beachtung der IVU-Richtlinie und der Erstellung von BVT-Merkblättern, Karlsruhe, 2001
- [73] Rieseberg, S.; Wörlen, C.: Befreiungen der energieintensiven Industrie in Deutschland von Energieabgaben, Arepo Consult, 2012
- [74] Rimpel, E.: Einsatz von nachwachsenden Brennstoffen und sonstigen Ersatzbrennstoffen beim Ziegelbrand, ZI, 8/2006
- [75] RWI Essen: Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft, Monitoringbericht, 2003-2004
- [76] Schmitz, K.; Schaumann, G.: Kraft-Wärme-Kopplung, 3. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2005
- [77] Schmitz, M.; Röhling, S.; Dohrmann, R.: In der grobkeramischen Industrie nutzbares Rohstoffpotenzial der bei Gewinnung und Aufbereitung in der deutschen Steine- und Erden-Industrie anfallenden Feianteile, DERA Rohstoffinformationen – 05, (pdf), 2011
- [78] Schwaiger, K.: Ganzheitliche energetische Bilanzierung der Energiebereitstellung (GaBiE), Teil I, FfE, 2011
- [79] Schwister, K.: Taschenbuch der Verfahrenstechnik, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hansen Verlag München Wien, 2010
- [80] Simulation der Konvektionstrocknung von Ziegelrohlingen und anderen schwindenden kapillarporösen Trockengütern, Institut für Ziegelforschung Essen e. V., 2010, www.izf.de
- [81] Staiß, F.: Jahrbuch Erneuerbare Energien. 02/03, Bieberstein-Verlag, Radebeul 2003

- [82] Stephan, P.; Schaber, K.; Stephan, K.; Mayinger, F.: Thermodynamik Band 1, 16. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006
- [83] Suttor, W.: Blockheizkraftwerke – Ein Leitfaden für den Anwender, BINE, Karlsruhe, 2009
- [84] Telljohann, U.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen der Trocknung plastisch geformter Ziegelrohlinge, Diss., 2004
- [85] Thuneke, K.: Untersuchungen zu Abgasemissionen und zum Einsatz von Partikelfiltersystemen bei rapsölbetriebenen Blockheizkraftwerken, Diss., 2008
- [86] Thuneke, K.; Remmele, E.; Widmann, A.: Pflanzenölbetriebene Blockheizkraftwerke, Bayerisches StMLU, TU-München – Weihenstephan, 2002
- [87] Todsen, U.: Verbrennungsmotoren, Hansen Verlag München, 2012
- [88] Umweltbundesamt: Klimaschutz in Deutschland bis 2030, Endbericht zum Forschungsvorhaben Politikszenerarien III, Berlin, 2005
- [89] Umweltbundesamt: Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken in der Keramikindustrie, 2007, <http://www.bvt.umweltbundesamt.de/kurzue.htm>
- [90] van Basshuysen; Schäfer: Handbuch Verbrennungsmotor, 3. Auflage, Vieweg & S. Verlag, Wiesbaden, 2005
- [91] van Basshuysen; Schäfer: Lexikon Motorentchnik, 2. Auflage, Vieweg & S. Verlag, Wiesbaden, 2006
- [92] VDI-Wärmeatlas, Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2003
- [93] VEA-Jahresbericht Strom Energiebericht – Strom Kalenderjahr 2010 für Deppe Backstein-Keramik GmbH
- [94] Verfahrensbeschreibung nawaRo-Anlage Kompogas, MPE ENERGIETECHNIK GmbH, 2005
- [95] Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung – BiomasseV), Ausfertigungsdatum: 21.06.2001, Stand 24.2.2012
- [96] Vogt, S.; Leu, E.: Energieeinsparpotenziale bei der Trocknung mit dem Mobil-System, Keramische Zeitschrift, 6-2007
- [97] Wagner, S.; Harr, B.; Meyer, U.: Ökologisches Bauen mit Ziegeln, Ziegel, Mainz, 1998
- [98] www.ooe-umwelthanwaltschaft.at, OÖ. Umwelthanwaltschaft, Emissionsmessungen im Abgas der Tunnelofenanlage der Martin Pichler Ziegelwerk GmbH in Aschach an der Donau, 2007
- [99] Zahoransky, R.: Energietechnik, 3.Auflage, Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007