

# ANHANG

## A1 Beispieldaten Wärmeverbrauch eines Einfamilienhaus

Exemplarische Verbrauchs- und Kostendaten eines Einfamilienhauses:

### Gebäudedaten

Baujahr: 1995  
Wohnfläche: 160  
Bewohner: 4 d.h. 2 Erw. + 2 Kinder

### Wärmeverbrauchsdaten:

Auszug aus den Fernwärmerechnungen (Zahlungen inkl. aller Nebenkosten):

Datum von	Datum bis	Anz. Tage	Verbrauch MWh	Rechnungs-betrag	€/MWh	Umrechnung auf 365 Tage MWh	Jahreskosten	pro m <sup>2</sup> Wohnfläche kWh/m <sup>2</sup> a	€/ m <sup>2</sup> a
07.01.2001	07.11.2001	305	10,235	1.027,69 €	100,41 €	12,248	1.229,86 €	76,553	7,69 €
08.11.2001	25.10.2002	352	16,689	1.120,66 €	67,15 €	17,305	1.162,05 €	108,158	7,26 €
26.10.2002	29.10.2003	369	18,449	1.222,32 €	66,25 €	18,249	1.209,07 €	114,056	7,56 €
30.10.2003	23.10.2004	360	16,789	1.159,44 €	69,06 €	17,022	1.175,54 €	106,389	7,35 €
24.10.2004	19.10.2005	361	17,097	1.268,53 €	74,20 €	17,286	1.282,59 €	108,040	8,02 €
20.10.2005	17.12.2006	424	19,193	1.521,89 €	79,29 €	16,522	1.310,12 €	103,264	8,19 €
<i>26.05.2006 Inbetriebnahme der solarthermischen Anlage für Brauchwasser u. Heizungsunterstützung</i>									
18.12.2006	10.09.2007	267	6,926	779,69 €	112,57 €	9,468	1.065,87 €	59,176	6,66 €
11.09.2007	02.09.2008	358	11,322	1.191,43 €	105,23 €	11,543	1.214,73 €	72,146	7,59 €

## A2 Beispieldaten elektr. Verbrauch eines Einfamilienhaushalts

Exemplarische Verbrauchs- und Kostendaten eines Einfamilienhauses:

### Gebäudedaten

Baujahr: 1995  
Wohnfläche: 160  
Bewohner: 4 d.h. 2 Erw. + 2 Kinder

### Energieverbrauchsdaten:

Auszug aus der Rechnungen für Energielieferung (Zahlungen inkl. aller Nebenkosten):

Datum von	Datum bis	Anz. Tage	Verbrauch kWh	Rechnungs-betrag	€/kWh	Umrechnung 365 Tage kWh / a	Jahreskosten	pro m <sup>2</sup> Wohnfläche kWh/m <sup>2</sup> a	€/ m <sup>2</sup> a	pro Pers. kWh/Pers.
07.01.2001	07.11.2001	305	3429	501,35 €	0,15 €	4104	599,98 €	26	3,75 €	1026
08.11.2001	25.10.2002	352	4235	650,65 €	0,15 €	4391	674,68 €	27	4,22 €	1098
26.10.2002	29.10.2003	369	4507	737,27 €	0,16 €	4458	729,28 €	28	4,56 €	1115
30.10.2003	23.10.2004	360	4556	787,81 €	0,17 €	4619	798,75 €	29	4,99 €	1155
24.10.2004	19.10.2005	361	4118	747,47 €	0,18 €	4164	755,75 €	26	4,72 €	1041
20.10.2005	13.01.2007	451	5548	1.047,73 €	0,19 €	4490	847,94 €	28	5,30 €	1123
14.01.2007	10.09.2007	240	2561	509,05 €	0,20 €	3895	774,18 €	24	4,84 €	974
11.09.2007	02.09.2008	357	4273	867,32 €	0,20 €	4369	886,76 €	27	5,54 €	1092
Mittelwert						<b>4311</b>		<b>27</b>		<b>1078</b>

### A3 Verbrauchsdaten exemplarischer Haushaltsgeräte

Herd mit Kochplatten und Ofen	10	kW max.
Dunstabzugshaube		
Lüfter	110	W
Beleuchtung	2 x 40	W
Mikrowelle	1,370	kW
mit Grillfunktion	2,170	kW
Kühlschrank	75	W
Gefrierschrank	90	W
Kühl-/Gefrierkombination	120	W
Waschmaschine	2000	W
• Kochwäsche 95 °C	1,80	kWh
• Buntwäsche 60 °C	1,05	kWh
• Buntwäsche 40 °C	0,55	kWh
• Mittl. Verbrauchsdaten pro Waschgang	1,0...1,4	kWh
Trockner	2500	W
• Mittl. Verbrauchsdaten pro Trockengang	4...4,5	kWh
Geschirrspüler	2300	W
• ca. 12 Ltr und 1,0 kWh pro Spülgang	1,05	kWh
Kaffeemaschine	1220	W
Heißwasserkocher	2200	W
Toaster	1300	W
Staubsauger	1600	W
Fernsehgerät	65	W
Video/DVD-Player	32	W
Satellitenempfänger	13	W
Radio/Stereoanlage	50	W
	90	W
PC		
Bildschirm		
Laptop	150	W

Anschlussdaten, Technischer Stand der Geräte 1995.

## A4 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung

In der Regel muss die Finanzierung der Investitionskosten über den Kapitalmarkt erfolgen. Über die Einnahmen sind dann die laufenden Kosten zu erwirtschaften. Nachfolgend werden die wichtigsten „Merkmale“ zur Kostenrechnung zusammengefasst<sup>119</sup>.

### A4.1 Bilanz

In der Bilanz werden Vermögenswerte (Aktivseite: Grundstücke, Gebäude, Maschinen, liquide Mittel usw.) und deren Herkunft (Passivseite: Eigenkapital des Besitzers, Bankendarlehen usw.) gegenübergestellt. Beide Seiten müssen also stets ausgeglichen sein.

Die **Aktivseite (Activa)** wird unterteilt in Anlagevermögen und Umlaufvermögen. Das **Anlagevermögen** beinhaltet im Wesentlichen

1. Immobilien (Grundstücke, Gebäude),
2. Mobilien (Möbel, Fahrzeuge, technische Anlagen und Maschinen) sowie
3. Finanzanlagen (Wertpapiere, Beteiligungen).

Zum **Umlaufvermögen** gehören

1. Vorräte (Waren- und Materialbestände),
2. Debitoren (Forderungen aus Lieferungen und Leistungen) und
3. liquide Mittel (Kasse, Bankguthaben).

Die Auflistung erfolgt nach Verfügbarkeit, d. h. unflexible Vermögenswerte erscheinen bevorzugt an erster Stelle, flexible Finanzmittel zuletzt.

Die **Passivseite (Passiva)** ist in Eigen- und Fremdkapital aufgeteilt. Zum **Eigenkapital** zählt:

1. Grundkapital (Aktienkapital, Kapitalanlagen)
2. Rücklagen (Gewinne, die im Unternehmen verbleiben)

Zu **Fremdkapital** gehören

1. Rückstellungen (Kapital, das für in Zukunft zu zahlende Verbindlichkeiten angesammelt wird),
2. (Bank-)Schulden (Darlehen, Hypotheken),
3. Kreditoren (Verbindlichkeiten gegenüber Kreditinstituten, Lieferantenschulden oder -kredite).

Die Auflistung erfolgt nach Fälligkeitsterminen der Verbindlichkeiten.

Im **Rechnungsabgrenzungsposten** werden Abrechnungsperioden abgegrenzt. Diese Position erscheint auf der Aktiv- und auf der Passivseite. Auf der Aktivseite sind dies z. B. Lohnzahlungen die (bei Erstellung der Bilanz) bereits vorab gezahlt wurden. Auf der Passivseite sind dies z. B. vorab erhaltene Mietzahlungen.

Zum Bilanzstichtag (i. Allg. der 31. Dez. eines Jahres) erfolgt so die Bewertung des Unternehmenswertes. Im Rahmen der Inventur werden alle Vermögenswerte aufgenommen, bewert-

---

<sup>119</sup> Stahl, Roland; Geller, Reto K.; Mehler, H. A.: Handbuch Führungskräfte, Heyne-Verlag, München, 1988

tet und die aufsummierten Schulden abgezogen. Der verbleibende Betrag ist das **Eigenkapital**. Durch **Gewinn/Verlust** des Geschäftsjahres verändert sich das Kapital entsprechend. Verbleibt ein positiver Betrag und ist dieser Betrag gegenüber dem Vorjahr gewachsen, so hat das Unternehmen **Gewinn** gemacht. Dieser erscheint dann auf der Passivseite. Ist der **Jahresfehlbetrag** größer als das am Jahresanfang vorhandene Eigenkapital, dann muss der Teil des Jahresfehlbetrages (Verlust), der nicht durch Eigenkapital abgedeckt ist, auf der Aktivseite ausgewiesen werden. Die Schulden sind dann größer als das vorhandene Vermögen (Überschuldung).

Aktivseite	Passivseite
<b>1. Anlagevermögen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Immobilien (Grundstücke, Gebäude)</li> <li>• Mobilien (Möbel, Fahrzeuge, Maschinen)</li> <li>• Finanzanlagen (Wertpapiere, Beteiligungen)</li> </ul>	<b>1. Eigenkapital</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundkapital (Aktien, Kapitaleinlagen)</li> <li>• Rücklagen (Gewinne die im Unternehmen verbleiben)</li> </ul>
<b>2. Umlaufvermögen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorräte (Waren- und Materialbestände)</li> <li>• Debitoren (Forderungen aus Lieferungen und Leistungen)</li> <li>• Liquide Mittel (Kasse, Bankguthaben)</li> </ul>	<b>2. Fremdkapital</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rückstellungen (Kapital das für in Zukunft zu zahlende Pensionen und Verbindlichkeiten angesammelt wird)</li> <li>• (Bank-)Schulden (Darlehen, Hypotheken)</li> <li>• Kreditoren (Lieferantenschulden oder -kredite)</li> </ul>
<b>3. Rechnungsabgrenzungsposten</b>	<b>3. Rechnungsabgrenzungsposten</b>
	<b>4. Wertberichtigungen</b>
(→ Jahresfehlbetrag)	→ Jahresüberschuss

→ **Bilanzsumme**

Vermögenswerte, die entgegen früherer Ausweisungen nicht mehr realisierbar sind (z. B. Ausfall von offenen Forderungen), reduzieren als (passive) **Wertberichtigung** den Gewinn und dienen so dem gesetzlichen Grundsatz der „Bilanzwahrheit“. Die Bewertung hat kaufmännisch vorsichtig zu erfolgen:

1. Wertansätze zum potentiellen Vermögen sind nach dem **Niedrigwertprinzip** zu verbuchen, um unrealistische Gewinne zu vermeiden, aber nicht realisierte Verluste transparent zu machen.
2. Auf der Seite der Verbindlichkeiten wird das **Höchstwertprinzip** angewendet, d. h. Schulden werden immer möglichst hoch angesetzt.

### **Bilanz-Grundsätze:**

1. Der Finanzierungszeitraum muss kürzer als der Nutzungszeitraum sein.
2. Horizontale Bilanzverhältnisse / „**Goldene Bilanzregel**“: Im Idealfall ist das **Anlagevermögen durch Eigenkapital** finanziert; mindestens jedoch durch eine langfristige Finanzierung (mit Eigenkapital und langfristigen Fremdkapital). Denn: Langfristige Schulden sind „sichere“ Schulden.

3. Vertikale Kapitalstruktur: Das **Verhältnis von Eigenkapital zu Fremdkapital** ist im Optimalfall 1 : 1, um das Fremdkapital von Risiken abzusichern und die Kreditwürdigkeit auf dem Gläubigermarkt zu erhalten. Tatsächlich ist in der Praxis ist die Eigenkapitalquote deutlich gesunken (< 20...30 %), Finanzfachleute sehen daher einen Eigenkapitalanteil von ca. 30 % als ausreichend an. Das Unternehmensrisiko wird so auf die Gläubiger verlagert. Es bleibt festzuhalten, dass eine sichere Unternehmensexpansion nur mit einer ausreichenden und langfristig gesicherten Eigenkapital-Basis möglich ist.
4. **Liquiditätsbewertung:** Unter Liquidität ersten Grades versteht man die „Barliquidität“, also die Summe der Geldmittel, die „bar“ und unmittelbar vorhanden ist. Unterformen berücksichtigen zusätzliche den Zeithorizont der Forderungen und die Verfügbarkeit:

$$\text{Liquidität 1. Grades / "Barliquidität"} = \frac{\text{Zahlungsmittel}}{\text{kurzfristige Verbindlichkeiten}}$$

$$\text{Liquidität 2. Grades / "Liquidität auf kurze Sicht"} = \frac{\text{Zahlungsmittel} + \text{kurzfristige Forderungen}}{\text{kurzfristige Verbindlichkeiten}}$$

$$\text{Liquidität 3. Grades / "Liquidität auf mittlere Sicht"} = \frac{\text{Umlaufvermögen}}{\text{kurzfristige Verbindlichkeiten}}$$

Zahlungsmittel sind Bargeld und Bankguthaben. Allgemeingültige Kennzahlen können hier nicht angegeben werden, da diese branchenspezifisch sind.

**Buchführung:** Eine Bilanz wird zum Bilanzstichtag erstellt. Jeder Geschäftsvorfall (Kauf-/Verkauf) führt zu einer Wertverschiebung. In der Buchführung werden daher alle Geschäftsvorfälle in chronologischer Reihenfolge aufgezeichnet. Dabei muss jeder Geschäftsvorfall zweimal verbucht werden, da immer zwei Positionen betroffen sind („**Doppelte Buchführung**“). Beispiel: Der Kauf einer Maschine mit Barzahlung betrifft zwei Bilanzpositionen: Mobilien und Kasse.

Zur besseren Übersicht werden die Geschäftsvorfälle nach **Konten** sortiert und aufgelistet. Hier werden Rechnungseinheiten addiert und subtrahiert. Jede Bilanzposition erhält ein eigenes Konto. Die linke Seite wird mit „Soll“ und die rechte mit „Haben“ gebucht:

Bilanz							
Aktivkonten				Passivkonten			
Maschinen				Eigenkapital			
Soll		Haben		Soll		Haben	
xxx	...€					xxx	...€
Waren				Bankdarlehen			
Soll		Haben		Soll		Haben	
xxx	...€					xxx	...€
Bankguthaben				kurzfr. Verbindlichkeiten			
Soll		Haben		Soll		Haben	
xxx	...€					xxx	...€
Kasse				.....			
Soll		Haben		Soll		Haben	
xxx	...€					xxx	...€

Die Aktivkonten nehmen die Werte auf der linken Seite auf, da sie auch in der Bilanz auf der linken Seite stehen; die Passivkonten übernehmen die Werte auf der Haben-Seite. Zu- und Abgänge werden in chronologischer Reihenfolge gebucht.

Je nach Auswirkung auf die Bilanz unterscheidet man nun folgende Arten der Wertverschiebung:

1. **Aktivtausch:** Die Bilanzsumme bleibt hierbei gleich, ein Aktivum (z. B. Warenbestand) wird erhöht und ein anderes Aktivum (z. B. Kasse) gleichzeitig vermindert.
2. **Passivtausch:** Auch hier bleibt die Bilanzsumme gleich. Beispiel: Ein Darlehen wird umgeschuldet. Es verringern sich die kurzfristigen Verbindlichkeiten (im Soll), die Darlehensschuld erhöht sich (im Haben).
3. **Bilanzvergrößerung:** Ein Aktivum und ein Passivum wird gleichzeitig erhöht; die Bilanzsumme steigt. Beispiel: Wareneinkauf mit Zahlungsziel in 30 Tagen: Die Waren vermehren sich (im Soll), die Verbindlichkeiten ebenfalls (im Haben).
4. **Bilanzverkleinerung:** Ein Aktivum und ein Passivum werden zeitgleich verkleinert. Beispiel: Eine Lieferantenrechnung wird per Überweisung gezahlt. Die Verbindlichkeiten vermindern sich (im Soll), das Bank-Guthaben ebenfalls (im Haben).

Am Ende einer Rechnungsperiode wird zwischen Soll und Haben die Differenz gebildet (**Saldo**). Dabei muss jedes Konto ausgeglichen sein. Der Saldo erscheint also auf der Soll- oder Habenseite und wird in die Abschlussbilanz übertragen.

Für die Nachvollziehbarkeit bestehen **Aufbewahrungspflichten:** Inventare und Bilanzen müssen mindestens 10 Jahre; Geschäftsbriefe, Rechnungen usw. 6 Jahre aufbewahrt werden.

Bilanzen werden mit unterschiedlichen Zielrichtungen aufgestellt. Es gibt Steuer- und Handels-, Monats- und Jahresbilanzen sowie Bilanzen für externen und internen Gebrauch.

## A4.2 Gewinn- und Verlustrechnung

Aus den Aufwands- und Ertragskonten (auch Vorkonten oder Erfolgskonten genannt) lassen sich Gewinn und Verlust ableiten.

Unter **Aufwand** versteht man den Wert der während der jeweiligen Abrechnungsperiode verbrauchten Güter- und Dienstleistungen; der **Ertrag** bezeichnet hingegen die erwirtschafteten Gegenwerte für *erbrachte* Güter und Leistungen. Aufwand sind z. B. Löhne, Mieten und Rohstoffe; der Ertrag entsteht durch den Verkauf der Produkte. In der Gewinn- und Verlustrechnung werden Aufwand und Ertrag der gleichen Periode gegenübergestellt. Auf diese Weise können exakt die Kostenstellen identifiziert werden, die dem Unternehmen Gewinn oder Verlust „zugeführt“ haben.

Aufwendungen werden auf der Sollseite der Aufwandskonten gebucht; Erträge auf der Habenseite der Ertragskonten.

Gewinn- und Verlustrechnung					
Aufwandskonto			Ertragskonto		
Materialverbrauch			Einspeisevergütung		
Personalaufwand			Zuschüsse		
Zinsen			Erlöse z. B. aus Pacht		
Instandhaltung			sonstige Erlöse		
Energieverbrauch					
Soll		Haben	Soll		Haben
Art	.....€			Art	...€
Art	.....€			Art	...€

Während die Bilanz das Ergebnis für einen Zeitpunkt abbildet, liefert die Gewinn- und Verlustrechnung eine detaillierte Übersicht über einen Gesamtzeitraum. Man rechnet die erfassten Daten oft zusätzlich in Prozentanteile um, damit die Tendenzen im Jahresvergleich besser beurteilt werden können.

Spaltet die Unternehmung das Aufwands- und Ertragskonto in verschiedene Kostenarten auf (Miete, Löhne, Kfz...), so können diese verschiedenen Geschäftsprozessen oder den Ertragsanteilen zugeordnet werden. Entwicklungstendenzen des Unternehmens können hieraus abgeleitet werden. Die wichtigsten Aufwandsarten sind

- Abschreibungen (linear oder degressiv)
- Waren und Materialverbrauch,
- Raum- und Personalaufwand,
- Zinsen, Versicherungen und Steuern,
- Reparaturen und Instandhaltung,
- Energieverbrauch;

die wesentlichen Ertragsarten sind

- Erlöse aus Produkten/Dienstleistungen,
- Miet- und Einspeiserlöse
- sonstige Erlöse

**Neutrale Aufwände und Erträge** werden gesondert gebucht. Sie entstehen aus Geschäftsprozessen, die mit dem eigentlichen betrieblichen Leistungen nichts zu tun haben (z. B. Wechselkursgewinne, Beseitigung von Schäden).

Der Saldo aus Ertrag und Aufwand ist der Gewinn oder Verlust.

Über die **Rentabilität** kann das Ergebnis bewertet werden:

$$\text{Eigenkapitalrentabilität} = \frac{\text{Gewinn}}{\text{durchschnittl. Eigenkapital der Periode}}$$

Im Falle einer Unternehmensbeteiligung (z. B. einem Windpark) sollte der Prozentsatz über den marktüblichen Fremdkapitalzinsen liegen. Je höher das betriebswirtschaftliche Risiko, desto größer sollte der Differenzbetrag sein.

Über die Verzinsung des gesamten eingesetzten Kapitals gibt die Gesamrentabilität Auskunft:

$$\text{Gesamtkapitalrentabilität} = \frac{\text{Gewinn} + \text{Fremdkapitalzinsen}}{\text{Gesamtkapital}}$$

Ziel ist eine Verbesserung der Eigen- und der Gesamtkapitalrentabilität. Liegt der Fremdkapitalzinssatz unter der Verzinsung des Gesamtkapitals, dann verbessert der überschüssige Ertragsanteil die Eigenkapitalrentabilität. Das heißt erzielt das Unternehmen eine bessere Rendite, als die Banken als Zinsen für Fremdkapital erheben, kann die Eigenkapitalrendite gesteigert werden, indem eine **Verschiebung von Eigen- in Richtung Fremdkapital** erfolgt („*Hebelwirkung des Fremdkapitals*“ = „*Leverage*“-Effekt<sup>120</sup>). Einzige Bedingung: Der Fremdkapitalzinssatz liegt unter der Gesamtkapitalrentabilität. Bei kleinen Gewinnen tritt der umgekehrte Effekt auf; die Eigenkapitalrendite sinkt überproportional.

---

<sup>120</sup> Leverage = engl. Hebelvorrichtung



### A4.3 Finanzplanung und Finanzkontrolle

Zur Vermeidung von **Liquiditätsengpässen** ist eine möglichst detailgetreue Finanzplanung und Finanzkontrolle erforderlich. Beispiele für Fehleinschätzungen sind:

1. **Expansion:** Normalerweise ist es ein natürliches Ziel einer Unternehmung zu wachsen. Ein häufiger Fehler besteht darin, dass zwar die Erweiterung des Anlagevermögens (Gebäude, Maschinen) geplant, das (zwangsläufige) mitwachsende Umlaufvermögen aber „vergessen“ wird (Vorräte, Waren...). Es ist deshalb eine systematische Vorausplanung des Umlaufvermögens erforderlich.
2. **Zahlungsgewohnheiten:** Nicht nur der Ausfall von offenen Forderungen (z. B. durch Insolvenz des Schuldners), sondern auch eine schlechte Zahlungsmoral der Kunden können Unternehmen in Existenznot bringen. Hohe Zwischenfinanzierungskosten sind daher zu vermeiden durch
  - rasche Rechnungserstellung,
  - günstige Zahlungsbedingungen (Skonto, gute Bankverbindung),
  - wirksames Mahnwesen,
  - Forderungen beleihen und verkaufen (Factoring, Wecheldiskont),
  - Leasing,
  - Bonitätsprüfung vor Vertragsabschluss,
  - Warenkreditversicherung.
3. **Gewinnausschüttung:** Auch die totale Ausschüttung des Gewinns führt oft zu einem Substanzverlust, besonders wenn die Abschreibungsbeträge nicht zur Reinvestition ausreichen. Die Kreditwürdigkeit einer Unternehmung wird auch danach beurteilt, ob und in welchem Maße die erwirtschafteten Gewinne im Unternehmen verbleiben und investiert werden.
4. **Fehlplanung bei Umsatz und Kosten:** Bleibt der Umsatz unter dem Planziel zurück (weil die Personalkosten stärker als die Umsätze steigen) ist die Liquidität ebenfalls gefährdet.
5. **Kreditspielraum:** Meistens werden Kreditinstitute aufgesucht, wenn man dringend Geld benötigt. Es ist daher nicht nur zweckmäßig die Geschäftsverbindungen zu pflegen, sondern auch mehrere gute Bankverbindungen zu unterhalten. Die Bankkontakte und die Einbindung der Banken sollten also gepflegt werden, wenn man gerade kein Geld benötigt.

Durch eine gezielte und **vorausschauende Finanzplanung** der Ein- und Auszahlungen können derartige Liquiditätsengpässe weitgehend vermieden werden. Dazu müssen die Betriebsvorgänge jedoch bekannt und Erfahrungen und Prognosen zu den Zahlungsein- und -ausgängen vorliegen.

Die **Investitionsplanung** dient der Beurteilung von Investitionsvorhaben bzw. dem Vergleich verschiedener Alternativen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Hier unterscheidet man statische und dynamische Methoden:

1. statische Investitionsplanung: Alle gegenwärtigen und zukünftigen Beträge werden gleich behandelt.
2. dynamische Investitionsplanung: Die zukünftigen Beträge werden mit Hilfe von Abzinsfaktoren umgerechnet. D. h. je weiter ein Betrag in der Zukunft liegt, desto weniger ist er heute wert!

Verfahren der **statischen Investitionsrechnung** sind:

1. **Kostenvergleichsrechnung:** Hierbei werden die jährlichen, durchschnittlichen Gesamtkosten (Anschaffung, Betriebskosten usw.) einer alten und einer neuen Anlage (bei Ersatzinvestitionen) oder die Gesamtkosten verschiedener neuer Anlagen (bei Erweiterungsinvestitionen) miteinander verglichen.
2. **Gewinnvergleichsrechnung:** Hier ist ein Vergleich der zu erwartenden Jahresgewinne das ausschlaggebende Entscheidungskriterium.
3. **Amortisationsrechnung:** Damit berechnet man den Zeitraum, in dem sich die Investition amortisiert hat. Je schneller umso günstiger.
4. **Rentabilitätsrechnung:** Der Quotient aus Gewinn/Kapital entscheidet über die Investition.

Zu der **dynamischen Investitionsrechnung** gehört beispielsweise die **Kapitalwertmethode**. Hier werden alle Einnahmen und Ausgaben einer Investition auf den Zeitpunkt unmittelbar vor Beginn der Investition abgezinst, d. h. vom zukünftigen Wert auf den gegenwärtigen Wert umgerechnet. Als entscheidende Größe ergibt sich der Kapitalwert einer Investition als Differenz zwischen der Summe der abgezinsten Einnahmen und der Summe der abgezinsten Ausgaben. Die Höhe des Kapitalwertes ist für die Beurteilung der Investition ausschlaggebend:

Beispiel:

Stichtag	02.01.2004	01.01.2005	01.01.2006	01.01.2007	01.01.2008	Summe
Einzahlungen		3.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	2.000,00 €	9.000,00 €
Auszahlungen	6.000,00 €	1.000,00 €	500,00 €	300,00 €		7.800,00 €
Nettoeinzahlungen	- 6.000,00 €	2.000,00 €	1.500,00 €	1.700,00 €	2.000,00 €	1.200,00 €

Der Kapitalwert errechnet sich mit

$$k = \sum_{n=1}^N \frac{(E_n - A_n)}{(1+z)^n}$$

d. h.

$$k = \frac{(E_0 - A_0)}{1} + \frac{(E_1 - A_1)}{(1+z)^1} + \frac{(E_2 - A_2)}{(1+z)^2} + \dots + \frac{(E_N - A_N)}{(1+z)^N}$$

Darin ist

- $E_n$  Einzahlung am Ende der Periode  $n$
- $A_n$  Auszahlung am Ende der Periode  $n$
- $z$  Kalkulationszinsfuß (z. B. der aktuelle Kreditzinssatz 6 %  $\rightarrow z = 0,06$ )
- $n$  Periode ( $n = 0, 1, 2, \dots, N$ )
- $N$  Nutzungsdauer des Investitionsobjekts

Wird der Kapitalwert negativ, ist die effektive Verzinsung niedriger als die Kreditzinsen. Die Investitionsentscheidung fällt negativ aus. Ist der Kapitalwert größer als Null, ist die Investition von Vorteil.

#### A4.4 Darlehens- und Tilgungsrechnung

Wird am Kapitalmarkt ein Kredit im Wert von  $k_0$  aufgenommen, sind Zinsen  $z$  und Tilgung  $t$  zu bedienen. Die Summe aus Zins- und Tilgung ist die Jahresrate  $r$ , i. Allg. werden die Zins- und Tilgungsanteile auf monatliche Raten heruntergerechnet. Die **Restschuld** nach  $n$  Jahren berechnet sich zu

$$k_n = k_0 \cdot q^n - r \cdot \frac{q^n - 1}{q - 1}$$

Umgestellt nach der **erforderlichen Rate**

$$r = \frac{(k_0 \cdot q^n - k_n) \cdot (q - 1)}{q^n - 1}$$

oder der **Anzahl von Jahren**

$$n = \frac{\lg \frac{r - k_n \cdot (q - 1)}{r - k_0 \cdot (q - 1)}}{\lg q}$$

darin ist

$k_0$	Anfangskapital im 0ten Jahr	
$k_n$	Restkapital nach $n$ Jahren	
$r$	Tilgungsanteil der Jahresrate	
$z$	Zinssatz	z. B. 5 % $\rightarrow$ 0,05
$t$	Tilgung	z. B. 2 % $\rightarrow$ 0,02
$q = 1 + z$	Zinsfaktor	z. B. 1,05
$n$	Anzahl der Jahre / Laufzeit	z. B. 10 Jahre

Da die Restschuld mit jeder Rückzahlrate sinkt, vermindert sich die Zinsbelastung. Oft werden Zins- und Tilgungszahlungen für die gesamte Laufzeit festgeschrieben. Dies hat zur Folge, dass die Zinsbelastung sinkt und der Tilgungsanteil steigt (**Annuitätendarlehen**).

Die Berechnung kann relativ einfach in einem Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen:

A1	B	C	D	E	F	G	H
2	<b>Darlehenssumme</b>		100000				
3							
4	Zinssatz	0,055	=D2*C4	p.a.	=D4/12	p.m.	=C4+1
5	Tilgung	0,02	=D2*C5	p.a.	=D5/12	p.m.	=C5+1
6	Annuität	=C5+C4	=D5+D4	p.a.	=E5+F4	p.m.	
7	Tilgung nach	=LOG10((D2/D5)*(H4-1)+1)/LOG10(H4)	Jahren				
8	Tilgungssumme	=D5*(POTENZ(H4;E8)-1)/(H4-1)	im / nach	5	Jahren		
9	Restschuld	=D2-C8					

Beispiel:

<b>Darlehenssumme</b>		100.000,00 €			
Zinssatz	5,50%	5.500,00 €	p.a.	458,33 €	p.m. 1,055
Tilgung	2,00%	2.000,00 €	p.a.	166,67 €	p.m. 1,020
<b>Annuität</b>	<b>7,50%</b>	<b>7.500,00 €</b>	<b>p.a.</b>	<b>625,00 €</b>	<b>p.m.</b>
Tilgung nach	24,687	Jahren			
Tilgungssumme	11.162,18 €	im / nach	5	Jahren	
Restschuld	88.837,82 €				

# A5 Periodensystem der Elemente

Haupt																	
I a	II a																
+I +II Oxidationsstufe																	
$s^1$ $s^2$ Orbitale der Valenzelektronen																	
H Wasserstoff 1,0079 1 1																	
Li Lithium 6,941 3 1																	
Be Beryllium 9,012 4 2																	
Na Natrium 22,990 11 1																	
Mg Magnesium 24,305 12 2																	
K Kalium 39,098 19 1																	
Ca Calcium 40,078 20 2																	
Rb Rubidium 85,468 37 1																	
Sr Strontium 87,62 38 2																	
Y Yttrium 88,906 39 1																	
Cs Cäsium 132,91 55 1																	
Ba Barium 137,33 56 2																	
La Lanthan 138,91 57 1																	
Ce Cer 140,12 58 2																	
Pr Praseodym 140,91 59 3																	
Nd Neodym 144,24 60 4																	
Pm Promethium (145) 61 3																	
Sm Samarium 150,35 62 3																	
Eu Europium 151,96 63 3																	
Gd Gadolinium 157,25 64 3																	
Tb Terbium 158,93 65 3																	
Dy Dysprosium 162,50 66 3																	
Ho Holmium 164,93 67 3																	
Er Erbium 167,26 68 3																	
Tm Thulium 168,93 69 3																	
Yb Ytterbium 173,04 70 3																	
Lu Lutetium 174,97 71 3																	
Fr Francium (223) 87 1																	
Ra Radium (226) 88 2																	
Ac Actinium (227) 89 3																	
Th Thorium 232,04 90 2																	
Pa Protactinium 231,04 91 3																	
U Uran 238,03 92 2																	
Np Neptunium (237) 93 3																	
Pu Plutonium (244) 94 3																	
Am Americium (243) 95 3																	
Cm Curium (247) 96 3																	
Bk Berkelium (247) 97 3																	
Cf Californium (251) 98 3																	
Es Einsteinium (252) 99 3																	
Fm Fermium (257) 100 3																	
Md Mendelevium (258) 101 3																	
No Nobelium (259) 102 3																	
Lw Lawrencium (262) 103 3																	

Dichte der Elemente  $< 5 \text{ g/cm}^3$

- 5...10
- 10...15
- 15...20
- $> 20$

Ordnungszahl  $Z$

relative Atommasse („Atomgewicht“)  $A$

\* radioaktiv

Siedepunkt  $T_b$

Schmelzpunkt  $T_m$  (°C)

Element

B basische Oxide  
S saure Oxide  
BS beides od. amphoter

Elektronegativität EN

Elektronenkonfiguration

höchste bzw. wichtigste Wertigkeit  $+III d^1$

Besetzung der d-Orbitale

Nebengruppe III b

Lanthanoide und Actinoide

										Hauptgruppen						Edelgase	Schale	Periode														
										III a	IV a	V a	VI a	VII a	VIII a																	
Wertigkeit gegenüber Sauerstoff (in Oxiden und Sauerstoffsäuren)										+III	+IV	+V	+VI	+VII	0																	
Wertigkeit gegenüber Wasserstoff (in Elementverbindungen und Hydriden)											-IV	-III	-II	-I	0																	
Orbitale der Valenzelektronen										$p^1$	$p^2$	$p^3$	$p^4$	$p^5$	$p^6$																	
												Princo- gene	Chalco- gene	Halo- gene	4,0026 -208,7 -208,7																	
gasförmig ↑ fest bei 20 °C (Ausnahme: Br, Hg: flüssig) ↓										Halbmetalle			Nichtmetalle																			
										B 2030 Bor	C 12,011 Kohlenstoff	N -210 Stickstoff	O -2188 Sauerstoff	F -188,2 Fluor	Ne -208,7 Neon																	
										Al 660 Aluminium	Si 1410 Silicium	P 34,2 Phosphor	S 119,6 Schwefel	Cl -1010 Chlor	Ar -188,4 Argon																	
										Eisenmetalle			Edelmetalle																			
										Platinmetalle			Edelmetalle																			
										+IV $d^2$	+V $d^3$	+VI $d^4$	+VII $d^5$	(+VIII) $d^6$	(+II) $d^7$	+II $d^8$	+I $d^9$	+II $d^{10}$														
Übergangsmetalle (Nebengruppen)																																
IV b		V b		VI b		VII b		VIII b		I b	II b																					
22 47,867 3200 Ti 1688 Titan	23 50,942 3450 V 1900 Vanadium	24 51,996 2885 Cr 1975 Chrom	25 54,938 2150 Mn 1246 Mangan	26 55,845 3000 Fe 1538 Eisen	27 58,933 2900 Co 1436 Cobalt	28 58,933 2730 Ni 1453 Nickel	29 63,546 2585 Cu 1083 Kupfer	30 65,409 906 Zn 419,5 Zink	31 69,723 2237 Ga 23,9 Gallium	32 72,64 2833 Ge 537,4 Germanium	33 74,922 613 As 60 Arsen	34 78,96 685 Se 217 Selen	35 79,904 58 Br -7,2 Brom	36 83,798 -102 Kr -167,3 Krypton																		
40 91,224 3590 Zr 1832 Zirkonium	41 92,906 3300 Nb 2468 Niobium	42 95,94 5950 Mo 2610 Molybdän	43 (98) 2200 Tc Technetium	44 101,07 4900 Ru 1562 Ruthenium	45 102,91 4500 Rh 1966 Rhodium	46 106,42 3980 Pd 1552 Palladium	47 107,87 2270 Ag 960,8 Silber	48 112,41 765 Cd 320,9 Cadmium	49 114,82 2000 In 156,2 Indium	50 118,71 2270 Sn 231,9 Zinn	51 121,76 1380 Sb 635,5 Antimon	52 127,60 985 Te 449,5 Tellur	53 126,90 183 I 113,7 Iod	54 131,29 -108,0 Xe -111,9 Xenon																		
72 178,49 5400 Hf 2262 Hafnium	73 180,95 5425 Ta 2966 Tantal	74 183,84 5950 W 3410 Wolfram	75 186,21 6900 Re 3160 Rhenium	76 190,23 5500 Os 2740 Osmium	77 192,22 6300 Ir 2454 Iridium	78 195,08 4530 Pt 1769 Platin	79 196,97 2070 Au 1083 Gold	80 200,59 95 Hg 38,4 Quecksilber	81 204,38 1437 Tl 303 Thallium	82 207,2 1725 Pb 327,4 Blei	83 208,98 1580 Bi 271,3 Bismut	84 (209) 965 Po 254 Polonium	85 (210) 380 At 302 Astat	86 (222) -618 Rn -7 Radon																		
104 (261) Rf Rutherfordium	105 (262) Db Dubnium	106 (266) Sg Seaborgium	107 (264) Bh	108 (277) Hs	109 (268) Mt	110 (281) Ds	111 (272) Rg	112 (285) Uub	113 (284) Uut	114 (289) Uuq	115 (288) Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo																		
<b>Elementsymbole (alphabetisch) mit Ordnungszahl</b> Ac Ag Al Am Ar As At Au B Ba Be Bi Bk Br C Ca Cd Ce Cf Cl Cm Co Cr Cs Cu Dy 89 47 13 95 18 33 85 79 5 56 4 83 97 35 6 20 48 58 98 17 96 27 24 55 29 66 Er Es Eu F Fe Fm Fr Ga Gd Ge H He Hf Hg Ho In Ir J K Kr Ku La Li Lr Lu Md 68 99 63 9 26 100 87 31 64 32 1 2 72 80 67 49 77 53 19 36 104 57 3 103 71 101 Mg Mn Mo N Na Nb Nd Ne Ni No Np O Os P Pa Pb Pd Pm Po Pr Pt Pu Ra Rb Re Rh 12 25 42 7 11 41 60 10 28 102 93 8 76 15 91 82 46 61 84 59 78 94 88 37 75 45 Rn Ru S Sb Sc Se Si Sm Sn Sr Ta Tb Tc Te Th Ti Tl Tm U V W Xe Y Yb Zn Zr 86 44 16 51 21 34 14 62 50 38 73 65 43 52 90 22 81 69 92 23 74 54 39 70 30 40																																
s	p	d	f	s	p	d	f	s	p	d	f	s	p	d	f	s	p	d	f	s	p	d	f	s	p	d	f	s	p	d	f	Zustand

## A6 Lösungen zu den Übungen

### Lösungen zu Kap. 2

zu 2.1: Nach Gl. (2.2) folgt

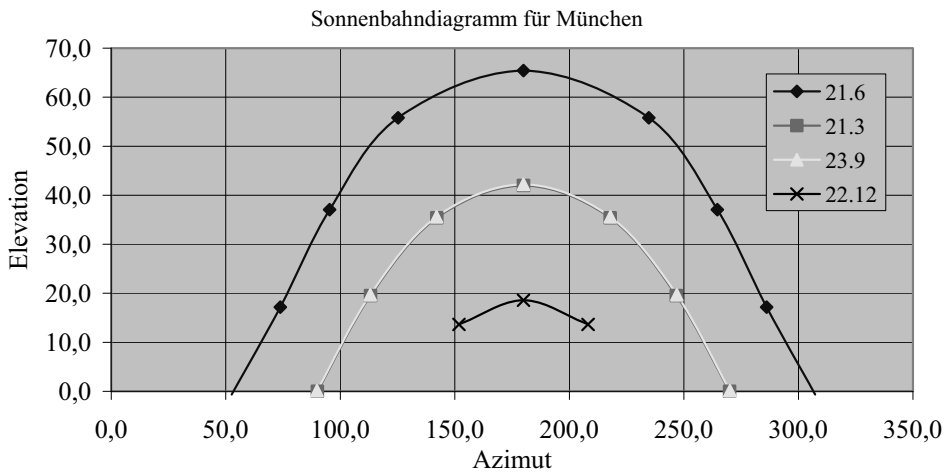
[W/m <sup>2</sup> ]	Diffus- strahl.	Direkt- strahl.	Global- strahl.	Tage	kWh
Jan	17	3	20	31	14,88
Feb	40	15	55	28	36,96
Mrz	60	30	90	31	66,96
Apr	85	50	135	30	97,2
Mai	110	80	190	31	141,4
Jun	135	75	210	30	151,2
Jul	120	70	190	31	141,4
Aug	105	65	170	31	126,5
Sept	70	45	115	30	82,8
Okt	45	25	70	31	52,08
Nov	20	5	25	30	18
Dez	10	5	15	31	11,16
				<u>365</u>	<u>940,4</u>

zu 2.2: Wirkungsgrad: ca. 120 kWh / m<sup>2</sup> a bezogen auf 1000 kWh/m<sup>2</sup> a als Jahresmittelwert ergibt: 0,12 = 12 %. Amortisationszeit: 27.600,-- € Investitionskosten / 2300,-- € Jahresertrag → ca. 12 Jahre ohne Wartungs- oder Instandhaltungskosten. Dabei ist anzumerken, dass der Ausfall eines Wechselrichter in dieser Laufzeit nicht ungewöhnlich ist. Investitionskosten 27.600 € / prognostizierter Ertrag nach 10 Jahre: 10 x 120 kWh/ m<sup>2</sup> a x 36, 1 m<sup>2</sup> = 43200 kWh → 27600/43200 = 63,9 Cent/kWh; Einspeisevergütung: 54,5 Cent/kWh; Einkaufspreis (vgl. Anhang) 15 Cent/kWh. Volllaststunden = Ertrag 4300 kWh/4,8 kW<sub>p</sub> = ca. 900 Volllaststunden pro Jahr. Beachte: Durch die Wetter- und Witterungseinflüsse kann es sich nur um Anhaltswerte handeln; eine exakte Prognose ist nicht möglich!

zu 2.3: Solarer elektr. Deckungsgrad: Ertrag der Anlage 4300...4400 kWh p.a. / Verbrauch 4000...4600 kWh → 0,96 ... 1,075 solarer Deckungsgrad, d. h. im Jahresmittel ist Selbstversorgung denkbar. Tendenziell wird jedoch im Januar eine Unterproduktion und im Juli eine Überproduktion vorliegen; vgl. dazu die Monatserträge der Beispielanlage in Nürnberg.

zu 2.4: Sonnenbahndiagramm für München:

Position (hier München)											
	geogr. Breite $\varphi$	48	N in Bogenmaß:	0,838							
	geogr. Höhe	11,5	E in Bogenmaß:	0,201							
Tag	Tag des Jahres	Laufvariable $J'$	Deklination $\delta$	Zeit	Stundenwinkel $\beta$		Höhen-/Elevationswinke		Azimutwinkel $\alpha$		
1.1			[° und rad]	WOZ [Std]	[°]	[rad]	[°]	[rad]	[°]	[rad]	
21.6	172	169,64	23,4	0	180	3,14	-18,6	-0,3239	0,0	0,000	
			0,409	2	150	2,62	-13,7	-0,2382	28,2	0,492	
				4	120	2,09	-0,6	-0,0113	52,6	0,918	
				6	90	1,57	17,2	0,3001	73,8	1,288	
				8	60	1,05	37,1	0,6468	95,4	1,665	
				10	30	0,52	55,8	0,9743	125,3	2,186	
				12	0	0,00	65,4	1,1422	180,0	3,142	
				14	-30	-0,52	55,8	0,9743	234,7	4,097	
				16	-60	-1,05	37,1	0,6468	264,6	4,619	
				18	-90	-1,57	17,2	0,3001	286,2	4,995	
				20	-120	-2,09	-0,6	-0,0113	307,4	5,365	
				22	-150	-2,62	-13,7	-0,2382	331,8	5,792	
				24	-180	-3,14	-18,6	-0,3239	360,0	6,283	



**Lösungen zu Kap. 3**

zu 3.1: Der verfügbare Wärmeinhalt des Wassers beträgt

$$\begin{aligned}
 Q &= m_w \cdot c_p \cdot \Delta T = V_w \cdot \rho_w \cdot c_p \cdot \Delta T \\
 &\approx \frac{500}{1000} m^3 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 4,2 \frac{kJ}{kgK} [90 - 40] K \\
 &\approx \underline{\underline{29,2 kWh}}
 \end{aligned}$$

Der Wärmehalt eines Liter Heizöls entspricht:

$$\begin{aligned}
 Q &= m \cdot H_u = V \cdot \rho \cdot H_u \\
 &= \frac{1}{1000} \text{ m}^3 \cdot 920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 42000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad [\text{J} = \text{Ws}] \\
 &= \frac{920 \cdot 42}{3600} \text{ kWh} = \underline{\underline{10,7 \text{ kWh}}}
 \end{aligned}$$

Der Wärmehalt des Speichers (500 Ltr-Zylinder = 0,5 m<sup>3</sup> = ca. 2 m Höhe und 56 cm Durchmesser) entspricht also ca. 3 Liter Heizöl (= 3 x 1 dm<sup>3</sup>).

zu 3.2: 1000 kWh x 14 m<sup>2</sup> x 0,25 Nutzungsgrad = 3500 kWh; bezogen auf ca. 17.000 kWh Wärmeverbrauch (ca. 1.200,- € Heizkosten) entspricht dies etwa 20 % (oder 0,2 x 1200,- € ca. 250,- € Heizkosteneinsparung) → Amortisationskosten bei einfacher linearer Abschreibung: Investitionskosten 12.000 € / 250,- € Einsparung p.a. = 48 Jahre. BEACHTEN: Zukünftige Preissteigerungen sind in dieser Kalkulation natürlich nicht enthalten! Interessanter ist das CO<sub>2</sub>-Einsparpotential: Da nach Kap. 7, Gl. (7.16) und Aufg. 7.3 bei der Erzeugung von 17 MWh Wärme aus fossilen Energieträgern etwa 4...5 Tonnen CO<sub>2</sub> entstehen, entsprechen 20 % ca. einer Tonne CO<sub>2</sub>-Einsparung pro Jahr.

zu 3.3: Nach Gl. (3.7b) folgt

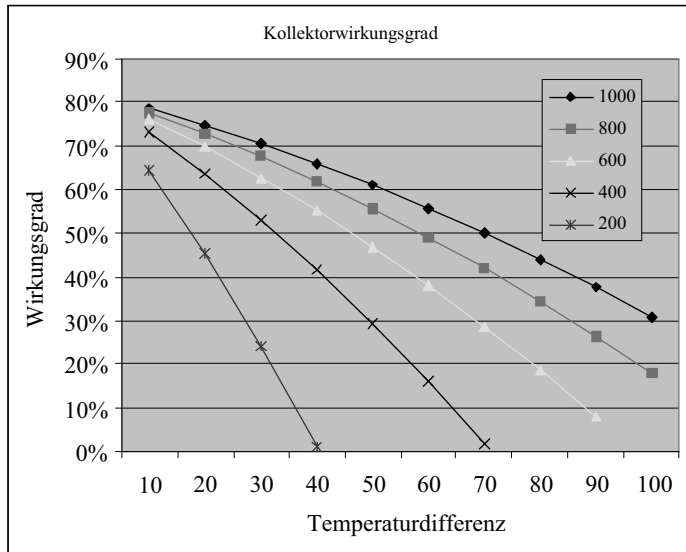
$$\begin{aligned}
 \eta &= \eta_0 - \frac{K_1 \cdot (T_{Abs} - T_U) + K_2 \cdot (T_{Abs} - T_U)^2}{\dot{G}_G} \\
 &= 0,82 - \frac{3,312 \cdot (70 - 25) + 0,0181 \cdot (70 - 25)^2}{500} = 0,82 - 0,37 = 0,45 = 45 \%
 \end{aligned}$$

Durch Parametervariation von Temperaturdifferenz und Globalstrahlung erhält man:

		Globalstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]				
		1000	800	600	400	200
$\Delta T =$	10	79 %	78 %	76 %	73 %	65 %
	20	75 %	73 %	70 %	64 %	45 %
	30	70 %	68 %	63 %	53 %	24 %
	40	66 %	62 %	55 %	42 %	1 %
	50	61 %	56 %	47 %	29 %	
	60	56 %	49 %	38 %	16 %	
	70	50 %	42 %	29 %	2 %	
	80	44 %	34 %	19 %		
	90	38 %	26 %	8 %		
	100	31 %	18 %	-3 %		



Grafisch:



Man beachte den Einfluss der Globalstrahlung und der Absorbtemperatur und die Konsequenzen für mittägliche und z. B. abendliche Strahlungs- und Temperaturbedingungen!

zu 3.4: Solarer Deckungsgrad

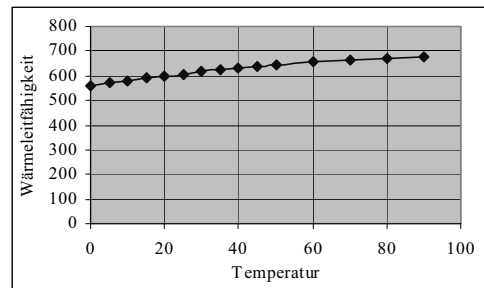
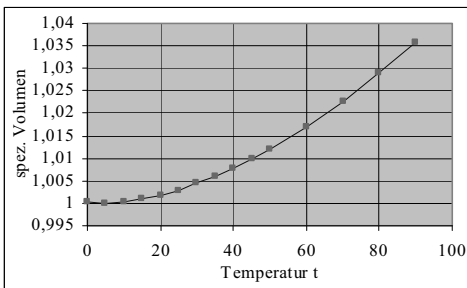
Monat	Gradtaganteil nach VDI 2067	Fernwärmeanteil [MWh]	Globalstrahl. [W/m²]	Tage	kWh/m² p.m.	solarer Wärmeenertrag [MWh]	Deckungsanteil [MWh]
Januar	170	2,890	20	31	14,9	0,071	0,071
Februar	150	2,550	55	28	37,0	0,177	0,177
März	130	2,210	90	31	67,0	0,320	0,320
April	80	1,360	135	30	97,2	0,465	0,465
Mai	40	0,680	190	31	141,4	0,676	0,676
Juni	13,3	0,227	210	30	151,2	0,723	0,227
Juli	13,3	0,227	190	31	141,4	0,676	0,227
August	13,3	0,227	170	31	126,5	0,605	0,227
September	30	0,510	115	30	82,8	0,396	0,396
Oktober	80	1,360	70	31	52,1	0,249	0,249
November	120	2,040	25	30	18,0	0,086	0,086
Dezember	160	2,720	15	31	11,2	0,053	0,053
<b>Σ</b>	<b>1000</b>	<b>17,000</b>		<b>365</b>	<b>940,4</b>	<b>4,500</b>	<b>3,175</b>
		<b>100%</b>			13,8 m²		<b>19%</b>

Jahresertrag  
gemittelter Wirkungsgrad 35%

100% 12.978 kWh p.a.  
4.500 kWh p.a.

Obwohl der Wirkungsgrad von der Einstrahlung und Außentemperatur abhängt, kann mit dem über das Jahr gemittelten Wirkungsgrad näherungsweise gerechnet werden. Er beträgt hier 35 %, der solare Deckungsgrad liegt bei ca. 19 %.

- zu 3.5: Aus den Ertragsdaten der Referenzanlage in Kap. 3.3 kann der Fernwärmeverbrauch nach Einrüstung der solarthermischen Anlage abgelesen werden: Sommer 06 bis 07 ca. 46 MWh minus 36 MWh = 10 MWh; Sommer 07 bis Sommer 08: 57 MWh minus 46 MWh = 11 MWh. Aus Anhang A1 erhält man den Jahresverbrauch von ca. 17 MWh. Die Einsparung entspricht also ca.  $(17-10)/17 = 41$  %. D. h. also ca. 40 % Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung (vgl. Aufg. 7.3: Statt 5 t CO<sub>2</sub> ca. 3 t CO<sub>2</sub>; d. h. also 2 t CO<sub>2</sub> Einsparung pro Jahr). BEACHTEN: Durch relativ milde Winter muss das Ergebnis nicht repräsentativ sein. Der Mittelwert aus Aufg. 3.4 und Aufg. 3.5 entspricht etwa den Darstellungen aus Bild 3.7.
- zu 3.6: Die Wärmeleitfähigkeit und die Dichte zeigen nachfolgende Abhängigkeit:



Verglichen mit anderen Werkstoffen (vgl. Tab. 3.2) hat das Wasser zwar eine große spezifische Wärmekapazität aber eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Dies führt dazu, dass der Wärmeausgleich über das Wasser stark behindert wird (der Effekt ist vom Tauchen und Schnorcheln als Temperatur-Sprungschichten im Wasser erlebbar). Die Temperaturschichtung bleibt aufgrund des eher stärkeren Dichteunterschieds erhalten.

## Lösungen zu Kap. 4

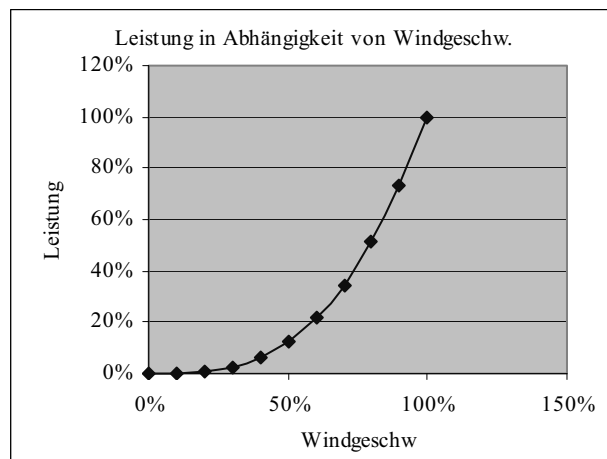
- zu 4.1: Vergleicht man die Herstellerangaben zur Windgeschwindigkeit im Nennbetriebspunkt (14 m/s) mit den Jahresmittelwerten aus den Vorbemerkungen zu Kap. 4 (ca. 3 m/s), so fällt hier eine relativ große Differenz auf. Nach dem Dritte-Potenz-Gesetz

$$P = \eta \cdot \left[ \underbrace{\left( \frac{\rho}{2} c^2 \right)}_{P_{dyn}} \cdot A \right] \cdot c \sim c^3 \quad \text{bzw.} \quad \left( \frac{P_1}{P_2} \right) = \left( \frac{c_1}{c_2} \right)^3$$

kann die Leistung wie folgt prognostiziert werden:

m/s	<i>c</i>	<i>P</i>	W
0,0	0 %	0 %	0,00
1,4	10 %	0 %	0,75
<b>2,8</b>	<b>20 %</b>	<b>1 %</b>	<b>6,00</b>
<b>4,2</b>	<b>30 %</b>	<b>3 %</b>	<b>20,25</b>
5,6	40 %	6 %	48,00
7,0	50 %	13 %	93,75
8,4	60 %	22 %	162,00
9,8	70 %	34 %	257,25
11,2	80 %	51 %	384,00
12,6	90 %	73 %	546,75
14,0	100 %	100 %	750,00

Grafisch aufbereitet also:



Aus „Marketing-Aspekten“ ist also interessant, dass der Hersteller für „Überschussperioden“ auch eine Heizpatrone mit vertreibt, die bei 10...20 W nicht einmal „handwarm“ werden würde.

Mit den mittleren Jahresvolllaststunden erhält man folgende Ertragsprognose:

Wind [m/s]		Leistung [W]	Arbeitsstunden	Ertragsprognose
5,5 m/s	39 %	6 % 45,47 W	1600 h/a	72,76 kWh/a
6,5 m/s	46 %	10 % 75,06 W	2300 h/a	172,64 kWh/a
7,5 m/s	54 %	15 % 115,31 W	3000 h/a	345,93 kWh/a
<b>Jahressumme:</b>			6.900,00 h/a	591,33 kWh/a

Die Leistungsangabe 280 W bei 10 m/s ist durchaus plausibel, weil

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = \left(\frac{c_1}{c_2}\right)^3 = \left(\frac{10}{14}\right)^3 = (0,71)^3 = 0,36$$

also 750 W x 36 % = 273 W (2 % „Messfehler“ zu 280 W wären „erklärbar“!).

Berechnung des Wirkungsgrades im Nennbetriebspunkt: Bei einem Luftdruck von 1 bar (abs.) und einer Temperatur von 15 °C ist die Dichte der Luft: 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Bei 14 m/s Windgeschwindigkeit (= Nennbetriebspunkt) ist der Staudruck 118,5 N/m<sup>2</sup>. Bei einer Rotorfläche von 1,5 m x 1,5 m = 2,25 m<sup>2</sup> ist der somit verfügbare Volumenstrom 2,25 m<sup>2</sup> x 14 m/s = 31,5 m<sup>3</sup>/s und das verfügbare Leistungsangebot des Windes

$$P_1 \approx \dot{V}_1 \cdot p_1 = (A \cdot c_1) \cdot \left( \frac{\rho}{2} c_1^2 \right) = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot c_1^3 = 3734,8 \text{ W} \cdot$$

Davon wären laut Herstellerangabe 750 W verfügbar, so dass der Wirkungsgrad oder Leistungsbeiwert 20 % beträgt und damit im erwarteten Bereich nach Bild 4.16 liegt.

zu 4.2: Beispielanlage in der Lausitz: Beachte den starken Einfluss der Lastannahmen auf den Ertrag; Rechnung mit dem Jahresmittelwert gibt ein falsches Ergebnis, weil eine unzureichende Gewichtung der Leistung erfolgt (die Abweichungen vom Windmittelwert werden bezüglich der Leistung nach dem 3. Potenzgesetz viel stärker bewertet). Beachte auch die Angabe der Nennwindgeschw. zur Nennleistung: Oft wird diese Angabe unterschlagen! Variationen des Durchmesser: 10 % mehr Durchmesser → 20 % mehr Leistung:

#### Rotordaten:

Rotordurchmesser	<i>d</i>	82 m
überstrichene Fläche	<i>A</i>	5281 m <sup>2</sup>

#### Luft

Druck	<i>p</i>	1 bar =	100000 Pa
Temperatur	<i>t</i>	15 °C =	288 K
Dichte	$\rho$	1,21 kg/m <sup>3</sup>	

#### Wind

Nennwindgeschw.	<i>c</i>	10 m/s
Nennleistung	$P_N$	1500 kW
Wirkungsgrad	$\eta$	47%

Jahresmittelwert Binnenland	<i>c</i>	3,5 m/s	Binnenland
Leistungsprognose	$P_{\text{mittel}}$	64,31 kW	3.-Potenz-Gesetz

#### Lastannahmen

	3,8 m/s	1000 h/a	82.308,00 kWh
	5,8 m/s	1600 h/a	468.268,80 kWh
	6,8 m/s	2300 h/a	1.084.790,40 kWh
	7,8 m/s	3000 h/a	2.135.484,00 kWh
		7900 h/a	<b>3.770.851,20 kWh</b>
Verfügbarkeit:		90%	8760 h/a = 100%
	$P_{\text{mittel}}$	64,31 kW	508.068,75 kWh

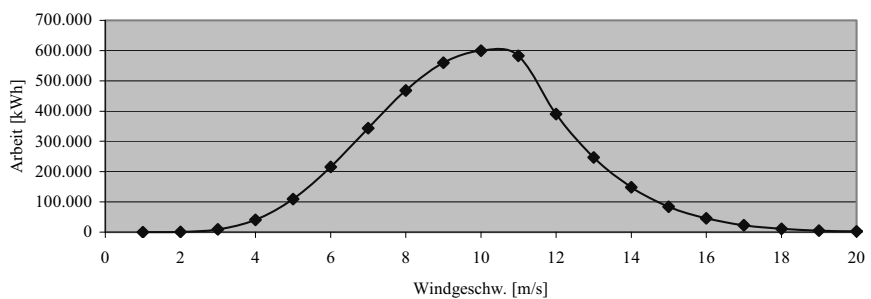
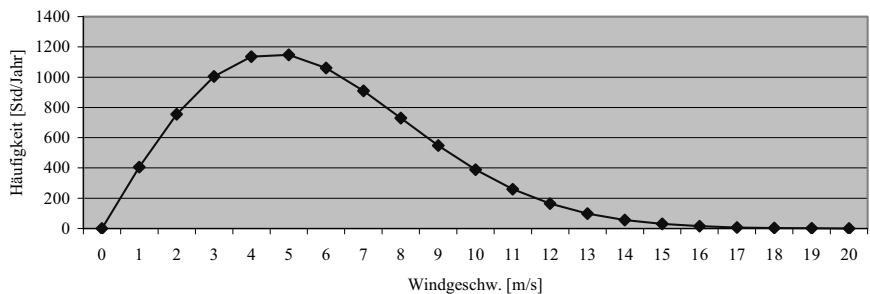
Variation Rotordurchmesser	90 m
	120%
	1807 kW

Beachte den Einfluss der Windannahmen auf das Jahresergebnis!

Detaillierter mit der WEILBULL-Verteilung nach Bild 4.1:

Mittelwert	6,5 m/s	<b>Leistungsprognose</b>
Formfaktor $\beta$	2,0	8.760 Std/Jahr
		1.500 kW Nennleistung

Wind [m/s]	rel. Häufigkeit	Leistung	Std/Jahr	Arbeit W [kWh]
0	0%	0%	0	0
1	5%	0%	405	607
2	9%	1%	754	9.053
3	11%	3%	1005	40.717
4	13%	6%	1136	109.037
5	13%	13%	1147	215.129
6	12%	22%	1061	343.838
7	10%	34%	910	468.287
8	8%	51%	729	560.135
9	6%	73%	549	600.008
10	4%	100%	389	583.288
11	3%	100%	260	390.313
12	2%	100%	165	247.048
13	1%	100%	99	148.103
14	1%	100%	56	84.180
15	0%	100%	30	45.402
16	0%	100%	16	23.252
17	0%	100%	8	11.313
18	0%	100%	3	5.231
19	0%	100%	2	2.300
20	0%	100%	1	962
<b>Summe:</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>8725</b>	<b>3.888.203</b>



## Lösungen zu Kap. 5

zu 5.1:  $\dot{V} = A_1 \cdot c_1 = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot c_1 = \frac{(1m)^2 \cdot \pi}{4} \cdot 10 \frac{m}{s} = 7,85 m^3 / s$ ;

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = 7,85 \frac{m^3}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} = 7854 \frac{kg}{s}$$

$$\frac{A_1}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d_1^2 \cdot \pi}{4} = \frac{d_2^2 \cdot \pi}{4} \rightarrow d_2 = \frac{d_1}{\sqrt{2}} = 0,707m \rightarrow \text{mittl. Strömungsfaden: } d_m \approx 0,85m$$

Umfangsgeschwindigkeit auf diesem Faden:  $u = d \cdot \pi \cdot n = 0,85m \cdot \pi \cdot \frac{70}{60s} = 3,12m / s$ ;

axiale Strömungsgeschwindigkeit gem. Kontinuitätsgleichung:

$$c = \frac{A_1 \cdot c_1}{A_2} = 2 \cdot c_1 = 20 \frac{m}{s},$$

wobei die Durchsatzgeschwindigkeit (Meridiangeschw.) gleich bleibt  $c = c_{2m}$ .

Leistung:  $Y = \frac{P}{\dot{m}} = \frac{M \cdot \omega}{\dot{m}} = u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1}$ , wobei bei einer Axialpumpe Eintritt- und

Austritt auf demselben Durchmesser liegen und hier eine drallfreie Anströmung und ein Austrittsdrall von  $30^\circ$  vorausgesetzt wurde, so dass

$$Y = \frac{P}{\dot{m}} = \frac{M \cdot \omega}{\dot{m}} = u \cdot \left( c_{u2} - \frac{c_{u1}}{0} \right) = u \cdot \frac{c}{\tan \alpha_2} = 3,12 \frac{m}{s} \cdot \frac{20m/s}{\tan 30^\circ} = 108,1 \left[ \frac{m^2}{s^2} = \frac{Nm}{kg} = \frac{W}{kg/s} \right]$$

also  $P = \dot{m} \cdot u \cdot \left( c_{u2} - \frac{c_{u1}}{0} \right) = 8854 \frac{kg}{s} \cdot 108,1 \frac{W}{kg/s} = 848,9kW$  als theoretisches Potential,

tatsächlich:  $P_{mech} = \eta \cdot P = 0,9 \cdot 848,9kW = 764kW$

Fallhöhe:  $\rho \cdot g \cdot H = \frac{\rho}{2} c^2 \rightarrow H = \frac{c^2}{2g} = \frac{(10m/s)^2}{2 \cdot 9,81m/s^2} = 5m$

zu 5.2: Fallhöhe = statischer plus dynamischer Anteil:

$$H = z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2}{2 \cdot g} = 1,9 + \frac{4,5 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} + \frac{7^2}{2 \cdot 9,81} = 50,2m$$

Turbinenwirkungsgrad:  $\eta_T = \frac{P_1}{P_{hydr}} = \frac{P_1}{\dot{V} \cdot \Delta p_{tot}} = \frac{P_1}{\dot{V} \cdot (\rho \cdot g \cdot H_1)} = \frac{600 \cdot 1000}{2 \cdot 9,81 \cdot 50,2} = 87\%$

In einem geänderten Betriebspunkt „bleibt sich die Turbine geometrisch ähnlich“, es gelten also die Ähnlichkeitsgesetze, die spezifischen Turbinenkennzahlen ändern sich nicht (hierin liegt ja gerade der Vorteil dieser Kennzahlen!). Somit wird die Druck-

zahl  $\psi = \frac{Y}{u^2/2} = \frac{\Delta p_t}{(d \cdot \pi \cdot n)^2}$ ; also  $H \sim n^2$ , so dass  $\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$

$$\rightarrow n_2 = n_1 \cdot \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} = 750 \cdot \sqrt{\frac{65}{50,2}} = 853 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{Durchflusszahl: } \varphi = \frac{c}{u} = \frac{\dot{V}/A}{u} = \frac{\dot{V}}{\left(d^2 \cdot \frac{\pi}{4}\right) \cdot (\omega \cdot r)} = \frac{\dot{V}}{\left(d^2 \cdot \frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{d}{2}\right)} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{d^3 \cdot \pi^2 \cdot n}$$

$$\rightarrow \dot{V} \sim n \rightarrow \frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} \rightarrow \dot{V}_2 = \dot{V}_1 \cdot \frac{n_2}{n_1} = 1,4 \cdot \frac{853}{750} = 1,592 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{spez. Drehzahl } n_q [\text{min}^{-1}] = n [\text{min}^{-1}] \cdot \frac{\sqrt{\dot{V} [\text{m}^3/\text{s}]}}{(H [\text{m}])^{3/4}} = 750 \cdot \frac{\sqrt{1,4}}{(50,2)^{3/4}} = 47 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{für den zweiten Betriebspunkt ebenfalls: } n_q [\text{min}^{-1}] = 853 \cdot \frac{\sqrt{1,592}}{(65)^{3/4}} = 47 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{neue Leistung } P_2 = \eta_T \cdot \dot{V}_2 \cdot (\rho \cdot g \cdot H) = 0,87 \cdot 1,59 \cdot (1000 \cdot 9,81 \cdot 65) = 883 \text{ kW}$$

$$\text{oder mit den Ähnlichkeitsgesetzen: } P \sim \dot{V}^3 \rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}\right)^3 \rightarrow P_2 = 600 \left(\frac{1,59}{1,4}\right)^3 = 883 \text{ kW}$$

$$\text{zu 5.3: mit } \Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h(t) = \rho \cdot g \cdot \frac{h}{2} \cdot \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{t[\text{Std.}]}{12\text{Std.}}\right)\right] = \frac{\rho}{2} c^2 \sim \dot{V}^2$$

$$\text{und } \frac{\dot{V}(t)}{A} = \frac{dh(t)}{dt} = -\frac{h}{2} \cdot \frac{2\pi}{12\text{Std.}} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t[\text{Std.}]}{12\text{Std.}}\right)$$

folgt überschlägig für die Gezeitenströmung:

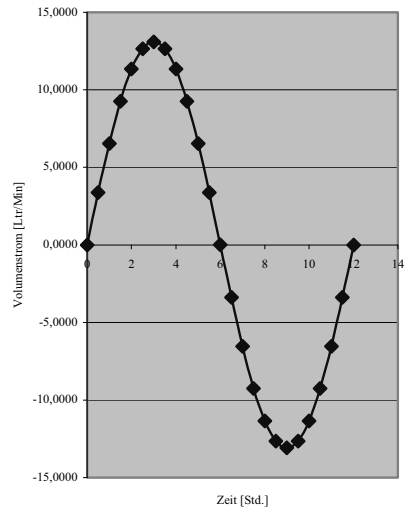
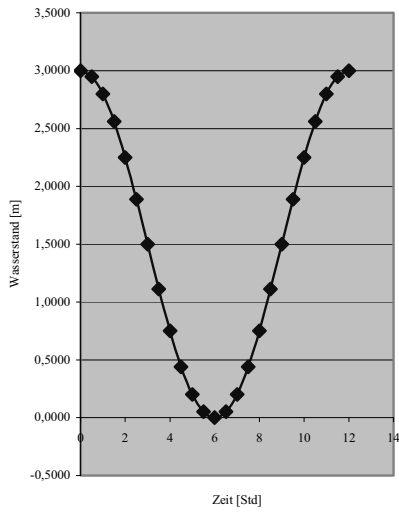
$$\bar{P} \approx \bar{\dot{V}} \cdot \Delta \bar{p} = \bar{\dot{V}} \cdot \frac{\rho}{2} c^2 = \bar{\dot{V}} \cdot \frac{\rho}{2} \left(\frac{\bar{\dot{V}}}{A}\right)^2 = \frac{2 \cdot 3 \text{ m}^3}{12 \text{ Std}} \cdot \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot 3 \text{ m}^3}{12 \text{ Std}} \cdot \frac{1}{1 \text{ m}^2}\right)^2$$

$$\approx \frac{0,5 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} \cdot 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{0,5 \text{ m}}{3600 \text{ s}}\right)^2 = 1,339592 \cdot 10^{-9} \text{ W}$$

Die nachfolgende Tabelle zeigt statt des Mittelwertes die Eckdaten in Abhängigkeit vom Tidenhub:

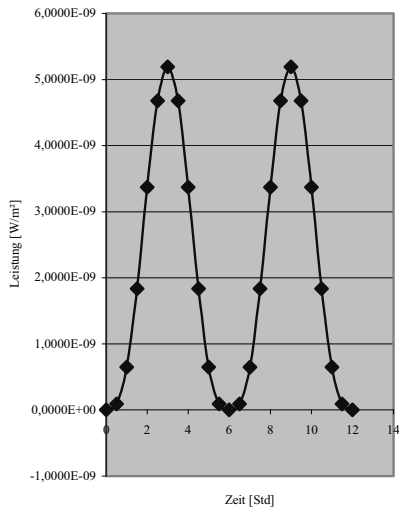
<b>Daten</b>	Dichte	1000	kg/m <sup>3</sup>			
	Erdbeschl.	9,81	m/s <sup>2</sup>			
	Tidenhub	3	m			
<b>Zeit</b>	<b>Wasser- stand [m]</b>	<b>stat. Druck [N/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Volumen- strom [m<sup>3</sup>/h pro m<sup>2</sup>]</b>	<b>Volumen- strom [Ltr/min pro m<sup>2</sup>]</b>	<b>dyn. Druck / Staudruck [N/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Leistung [W/m<sup>2</sup>]</b>
0	3,0000	29430	0,0000	0,0000	0,0000E+00	0,0000E+00
0,5	2,9489	28929	0,2033	3,3879	1,5942E-06	9,0016E-11
1	2,7990	27459	0,3927	6,5450	5,9496E-06	6,4900E-10
1,5	2,5607	25120	0,5554	9,2560	1,1899E-05	1,8356E-09
2	2,2500	22073	0,6802	11,3362	1,7849E-05	3,3723E-09
2,5	1,8882	18524	0,7586	12,6439	2,2204E-05	4,6791E-09
3	1,5000	14715	0,7854	13,0900	2,3798E-05	5,1920E-09
3,5	1,1118	10906	0,7586	12,6439	2,2204E-05	4,6791E-09
4	0,7500	7358	0,6802	11,3362	1,7849E-05	3,3723E-09
4,5	0,4393	4310	0,5554	9,2560	1,1899E-05	1,8356E-09
5	0,2010	1971	0,3927	6,5450	5,9496E-06	6,4900E-10
5,5	0,0511	501	0,2033	3,3879	1,5942E-06	9,0016E-11
6	0,0000	0	0,0000	0,0000	3,5721E-37	9,5477E-57
6,5	0,0511	501	-0,2033	-3,3879	1,5942E-06	9,0016E-11
7	0,2010	1971	-0,3927	-6,5450	5,9496E-06	6,4900E-10
7,5	0,4393	4310	-0,5554	-9,2560	1,1899E-05	1,8356E-09
8	0,7500	7357	-0,6802	-11,3362	1,7849E-05	3,3723E-09
8,5	1,1118	10906	-0,7586	-12,6439	2,2204E-05	4,6791E-09
9	1,5000	14715	-0,7854	-13,0900	2,3798E-05	5,1920E-09
9,5	1,8882	18524	-0,7586	-12,6439	2,2204E-05	4,6791E-09
10	2,2500	22073	-0,6802	-11,3362	1,7849E-05	3,3723E-09
10,5	2,5607	25120	-0,5554	-9,2560	1,1899E-05	1,8356E-09
11	2,7990	27459	-0,3927	-6,5450	5,9496E-06	6,4900E-10
11,5	2,9489	28929	-0,2033	-3,3879	1,5942E-06	9,0016E-11
12	3,0000	29430	0,0000	0,0000	1,4288E-36	7,6382E-56
Mittel	1,5600	15304	0,0000		1,1423E-05	2,1155E-09
Summe			6,0	m <sup>3</sup> /12 Std		<i>q.e.d.</i>





Wasserstand [m]

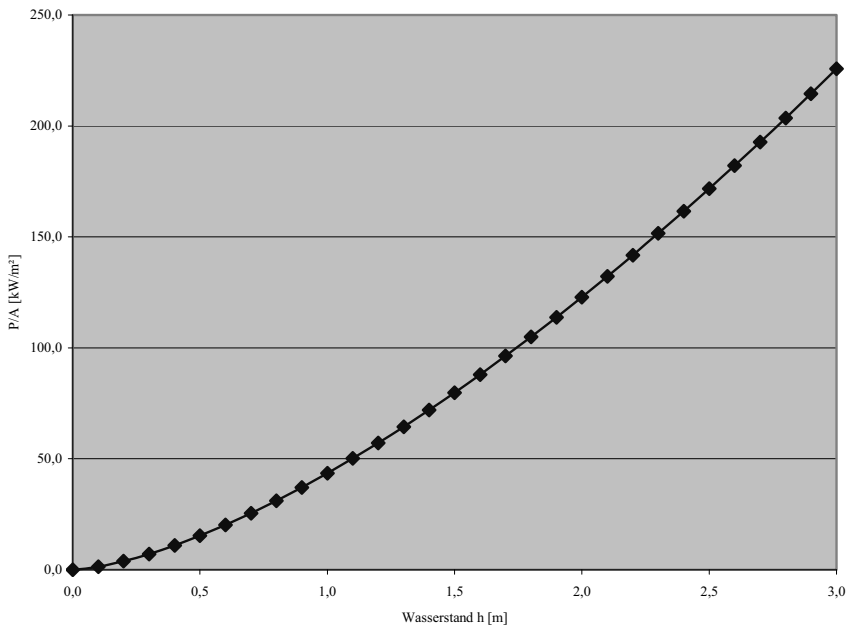
Volumenstrom [Ltr/Min]



Leistung [W/m²]

Im Falle der Staustufe (Ausnutzung des Tidenhubgefälles während der Ebbe) ergibt sich:

$P = \dot{V} \cdot \Delta p = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot h$  wobei die Ausströmgeschwindigkeit nach TORRICELLI  $c_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \frac{\dot{V}}{A}$ , so dass der Volumenstrom vom freigegebenen Strömungsquerschnitt  $A$  abhängig wird:  $P = \dot{V} \cdot \Delta p = A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot \rho \cdot g \cdot h$ . Der Strömungsquerschnitt bestimmt daher die zeitliche Haltbarkeit des Energiespeichers, die Höhe des Wasserspiegels das Leistungsvermögen:  $\frac{P}{A} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot \rho \cdot g \cdot h$



zu 5.4:  $\text{NaCl} = 23 + 35 = 58 \text{ g/mol} \rightarrow 9 \text{ g NaCl} = 9/58 \text{ mol/Ltr}$

$$p_{Osm} = c_A \cdot R \cdot T = \frac{9 \text{ mol}}{58 \text{ Ltr}} \cdot 0,08314 \frac{\text{bar} \cdot \text{Ltr}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot (273 + 37) = 3,999 \approx 4 \text{ bar}$$

9 g/Ltr = 9 g / 1 kg = 0,009 = 0,9 % (vgl. Ostsee)

3,5 % = 0,035  $\rightarrow$  3,9mal höhere Konzentration  $\rightarrow$  3,9mal höheren osmot. Druck

zu 5.5: Summe 1,093 Mol/kg Meerwasser; Dichte: 1,025 kg/Ltr  $\rightarrow$  1,12 Mol/Ltr

$$p_{Osm} = c_A \cdot R \cdot T = 1,12 \frac{\text{mol}}{\text{Ltr}} \cdot 0,08314 \frac{\text{bar} \cdot \text{Ltr}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot (273 + 25) \approx 27,6 \text{ bar}$$

**Lösungen zu Kap. 6**

zu 6.1: Anlage im Taunus

Datum		Tage	Verbrauch [kWh]		
von	bis		El.-Energie	WärmeP	<i>E-Anteil</i>
26.05.2006	30.06.2006	36	268	1133	19%
01.07.2006	30.09.2006	92	692	2919	19%
01.10.2006	31.10.2006	31	282	1310	18%
01.11.2006	31.12.2006	61	639	2577	20%
01.01.2007	31.03.2007	90	921	3888	19%
01.04.2007	11.05.2007	41	362	1526	19%

Summe	351	13.353 kWh
Jahresverbrauch Strom für WärmeP		13.886 kWh
angenommener Wärmeverbrauch		80 kWh / m <sup>2</sup> a
geschätzter Wärmeverbrauch		16.000 kWh
<b>errechnete Jahresarbeitszahl</b>		<b>1,152</b>

Die Gründe für das äußerst schlechte Abschneiden dieser Wärmepumpenanlage konnten aufgrund der räumlichen Distanz nicht geklärt werden. Mögliche Ursachen könnten hier sein:

- Kältemittelmangel,
- schlechte Wärmespeichereigenschaften des Untergrundes,
- falsche Dimensionierung (vgl. Kap. 6.3)
- falsch eingestellte Betriebswerte (zu hohe Vorlauftemperatur).

Nach Absenkung der Reglerkurve (Vorlauftemperatur) zeigten sich die nachfolgenden Ergebnisse:

Datum		Tage	Verbrauch [kWh]	
von	bis		El.-Energie	WärmeP
12.05.2007	30.06.2007	50		498
01.07.2007	30.09.2007	92		901
01.10.2007	31.12.2007	92		1201
01.01.2008	04.06.2008	156		1937

Summe	390	4.537 kWh
Jahresverbrauch Strom für WärmeP		4.246 kWh
angenommener Wärmeverbrauch		80 kWh / m <sup>2</sup> a
geschätzter Wärmeverbrauch		16.000 kWh
<b>errechnete Jahresarbeitszahl</b>		<b>3,768</b>

Das Beispiel verdeutlicht jedoch eine Problematik: Der laienhafte Anwender ist in der Regel nicht in der Lage die Betriebsverhältnisse angemessen beurteilen zu können; auch der Installateur ist oft mit dieser Aufgabe überfordert. Der Systemlieferant steht aber nicht im direkten Kundenkontakt, so dass keine unmittelbare Beratungsverpflichtung besteht.

zu 6.2: Anlage in Nordfriesland; Beachte die Verbesserung nach Einbau der neuen Pumpe:

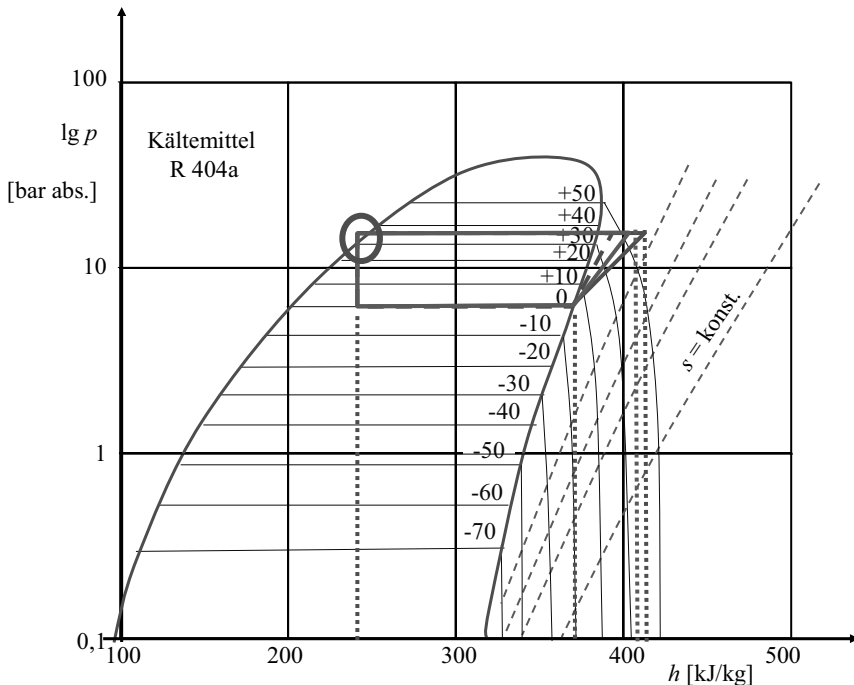
**E-Antrieb Wärmepumpe + Warmwasser**

Datum von	Datum bis	Tage	El.-Energie [kWh]	Jahresbedarf [kWh / a]	geschätzte (Nutzen/Aufwand) Jahresarbeitszahl	
12.10.2001	31.12.2001	81	3767	11.360	2,51	2002
01.01.2002	12.10.2002	285	7624			
13.10.2002	31.12.2002	80	4360	13.269	2,15	2003
01.01.2003	04.10.2003	277	8618			
05.10.2003	31.12.2003	88	4616	13.165	2,16	2004
01.01.2004	05.10.2004	279	8621			
06.10.2004	31.12.2004	87	4287	13.120	2,17	2005
01.01.2005	19.06.2005	170	7197			
20.06.2005	23.09.2005	96	1205			
24.09.2005	31.01.2006	130	7079	9.309	3,06	2006
01.02.2006	31.12.2006	334	2230			
01.01.2007	31.12.2007	365	7538	7.538	3,78	2007

Geschätzte Heizkosten:

Wohnfläche	190 m <sup>2</sup>
Ansatz	150 kWh / m <sup>2</sup> a
Wärmebedarf	28500 kWh

zu 6.3: Animationsbeispiel:



aus der Tabelle für R404A und den gewählten Eckdaten folgt:

Firmenangaben:

	<b>Druck</b>	<b>Temp.</b>	<b>Enthalpie</b>	<b>Bemerkung</b>
Verdichtungsbeginn	5,5	0	$h''(5,5\text{bar})=$ $v''(5,5\text{bar})=$	368,90 [kJ/kg] 36,64 [dm <sup>3</sup> /kg]
Verdichtungsende	17,0	36		
Druckverhältnis	3,1			
Unterkühlung			$h'(17\text{bar})=$	258,91 [kJ/kg]
Drosseleintritt	17,0	25	$h'(25^\circ\text{C})=$	239,01 Unterkühlung?
Drosselaustritt	5,5	-4	$h=\text{konst.} =$	239,01 [kJ/kg]

berechnet mit:

Isentropenexponent	0,9971		$\Delta h_s =$	22,704 [kJ/kg]
Verdichterwirkungsgrad	0,53		$\Delta h =$	42,837 [kJ/kg]
Austrittsenthalpie				411,737 [kJ/kg]
Nutzwärme Dh				172,727 [kJ/kg]
Leistungszahl e				4,03
Leistungszahl e ohne Unterkühlung				3,57
spez. Wärmekapazität	1,2 kJ/kg K		$\Delta T =$	35,70 K Verdichter
Verdichteraustrittstemperatur			$T_1 + \Delta T =$	35,70 °C

Diese Leistungszahl wird unter folgenden Bedingungen erreicht:

1. Heizungstemperaturniveau in diesem relativ geringen Bereich (Niedrigenergiehaus!); beachte: Gut isolierende Teppich- oder Fußböden erschweren die Einhaltung dieser Bedingung.
2. Beachte: Die Warmwassertemperaturen reichen nicht für ein Brauchwasserniveau aus (z. B. zum Duschen). Diese Temperaturen werden daher mit einem elektrischen Heizstab erreicht. Hier wird qualitativ hochwertige Energie in minderwertige Wärme „verbraten“.
3. Grädigkeit des Wärmetauschers ausreichend (hier 1 °C!)? Rückkühlung auf 25 °C bei diesen Temperaturwerten überhaupt möglich? Wärme geht immer vom höheren zum niedrigen Temperaturniveau!
4. Beachte den starken Einfluss der Unterkühlung auf die Leistungszahl und die Abhängigkeit der Unterkühlbarkeit und den Einstellwerten von der Rücklauftemperatur der Heizungsanlage.

Es zeigt sich also, dass trotz sehr optimistischer Randbedingungen eine Leistungszahl von 4,0 nur schwer zu erreichen ist. Der Jahresmittelwert folgt nicht unbedingt den Normbedingungen unter denen die Leistungszahl berechnet wurde. Praxis und Theorie können also leicht auseinanderdivergieren.

zu 6.4: Mit der Definition der Leistungszahl einer Wärmepumpe ergibt sich jeweils:

Verdichtertyp	Verflüssigungstemp. [°C]	<b>Halbhermetischer, einstufiger Kolbenverdichter</b>										
		bezogen auf Sauggastemperatur 20°C ohne Flüssigkeits-Unterkühlung 50 Hz, R 404A und R507A										
		$Q_0$										
		$Q_0$	Kälteleistung $Q_0$ [kW]									
		$P$	Verdichterantriebsleistung $P$ [kW]									
		$\epsilon$	Leistungszahl [-]									
		↓	Verdampfungstemperatur [°C]									
			<b>7,5</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>-5</b>	<b>-10</b>	<b>-15</b>	<b>-20</b>	<b>-25</b>	<b>-30</b>	<b>-35</b>
Typ A	30	$Q_0$	4690	4290	3560	2940	2390	1920	1510	1160	865	610
		$P$	820	810	800	780	750	720	680	630	570	500
		$\epsilon$	6,72	<b>6,296</b>	<b>5,45</b>	4,769	4,187	3,667	3,221	2,841	2,518	2,22
	40	$Q_0$	3850	3520	2920	2390	1940	1540	1200	90	650	435
		$P$	980	960	930	890	890	840	720	650	570	470
		$\epsilon$	4,929	<b>4,667</b>	<b>4,14</b>	3,685	3,18	2,833	2,667	1,138	2,14	1,926
	50	$Q_0$	3080	2810	2320	1890	1520	1190	910	670	460	285
		$P$	1140	1110	1050	990	920	840	760	660	550	430
		$\epsilon$	3,702	<b>3,532</b>	<b>3,21</b>	2,909	2,652	2,417	2,197	2,015	1,836	1,663
Typ B	30	$Q_0$	7860	7200	6020	5000	4110	3340	2680	2110	1620	1210
		$P$	1420	1420	1400	1370	1320	1250	1160	1060	950	830
		$\epsilon$	6,535	<b>6,07</b>	<b>5,3</b>	4,65	4,114	3,672	3,31	2,991	2,705	2,458
	40	$Q_0$	6620	6070	5060	4190	3430	2760	2190	1700	1270	915
		$P$	1730	1700	1640	1560	1470	1360	1240	1100	960	800
		$\epsilon$	4,827	<b>4,571</b>	<b>4,085</b>	3,686	3,333	3,029	2,766	2,545	2,323	2,144
	50	$Q_0$	5400	4940	4110	3380	2740	2190	1710	1290	935	630
		$P$	2000	1960	1850	1730	1590	1590	1280	1110	930	750
		$\epsilon$	3,7	<b>3,52</b>	<b>3,222</b>	2,954	2,723	2,377	2,336	2,162	2,005	1,84

Beachte: Bei typischen Wärmepumpenrandbedingungen 0 °C / 35 °C ergibt sich eine Leistungszahl von ca. 4,5. Je weiter die Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur auseinanderliegen, desto schlechter wird die Leistungszahl; z. B. bei -5 °C / 50 °C nur ca. 2,9 bis 3,0.

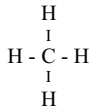
**Lösungen zu Kap. 7**

zu 7.1: Der Massenanteil kann relativ einfach aus den Molzahlen und der Strukturformel abgeleitet werden:

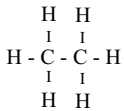
**Kohlenstoffanteil**

$$C = 12 \text{ kg/kmol}$$

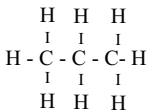
$$H = 1 \text{ kg/kmol}$$



Massenanteil  $C = \frac{12}{12+1+1+1+1} = 0,75 = 75\% \quad C$



Massenanteil  $C = \frac{12+12}{12+12+6} = 0,80 = 80\% \quad C$



Massenanteil  $C = \frac{3 \cdot 12}{3 \cdot 12 + (3 \cdot 2 + 2)} = 0,82 = 82\% \quad C$



$$C = \frac{6 \cdot 12}{6 \cdot 12 + 6} = \frac{72}{78} = 92\%$$

Heizöl ist ein Gemisch aus  $C_{12}H_{26} \dots C_{17}H_{36}$ , also kein Reinstoff; vgl. Tab. 7.2. Zur Berechnung des Kohlenstoffanteils wird hier ein repräsentatives Mitteldestillat gewählt:  $C_{15}H_{32} \rightarrow C = 12 \cdot 15 / (12 \cdot 15 + 32) = 180/212 = 0,85 = 85\%$

CO<sub>2</sub>-Emissionen:  $m_{CO_2}^* = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{m}_B} = \xi_{CO_2} = 3,664 \cdot C$

z. B. Heizöl:  $3,664 \cdot 0,85 = 3,12 \text{ kg CO}_2 / \text{kg Heizöl}$

zu 7.2: Aus Tab. 7.1:

Holzsorte	Heizwert [wasserfrei] H <sub>U</sub> [kWh/kg]	Elementaranalyse [m/m-%, wasserfrei]					Aschegehalt [m/m-%]
		C	H	O	N	S	
<b>Pappel</b>	5,1	47,5	6,6	43,1	0,42	0,03	1,9

Für die Verdampfung des Wasseranteils wird benötigt (1 bar, 20 °C):

$$Q = (\xi_{trocken} \cdot H_U - \xi_{H_2O} \cdot [c_p \cdot \Delta T + r]) \cdot m_B$$

$$\frac{Q}{m_B} = 0,8 \cdot 5,1 - 0,2 \cdot \left[ 4,2 \frac{kJ}{kgK} \cdot 80K + 2450 \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$= 0,8 \cdot 5,1 - 0,2 \cdot \frac{2786 \text{ kWh}}{3600 \text{ kg}} = 0,8 \cdot 5,1 - 0,2 \cdot 0,77 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

Heizwert der Absoluten Trockenmasse	minus	Verdampfungswärme des Wasseranteils	gleich	Heizwert normal
80 % · 5,1 kWh	–	20 % · 0,77 kWh	=	
4,08 kWh	–	0,15 kWh	=	3,93 kWh

Überschlagsrechnung:

$$H_U \approx 5,1 \left[ \frac{kWh}{kg} \right] \cdot \left( \frac{100 - H_2O[\%]}{100} \right) \approx 5,1 \cdot 0,8 = 4,08 \frac{kWh}{kg}$$

Der Unterschied beträgt 3,75 % und liegt damit im Bereich der natürlichen Schwankungsbreite von natürlichen Rohstoffen.

Mit der Elementarteilchenanalyse ergibt sich:

$$\begin{aligned} H_U &= 33,8 C + 120 H - O + 9,25 S - 2,45 W && [ \text{MJ/kg} ] \\ &= 33,8 \cdot 0,475 + 120 \cdot 0,066 - 0,431 + 9,25 \cdot 0,03 - 2,45 \cdot 0,2 [ \text{MJ/kg} ] \\ &= 23,33 \text{ MJ/kg} = 6,48 \text{ kWh/kg} \end{aligned}$$

Diese relativ große Differenz erklärt sich aus dem Abbrandrest (Asche, Holzkohle) und den nicht vollständig umsetzbaren Bindungsenergien der Molekularstruktur (Umsetzungsverluste). Insgesamt ist also von einer Berechnung mit Hilfe Elementaranalyse abzuraten.

zu 7.3: Der spez. Emissionswert ist gem. Gl. (7.16)

$$\frac{\xi_{CO_2}}{\eta_U \cdot H_U} = \frac{3,664 \cdot C}{\eta_U \cdot H_U} \frac{[\text{kg CO}_2 / \text{kg Brennstoff}]}{[\text{MJ/Brennstoff}]}$$

Vergleich man die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von konventionellen und Biokraftstoffen mit typischen Kohlenstoffanteilen und mittleren Heizwerten, so erhält man mit den entsprechenden Kohlenstoffanteilen und dem Heizwert

$$\frac{\xi_{CO_2}}{\eta_U \cdot H_U} = \frac{3,664 \cdot 0,85}{\eta_U \cdot \frac{42.707}{3600}} \frac{[\text{kg CO}_2 / \text{kg Heizöl}]}{[\text{kWh/Heizöl}]} \approx \frac{263 \text{ g CO}_2}{\eta_U \text{ kWh}}$$

$$\frac{\xi_{CO_2}}{\eta_U \cdot H_U} = \frac{3,664 \cdot 0,5}{\eta_U \cdot 5} \frac{[\text{kg CO}_2 / \text{kg Holz}]}{[\text{kWh/Holz}]} \approx \frac{366 \text{ g CO}_2}{\eta_U \text{ kWh}}$$

also je nach Energieumsetzungsgrad des Prozesses 300 ... 660 g CO<sub>2</sub> / kWh. Dies bedeutet z. B. bei Verstromungswirkungsgraden konventioneller Kraftwerke von ca. 40% spez. Emissionswerte von ca. 660 g/kWh. Für Holzpellet (C ca. 45...50 %) und einen Kesselwirkungsgrad von ca. 90 % ergibt sich unter Berücksichtigung eines Asche- und Koksanteil von 2 % etwa 350...400 g/kWh, wenn die vorherige photosynthetische Bindung nicht abgezogen wird.



Für das Beispiel im Anhang A1 bedeutet dies:

**CO<sub>2</sub>-Bilanz und Brennstoffäquivalent:**

Energiegehalt fossiler Wärmeträger

Diesel, Heizöl:	42700 kJ/kg	
	11,9 kWh/kg	
Dichte	880 kg/m <sup>3</sup>	
Steinkohle	37500 kJ/kg	
	10,42 kWh/kg	
Erdgas	35000 kJ/kg	
Heizwert	9,72 kWh/kg Erdgas (95% CH <sub>4</sub> )	

**Verbrennungsrechnung**

	44 kg CO <sub>2</sub> pro	12 kg C
	3,667 kg CO <sub>2</sub> pro	1 kg C
Heizöl	85% C	3,1 kg CO <sub>2</sub> / kg
		0,2628 kg CO <sub>2</sub> /kWh
Steinkohle	75% C	2,8 kg CO <sub>2</sub> / kg

**Wärmeverbrauch**

	<b>17 MWh/Jahr</b>	<b>1.400,00 €</b>
Äquivalenzzwerte:	17.000 kWh/Jahr =	
	1.433,3 kg Heizöl	4.467,0 kg CO <sub>2</sub>
	1.628,7 Ltr Heizöl	
	1.748,6 kg Erdgas	
Umsetzungsgrad	85%	0,311 kg CO <sub>2</sub> /kWh
		<b>5.255,3 kg CO<sub>2</sub></b>
		1.916,1 Ltr Heizöl

zu 7.4: Da ein Mol aller Gas unter Standardbedingungen stets 22,4 Ltr einnimmt und sich die Molzahl auf der linken und rechten Seite nicht ändert



tritt keine Volumen- bzw. Druckänderung im Reaktor auf.

zu 7.5: Methanverbrennung:  $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$ , aus Tab. 7.4 folgt:

Substanz	Enthalpie $\Delta H_m^0$ [kJ/mol]	Entropie $S_m^0$ [J/(mol · K)]	Freie Enthalpie $\Delta G_m^0$ [kJ/mol]
CH <sub>4</sub> Methan(g)	-74,85	186,19	-50,8
CO <sub>2</sub> (g)	-393,5	213,6	-394,38
H <sub>2</sub> O (g)	-241,8	188,9	-234,6
H <sub>2</sub> O (l)	-286,0	70,0	-237,2
O <sub>2</sub>	0	205,0	0

$$\Delta H_{\text{Reaktion}}^0 = \sum (c \cdot \Delta H_C^0 + d \cdot \Delta H_D^0) - \sum (a \cdot \Delta H_A^0 + b \cdot \Delta H_B^0)$$

also hier mit:  $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$ , wenn das Wasser gasförmig

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{Reaktion}}^0 &= [(+1) \cdot (-393,5) + (+2) \cdot (-241,8)] - [(+1) \cdot (-74,85) + (+2) \cdot (0)] \\ &= -802,25 \text{ kJ/mol bei nicht kondensiertem Wasser/ Wasserdampf} \end{aligned}$$

→ unterer Heizwert:  $H_U = \frac{802,25 \text{ kJ/mol}}{16 \text{ kg/kmol}} = 50 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  für Methan

$$\Delta H_{\text{Reaktion}}^0 = [(+1) \cdot (-393,5) + (+2) \cdot (-286,0)] - [(+1) \cdot (-74,85) + (+2) \cdot (0)]$$

$$= -890,65 \text{ kJ/mol} \text{ bei kondensiertem Wasser}$$

→ Brennwert (oberer Heizwert):  $H_o = \frac{890,65 \text{ kJ/mol}}{16 \text{ kg/kmol}} = 55,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  für Methan

für die molare Standardreaktionsentropie gilt im Fall des kondensierten Wassers analog:

$$\Delta S_{\text{Reaktion}}^0 = \sum (c \cdot \Delta S_C^0 + d \cdot \Delta S_D^0) - \sum (a \cdot \Delta S_A^0 + b \cdot \Delta S_B^0)$$

so dass die Entropie

$$\Delta S_{\text{Reaktion}}^0 = [(+1) \cdot (213,6) + (+2) \cdot (70)] - [(+1) \cdot (186,19) + (+2) \cdot (205)]$$

$$= -242,59 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

und Freie Enthalpie

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S = -890,65 - (273,15 + 25) \cdot (-242,59) / 1000 = -890,65 + 72,3$$

$$= -818 \text{ kJ/mol}$$

Die Reaktion läuft freiwillig nach rechts in Richtung  $\text{CO}_2$ .

Das gleiche Ergebnis erhält man mit

$$\Delta G_{\text{Reaktion}}^0 = \sum (c \cdot \Delta G_C^0 + d \cdot \Delta G_D^0) - \sum (a \cdot \Delta G_A^0 + b \cdot \Delta G_B^0)$$

$$= [(+1) \cdot (-394,38) + (+2) \cdot (-237,2)] - [(+1) \cdot (-50,8) + (+2) \cdot (0)]$$

$$= -818 \text{ kJ/mol}$$

zu 7.6: Wassergas-/Shiftreaktion:  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Substanz	Enthalpie $\Delta H_m^0$ [kJ/mol]	Entropie $S_m^0$ [J/(mol · K)]	Freie Enthalpie $\Delta G_m^0$ [kJ/mol]
$\text{CO}_2(\text{g})$	-393,5	213,6	-394,38
$\text{H}_2$	0	130,6	0
$\text{CO}(\text{g})$	-110,5	198,0	-137,3
$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$	-241,8	188,9	-234,6

$$\Delta H_{\text{Reaktion}}^0 = \sum (c \cdot \Delta H_C^0 + d \cdot \Delta H_D^0) - \sum (a \cdot \Delta H_A^0 + b \cdot \Delta H_B^0)$$

$$= [(+1) \cdot (-393,5) + (+1) \cdot (0)] - [(+1) \cdot (-110,5) + (+1) \cdot (-241,8)]$$

$$= -41,2 \text{ kJ/mol} = -41200 \text{ kJ/kmol} < 0$$

$$\Delta G_{\text{Reaktion}}^0 = \sum (c \cdot \Delta G_C^0 + d \cdot \Delta G_D^0) - \sum (a \cdot \Delta G_A^0 + b \cdot \Delta G_B^0)$$

$$= [(+1) \cdot (-394,38) + (+1) \cdot (0)] - [(+1) \cdot (-137,3) + (+1) \cdot (-234,6)]$$

$$= -22,48 \text{ kJ/mol} < 0$$

Die Reaktion läuft bei Standardbedingungen freiwillig ab und ist exotherm.

$$K_T = e^{-\frac{\Delta G_T^0}{\mathfrak{R} \cdot T}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_T^0}{\mathfrak{R} \cdot T}\right) = \exp\left(-\frac{-22,48 \frac{kJ}{mol}}{\frac{8,314}{1000} \frac{kJ}{(mol \cdot K)} \cdot (273,15 + 25)K}\right)$$

$K_T \approx 8700 > 1$  Das Gleichgewicht liegt auf der Seite der Endprodukte.

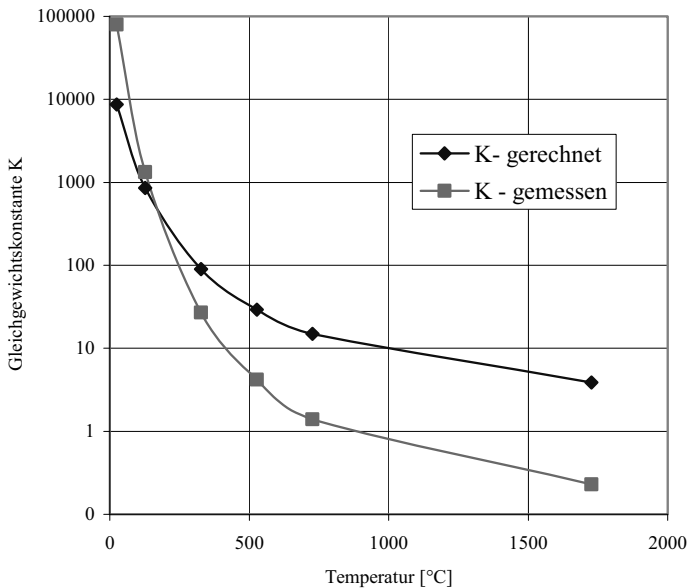
Die Freie Enthalpie ist temperaturabhängig. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Abweichung zwischen

- gemessenen Werten nach [43, 47, 50] und
- gerechneten Werten unter der Annahme, dass die Freie Enthalpie gleich bleibt. Tatsächlich ändert sich die Freie Enthalpie; sie kann mit Polynomen höheren Grades angenähert werden. So liefert Gl. (9.8) deutlich bessere Ergebnisse.

Bei höheren Temperaturen zeigt sich jedoch tendenziell in beiden Fällen eine deutliche Verschiebung in Richtung der Ausgangsprodukte.

Freie Enthalpie -22,48 kJ/mol  
 Gaskonstante 8,314 kJ/kmol K

T	298	400	600	800	1000	2000
t	25	127	327	527	727	1727
<i>K</i> -gerechnet	8681	860	90	29	15	4
<i>K</i> -gemessen	79960	1330	27	4,2	1,4	0,23



zu 7.7: Methanisierung:  $CO + 3 H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ ;  $\Delta H = -203,0 \text{ kJ/kmol} < 0$

a) **Druckerhöhung:** Bei der Reaktion verkleinert sich das Volumen (4 Molanteile  $\rightarrow$  2 Molanteile). Wird der Druck erhöht, kann das System dem Zwang ausweichen, indem mehr Methan gebildet wird. Wird der Gesamtdruck z. B. auf das Doppelte erhöht, steigen auch die Partialdrücke auf das Doppelte, so dass

$$\frac{(p_{CH_4}) \cdot (p_{H_2O})}{(p_{CO}) \cdot (p_{H_2})^3} = K_p \rightarrow \frac{(2 \cdot p_{CH_4}) \cdot (2 \cdot p_{H_2O})}{(2 \cdot p_{CO}) \cdot (2 \cdot p_{H_2})^3} = \frac{1}{4} K_p$$

Das System befindet sich dadurch nicht mehr im Gleichgewicht. Es stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein, wobei sich die Partialdrücke der Reaktionsteilnehmer so verändern, dass der Quotient wieder den Wert der Gleichgewichtskonstante annimmt. Merke: Wird der Quotient kleiner, so wird das Gleichgewicht in Richtung der Reaktionsprodukte verschoben [47].

b) **Temperaturerhöhung:** Bei der hier vorliegenden Reaktion handelt es sich um eine exotherme Reaktion. Vom System wird Wärme an die Umgebung übertragen. Wird die Temperatur des Systems gesteigert, versucht es dem Zwang auszuweichen, indem es selbst weniger Energie freisetzt. Das heißt, dass eine hohe Temperatur sich nachteilig auf die Bildung von Methan auswirkt [48].

$$K_T = e^{-\frac{\Delta G_T^0}{R \cdot T}} = \exp\left(-\frac{\Delta G_T^0}{R \cdot T}\right)$$

c) **Konzentrationsänderung:** Konzentration (~Partialdruck): Wird die Konzentration von Kohlenmonoxid und Wasserstoff erhöht, steigt der Partialdruck von Methan. Dabei ist der Einfluss des Wasserstoffes (3. Potenz) wesentlich stärker als der Einfluss des Kohlenstoffes (1. Potenz).

zu 7.8: Anteil am Heizwert:  $\frac{400kW/8000kg/h}{5kWh/kg} = \frac{0,05kWh/kg}{5kWh/kg} = 0,01 = 1\%$

unter Berücksichtigung des Verstromungswirkungsgrades von ca. 30 %, ergibt sich ein Primärenergieaufwand von ca. 3 % des Pelletheizwerts für die Pelletierung. Zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen durch Trocknung und Transport. Diese „versteckten Energieanteile“ werden als **Graue Energie** bezeichnet.

Der Heizwert von Holz beträgt nach Bild 7.4 ca. 15 ... 20 MJ/kg (theoretisch ergeben sich in der nachfolgenden Tabelle etwas höhere Werte wegen der komplexen Bindungs- und Reaktionsstrukturen). Bei vollständiger, stöchiometrischer Verbrennung (Luftverhältnis 1) entstehen ca. 6 m<sup>3</sup> Rauchgase, bei unterstöchiometrischer Vergasung deutlich weniger, da der Hauptgasbestandteil Stickstoff aus der Verbrennungsluft resultiert (vgl. Tabelle unter „Rauchgas, stöchiometrisch“). Überschlägig kann mit ca. 3 m<sup>3</sup> Synthesegas pro kg Holz gerechnet werden, wobei dieser Wert stark durch den Wassergehalt des Holzes mitbestimmt wird!

[59] beziffert den Energieinhalt des Produktgases auf 70 bis 80 % der Brennstoffwärme. Mit folgender Überschlagsrechnung bestätigt die Tabelle diese Werte: Energiegehalt **Holz** ca. 16... **18 MJ/kg = 5 kWh/kg** → **Holzgas** ca. 6 MJ/m<sup>3</sup> · 80 % ≈ 4... **5 MJ/m<sup>3</sup> = 1,4 kWh/m<sup>3</sup>**. Zum Vergleich (vgl. Kap. 8 und Übung 8.1): **Biogas (23 MJ/m<sup>3</sup> ≈ 6,5 kWh/m<sup>3</sup>)** oder **Erdgas/Methan (36 MJ/m<sup>3</sup> = 10 kWh/m<sup>3</sup>)**.

zu 7.9: Pyrolyseprozess:

Energiebilanz:  $m_G \cdot H_{UG} + m_{fl} \cdot H_{Ufl} + \underbrace{m_R \cdot H_{UR}}_{=0 \text{ vernachlässigbar}} = \eta \cdot m_H \cdot H_{UH}$

spezifisch:  $\frac{m_G}{m_H} \cdot H_{UG} + \frac{m_{fl}}{m_H} \cdot H_{Ufl} = \eta \cdot H_{UH} \rightarrow \xi_G \cdot H_{UG} + \xi_{fl} \cdot H_{Ufl} = \eta \cdot H_{UH}$

Massenbilanz:  $m_H + m_L = m_G + m_{fl} + m_R$

→  $1 + \underset{\text{hier } 0,25}{\lambda} = \frac{m_G}{m_H} + \frac{m_{fl}}{m_H} + \frac{m_R}{m_H} = \xi_G + \xi_{fl} + \underset{\text{hier } 0,05}{\xi_R}$

2 Gleichungen mit 2 Unbekannten → Lösung z. B. durch Einsetzungsverfahren:

Massenbilanz  $\xi_G = \frac{m_G}{m_H} = 1 + \lambda - \xi_{fl} - \xi_R$

in Energiebilanz  $(1 + \lambda - \xi_{fl} - \xi_R) \cdot H_{UG} + \xi_{fl} \cdot H_{Ufl} = \eta \cdot H_{UH}$

liefert  $\xi_{fl} = \frac{m_{fl}}{m_H} = \frac{\eta \cdot H_{UH} - (1 + \lambda - \xi_R) \cdot H_{UG}}{(H_{Ufl} - H_{UG})}$

Somit ist das Massenverhältnis der Produkte:  $\frac{m_{fl}}{m_G} = \frac{\eta \cdot H_{UH} - (1 + \lambda - \xi_R) \cdot H_{UG}}{(H_{Ufl} - H_{UG}) \cdot (1 + \lambda - \xi_{fl} - \xi_R)}$

Für das Volumenverhältnis ist dann:  $\frac{m_{fl}}{m_G} = \frac{\rho_{fl} \cdot V_{fl}}{\rho_G \cdot V_G} \rightarrow \frac{V_{fl}}{V_G} = \frac{m_{fl}}{m_G} \cdot \frac{\rho_G}{\rho_{fl}}$

*Hinweis:* Für die Produktverteilung (Kohle, Kondensat, Gas) gibt [43] an:

- Flashpyrolyse von Holz → extrem schnelle Aufheizung → viel Kondensat und wenig Kohle.
- Klassische Holzverkohlung (langsame Aufheizung ergibt wenig Kondensat und viel Kohle.

Mit den Daten aus der Aufgabenstellung folgt hier:

**Verfahrensparameter:**

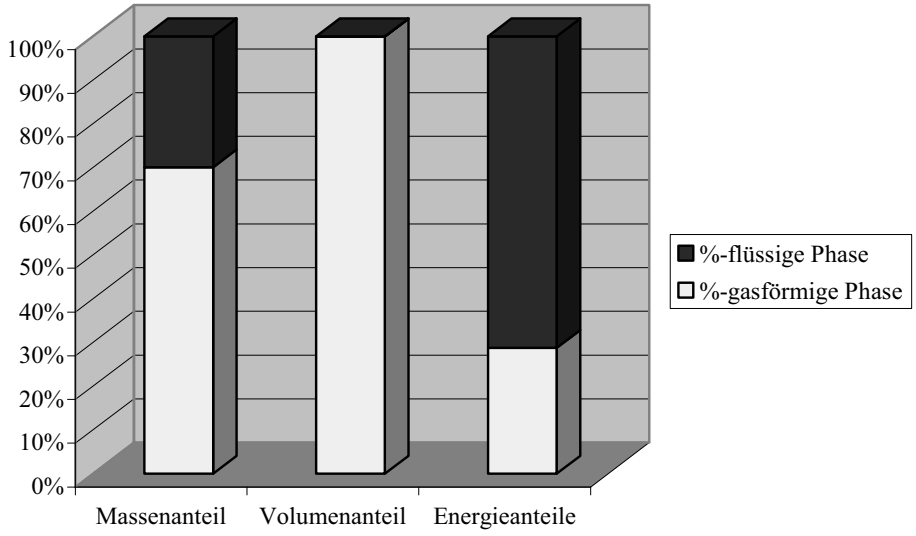
Luftverhältnis	0,25
Rückstand	5%
Umsetzungsgrad:	70%

**Bilanzgrößen:**

		Holz	Luft	Gas	Flüssig	Summe	%-Gas	%-Flüssig
Massenanteil	[kg/kg Holz]	1	0,25	0,841	0,359	1,25	67%	29%
Volumenanteil	[m³/kg Holz]			0,725	0,0004	0,73	100%	0,055%
Energieanteile	[kJ/kg Holz]			3625	8975	12600	29%	71%
Dichte	[kg/m³]			1,16	900			
Heizwert	[kWh/kg]	5	-	1,20	6,94			
	[kJ/kg]	18000	-	4310	25000			
	[MJ/m³]		-	5	22500			

**Produktanteile:**

Massenverhältnis	[Fl./Gas]	0,43
Volumenverhältnis	[Fl./Gas]	0,0006
Energieverhältnis	[Fl./Gas]	2,48



zu 7.10: Überschlagsrechnung zur Holzvergasung:

Holzzusammensetzung	Element	C	H	O	N	S	Summe	Bemerkungen
(hier: Pappel)	m/m-%	47,5%	6,6%	43,1%	0,42%	0,03%	100%	vgl. Tab. 7.1
	Molzahl [kg/kmol]	12	1	16	14	32		
	Bildungsenthalpie [kJ/mol]	0	0	0	0	0		vgl. Tab. 7.4
	Mindestsauerstoff $o_{min}$ [kg/kg]	1,268	0,528	-0,431		0,0003	1,366	vgl. Gl. (7.10)
	Mindestluft $l_{min}$ [kg/kg]						5,886	vgl. Gl. (7.13)
	Heizwertanteil, stöchiometr. [MJ/kg Holz]	-15,576	-7,979			-0,003	-23,56	-6,54 kWh/kg
	Heizwertanteil, unterstöchiometr. [MJ/kg Holz]	-4,873					-12,85	-3,57 kWh/kg
	Rauchgas [kg/kg Holz], stöchiometr. ( $\lambda=1$ )	1,740	0,594	0,000	4,525	0,001	6,860	vgl. Gl. (7.15)
	Rauchgas [Ltr/kg Holz], stöchiometr.	887	739	näherungsweise mit Rauchgasdichte			5911	
<b>Gaszusammensetzung</b>	flüchtige Anteile	81,2%						vgl. Tab. 7.1
	Asche	1,9%						vgl. Tab. 7.1
	<b>Produkt</b>	<b>CO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>		
	Molzahl [kg/kmol]	28	44	2	16	28	26	vgl. Gl. (8.4)
	Vol.-% = Mol-%	16,3%	13,5%	12,5%	4,4%	52,0%	100%	vgl. Tab. 7.5
	Gaskonst. $R_{gsm}$ [J/kg K]						319,6	vgl. Gl. (8.5)
	Rauchgasdichte 0°C, 1 bar [kg/m <sup>3</sup> ]						1,161	vgl. Gl. (8.6)
	Heizwertanteil [MJ/m <sup>3</sup> ]	-2,0	0,0	-1,3	-1,6	0,0	-4,9	vgl. Tab. 7.4 (5,1)
<b>Reaktionsgl. Holzverbr.</b>	<b>vollst. Verbr.</b>	<b>C</b>	<b>+</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>=</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>		vgl. Gl. (7.30) ff
	Molzahl [kg/kmol]	12		32		44		
	Mol-Volumen (Ltr/mol)			22,4		22,4		
	Rauchgas [Ltr/kg C]					1867		
	Bildungsenthalpie [kJ/mol]	0		0		-393,5		vgl. Tab. 7.4
	Heizwert C [MJ/kg C]					-32,8		
	<b>unvollst. Verbr.</b>	<b>C</b>	<b>+</b>	<b>1/2 · O<sub>2</sub></b>	<b>=</b>	<b>CO</b>		vgl. Gl. (7.30) ff
	Molzahl [kg/kmol]	12		8		28		
	Mol-Volumen (Ltr/mol)			11,2		22,4		
	Rauchgas [Ltr/kg C]					1867		
	Bildungsenthalpie [kJ/mol]	0		0		-123,1		vgl. Tab. 7.4
	Heizwert C [MJ/kg C]					-10,3		
	<b>vollst. Verbr.</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>+</b>	<b>1/2 · O<sub>2</sub></b>	<b>=</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>		vgl. Gl. (7.30) ff
	Molzahl [kg/kmol]	2		16		18		
	Mol-Volumen (Ltr/mol)	22,4		11,2		22,4		
	Rauchgas [Ltr/kg H]					11200		
	Bildungsenthalpie [kJ/mol]	0		0		-241,8		vgl. Tab. 7.4
	Heizwert H [MJ/kg H]					-120,9		
	Heizwert H [kJ/Ltr H = MJ/m <sup>3</sup> H]					-10,8		
	<b>vollst. Verbr.</b>	<b>S</b>	<b>+</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>=</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>		vgl. Gl. (7.30) ff
	Molzahl [kg/kmol]	32		32		64		
	Mol-Volumen (Ltr/mol)			22,4		22,4		
	Rauchgas [Ltr/kg S]					700		
	Bildungsenthalpie [kJ/mol]	0		0		-296,9		vgl. Tab. 7.4
	Heizwert H [MJ/kg S]					-9,3		
<b>Reaktionsgl. Holzgasverbr.</b>	<b>vollst. Verbr.</b>	<b>CO</b>	<b>+</b>	<b>1/2 · O<sub>2</sub></b>	<b>=</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>		
	Molzahl [kg/kmol]	28,0		16		44,0		
	Mol-Volumen (Ltr/mol)	22,4		11,2		22,4		
	Rauchgas [Ltr/kg CO]					800		
	Bildungsenthalpie [kJ/mol]	-123,1		0		-393,5	-270,4	
	Heizwert CO [MJ/kg CO]						-9,7	
	Heizwert CO [kJ/Ltr CO = MJ/m <sup>3</sup> CO]						-12,071	
	<b>vollst. Verbr.</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>+</b>	<b>2 · O<sub>2</sub></b>	<b>=</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>2 H<sub>2</sub>O</b>	
	Molzahl [kg/kmol]	16		64		44,0	36,0	
	Mol-Volumen (Ltr/mol)	22,4		44,8		22,4	44,8	
	Rauchgas [Ltr/kg CH <sub>4</sub> ]					1400	2800	
	Bildungsenthalpie [kJ/mol]	-74,9		0		-393,5	-483,6	→ -802,3
	Heizwert CH <sub>4</sub> [MJ/kg CH <sub>4</sub> ]							-50,1
	Heizwert CH <sub>4</sub> [kJ/Ltr = MJ/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ]							-35,8

Stickstoff (N) ist ein Inertgas und reagiert erst bei 1200 ... 1400°C zu Stickoxiden (NOx)

## Lösungen zu Kap. 8

zu 8.1: Thermodyn. Daten des Biogases:

$$M_{gem} = \sum \psi_i \cdot M_i \approx 0,65 \cdot 16,043 + 0,35 \cdot 44 = \underline{\underline{25,829 \text{ kg/kmol}}}$$

$$R_{gem} = \frac{\mathfrak{R}}{M_{gem}} = \frac{8,3143 \text{ kJ / kmol}}{25,829 \text{ kg / kmol}} = \underline{\underline{321,9 \text{ J / kg K}}}$$

$$\rho_{gem} = \frac{p}{R_{gem} \cdot T} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ kg}}{321,9 \cdot 273,15 \text{ m}^3} = \underline{\underline{1,1521 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

zum Vergleich:  $\rho_{CH_4} = \frac{p}{R_{CH_4} \cdot T} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ kg}}{518,25 \cdot 273,15 \text{ m}^3} = \underline{\underline{0,7156 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$

Massenanteile:  $\xi_i = \frac{m_i}{\sum m_i} = \frac{M_i}{M_{gem}} \psi_i \rightarrow \xi_{CH_4} = \frac{16}{25,8} \cdot 65\% \approx \underline{\underline{40 \text{ Masse-\%}}}$

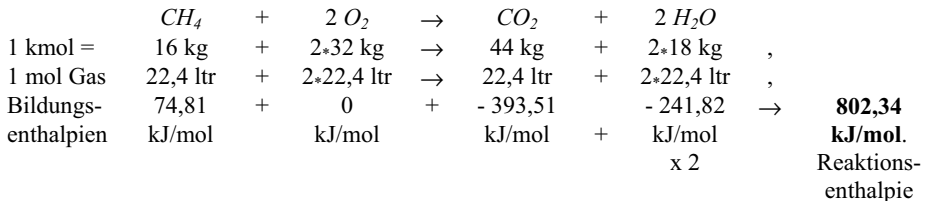
$$\xi_{CO_2} = \frac{44}{25,8} \cdot 35\% \approx \underline{\underline{60 \text{ Masse-\%}}}$$

Die Zahlenwerte haben sich also gegenüber den Volumenanteilen gerade umgekehrt!

$$c_p = \sum \xi_i \cdot c_{p_i} = \underline{\underline{1352 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}}}, \quad c_v = \sum \xi_i \cdot c_{v_i} = \underline{\underline{1030 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}}}$$

Reaktionsgleichung für das vereinfachte Gemisch:

aus



CO<sub>2</sub> reagiert als Inertgas nicht!

Mindessauerstoffbedarf für reines Methan:  $o_{min} = \frac{2 \cdot 32}{16} = 4 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg CH}_4}$

für das Gemisch:  $\xi_{CH_4} \cdot o_{min} = 1,6 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg Biogas}}$

Mindestluftbedarf für reines Methan:  $l_{min} = \frac{o_{min}}{0,232} = 17,2 \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg CH}_4}$

für das Gemisch:  $\xi_{CH_4} \cdot l_{min} = 6,9 \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg Biogas}}$

Die dazugehörigen volumetrischen Größen sind hier

$$o_{min} = \frac{2 \cdot 22,4 \text{ ltr O}_2}{22,4 \text{ ltr CH}_4} \rightarrow r_{CH_4} \cdot o_{min} = 1,3 \frac{\text{m}^3 \text{ O}_2}{\text{m}^3 \text{ Biogas}}$$

$$l_{min} = \frac{o_{min}}{0,210} = 9,524 \frac{\text{m}^3 \text{ Luft}}{\text{m}^3 \text{ CH}_4} \rightarrow r_{CH_4} \cdot l_{min} = 6,19 \frac{\text{m}^3 \text{ Luft}}{\text{m}^3 \text{ Biogas}}$$



$$\begin{aligned}
 H_u &= r_{CH_4} \cdot \{ \Delta H_{CH_4}^0 + 2 \cdot \Delta H_{O_2}^0 - \Delta H_{CO_2}^0 - 2 \cdot \Delta H_{H_2O}^0 \} = r_{CH_4} \cdot \{ 74,81 + 2 \cdot 0 - 393,51 - 2 \cdot 241,82 \} \frac{MJ}{kmol} \\
 &= r_{CH_4} [Vol. - \% CH_4 \text{ im Biogas}] \cdot 802,34 \frac{MJ}{kmol CH_4} \text{ bzw.} \\
 &= \xi_{CH_4} \left[ \frac{kg CH_4}{kg Biogas} \right] \cdot \frac{802,34 MJ}{16 kg CH_4} = \xi_{CH_4} \cdot \underline{\underline{50,1 \frac{MJ}{kg Biogas}}}
 \end{aligned}$$

also für das Methan  $H_u = \underline{\underline{50,1 MJ/kg}}$

und für Biogas der o.g. Zusammensetzung  $H_u = \underline{\underline{20,2 MJ/kg}}$ .

Für den volumetrischen Wert ersetzt man 1 kmol durch 22,4 m<sup>3</sup> so erhält man

für Methan 
$$H_u = \frac{802,34 kJ}{22,4 ltr} = 35.818 \frac{kJ}{m^3 CH_4} = 9,95 \frac{kWh}{m^3 CH_4}$$

und für dieses Biogas 
$$H_u = r_{CH_4} \cdot \frac{802,34 kJ}{22,4 ltr} = 0,65 \cdot 35.818 \frac{kJ}{m^3} = 23,28 \frac{MJ}{m^3} = \underline{\underline{6,5 \frac{kWh}{m^3 Biogas}}}$$

Alternativ findet man aus der zugeführten Wärme

$$Q_{zu} = m \cdot H_u = V \cdot \rho \cdot H_u$$

den volumetrischen Energiegehalt für Methan

$$\frac{Q_{zu}}{V} = \rho \cdot H_u = 0,7156 \frac{kg}{m^3} \cdot 50,1 \frac{MJ}{kg} = 35,85 \frac{MJ}{m^3 CH_4} = 9,95 \frac{kWh}{m^3 CH_4}$$

für dieses Biogas

$$\frac{Q_{zu}}{V} = \rho \cdot (\xi_i \cdot H_u) = 1,1521 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,4 \cdot 50,1 \frac{MJ}{kg} = 23 \frac{MJ}{m^3 Biogas} = \underline{\underline{6,5 \frac{kWh}{m^3 Biogas}}}$$

Die Eigenschaften des Beispiel-Biogases bei 0 °C und kleinen Drücken sind somit zusammengefasst:

Dichte bei Normbed.	$\rho$	1,15 kg/m <sup>3</sup>
Mindestluftbedarf	$l_{min}$	6,9 kg/kg
unterer Heizwert	$H_u$	20,2 MJ/kg = 6,5 kWh/m <sup>3</sup>
Molmasse	$M$	25,83 kg/kmol
Gaskonstante	$R$	322 J/kg K
spez. Wärmekapazität	$c_p$	1352 J/kg K
	$c_v$	1030 J/kg K
Isentropenexponent	$\kappa$	1,31
Methanzahl	$MZ$	ca. 133

zu 8.2: Begriffserklärungen:

- H<sub>2</sub>S = Schwefelwasserstoff. Der Partialdruckanteil hängt von dem Gasanteil und von der Temperatur ab. Die Konzentration an gelöstem Schwefelwasserstoff nimmt mit sinkendem pH-Wert (Säurezunahme) zu.
- Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Ammonium (NH<sub>4</sub>) → Harnstoff der Mikroben. Bei Vergärung von Substraten mit hohem Eiweißgehalt steigt die Ammonium-Stickstoff-

Freisetzung. Das Gleichgewicht zwischen Ammonium und Ammoniak wird dabei mit steigendem pH-Wert zugunsten des Ammoniak verschoben. Die Hemmwirkung der Methanbildung durch das Ammoniak nimmt mit der Temperatur zu.

- Silage ist durch Milchsäuregärung konserviertes Pflanzenmaterial.
- TS = Trockensubstanz → wasserfreier Anteil eines Stoffgemisches nach Trocknung bei 105 °C.
- oTS = organische Trockensubstanz = um den Wasseranteil und die anorganische Substanz reduzierter Anteil eines Stoffgemisches, in der Regel durch Trocknung bei 105 °C und nachfolgendes Glühen bei 550 °C ermittelt (Differenzenbildung).
- C/N = Verhältnis der Kohlenstoff- zur Stickstoffmenge. Das C/N-Verhältnis im zu vergärenden Gut ist für einen optimalen Gärprozess wichtig (ideal: 13/30). Das C/N-Verhältnis im vergorenen Gut lässt eine Aussage über die Stickstoffverfügbarkeit bei der Düngung zu (ideal ca. 13).
- Hygienisierung: Verfahrensschritt zur Reduzierung und/oder Elimination von Seuchenerregern und/oder Phytopathogenen. Hinweise zu Verfahren geben BioAbfV oder EG-Hygiene-VO.
- Raumbelastung: Organischer Anteil des in den Fermenter eingebrachten Gutes, bezogen auf das nutzbare Fermenterraumvolumen pro Zeiteinheit [kg oTS / m<sup>3</sup> und Tag]
- Verweilzeit = durchschnittliche Aufenthaltszeit des Substrats im Fermenter
- Volllaststunden: Zeitraum der Vollausslastung einer Anlage, wenn die Gesamtnutzungsstunden und der durchschnittliche Nutzungsgrad innerhalb eines Jahres auf einen Nutzungsgrad von 100 % umgerechnet wird.

zu 8.3: Kennzahlen der Biogasanlage aus Kap. 8.7:

- Großvieheinheit (GV: 500 kg Lebendgewicht): 1 Kuh = 1 GV → 1150 GV
- 1150 Rinder / (850+200) ha = 1,1 GV/ha
- Raumbelastung  $B_R = \frac{\dot{m} \cdot c}{V_R} = \frac{801 \cdot \frac{t}{d} \cdot 5,3 \text{ oTS} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{m^3}}{2500 m^3} = 0,243 \frac{\text{kg oTS}}{m^3 \cdot d}$
- [m<sup>3</sup> Biogas / m<sup>3</sup> Fermenter-Vol.]: 2547 m<sup>3</sup>/d : 2500 m<sup>3</sup> = 1,02 m<sup>3</sup> Biogas / m<sup>3</sup> d
- [m<sup>3</sup> Biogas / GV]: 2547 m<sup>3</sup>/d : 1150 GV = 2,2 m<sup>3</sup> Biogas / GV d
- Energieinhalt Biogas (vgl. Auf. 8.1):

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot H_U = \dot{V} \cdot \rho \cdot H_U = \dot{V} \cdot \frac{p}{R \cdot T} \cdot H_U = \frac{2547 m^3}{24 h} \cdot 6,5 \frac{\text{kWh}}{m^3} = 690 \text{ kWh}$$

- elektr. Leistung bei einem Wirkungsgrad von 35 %: 244 kW<sub>el</sub>
- Leistungsausnutzung = Leistung / Nennleistung: 65 %
- therm. Leistung einem therm. Wirkungsgrad von 48 %: 334 kW
- elektr. Energie [kWh/Woche]:  $244 \text{ kW} \cdot 7 \frac{d}{w} \cdot 24 \frac{h}{d} = 40992 \frac{\text{kWh}_{el}}{\text{Woche}}$
- therm. Energie [kWh/Woche]:  $334 \text{ kW} \cdot 7 \frac{d}{w} \cdot 24 \frac{h}{d} = 56112 \frac{\text{kWh}_{th}}{\text{Woche}}$

- elektr. Eigenverbrauch:  $801 \frac{t}{\text{Woche}} \cdot 0,8 \frac{kWh}{t} = 640 \frac{kWh_{el}}{\text{Woche}}$  oder 1,6 %
- therm. Eigenverbrauch:  $801 \frac{t}{\text{Woche}} \cdot 43,1 \frac{kWh}{t} = 34523 \frac{kWh_{th}}{\text{Woche}}$  oder 62 %

Beachte: Während der elektr. Verbrauch eindeutig dem Substrat zugewiesen werden kann, ist der Wärmeverbrauch von jahreszeitlichen Schwankungen abhängig!

- Gesamtnutzungsgrad, wenn die Wärme vollständig genutzt werden kann:  $(244+334)/690 = 84 \%$
- Produktivität [kW/GV]:  $244 \text{ kW} / 1150 \text{ GV} = 0,212 \text{ kW/GV}$

### Lösungen zu Kap. 12.8

Leistung der Brennstoffzelle:  $P = U \cdot I = 0,712V \cdot 1,175A = 0,837W$

thermodyn. max. möglich:  $P_{rev} = \dot{n}_{H_2} \cdot \Delta G$  wobei der Molenstrom

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{p_{H_2}}{\mathfrak{R} \cdot T} \cdot \dot{V}_{H_2} = \frac{1,05 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{8,314 \frac{kJ}{kmol \cdot K} \cdot 298K} \cdot 9,56 \frac{m^3}{100^3 \cdot 60s} = 6,75 \cdot 10^{-6} \frac{mol}{s}$$

und für die Wasserstoffzelle (AFC) nach Tab. 7.4:  $\Delta G = -237,13kJ / mol$

also  $P_{rev} = \dot{n}_{H_2} \cdot \Delta G = 237,13kJ / mol \cdot 6,75 \cdot 10^{-6} mol / s = 1,6 \frac{J}{s} = 1,6W$

Zellenwirkungsgrad:  $\eta = \frac{P}{P_{rev}} = \frac{0,837}{1,6} = 0,52 = 52\%$

Reversibler Wirkungsgrad:  $\eta_{rev} = \frac{U}{U_{rev}} = \frac{0,712V}{1,229V} = 0,58 = 58\%$

Umsetzungsgrad:  $\eta_U = \frac{(\dot{n}_{H_2})_U}{\dot{n}_{H_2}} = \frac{\eta}{\eta_{rev}} = \frac{52}{58} = 0,897 \approx 90\%$

Etwa 10 % des Brennstoffes wird also nicht umgesetzt.

Der 1. Hauptsatz liefert für die zu- und abgeführten Stoff- und Energieströme:

$$\dot{n}_{H_2} \cdot H_U(H_2) + \dot{n}_{O_2} \cdot H_U(O_2) = \dot{Q} + P + \dot{n}_{H_2O} \cdot H_U(H_2O)$$

wobei nur ein Teilstrom tatsächlich chemisch reagiert, so dass mit der Standardenthalpie nach

Tab. 7.4:  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$  also  $\Delta H_{\text{Reaktion}}^0 = 286 - 0 - \frac{1}{2} \cdot 0 = 286 \frac{kJ}{mol}$

$\dot{Q} + P = \eta_U \cdot \dot{n}_{H_2} \cdot \Delta H_{\text{Reaktion}}^0$  also:

$$\dot{Q} = \eta_U \cdot \dot{n}_{H_2} \cdot \Delta H_{\text{Reaktion}}^0 - P = 0,897 \cdot 6,75 \cdot 10^{-6} \frac{mol}{s} \cdot 286 \frac{10^3 J}{mol} - 0,837W = 1,732 - 0,837 = 0,895W$$

Die Brennstoffzelle gibt also mehr Wärme als elektr. Arbeit ab.

**Lösungen zu Kap. 13**

zu 13.1: Als Elektrolyse bezeichnet man die Zersetzung von chemischen Substanzen durch hindurchfließen elektrischen Strom. Wenn zur Umwandlung eines Moleküls oder Ions  $n$  Elektronen nötig sind, dann werden  $n$  Faraday zur Umwandlung von 1 mol Substanz benötigt.

zu 13.2: Vgl. Gl. (12.11) ff & Kap. 13:  $F = e \cdot N_A = 96487 \frac{As}{mol}$  ;  $I = N \cdot e = (\dot{n}_{el} \cdot N_A) \cdot e$

## Quellen- und Literaturhinweise

### Erneuerbare Energie und rationelle Energieanwendung

- [1] Kaltschmitt, M.; Wiese, A.; Streicher, W. (Hrsg.): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte (3. Auflage), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2003)
- [2] Heinloth, K.: Energie und Umwelt, Klimaverträgliche Nutzung von Energie, Vieweg+Teubner Verlag 1996
- [3] Dreyhaupt, F. J. (Hrsg.): VDI-Lexikon Umwelttechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- [4] Beitz, W.; Küttner, K.-H. (Hrsg.): Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau (15. Aufl.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1983
- [5] BINE Informationsdienst, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [6] Bundesverband erneuerbare Energien, [www.bee-ev.de](http://www.bee-ev.de); Stand: Mai 2008
- [7] Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme (5. Auflage), Hanser Verlag, München (2008)

### Photovoltaik

- [8] Koeppen, J.: Elektrotechnik, Vorlesungsmanuskript, HAW Hamburg, 2008
- [9] Wagemann, H.-G. / Eschrich, H.: Photovoltaik, Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben, Vieweg+Teubner Verlag 2007
- [10] BINE Informationsdienst: Performance von Photovoltaikanlagen, Projektinfo 03/03, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008

### Solarthermie

- [11] BINE Informationsdienst: Große Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung, Projektinfo 03/02, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [12] BINE Informationsdienst: Glasfaserverstärkte Kunststoffe für den Wärmespeicherbau, Projektinfo 02/03, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [13] BINE Informationsdienst: Solare Luftsysteme, Projektinfo II/02, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008

### Wind- und Wasserkraft

- [14] Koeppen, J.: Innovative Energieversorgung / Windkraftanlagen (Vorlesungsmanuskript), HAW Hamburg, 2008
- [15] Twele, J., Gasch, R. (Hrsg.): Windkraftanlagen Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb Vieweg+Teubner Verlag, 2007
- [16] Heier, S.: Windkraftanlagen, Systemauslegung, Netzintegration und Regelung, Vieweg+Teubner Verlag 2005
- [17] Becker, E.: Technische Strömungslehre, Teubner Studienbücher, Teubner-Verlag, Stuttgart (1982)
- [18] Menny, K.: Strömungsmaschinen, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006
- [19] BINE Informationsdienst: Kleine Windenergieanlage für Netz- und Inselbetrieb, Projektinfo 02/07, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [20] BINE Informationsdienst: Windprognosen im Binnenland, Projektinfo 11/99, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [21] BINE Informationsdienst: Offshore-Windenergie vor der Küste, Projektinfo 05/03, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [22] BINE Informationsdienst: Ökologische Begleitforschung für Offshore-Windenergienutzung, Projektinfo 07/04, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [23] Bohl, W.: Strömungsmaschinen (Band 1: Aufbau und Wirkungsweise; Band 2: Berechnung und Konstruktion), 4. Auflage, Vogel-Fachbuchverlag, Würzburg, 1991
- [24] Pfleiderer, C.; Petermann, H.: Strömungsmaschinen (6. Aufl.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991
- [25] BINE Informationsdienst: Seafloor – Strom aus der Meeresströmung, Projektinfo 04/04, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008

- [26] Graw, K.-U.: Wellenenergie – eine hydrodynamische Analyse, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, [http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte\\_099/40\\_\\_1995/](http://www.uni-leipzig.de/~grw/lit/texte_099/40__1995/); Stand: Mai 2008

### **Erdwärme / Wärmepumpe / Kältemittel**

- [27] BITZER: Kältemittelreport (13. Auflage), Bitzer-Kühlmaschinenbau GmbH, Sindelfingen, [www.bitzer.de](http://www.bitzer.de); Stand: Mai 2008
- [28] BITZER: Einsatz von Propan (R290) mit halbhermetischen Kältemittelverdichtern, Technische Information, Bitzer-Kühlmaschinenbau GmbH, Sindelfingen, [www.bitzer.de](http://www.bitzer.de); Stand: Mai 2008
- [29] Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein: Geothermie in Schleswig-Holstein, Leitfaden für oberflächennahe Erdwärmeanlagen (Erdwärmekollektoren – Erdwärmesonden), [www.lanu-sh.de](http://www.lanu-sh.de), 2007
- [30] Groth, K.: Kompressoren (Grundzüge des Kolbenmaschinenbaus II), Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1995
- [31] BINE Informationsdienst: CO<sub>2</sub> als Kältemittel für Wärmepumpen und Kältemaschinen, Projektinfo 10/00, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [32] BINE Informationsdienst: Neue Wärmepumpen-Konzepte für energieeffiziente Gebäude, Projektinfo 14/01, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [33] Safenreiter, M.; Schulze, M.: Simulationsberechnungen zur Rückwirkung von Erdwärmepumpen auf das Erdreich, Studienarbeit, HAW Hamburg, 2008
- [34] Schulz, C.: Ein Beitrag zur Berechnung der Wärmeübertragungseigenschaften in einem Erdwärmekollektor, Diplomarbeit, HAW Hamburg, 2008
- [35] DIMPLEX: Projektierungs- und Installationshandbuch für Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen, Ausgabe 02/2006, [www.dimplex.de](http://www.dimplex.de), 2007; Stand: Mai 2008
- [36] Dozenten der Kältetechnik an Fachhochschule (Hrsg.): Aufgabensammlung Kältetechnik – Aufgaben und Lösungen mit Begleitdiskette, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 1995
- [37] <http://de.wikipedia.org/wiki/Scrollverdichter>; Stand: Mai 2008
- [38] Huber, A.; Pahud, D.: Untiefe Geothermie – Woher kommt die Energie? Schlussbericht zur Projektstudie, Bundesamt für Energie (BfE), 1999

### **Energie aus Biomasse**

- [39] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2001)
- [40] Hartmann, H.; Reisinger, K.; Thuncke, K.; Höldrich, A.; Roßmann, P.: Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen, Fachagentur nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow (2. Aufl.), 2007
- [41] Bendix, D.; Faulstich, M.: Vorlesungsmanuskript Technische Thermodynamik, [www.rohstofftechnologie.de](http://www.rohstofftechnologie.de); Technische Universität München, 2008
- [42] Willner, Th.: Direktverflüssigung von Biomasse am Beispiel der Entwicklungen der HAW Hamburg, Gülzower Fachgespräche, Band 28, Hrsg. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow 2008, S. 54–86
- [43] Willner, Th.: persönliche Mitteilungen (28. Sept. und 7. Okt. 2008)
- [44] BINE Informationsdienst: Holz – Energie aus Biomasse, Basis Energie 13, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info); Stand: Mai 2008
- [45] Feßmann, Orth: Angewandte Chemie und Umweltechnik für Ingenieure, Handbuch für Studium und betriebliche Praxis, Ecomed-Verlag, Landsberg/Lech, 1999
- [46] Dickerson/Geis: Chemie – eine lebendige und anschauliche Einführung, Verlag Chemie, Weinheim, Deerfield Beach, Florida, Basel, 1981
- [47] Schröter / Lautenschläger / Bibrack: Taschenbuch der Chemie (17. Auflage), Verlag Harry Deutsch, Frankfurt am Main, 1995
- [48] Hölzel, G.: Einführung in die Chemie für Ingenieure, Hanser-Verlag, München/Wien, 1992
- [49] Baehr, H. D.: Thermodynamik (5. Aufl.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1981), Seite 346 ff bzw. Tab. 10.6 und 10.11
- [50] Wedler, G.: Lehrbuch der Physikalischen Chemie (3. Aufl.), VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1987

- [51] European Commission: Biomass Conversion Technologies; Achievements and Prospects for Heat and Power Generation; Directorate-General Science, Research and Development; Nov. 1998
- [52] Mayr, F.: Kesselbetriebstechnik – Kraft- und Wärmeerzeugung in Praxis und Theorie (8. Auflage), Resch-Verlag, Gräfelfing/München, 1999
- [53] Lehmann, H.: Dampferzeugerpraxis – Grundlagen und Betrieb, Resch-Verlag, Gräfelfing/München, 1994
- [54] Polifke, W.; Kopitz, J.: Wärmeübertragung – Grundlagen, analytische und numerische Methoden, Pearson-Verlag, München, 2005 (S. 118)
- [55] N.N.: Abschnitt 6. Theorie der Holzverbrennung .....9. Vergasung und Pyrolyse.... 10. Vergasung und andere Kraft/Wärmetechniken, [www.videncenter.dk](http://www.videncenter.dk); Stand: Nov. 1998
- [56] Leible, L.; Kälber, S.; Kappler, G.: Energiebereitstellung aus Stroh und Waldrestholz, BWK Bd. 60 (5/2008); S. 56...62
- [57] Gaderer, M.; Kunde, R.; Spliehoff, H.: Systemuntersuchung an Heizungsanlagen – Holzpellets, Heizöl-Brennwert- und Erdgas-Brennwertkessel im Vergleich; BWK Bd. 59 (12/2007), S. 39...46
- [58] Senger, W.: IUTA-Kombi-Vergaser – Energiebündel Holz, UMWELT 6/2001, S. 34 ... 36
- [59] Hiller, A.: Beiträge zur energetischen Nutzung von Biomasse in zirkulierende Wirbelschicht-Anlagen mit Festbettvergasung, Dissertation TU Dresden, 2004
- [60] Hertwig, K.; Martens, L.: Chemische Verfahrenstechnik – Berechnung, Auslegung und Betrieb chemischer Reaktoren, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2007  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, [www.fal.de](http://www.fal.de); Stand: 2007

### Biogas

- [61] Scherer, Paul A.: Zur Biologie von Vergärung von Biomasse, persönliche Mitteilungen, August 2008
- [62] Institut für Energetik und Umwelt gGmbH; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR – Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung (3. Auflage), Gülzow, 2006, [www.fnr.de](http://www.fnr.de)
- [63] BINE: Betriebserfahrungen mit Biogasanlagen in der Landwirtschaft – Ergebnisse einer Struktur-analyse, BINE Fachinformationsdienst, Bonn/Karlsruhe, 1998
- [64] Eder; Schulz: Biogas Praxis (4. Auflage), Ökobuch Verlag, Staufen, 2007
- [65] FNR (Hrsg.): Biogas – eine natürliche Energiequelle, Gülzow, 2002, [www.fnr.de](http://www.fnr.de)
- [66] FNR/FAL: Biogas-Anlagen – 12 Datenblätter, Gülzow, 2004, [www.fnr.de](http://www.fnr.de)
- [67] Urban, W.; Girod, K.; Lohmann, H. (Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik – Fraunhofer UMSICHT): Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz, BMBF-Studie, Oberhausen, 2008
- [68] Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg: Sicherheitsregeln für landwirtschaftliche Biogasanlagen – Planungshilfe für Bauherren, Ingenieure und Fachbehörden, Stuttgart, 1998
- [69] Theißing, M.: Biogas – Einspeisung und Systemintegration in bestehende Gasnetze, Öster. Ministerium f. Verkehr, Innovation u. Technologie, Berichte aus der Energie- und Umweltforschung 1/2006, Wien; <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

### Biokraftstoffe

- [70] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR): Biokraftstoffe – eine vergleichende Analyse; Gülzow, 2006; [www.bio-kraftstoffe.info](http://www.bio-kraftstoffe.info); [www.fnr.de](http://www.fnr.de); Stand: Mai 2008
- [71] Leible, Kälber, Kappler, Lange, Nieke, Proplesch, Wintzer, Fürniß (Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Forschungszentrum Karlsruhe): Kraftstoff, Strom und Wärme aus Stroh und Waldrestholz – eine systemanalytische Untersuchung, Wissenschaftliche Bericht FZKA 7170, Forschungszentrum Karlsruhe, 2008; <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2007/leua07a.pdf>; Stand: Mai 2008
- [72] Clausthaler-Umwelttechnik-Institut: Anforderungen an Biomasse zur Kraftstoffherstellung aus der Sicht von Anlagenbetreibern (Abschlussbericht), 2006; [www.cutec.de](http://www.cutec.de); [www.fnr.de](http://www.fnr.de); Stand: Mai 2008
- [73] Vogel, Alexander; Bolhar-Nordenkamp, Markus; Hofbauer, Hermann: Systemkonzepte für die Produktion von Fischer-Tropsch-Biokraftstoffen, BWK Bd. 56 (03/2004), S. 57...62

**Motorentechnik**

- [74] Zacharias; Friedemann: Gasmotoren, Vogel-Fachbuch-Verlag, Würzburg, 2001
- [75] Mollenhauer, K. (Hrsg.): Handbuch Dieselmotoren, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997
- [76] Köhler, E.: Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung (2. Aufl.), Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2001
- [77] Robert Bosch GmbH: Dieselmotoren-Management (3. Auflage), Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 2002
- [78] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) – Hrsg.: BHKW und Methanzahl – Einfluss der Gasbeschaffenheit auf den Motorbetrieb, Hamburg
- [79] MDE: BHKW planen mit ... MDE Dezentrale Energiesysteme, Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasmotoren zur dezentralen Energieversorgung, CD-ROM, MDE Dezentrale Energiesysteme GmbH, Augsburg, [www.mde-augsburg.de](http://www.mde-augsburg.de) (1999)
- [80] MWM: Gasmotoren-Information, DEUTZ MWM; Mannheim, 1984

**Stirling-Motor**

- [81] Schleder, Frank: Stirlingmotoren – Thermodyn. Grundlagen, Kreisprozessrechnung und Niedertemperaturmotoren, Vogel-Fachbuchverlag, Würzburg, 2002
- [82] Keck, T.; Schiel, W.: Dish/Stirling-Anlagen zur dezentralen solaren Stromerzeugung, BWK 12/2001 (Bd. 53)
- [83] Beck, P.: Stirlingmaschine verlässt die Nische – Der ungewöhnliche Motor kann Strom aus Biomasse im kleinen Leistungsbereich erzeugen, VDI-Nachrichten vom 29. August 2008, Seite 11

**Brennstoffzellen**

- [84] Winkler, Wolfgang: Brennstoffzellenanlagen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [85] Larminie, James; Dicks, Andrew: Fuel Cell Systems Explained (2nd Edition), Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 2003
- [86] Wendt, H.; Plzak, V. (Hrsg.): Brennstoffzellen – Stand der Technik, Entwicklungslinien, Marktchancen, VDI Verlag, Düsseldorf, 1990
- [87] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR Hrsg.): Energetische Nutzung von Biomasse mit Brennstoffzellenverfahren, FNR, Gülzow, 1998
- [88] Heinzel, A.: Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung; BWK Bd. 59 (12/2007), S. 35...38
- [89] BINE Informationsdienst: Kraft-Wärme-Kopplung mit Brennstoffzellen, Projektinfo Okt. 1998, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info)
- [90] BINE Informationsdienst: PEM-Brennstoffzellen, Projektinfo 14/01, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info)

**Geothermische Stromerzeugung**

- [91] Rogge, S.: Geothermische Stromerzeugung in Deutschland – Ökonomie, Ökologie und Potentiale; Dissertation, TU Berlin, [http://edocs.tu-berlin.de/diss/2003/rogge\\_silke.pdf](http://edocs.tu-berlin.de/diss/2003/rogge_silke.pdf), 2004
- [92] Paschen, H.; Oertel, D.; Grünwald, R.: Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin, 2003; <http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab84.pdf>; Stand: Mai 2008
- [93] [http://www.geothermie.de/egec\\_geothernet/menu/frameset.htm](http://www.geothermie.de/egec_geothernet/menu/frameset.htm); Stand: Mai 2008

**Solkraftwerke**

- [94] BMU: Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, Herausgeber BMU, inhaltliche Bearbeitung DLR, ifeu, Wuppertal Institut, April 2004, 285 Seiten; verfügbar über: <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/5650/20049/>
- [95] BINE Informationsdienst: Solarthermische Kraftwerke werden Praxis, Projektinfo 07/08, Fachinformationszentrum Karlsruhe/Bonn, [www.bine.info](http://www.bine.info)

**Kraft-Wärme-Kopplung**

- [96] Bundesministerium für Forschung und Technologie: Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie, ISBN 3-88135-000-4, Bonn, 1976



- [97] Weish, P.; Gruber, E.: Radioaktivität und Umwelt, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 1979

**Wasserstoff**

- [98] Altmann, Gaus, Landinger, Stiller, Wurst: Wasserstofferzeugung in offshore Windparks (Studie im Auftrag der GEO Gesellschaft für Energie und Ökologie), L-B-Systemtechnik, Ottobrunn, [www.sbst.de](http://www.sbst.de) (2001)
- [99] Schüle, M.: Energietechnische Analyse der Erzeugung und des Transports von Solar-Wasserstoff, VDI-Fortschrittsbericht 287 (Reihe 6 Energieerzeugung), VDI Verlag, Düsseldorf, 1993

## Sachwortverzeichnis

3.-Potenz-Gesetz 49

### A

Ablativ 165  
 ablative Strohverflüssigung 175  
 Abminderungsfaktor 52  
 Abschaltgeschwindigkeit 49  
 Absolutgeschwindigkeit 55, 75  
 Absorber 28, 127  
 Absorptionsgrad 26  
 Absorptionskälteanlage 126  
 Acetogenese 186  
 Acidogenese 185  
 Activa 285  
 Aerosol 175  
 AFC 261  
 Aktivkohle 277  
 Aktivseite 285  
 Aktivtausch 288  
 Akzeptor 12  
 Alkalie 172  
 Alkaligehalt 172  
 Alkalimetall 172  
 Alkane 212  
 alkoholische Gärung 207  
 allotherm 164  
 Amine 192  
 Amin-Wäscher 192  
 Amortisationsrechnung 292  
 Anlagevermögen 285  
 Annuitätendarlehen 293  
 Anode 260, 279  
 Apertur 235  
 Arbeitsmedium 255  
 Asche 139  
 Aschegehalt 139  
 Atmosphäre 5  
 atmosphärische Vergasung 161  
 Aufbewahrungspflicht 288  
 Aufheizung 144  
 Aufladung 255  
 Auftriebsbeiwert 56  
 Auftriebskraft 56  
 Auftriebsprinzip 54

Aufwand 289  
 Aufwindkraftwerk 241  
 Auskühlen des Erdreiches 122  
 Ausleitungskraftwerk 83  
 Austreiber 127  
 Autoklaven 215  
 autotherm 163  
 AVOGADRO-Konstante 262  
 Axialschub 62  
 Azeotrop 115  
 Azimut 9  
 Azimutregelung 62

### B

Bakteriengruppe, mesophile 185  
 Bakteriengruppe, thermophile 185  
 Ballaststoffe 138  
 BEAUFORT 44  
 Belagbildung 222  
 Bergius-Verfahren 215  
 BERNOULLI 51  
 BERNOULLI-Gleichung 71  
 Betriebsparameter 197  
 BETZsche Theorie 52  
 Bewegtbettvergasung 176  
 Bilanz 285  
 Bilanz-Grundsätze 286  
 Bilanzvergrößerung 288  
 Bilanzverkleinerung 288  
 Bildungsenthalpie 147  
 Biodiesel 204  
 Bioethanol 207  
 Biogas 184, 211  
 Biogasanlage 184  
 Biogasertrag 189  
 Biogasproduktion 189  
 Biokraftstoff 203  
 Biomasse 136  
 Biomassestruktur 139  
 Bioreaktor 190  
 Biowasserstoff 281  
 Bipolar 59  
 Bodenwellengenerator 91  
 Bodenwert 122

Boudouard-Reaktion 157  
Brayton-Kreisprozess 238  
Breitengrad 9  
Brennstoffe, konventionelle 140  
Brennstoffzelle 260  
Brennstoffzelle, alkalische 261  
Brennwert 142, 148  
Brenzen 154  
BtL-Kraftstoff 211  
Buchführung 287  
Bypassdiode 15

## C

C/N-Verhältnis 324  
Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS 194  
Carbonat-Wäscher 192  
Carbonsäure 185  
Carbo-V-Verfahren 213  
CARNOT-Prozess 102  
Cellulose 137  
Cellulose-Ethanol 219  
Chlorgehalt 172  
Chlorophyll 136  
„Chopper“-Betrieb 18  
CNG = Compressed Natural Gas 211  
CO<sub>2</sub>-Abtrennung 192  
CO<sub>2</sub>-Emissionswert 149  
„Coefficient of Performance“ = COP 106  
Coulomb 262  
CPOX 277

## D

DALTONsches Gesetz 152  
Dampfdruckkurve 94  
Dampfpreformierung 157, 217, 271, 276  
Dampfturbinenkraftwerk 245  
DARRIEUS-Prinzip 65  
Deckungsgrad 30  
Deklination 9  
Deoxygenierung 178  
Destillation, trockene 154, 216  
Deuteriumoxid 273  
Dextrose 137  
Diffusionsbewegung 12  
Diffusstrahlung 7  
Dimethylether 210  
Diodengleichung 13

Direktmethanolbrennstoffzelle 265  
Direktstrahlung 7  
Direktverflüssigung 178  
Dish 234  
Dish-Stirling-Anlage 239  
DISS = Direct Solar Steam 235  
Dissoziation, thermische 280  
DME 210  
DMFC 265  
DoS-Verfahren 179  
Dotierung 11  
Drehkraft 56  
Drehmoment 58  
Druckänderung 151  
Druckverflüssigung 215  
Druckvergasung 161  
Druckwasserreaktor 273  
Druckwechsel-Adsorption 278  
Druckzahl 76  
Düngemittel 200  
Durchflusszahl 76  
DWR 273  
dynamischer Druckanteil 71

## E

Ebbe 85  
EC-Motor 35  
Economiser 108  
Edukt 146, 150  
Eigenkapital 285 f.  
Einschaltgeschwindigkeit 49  
Eisenionen 191  
Eisensulfat 150  
Elektrofilter 175  
Elektrolyt 260  
Elektronen-Loch-Paar 12  
Elektronenmolenstrom 262  
Elementarladung 262  
Elevation 9  
Elevationswinkel 10  
Elsbett-Motor 244  
Emission 168  
Emissionswert 149  
Energieertrag 50  
Entgasungsphase 144  
Enthalpie, freie 147  
Entschwefelung 191, 199  
Entspannungsverdampfung 230

Erdalkalimetall 172  
 Erdkollektor 120  
 Erdwärme 102, 222  
 Erdwärmesonde 225  
 Ertrag 289  
 Esterbildung 206  
 Ethanol 207  
 EULER-Hauptgleichung 58, 75

**F**

Fallhöhe 76  
 Fallwindkraftwerk 242  
 FARADAY-Konstante 262  
 Faulraumbelastung 199  
 Faulverfahren 185  
 FCKW 112  
 Feldeffekttransistor 18  
 Fermentation 184 f.  
 Fermenter 190  
 Festbettvergasung 160  
 Festmeter 143  
 Festoxidbrennstoffzelle 268  
 Feststoffvergaser 176  
 FET 18  
 Fett-/Carbonsäure 186  
 feuchtes Milieu 197  
 Finanzplanung 291  
 FISCHER-TROPSCH-Verfahren 212  
 Flash-Evaporation 230  
 Flash-Pyrolyse 155  
 Flügelzahl 63  
 Flugstromvergasung 163, 213  
 Flut 85  
 FRANCIS-Turbine 80  
 Freie Enthalpie 153  
 Freilaufdiode 15  
 Freistrahlturbine 79  
 Fremdkapital 285  
 FRESNEL-Linse 236  
 fühlbare Wärme 26  
 Füllfaktor FF 14

**G**

Gärungsvorgang 216  
 Gärzeit 187  
 Gaskonstante 190  
 Gasmotor 173, 244  
 Gasproduktion 187

Gasturbinenprozess 246  
 Gaswäsche 194  
 Gaszusammensetzung 158, 190  
 Gegenstromverfahren 160  
 Geothermie 222  
 Geothermie, hydrothermale 225  
 Geothermie, petrothermale 223 f.  
 Gesetz von STEFAN-BOLTZMANN 26  
 Gewinn 286  
 Gewinn- und Verlustrechnung 289  
 Gewinnvergleichsrechnung 292  
 Gezeitenkraftwerk 85, 98  
 GIBBS-Energie 153  
 Gitterbemessungsgleichung 64  
 Gleichgewichtskonstante 151  
 Gleichgewichtszustand 150  
 Gleichstromvergaser 160  
 Gleitwinkel 58  
 Gleitzahl 58  
 Globalstrahlung 7  
 Glucose 136 f., 208  
 Glykolkreislauf 35  
 Grädigkeit 117  
 Grenzflächenkorrosion 199  
 Großvieheinheit 187  
 GuD 234  
 GWP 110

**H**

Hackschnitzel 171  
 Häufigkeitsverteilung 46  
 Hausfeuerungsanlage 166  
 HDR-Verfahren 223  
 Hefe 208  
 Heißgasturbine 246  
 Heizstab 118  
 Heizwert 141 f., 148  
 Heliostat 234, 237  
 Hemicellulose 137  
 HFC 113  
 HFR = Hot Fractured Rock 231  
 Hochenthalpie-Lagerstätte 223  
 Höchstwertprinzip 286  
 Hochtemperaturkorrosion 172  
 Hochtemperaturreaktor 274  
 Hochtemperaturvergaser (HTV) 214  
 Holzgeist 216  
 Holzhackschnitzelvergasung 173

Holzkohle 146  
Holzpelletkessel 168  
Holzteer 215  
Holzvergaser-Heizkessel 160  
Holzvergaserkessel 170  
Holzvergasung 156  
hot spot 15  
Hot-Dry-Rock-Verfahren 223  
HTR 274  
Hubflügelgenerator 84  
HWR 273  
hydraulische Leistung 71  
hydraulische Stimulation 223  
hydrierende Vergasung 157  
Hydrogenase 281  
Hydrolyse 185  
Hygienisierung 324

**I**

Impulssatz 56  
Integrated Gasification Combined Cycle,  
IGCC 194  
Investitionsplanung 291  
Investitionsrechnung 292  
ISCCS 234

**J**

Jahresarbeitszahl 106, 118  
Jahresertrag 20  
Jahresfehlbetrag 286  
Jahresnutzungsgrad 167  
Joule-Kreisprozess 238

**K**

Kalina-Cycle-Verfahren 258  
Kalina-Kreisprozess 258  
KALINA-Verfahren 231  
Kältemittel 109  
Kapitalwertmethode 292  
KAPLAN-Turbine 81  
Katalysator 151  
Katalytische Niederdruck-  
Direktverflüssigung 178  
Kathode 260, 278  
Kernenergie 272  
Kesselwirkungsgrad 167  
KIRCHHOFFschen Gesetz 27  
Klafter 143

Kofermentation 200  
Kohlenhydrate 138  
Kohlenhydratherstellung 136  
Koks 165  
Kollektorstillstand 31  
kombinierter Gas-Dampfturbinenprozess  
248  
Kostenvergleichsrechnung 292  
Kraftstoffe, konventionelle 140  
Kraft-Wärme-Kopplung 243  
Kraftwerk, solares 233  
Kristallgitter  
n-dotiertes 12  
p-dotiertes 12  
Kværner-Verfahren 277

**L**

Ladungsstrom 262  
Lambdasonde 170  
Laufwasserkraftwerk 82  
Laufzahl 60  
Leerlaufspannung 13  
Leichtwasserreaktor 273  
Leistungsbeiwert 52  
Leistungsregelung 124  
Leistungszahl 106  
lg-p-h-Diagramm 104  
Lignin 138  
Lipide 209  
Liquiditätsbewertung 287  
LWR 273

**M**

Maische 208  
Massebedarf 143  
Massenwirkungsgesetz 150  
Massenwirkungskonstante 151  
Masseverhältnis 190  
Maximum Power Point (MPP) 14  
MCFC 267  
Meeresströmungskraftwerk 87  
Meereswärmekraftwerk 93  
Meerwasserentsalzung 95  
Melasse 208  
mesophil 194  
Methanisierung 157  
Methanogenese 186  
Methanol 216

Methanzahl 244  
 Methylalkohol 216  
 Mindestluftbedarf 148  
 Mindestsauerstoffbedarf 148  
 Mindestverweildauer 199  
 Mitteldruck 255  
 Mitteldruck, indizierter 254  
 Mitteleuropäischen Zeit (MEZ) 10  
 Mittlere Ortzeit (MOZ) 10  
 Molgewicht 190  
 Molverhältnis 190  
 Monomere 154  
 MOSFET 18  
 MPP-Tracking 18  
 MTBE 219  
 MTG-Verfahren 219  
  
**N**  
 n-(Elektronen)-Leiter 12  
 Naphtha 213  
 natives Öl 209  
 Naturzugkessel 168  
 Nennleistung 49  
 Niederenenthalpie-Lagerstätten 225  
 Niedertemperaturkorrosion 199  
 Niedertemperaturvergasung (NTV) 214  
 Niedertemperatur-Wärmequelle 229  
 Niedrigwertprinzip 286  
 Nitrogenase 281  
  
**O**  
 Ocean Thermal Energy Conversion 93  
 ODP 110  
 ORC 256  
 ORC-Prozess 93  
 Organic Rankine Cycle 256  
 Organic Rankine Cycle-Anlage (ORC)  
     231  
 Organic Rankine Cycle-Kraftwerk 240  
 oscillating water column 89  
 Osmose 95  
 Osmosekraftwerk 95  
 osmotischer Druck 95  
 OTEC 93  
 oTS = organische Trockensubstanz 199,  
     324  
 OWC-Boje 90  
 OWC-Prinzip 89

Oxidation 144  
 Oxidation, partielle 271, 277  
 Oxonium 267  
 Oxyfuel-Verfahren 194  
 Ozon-Abbau-Potential 110  
  
**P**  
 PAFC 266  
 Parabolrinne 233  
 Parabolrinnenkollektor 235  
 Parabolspiegel 234  
 Paraffin 212  
 Parallelschaltung 15, 33  
 Partialdruck 152  
 Passiva 285  
 Passiveite 285  
 Passivtausch 288  
 Peak-Leistung 14  
 PEFC 264  
 Pektine 216  
 PELAMIS 90  
 PELTON-Turbine 79  
 PEMFC 264  
 Pflanzenöl 209  
 Pflanzenölmotor 244  
 Phosphorsäurebrennstoffzelle 266  
 Photosynthese 136  
 photothermische Wandlung 27  
 Phototrophie 136  
 Photovoltaik 4  
 pH-Wert 197 f.  
 Pitch-Control 62  
 Pitch-Regelung 62  
 Plasma 277  
 p-Leiter 12  
 Polymerelektrolytbrennstoffzelle 264  
 Polyosen 137  
 Polysaccharide 137  
 Post-Combustion-Capture-Verfahren 192  
 Pre-Combustion-Capture 194  
 Produkt 146, 150  
 Profilanströmung 55  
 Profilanströmung 55  
 Propellersteigung 81  
 PROX 278  
 PSA – Pressure Swing Adsorption 278  
 Pufferkapazität 198  
 Pufferspeicher 170

- Pumpspeicherkraftwerk 84, 98  
Purisolwäsche 215, 278  
PWM = Pulsweitenmodulation 17  
Pyrolyse 144, 154  
Pyrolyse, direkte 155  
Pyrolyse, indirekte 155  
Pyrolyselöl 175  
Pyrolyserohr 173  
Pyrolyseschnecke 176  
pyrolytische Zersetzung 144
- Q**  
Quenchen 164, 215
- R**  
Raps 192  
Rapsdiesel 204  
Rapsölmethylester, RME 204  
Raumbedarf 143  
Raumladungszone 12  
Raummeter 143  
RAYLEIGH-Verteilung 47  
Reaktionsenthalpie 147  
Reaktivdestillation 178  
Receiver 237  
Rechnungsabgrenzungsposten 285  
Rectisolverfahren 218  
Rectisolwäsche 215, 278  
Redoxpotenzial 197  
Reflexionsgrad 26  
Reformer 270  
REFOS 234  
Regenerator 253  
Reihenschaltung 15, 32  
relative Häufigkeit 46  
Rentabilität 290  
Rentabilitätsrechnung 292  
Rohbenzin 213  
Rücklauftemperaturanhebung 170
- S**  
Saccharide 138  
Saldo 288  
Salzgradientenkraftwerk 95  
SAVONIUS-Prinzip 65  
Scaling 222  
Schiffsmühle 74  
Schlacke 139  
Schlempe 208  
Schmelzkarbonatbrennstoffzelle 267  
Schneller Brüter 274  
Schnellläufigkeit 62, 76  
Schüttraummeter 143  
Schwefelsäure 149  
Schwellbetrieb 83  
schweres Wasser 273  
Schwerwasserreaktor 273  
Scrollkompressor 124  
scrubber 192  
Seaflow 87  
Seeschlage 90  
SEGS = Solar Electricity Generation  
    System 235  
selektive Absorberschicht 27  
Selexol-Wäsche 215, 278  
Shift-Reaktion 157, 276  
SHOCKLEY 13  
Sicherheitstechnik 200  
Siedewasserreaktor 273  
SOFC 268  
SOFC-GT 270  
Solarkonstante 4  
Solarkraftwerk, thermisches 233  
Solarteichkraftwerk 240  
Solarthermie 26  
Solarturmkraftwerk 237  
Solvolyse 178  
Sonnenbahndiagramm 11  
Sonnenstand 9  
Speed-Control 62  
Speicher 33  
Speicherkraftwerk 84  
Speisewasservorwärmung 245  
Sperrdiode 15  
spez. Drehzahl 77  
spez. Stutzenarbeit 76  
Stall 58  
Stall-Control 62  
Stall-Effekt 62  
Standardbildungsenthalpie 146  
Stärke 207  
statischer Druck 71  
Staubturbine 246  
Staudruckprinzip 53  
Steam Reforming 276  
Ster 143

Stickstoffverfügbarkeit 200  
 STIRLING-Motor 174, 250  
 Strahltheorie 51  
 Strahlungsspektrum 6  
 Strangreguliventil 33  
 Stripper 192  
 Stroh 171  
 Strohpyrolyseanlage 172  
 Strom-Boje 83  
 Stromdichte 263  
 Strom-Spannungskennlinie 13  
 Strömungsabriss 58  
 Strömungsgeschwindigkeit 75  
 Stundenwinkel 9 f.  
 Summenhäufigkeit 46  
 Sumpfphasenprozess 178  
 SWR 273

**T**

Teillastverhalten 166  
 Temperatur 153  
 Temperaturschichtung 35  
 TEWI 111  
 Thermalwasseranwendung 223  
 Thermikkraftwerk 241  
 thermochemische Umwandlung 144, 150  
 Thermolyse 178  
 Thermoöl 235  
 thermophil 194  
 Thyristor 17  
 Tidenhub 85  
 Tilgungsrechnung 293  
 Totaldruck 71  
 TPOX 277  
 Transistor 17  
 Transmissionsgrad 26  
 Traubenzucker 137  
 Treibhausgas 5  
 Treibhauspotential 110  
 Triglyceride 209  
 Triticale 208  
 Trockendestillation 154  
 trockene Destillation 154, 216  
 Trockensubstanz, organische 199  
 Trocknung 144  
 Trocknungsphase 144  
 TS = Trockensubstanz 324  
 Tunnelwasser 229

**U**

Überdüngung 198  
 Umfangsgeschwindigkeit 53, 55, 75  
 Umlaufvermögen 285  
 Unterkühlung 107

**V**

Verbrennung 144 f.  
 Verbrennungsluftverhältnis 148  
 Verbrennungsmotor 243  
 Verbrennungsprodukt 149  
 Verbrennungswärme 142  
 Verfahren, aerobes 185  
 Verfahren, anaerobes 185  
 Vergasungsmittel 157  
 Verkokung 165  
 Verlust 286  
 Verschattungsproblem 7  
 Verschwelung 154  
 Verweildauer, hydraulische 199  
 Volumenanteil 190

**W**

Wahre Ortzeit (WOZ) 10  
 Wandwärmeverluste 30  
 Wärmeanomalien 222  
 Wärmebedarfberechnung 166  
 Wärmeentzug 123  
 Wärmepumpe 102  
 Wärmesatz von HESS 146  
 Wärmespeicher 28  
 Wärmestromdichte 222  
 Wärmeträgermedium 31, 123  
 Wärmeträgeröl 178  
 Wärmeverlustkoeffizient 30  
 Wassergasreaktion 157  
 Wassergas-Shift-Reaktion 215, 217, 278  
 Wasserkraft 70  
 Wasserrad 72  
 Wasserstoff 276  
 Wasserstoffmolenstrom 262  
 Wave Dragon 90  
 Wave Star 92  
 WaveRoller 91  
 Wechselrichter 17  
 WEIBULL-Verteilung 46  
 Wellenkraftwerk 87  
 WELLS-Turbine 88



Wertberichtigung 286  
Widerstandsbeiwert 53, 55  
Widerstandskraft 55  
Widerstandsläufer 65  
Windenergie 44  
Windgeschwindigkeitsverteilung 46  
Windrad  
    langsamläufiges 64  
    schnellläufiges 64  
Winkelgeschwindigkeit 53  
Wirbelschicht, stationäre 162  
Wirbelschicht, zirkulierende 163  
Wirbelschichtfeuerung 162  
Wirbelschichtvergasung 162  
Wirkungsgrad 14, 30  
    optischer 30

**Z**

Zeitgleichung 10  
Zellspannung 262  
Zentralreceiverkraftwerk 237  
Zeolith 278  
Zündeigenschaft 244  
Zustandsänderung 106  
Zweistoffkreislauf 126  
Zwischenüberhitzung 172, 245  
Zyklonabscheider 163  
Zyklone 163, 173  
Zymase 207