

3 Energetische Grundlagen

3.1 Physikalische Grundzusammenhänge

Der Begriff Energie leitet sich vom griechischen *en-érgeia* („wirkende Kraft“) bzw. vom Wortstamm *érgon* („Werk“, „Wirken“) ab. Mit der Entwicklung der modernen Physik wurde der Begriff der Energie dann vom Begriff der Kraft unterschieden und wie folgt definiert:

Energie ist die Fähigkeit eines Systems, Arbeit zu verrichten.

Energie ist also eine Zustandsgröße eines Systems. Geht ein System von einem Zustand in einen anderen Zustand über, so heißt dies Prozess. Dabei tritt die Prozessgröße Arbeit auf. Wird Arbeit am System verrichtet, erhöht sich dessen Energie (Energie wird zugeführt). Verrichtet das System Arbeit, so verringert sich dessen Energie (Energie wird abgegeben).

Die Arbeit W ist die durch eine an einem Körper oder Massenpunkt angreifende Kraft F längs eines Weges s übertragene Energie.

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F(s) ds \quad (3.1)$$

Im einfachsten Fall, wenn Kraft und Weg in die gleiche Richtung weisen und die Kraft konstant wirkt, gilt:

$$W = F \cdot s \quad (3.2)$$

Es gibt verschiedene Arten von Arbeit, die nach der Art der Kraft, die Zustandsveränderungen hervorruft, benannt werden (z. B. mechanische, elektrische, magnetische Kräfte). Eine besondere Rolle spielt die Wärme Q . Sie ist keine Arbeit, aber der Arbeit äquivalent. Wärme ist die über die Systemgrenze hinweg zu- oder abgeführte thermische Energie. Diese Wärmezufuhr bzw. -abfuhr bewirkt Temperaturänderungen, Phasenübergänge (z. B. Schmelzen, Erstarren), Druck- und Volumenänderungen (in Gasen).

Oben stehende Definition der Energie als Arbeitsfähigkeit hilft in vielen Fällen, die Rolle der Energie in Technik und Alltag zu verstehen. Neue physikalische Erkenntnisse verlangten jedoch, den Begriff Energie in der Wissenschaft diffiziler zu bestimmen. Bevor eine solche Definition gegeben wird, sollen zunächst einige grundlegende Zusammenhänge erläutert werden. Eingangs stellt Tabelle 3.1 ausgewählte Energieformen vor.

Tabelle 3.1. Energieformen

Energieform	Erläuterung
mechanische Energie	
- kinetische Energie (Bewegungsenergie)	Energie, die in der bewegten Masse eines Körpers enthalten ist. Sie hängt von der Masse und Geschwindigkeit des bewegten Körpers ab.
- potenzielle Energie (Lageenergie)	Energie, die ein Körper durch seine Position oder Lage in einem Kraftfeld (z. B. Gravitationsfeld oder elektrisches Feld) enthält.
thermische Energie	Energie, die in der ungeordneten Bewegung der Atome oder Moleküle eines Stoffes gespeichert ist.
elektrische Energie	potenzielle Energie im elektrostatischen Feld von elektrischen Ladungen
magnetische Energie	potenzielle Energie im magnetischen Feld
chemische Energie	Energie, die in der chemischen Bindung von Atomen oder Molekülen enthalten ist.
Kernenergie	Energie der Bindung der Protonen und Neutronen im Atomkern
Strahlungsenergie	Energie im elektromagnetischen Feld (Licht, Radiowellen)

Das Kurzzeichen für Energie ist E. Auf Grund der Äquivalenz zur Arbeit wird jedoch oft auch das Symbol W verwendet. Die SI-Einheit für Energie, Arbeit und Wärme ist Joule [J]. Auch die Verwendung dieser einheitlichen Einheit ist Ausdruck der Äquivalenz von Energie, Arbeit und Wärme.

$$1\text{ J} = 1\text{ N} \cdot \text{m} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 1\text{ W} \cdot \text{s}$$

(3.3)

In Energiewirtschaft, Technik und im Alltag sind abweichend von der SI-Einheit vor allem kWh und MWh gebräuchlich. Auch veraltete Einheiten wie Kilopondmeter und Kalorie werden noch verwendet. Tabelle 3.2 zeigt die Umrechnungsfaktoren zwischen den Energieeinheiten Kilojoule, Kilowattstunde, Kilokalorie, Steinkohleeinheit und Rohöleinheit.

Tabelle 3.2. Gebräuchliche Umrechnungsfaktoren zwischen Energieeinheiten

		kJ	kWh	kcal	1 kg SKE	1 kg RÖE
1 kJ	=	1	0,000278	0,2388	-	-
1 kWh	=	3600	1	860	0,123	0,086
1 kcal	=	4,1868	0,001163	1	-	-
1 kg SKE	=	29308	8,141	7000	1	0,7
1 kg RÖE	=	41868	0,7	10000	1,43	1

Für die Nutzung der Energieformen – u. a. beim Betreiben von Fabriken – sind folgende physikalische Zusammenhänge grundlegend:

Energie kann zwischen Systemen ausgetauscht werden, sie kann jedoch weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden. In einem abgeschlossenen (energiesicheren) System ist die Gesamtheit der Energie daher immer gleich (Energieerhaltungssatz bzw. 1. Hauptsatz der Thermodynamik).

In der Praxis – und deshalb auch in diesem Buch – wird dennoch oft von Energieverlust, Energieverbrauch oder Energieverschwendung gesprochen. Dies hat mit dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu tun, der in der historischen Entwicklung der Physik in mehreren äquivalenten Versionen formuliert wurde:

- Wärme fließt nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur zu einem Körper höherer Temperatur.
- Wärme kann von keiner wie auch immer gearteten Maschine vollständig in mechanische oder elektrische Energie gewandelt werden.

Allgemein gilt also, dass Energieumwandlungen zwischen verschiedenen Energieformen und Energieniveaus spontan in eine Richtung verlaufen und nicht (vollständig) umkehrbar sind. Es existieren also einerseits „wertvolle“, weil frei verfügbare bzw. unbeschränkt wandelbare Energien (z. B. kinetische, potenzielle und elektrische Energie). Andererseits existieren „minderwertige“, nicht mehr umwandelbare Energien (z. B. niederkalorische Wärme).

Die Physik nutzt zur Beschreibung dieses Sachverhalts die Begriffe Exergie und Anergie.¹³

Exergie ist der Teil der Gesamtenergie eines Systems, der maximal – d. h. unter den günstigsten Bedingungen – als Arbeit entnommen werden kann. Wie groß der Anteil der Exergie an der gesamten Energie eines Systems ist, wird von den Umgebungsbedingungen bestimmt. So muss die Temperatur von Teilsystemen, die Wärmearbeit verrichten sollen, über der Umgebungstemperatur liegen, damit diese Wärme genutzt werden kann. Weitere Beispiele für Umgebungsbedingungen sind mechanische und chemische Gleichgewichtszustände.

Anergie ist der Anteil der Gesamtenergie eines Systems, der unter den Umgebungsbedingungen keine Arbeit verrichten kann. Obwohl mit der Anergie keine Arbeit verrichtet werden kann, hat sie doch ähnliche Merkmale wie die Arbeit. Der Zuwachs der Anergie in einem System kann gemessen und in der Einheit Joule angegeben werden. Es gilt:

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie} \quad (3.4)$$

Die oben angekündigte, aus wissenschaftlicher Sicht bessere Definition der Energie lautet daher:

¹³ Definition und Beschreibung in Anlehnung an (Fleischer 2008)

Energie beschreibt alle Eigenschaften von Zuständen und Prozessen, die einer Arbeit äquivalent (identisch, gleich, proportional) sind und die mit gleichem Maß messbar sind (Fleischer 2008).

Bei der Wandlung von Energie, d. h. beim Verrichten von Arbeit, geht Exergie in Anergie über (s. Abb. 3.1). Es kommt also zu einem Exergieverlust bzw. zu einer Energieentwertung. Dieser Exergieverlust bzw. diese Energieentwertung wird umgangssprachlich Energieverbrauch genannt. Wird in der Praxis von Energie gesprochen, so ist meist Exergie gemeint.

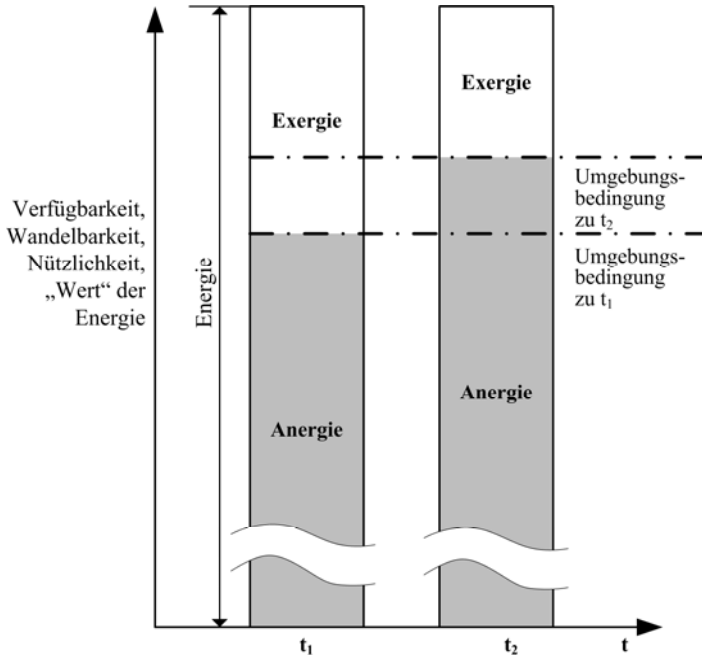


Abb. 3.1. Exergie und Anergie

Auf Grund der Irreversibilität der Umwandlung von Exergie in Anergie streben abgeschlossene, energiedichte Systeme einem Zustand entgegen, in dem alle Exergie aufgebraucht ist. In diesem Zustand würde ein völliges thermisches, mechanisches und chemisches Gleichgewicht herrschen und alles Geschehen zum Erliegen kommen (sogenannter Wärmetod).

Die Erde dagegen ist ein offenes System. Sie bezieht ständig Energie von der Sonne. Von diesem Energiegewinn kann u. a. auch die Menschheit leben (auch durch Nutzung fossiler Energiequellen, die nichts anderes als gespeicherte Sonnenenergie darstellen).

Ähnliches gilt für technische Systeme (z. B. Fabriken, Produktionsanlagen): Sie bedürfen der Zufuhr von wandelbarer, „hochwertiger“ Energie (Exergie, z. B. Elektroenergie), damit die zur Verrichtung der gewünschten Arbeit notwendigen

Energieumwandlungen stattfinden können. Diese Energien sind – auch physikalisch begründet – knappe Güter.

Für das Planen und Betreiben energieeffizienter Fabriken ergeben sich aus den geschilderten Grundlagen erste praktische Schlussfolgerungen:

Energie ist eine Bilanzgröße. Energiebilanzen können als wirkungsvolles Analyseinstrument beim Planen und Betreiben energieeffizienter Fabriken eingesetzt werden.

Die Bilanzierbarkeit der Energie lässt sich aus dem Energieerhaltungssatz ableiten: Die Summe aus der Energie W_{Anfang} , die zu einem beliebig gewählten Anfangszeitpunkt in einem System (z. B. der Fabrik, einem Betriebsmittel) gespeichert ist, und der zugeführten Energie/Arbeit W_{zu} ist gleich der Summe der in einem beliebig gewählten Endzustand gespeicherten Energie W_{End} und der abgegebenen Arbeit W_{ab} .

$$W_{\text{Anfang}} + W_{\text{zu}} = W_{\text{End}} + W_{\text{ab}} \quad (3.5)$$

In der betrieblichen Praxis können zum Beispiel Lagerbestände an Heizöl oder Treibstoff als gespeicherte Energie verstanden werden. Bei der Bilanzierung von betrieblichen Produktionsprozessen und einzelner Betriebsmittel spielt gespeicherte Energie oft keine Rolle, so dass gilt:

$$W_{\text{zu}} = W_{\text{ab}} \quad (3.6)$$

Die einer Fabrik oder einem Betriebsmittel zugeführte Energie – meist in Form von Elektroenergie, Erdgas, thermischer Energie oder Druckluft – lässt sich in der Regel auch in der Praxis durch Messung ermitteln (s. Kap. 6). Die abgeführte Energie besteht aus Nutzarbeit W_{Nutz} und sogenannter Verlustarbeit W_{Verlust} (= Anergie).

$$W_{\text{ab}} = W_{\text{Nutz}} + W_{\text{Verlust}} \quad (3.7)$$

Die Nutzenergie ist in der Praxis messtechnisch meist nur schwer zu ermitteln (z. B. Ermittlung der in einem umgeformten oder spannend bearbeiteten Werkstück gespeicherten Verformungsarbeit). Im besten Fall können Ergebnisse von Laboruntersuchungen übertragen werden, mit denen sich die Nutzenergie berechnen lässt. Dazu dient z. B. der aus technischen Dokumentationen bekannte Wirkungsgrad von Betriebsmitteln. Oft wird auf die zahlenmäßige Ermittlung der Nutzenergie verzichtet.

Zur Verlustenergie zählt vor allem Wärme, die durch Reibung entsteht oder unerwünscht aus thermischen Produktionsprozessen oder beheizten Räumen entweicht. Die Verlustenergie ist Ausdruck des Zweiten Hauptsatzes der Thermody-

namik. In einigen Fällen gelingt es, vermeintliche Verlustenergie wieder- oder weiter zu nutzen:

- Verlustenergie kann ggf. noch auf einem geringeren Energieniveau genutzt werden (sogenannte Nutzungskaskade, z. B. Prozessabwärme für die Warmwasserbereitung im Sanitärbereich).
- Verlustenergie kann durch Zufuhr von wenig zusätzlicher Energie auf ein höheres Energieniveau gehoben werden und zum Einsatz kommen (z. B. Wärmerückgewinnung mit integrierter Wärmepumpe).

Ansätze für Energieeinsparungen

Der Energiebedarf einer Fabrik – die zugeführte Energie – lässt sich nach (3.7) auf dreierlei Weise reduzieren:

1. durch die Verringerung der erforderlichen Nutzenergie,
2. durch die Minderung energetischer Verluste bei der Umwandlung der zugeführten Energie in Nutzenergie und
3. durch Wieder- und Winternutzung der Verlustenergie.

Diesen drei Möglichkeiten der Energiereduzierung widmet sich das vorliegende Buch an verschiedenen Stellen. Beispiele werden vor allem im Kap. 5 (Energierelevante Planungsobjekte) erläutert.

Weiterhin kann aus dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik geschlussfolgert werden, dass

4. mit hochwertiger, vollständig wandelbarer Energie (z. B. Elektroenergie) besonders sparsam umzugehen ist, bzw. dass Energie, deren Niveau gerade noch für die technische Anwendung ausreicht (z. B. niederkalorische Wärme für Niedertemperaturheizungen), bevorzugt eingesetzt werden sollte.

Dieser Sachverhalt wird besonders im folgenden Abschnitt erläutert.

3.2 Energieumwandlungskette

Produzierende Unternehmen beziehen Energie in unterschiedlicher Form: als Elektrizität, Erdgas, Diesel, Fernwärme u. a. m. Jede dieser Energieformen durchläuft eine Energieumwandlungskette: von der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung über verschiedene Stufen der Energiewandlung und des Transports bis hin zur Auslieferung an den Verbraucher.¹⁴ Abbildung 3.2 zeigt die in diesem Zusammenhang wichtigen Begriffe, die nachfolgend näher erläutert werden.

¹⁴ entspricht dem Produktlebensweg (vgl. Abschn. 2.4)

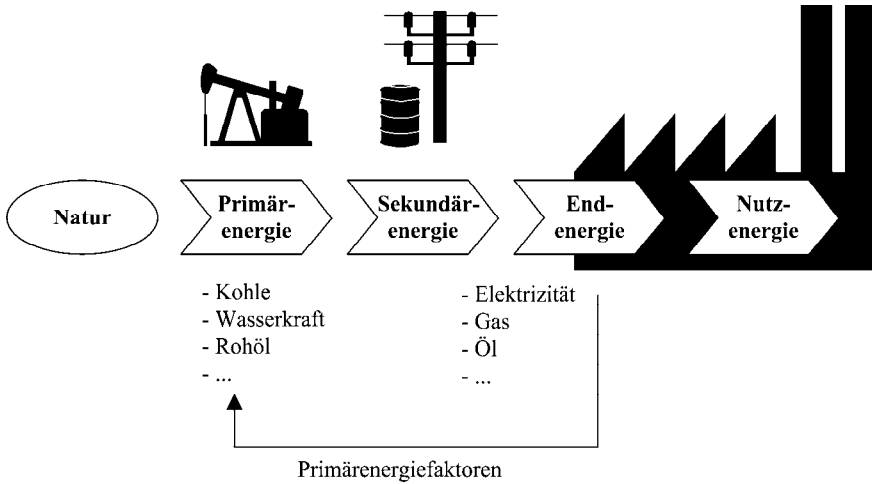


Abb. 3.2. Energieumwandlungskette

Energieträger sind alle Quellen oder Stoffe, in denen Energie mechanisch, thermisch, chemisch oder physikalisch gespeichert ist. Dabei werden primäre und sekundäre Energieträger unterschieden.

Primärenergie ist der Energieinhalt von natürlich vorkommenden Energieträgern, die noch keiner Umwandlung durch den Menschen unterworfen worden sind. Primäre Energieträger sind z. B. die solare Einstrahlung, Wasserkraft, Wind, fossile Energieträger (z. B. Kohle, Mineralöl, Erdgas), Biomasse, Kernkraft und Erdwärme. Abbildung 3.3 zeigt, welche der eben genannten Energieträger zu welchen Anteilen im ersten bis dritten Quartal 2008 in Deutschland zum Einsatz kamen.

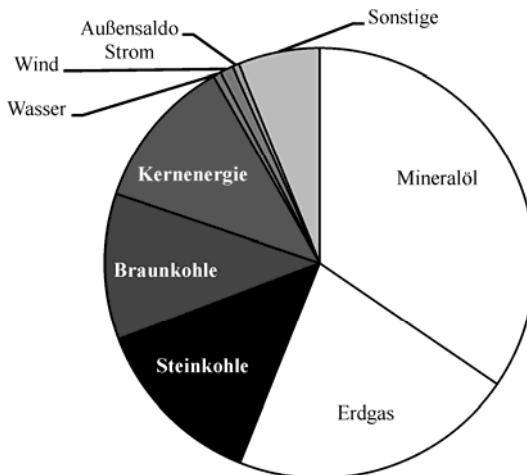


Abb. 3.3. Anteile verschiedener Energieträger am Primärenergieverbrauch Deutschlands, I. bis III. Quartal 2008, eigene Darstellung nach (AG Energiebilanzen 2008)

Sekundärenergie ist der Energieinhalt jener Energieträger, die vom Menschen durch Umwandlung natürlich vorkommender Energieträger gewonnen wurden. Sekundärenergieträger sind z. B. Elektroenergie, Benzin, Diesel, Heizöl. Bei der Umwandlung von Primär- in Sekundärenergie treten Verluste auf.

Endenergie ist der Energieinhalt jener Energieträger, die dem Nutzer letztendlich zur Verfügung gestellt werden. Endenergie gleicht in ihrer Form der Sekundärenergie (z. B. Elektroenergie). Der Energieinhalt der Endenergie wird an der Stelle und zu dem Zeitpunkt gemessen, an der/zu dem der Energieträger physisch in den Besitz des Nutzers übergeht (z. B. Einspeisestelle für elektrischen Strom an der Grundstücksgrenze, Betanken eines Kraftfahrzeugs an der Tankstelle). Üblicherweise werden die Energiekosten an Hand der Endenergie berechnet.

Nutzenergie ist die Energie, die unmittelbar für die vom Nutzer gewünschte Anwendung/Leistung eingesetzt wird (z. B. Licht, Kälte, mechanische Energie).

Primärenergiefaktoren sind Koeffizienten, mit denen – für eine gegebene Endenergiemenge – berechnet werden kann, wie viel Primärenergie für die Bereitstellung der Endenergie aufgewendet werden musste. Der Primärenergieaufwand wird dabei von der Gewinnung der Primärenergieträger über die Energieumwandlung bis hin zum Transport zum Endabnehmer kumuliert. Für einzelne Länder und die EU werden gemittelte Primärenergiefaktoren als Standardwerte veröffentlicht. So gilt für den deutschen Strommix ein Primärenergiefaktor von 3, d. h. für 1 kWh elektrischen Strom werden 3 kWh Primärenergie eingesetzt (s. Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3. Primärenergiefaktoren f_p für Standard-Wärmeversorgung gemäß DIN V 4701-10

Energieträger	f_p
Brennstoffe als Energieträger (Wandlung in Wärme innerhalb der Gebäude)	
Heizöl EL, Erdgas H, Flüssiggas und Steinkohle	1,1
Braunkohle	1,2
Holz	0,2
Fern-/Nahwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung (Wandlung in Wärme außerhalb der Gebäude)	
Erzeugung mit fossilen Brennstoffen	0,7
Erzeugung mit regenerativen Brennstoffen	0,0
Fern-/Nahwärme aus Heizwerken (Wandlung in Wärme außerhalb der Gebäude)	
Erzeugung mit fossilen Brennstoffen	1,3
Erzeugung mit regenerativen Brennstoffen	0,1
elektrische Energie (Wandlung in Wärme und als Hilfsenergie, z. B. für Pumpen)	
Strom-Mix	3,0

Im Unternehmen ist der Energieverbrauch zunächst als Endenergieverbrauch aus den Rechnungen der Energieversorger oder aus Messungen (z. B. Stromzähler) bekannt. Die Größe „Endenergieverbrauch“ ist somit für das Unternehmen gut nachvollziehbar und wirtschaftlich bewertbar.

Aus Sicht der Energieeffizienz ist es jedoch falsch, z. B. eine Kilowattstunde Elektroenergie mit einer Kilowattstunde Erdgas gleichzusetzen, da für die Kilo-

wattstunde Elektroenergie deutlich mehr Primärenergie aufgewendet werden muss. Dies widerspiegelt sich letztlich auch in der Differenz des spezifischen Preises für eine Kilowattstunde elektrischen Strom und eine Kilowattstunde Erdgas.

Zur adäquaten Beurteilung der Energieeffizienz ist daher der Endenergieverbrauch durch Multiplikation mit den oben genannten Primärenergiefaktoren auf den Primärenergieverbrauch zurückzuführen. Der Primärenergiegehalt verschiedener Energiearten und -träger lässt sich dann miteinander vergleichen und verrechnen. Der konkrete Primärenergiegehalt der eingesetzten Endenergie kann den Rechnungen des Energielieferanten entnommen werden oder ist dort nachzufragen. Alternativ sind die in Tabelle 3.3 genannten Standards nutzbar.

Die Abb. 3.4 und 3.5 illustrieren das Verhältnis von Endenergieverbrauch und Primärenergieverbrauch an Hand eines vereinfachten Beispiels: In einem Betrieb besteht der Bedarf nach 110 MWh Wärme (Nutzenergie). In Abb. 3.4 wird diese Wärme aus elektrischem Strom erzeugt. Elektroenergie kann nach dem Prinzip der Widerstandsheizung zu nahezu 100 Prozent in Wärme gewandelt werden.¹⁵ Nötig sind also rund 110 MWh Elektroenergie (Endenergie).

In Abb. 3.5 wird die Wärme aus Erdgas erzeugt. Der eingesetzte Brenner hat einen Wirkungsgrad von ca. 85 Prozent, was einen Bedarf von ca. 130 MWh Erdgas (Endenergie) ergibt. Beim Vergleich des Endenergiebedarfs von Abb. 3.4 (110 MWh) und Abb. 3.5 (130 MWh) schneidet also Abb. 3.4 besser ab.

Wie oben gezeigt, werden beim Endenergieverbrauch jedoch „Äpfel mit Birnen“ (hier: Elektroenergie mit Erdgas) verglichen. Wird die Endenergie durch Multiplikation mit den entsprechenden Primärenergiefaktoren ($f_{p_Elektroenergie} = 3$; $f_{p_Erdgas} = 1,1$) auf Primärenergie zurückgeführt, so zeigt sich, dass Abb. 3.5 mit 142 MWh gegenüber 330 MWh von Abb. 3.4 energetisch deutlich günstiger ist.

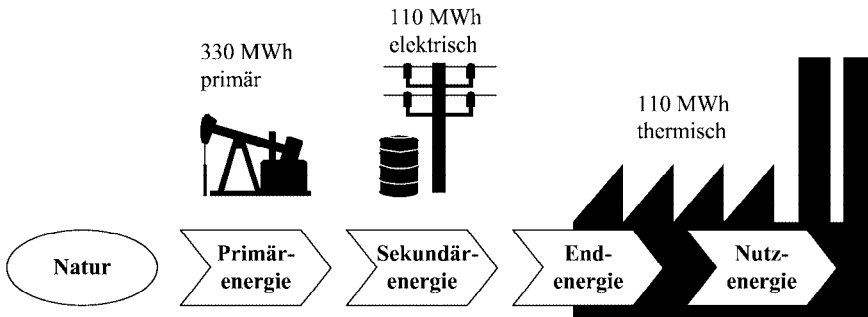


Abb. 3.4. Vergleich von Endenergie- und Primärenergieverbrauch bei der Wärmegewinnung aus Strom

¹⁵ Verluste für die Eigenerwärmung der Widerstandsheizung und bei der Übertragung der Wärme auf das zu erwärmende Medium werden vernachlässigt, da sie entweder nur im Anlauf oder auch in Variante B, also variantenneutral, auftreten.

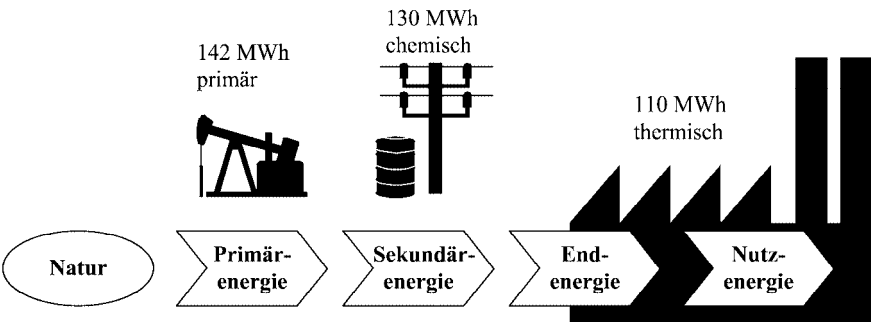


Abb. 3.5. Vergleich von Endenergie- und Primärenergieverbrauch bei der Wärme Gewinnung aus Erdgas

Eine typische Kennzahl, mit der Energieumwandlungen bzw. die zugehörigen Prozesse, Betriebsmittel oder deren Komponenten (z. B. Motoren) energetisch beurteilt werden, ist der Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad η beschreibt das Verhältnis der Nutzenergie zur zugeführten Energie. Beispiele zeigt Tabelle 3.4.

$$\eta = \frac{W_{Nutz}}{W_{zu}}; 0 < \eta < 1 \tag{3.8}$$

Tabelle 3.4. Beispiele für Energieumwandlungen, eigene Darstellung nach (Schufft 2003)

Energieumwandlung von	in	Betriebsmittel	Wirkungsgrad [%]
elektrisch	elektrisch	Transformator	95
	mechanisch	Motor	95
	thermisch	Elektroheizung	100
	chemisch	Akkumulator, Elektrolyse	70
		Glühlampe	5
	Strahlung	Leuchtstoffröhre	20
mechanisch		Laser	bis 35
	elektrisch	Generator	95
	mechanisch	Getriebe	99
	thermisch	mechanische Bremse	100
thermisch	elektrisch	Thermoelement	5
	mechanisch	Dieselmotor	35
		Ottomotor	25
chemisch	thermisch	Wärmetauscher	90
	elektrisch	Akkumulator	70
		Brennstoffzelle	45
	thermisch	Kohleheizung	70

Strahlung	elektrisch	Solarzelle	15
	thermisch	Solarthermie	50
	chemisch	Photosynthese	1
nuklear	thermisch	Atomreaktor	100

In Energieumwandlungsketten multiplizieren sich die Wirkungsgrade der einzelnen Energieumwandlungen zu einem Gesamtwirkungsgrad:

$$\eta_{\text{gesamt}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (3.9)$$

Treten viele Energieumwandlungsstufen auf, wird der Gesamtwirkungsgrad wegen der Multiplikation der Einzelwirkungsgrade oft sehr klein. Orientiert die Fabrikplanung auf möglichst kurze Energieumwandlungsketten, kann meist Energie gespart werden.

3.3 Grundlagen ausgewählter Formen der Energie und Arbeit

3.3.1 Mechanische Energie und mechanische Arbeit

Mechanische Energie bzw. Arbeit wird in der Fabrik für Transformations- und Transportprozesse benötigt. Für das Planen und Betreiben von Fabriken sind vordergründig folgende mechanische Energien von Interesse.

Die potenzielle Energie W_{pot} eines Körpers im erdnahen Gravitationsfeld – z. B. einer im Hochregallager eingelagerten Palette mit Material – berechnet sich aus der Höhe h , um die der Körper gegenüber einer Bezugshöhe angehoben wurde, der Masse m des Körpers und der Erdbeschleunigung g . Die potenzielle Energie entspricht der geleisteten Hubarbeit.

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad (3.10)$$

Die kinetische Energie der Translation W_{kin} – z. B. der Bewegung eines Werkstücks von Maschine zu Maschine oder der Vorschubeinheit einer Werkzeugmaschine – hängt von der Masse m des transportierten Körpers und der Geschwindigkeit v ab.

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (3.11)$$

Die kinetische Energie der Rotation – z. B. der Rotation von Werkzeugmaschinen-spindeln – ergibt sich aus dem Trägheitsmoment J und der Winkelgeschwindigkeit ω .

$$W_{kin} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \quad (3.12)$$

Das Trägheitsmoment J ist von der Masse m und vom Radius r abhängig.

$$J = \int r^2 \, dm \quad (3.13)$$

Auf die allgemeine Berechnungsformel der Arbeit ($W = F \cdot s$) wurde bereits im Abschn. 3.1 hingewiesen. Für die spezielle Form der Reibungsarbeit W_R ist die Reibungszahl μ zu berücksichtigen:

$$W_R = \mu \cdot F \cdot s \quad (3.14)$$

Für die Beschleunigungsarbeit W_B ist die Kraft als Masse m multipliziert mit der Beschleunigung a zu spezifizieren.

$$W_B = m \cdot a \cdot s \quad (3.15)$$

In der Zusammenschau der oben stehenden Gleichungen ergeben sich für das Planen und Betreiben von energieeffizienten Fabriken folgende Ansätze:

1. Die Masse von bewegten Körpern gering halten!
2. Die Radien bei der Rotation von Körpern gering halten. Der Radius geht im Quadrat in den Energiebedarf ein!
3. Die Geschwindigkeit, mit der Körper bewegt werden, gering halten. Die Geschwindigkeit geht im Quadrat in den Energiebedarf ein!
4. Die Wege, über die Körper bewegt werden müssen, gering halten!
5. Die Reibung durch geeignete Materialpaarungen (geringe Reibungszahl) gering halten!
6. Die Beschleunigung gering halten!

Die Umsetzung dieser Ansätze ist in der Praxis nicht trivial. Oft stehen die energetischen Verbesserungsansätze anderen Anforderungen an die Fabrik diametral gegenüber: So führen geringe Geschwindigkeiten bei der Bearbeitung von Werkstücken und beim Transport meist zu längeren Durchlaufzeiten, was in der Regel nicht hinnehmbar ist.

Andererseits existieren Situationen, in denen z. B. ein Regalbediengerät ein Lagergut mit hoher Geschwindigkeit und einem hohen Energieverbrauch zu einem Regalfach transportiert und anschließend längere Zeit auf einen neuen Auftrag

wartet. In einem solchen Fall kann der Energieverbrauch des Regalbediengeräts verringert werden, indem die Beschleunigung und die Geschwindigkeit gesenkt werden. Die Maßnahme hat keine Auswirkung auf die Ausbringungsmenge und die Durchlaufzeiten.

3.3.2 Thermische Energie und Wärme

Die Wärme Q ist die über die Systemgrenze hinweg zu- oder abgeführte thermische Energie. Wärmezufuhr bzw. -abfuhr bewirken Temperaturänderungen, Phasenübergänge (z. B. Schmelzen, Erstarren), Druck- und Volumenänderungen (in Gasen).

In der Produktionstechnik wird Wärme in allen Verfahrensgruppen benötigt: beim Urformen (z. B. Schmelzen des Werkstoffs vor dem Gießen, Spritzgießen), beim Umformen (z. B. Erwärmen zum Freiformschmieden, Warmstrangpressen), beim Trennen (z. B. Brennschneiden), beim Stoffeigenschaftsändern (z. B. Erwärmen zum Härten, Normalglühen), beim Fügen (z. B. Schweißen, Erwärmen vor dem Fügen von Presspassungen, Erwärmen von Klebern) und beim Beschichten (z. B. Lacktrocknen, Flammgespritzen). Hinzu kommen Hilfsprozesse wie die Teilereinigung (z. B. unterstützende Heizung der Reinigungsbäder) und die Raumheizung.

Typische Anwendungen für Wärme sind also das Erwärmen von Körpern, das Schmelzen und das Verdampfen. Für das Erwärmen eines Körpers berechnet sich die Wärmemenge aus der Masse m des Körpers, dessen spezifischer Wärmekapazität c und der Temperaturdifferenz ΔT (Grundgleichung der Wärmelehre):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.16)$$

Für das Schmelzen und Verdampfen sind die stoffspezifische Schmelz- bzw. Verdampfungswärme (c_s bzw. c_v) zu berücksichtigen:

$$Q = m \cdot c_s \quad (3.17)$$

$$Q = m \cdot c_v \quad (3.18)$$

Aus den Gleichungen lässt sich bereits die Forderung ableiten, dass die Masse von Körpern oder Flüssigkeiten, die erwärmt, geschmolzen oder verdampft werden sollen, gering zu halten ist. Beim Planen und Betreiben von Fabriken spielt diese Forderung z. B. bei der Dimensionierung von beheizten Behältern oder Tauchbädern eine Rolle.

Die Wärmemenge Q wird als Wärmestrom \dot{Q} über eine Zeit t zugeführt:

$$Q = \dot{Q} \cdot t \quad (3.19)$$

In Analogie zur Gleichung 3.7 gilt weiterhin, dass von einem zugeführten Wärmestrom nur ein Teil in Nutzwärme verwandelt werden kann und ein weiterer Teil unerwünscht verloren geht:

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{Nutz} + \dot{Q}_{Verlust} \quad (3.20)$$

Die Verluste treten an verschiedenen Stellen der Wärmeübertragung auf. Bei der Wärmeübertragung sind Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung zu unterscheiden. Diese Mechanismen der Wärmeübertragung werden nachfolgend in Anlehnung an (Schieferdecker 2006) erläutert.

Wärmeleitung

Wärmeleitung ist der Wärmefluss in einem festen Körper, einer (stehenden) Flüssigkeit oder einem Gas, der durch Schwingungen und andere Teilchenbewegungen zu Stande kommt. Wärmeleitung erfolgt ohne Stoffaustausch. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik fließt die Wärme stets von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedriger Temperatur.

Bei der Berechnung der Wärmeleitung wird modellhaft eine Wand, die aus einer oder mehreren Schichten besteht, zu Grunde gelegt. Der Wärmestrom ergibt sich aus der Zahl der wärmeleitenden Schichten i , der Wärmeleitzahl λ dieser Schichten, der Wandstärke s der Schichten, der Wärmeübergangsfläche A und der Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenfläche ($T_A - T_I$).

$$\dot{Q} = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{s_i} \cdot A \cdot (T_A - T_I) \quad (3.21)$$

In technischen Systemen – und dies betrifft auch das Planen und Betreiben von Fabriken – werden bezüglich der Wärmeleitung zwei Zielstellungen verfolgt:

1. Eine gute Wärmeleitung, bei der sich die Temperaturen auf der Außen- und Innenfläche möglichst angleichen ($T_A = T_I$). Diese Anforderung sollte z. B. in Wärmetauschern und Flächenheizkörpern umgesetzt werden. Dafür sind Materialien mit großer Wärmeleitzahl einzusetzen. Fläche und Schichtdicke ergeben sich meist aus mechanischen und prozesstechnischen Anforderungen.
2. Eine gute Isolation, bei der die Wärmeleitung möglichst unterbunden werden soll ($T_A \gg T_I$ oder $T_A \ll T_I$). Diese Anforderung sollte z. B. bei der Einhausung von Trocknern, Glühöfen, Kühllagern oder Leitungen, die kalte oder warme Medien führen, sowie bei der Hülle beheizter oder gekühlter Gebäude umge-

setzt werden. Um eine gute Isolation zu erreichen, sind Materialien mit kleiner Wärmeleitzahl und großen Schichtdicken zu verwenden.

Konvektion

Konvektion heißt die Wärmeübertragung zwischen einem strömenden Medium und einem festen Körper bzw. – mit geringerer Bedeutung für die Produktionstechnik und die Fabrik – die Wärmeübertragung zwischen einem strömenden Medium und einem anderen Fluid (z. B. in Wirbelschichten). Ursachen für die Strömung sind u. a. die Schwerkraft sowie Druck-, Dichte-, Temperatur- oder Konzentrationsunterschiede. Die Wärmeübertragung findet an der Grenzfläche zwischen den Medien statt. Deren Oberfläche (Gestalt, Rauheit), Stoffeigenschaften (Aggregatzustand) und Strömungseigenschaften (laminar, turbulent) beeinflussen die Konvektion entscheidend und werden mit der Wärmeübergangszahl α charakterisiert. Weiterhin spielen die Wärmeübergangsfläche A und die Temperaturdifferenz ($T_A - T_I$) eine Rolle.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_A - T_I) \quad (3.22)$$

Ein Beispiel für die Konvektion ist die freie Konvektion an Heizkörpern: Die Strömung entsteht hierbei durch den Effekt, dass sich die Luft bei Erwärmung ausdehnt und nach oben steigt, während kühlere Luft vom Boden aus nachströmt. Freie Konvektion wirkt auf Grund der Gravitation immer nur in vertikaler Richtung. Für horizontale Wärmetransporte mittels Konvektion muss die Strömung „erzwungen“ werden, was einen zusätzlichen Energieeinsatz erfordert. Ein Beispiel für erzwungene Konvektion ist der Wärmetransport im Heizkreislauf von Warmwasserheizungen durch Pumpen.

Fabrikplaner und Fabrikbetreiber können u. a. folgende Maßnahmen ergreifen, um Wärmeübertragungen durch Konvektion effizient zu gestalten:

1. Nutzung der freien Konvektion zur Abfuhr von Abwärme (und von Schadstoffen) aus dem Aufenthaltsraum von Mitarbeitern: Dazu dürfen die natürlichen vertikalen Luftströmungen in Produktionshallen nicht durch Einbauten oder Querströmungen gestört werden.
2. Begünstigung von laminaren Strömungen in wärme führenden Leitungen durch geradlinige Leitungsführung und großzügige Biegeradien.
3. Regelmäßige Reinigung von Wärmeübergangsflächen im Rahmen der Wartung.

Außerdem tritt in Fabriken unerwünschte Konvektion auf. Maßgeblich sind hierbei Effekte, die durch Zugluft – z. B. in Folge offener Hallentore (beim Be- und Entladen) oder offener Fenster – ausgelöst werden. Mitarbeiter, die von Zugluft betroffen sind, fühlen sich unbehaglich oder können im Extremfall erkranken. Materialien und Betriebsmittel kühlen unter Zuglufteinwirkung lokal aus, was zu unterschiedlichen Längenausdehnungen und Qualitätsproblemen führen kann.

Wärmestrahlung

Wärmestrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, die Körper in Abhängigkeit von ihrer Temperatur aussenden. Treffen diese elektromagnetischen Schwingungen auf einen Körper, so werden sie teils absorbiert, teils reflektiert und teils hindurchgelassen. Die Absorption führt zu einer Wärmezufuhr im absorbierenden Körper.

Zwischen zwei parallelen Flächen unterschiedlicher Temperatur berechnet sich der durch Strahlung erzeugte Wärmestrom aus dem resultierenden Emissionsgrad der Flächen ε_{res} , der Strahlungszahl des definierten schwarzen Körpers¹⁶ C_S , der bestrahlten Fläche A und der Temperaturen der strahlenden und bestrahlten Flächen T_1 und T_2 . Der Energiebedarf ermittelt sich also aus dem Absorptionsvermögen der bestrahlten Fläche und dem Strahlungsvermögen der strahlenden Fläche.

$$\dot{Q} = \varepsilon_{\text{res}} \cdot C_S \cdot A \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (3.23)$$

$$\varepsilon_{\text{res}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (3.24)$$

Anwendungen in der Fabrik sind z. B. Heizstrahler in der technischen Trocknung, Deckenheizstrahler und Niedertemperaturflächenheizsysteme, wie die Fußboden-, Wand- und Deckenheizung. Die Auslegung solcher Systeme bleibt dem Fachplaner vorbehalten. Die Fabrikplanung muss sicherstellen, dass Wärmestrahlungssysteme nur dort eingesetzt werden, wo die emittierenden und absorbierenden Flächen über den Fabriklebenszyklus frei zugänglich bleiben.

Außerdem kann die Wärmestrahlung durch eine entsprechende Farbgebung (dunkel: absorbierend, hell: reflektierend) unterstützt oder unterdrückt werden. Im Fabrikbetrieb ist darauf zu achten, dass bestrahlte und strahlende Flächen sauber gehalten und nicht verstellt oder verbaut werden.

Zusammenfassend lassen sich aus den thermodynamischen Zusammenhängen folgende Konsequenzen für das Planen und Betreiben energieeffizienter Fabriken ableiten:

1. Die Masse von Körpern oder Flüssigkeiten, die zu erwärmen, zu schmelzen oder zu verdampfen sind, gering halten (geringer Wärmebedarf)!
2. Verluste an wärmeübertragenden Bauteilen (Wärmeleiter) durch Einsatz von Materialien mit großer Wärmeleitzahl mindern!

¹⁶ idealisierter Körper, der elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert; Strahlungszahl $C_S = 5 \text{ W/m}^2\text{hK}^4$

3. Verluste an wärmeisolierten Anlagen- und Gebäudeteilen durch Einsatz von Materialien mit kleiner Wärmeleitzahl und großer Schichtdicke mindern!
4. Freie Konvektion zur Abfuhr von Abwärme und Schadstoffen aus dem Aufenthaltsraum von Mitarbeitern nutzen!
5. Unerwünschte Konvektion durch offene Tore und Fenster sowie undichte Bauteile (Zugluft) vermeiden!
6. Verluste in wärmeleitenden Leitungen durch geradlinige Leitungsführung und großzügige Biegeradien verhindern!
7. Verluste an Wärmeübergangsflächen (z. B. Radiatorheizung) durch regelmäßige Reinigung mindern!
8. Verluste in Wärmestrahlungssystemen mindern durch die Sicherung einer ungehinderten Abstrahlung von emittierenden Flächen und einer ungehinderten Einstrahlung auf absorbierende Flächen! (Nicht verbauen oder verstellen und sauber halten!)

3.3.3 Elektrische Energie und elektrische Arbeit

Die elektrische Energie – kurz: Elektroenergie, umgangssprachlich auch Strom – ist eine der wichtigsten Energieformen, die in der Fabrik eingesetzt werden. Sie ist eine „hochwerte“ Energie (Exergie), die sich in nahezu alle anderen Energieformen wandeln lässt.

Bei der elektrischen Energie beruht das Arbeitsvermögen auf Phänomenen, die von ruhenden oder bewegten elektrischen Ladungen sowie von deren elektrischen und magnetischen Feldern ausgehen. Die Träger der elektrischen Ladung sind negativ geladene Elektronen und Anionen sowie positiv geladene Protonen und Kationen. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen ziehen sich an. Elektrische Ladungen erzeugen elektrische Felder, bewegte elektrische Ladungen erzeugen zusätzlich magnetische Felder. Die Phänomene werden insgesamt durch den Überbegriff Elektrizität bezeichnet.

Gleichspannung

Die energetischen Zusammenhänge lassen sich zunächst gut für Stromkreise mit Gleichspannung beschreiben. Bei Gleichstrom (DC, direct current) bleiben der Betrag der Spannung und die Polarität an der Spannungsquelle über die Zeit konstant. Spannungsquellen für Gleichspannung sind Batterien, Akkumulatoren und Fotovoltaikzellen.

Die elektrische Energie E oder die Arbeit A , beide meist als W_{el} geschrieben, berechnet sich aus der elektrischen Leistung P_{el} und der Zeit t :

$$W_{el} = P_{el} \cdot t \quad (3.25)$$

Die elektrische Leistung ergibt sich aus der Spannung U und dem Strom I . Die Einheit der Leistung ist Watt [W].

$$P_{el} = U \cdot I \quad (3.26)$$

Die elektrische Spannung U gibt an, wie viel Arbeit W verrichtet wird, um elektrische Ladungen bzw. ihre Träger – im üblichen metallischen Leiter Elektronen – entlang eines elektrischen Felds zu bewegen.

$$U = \frac{W}{Q} \quad (3.27)$$

Die elektrische Spannung wird durch Ladungstrennung in einer Spannungsquelle aufgebaut. Dabei werden die positiven und negativen Ladungen jeweils an einem Pol der Spannungsquelle konzentriert. Bei der Batterie erfolgt diese Trennung z. B. durch eine chemische Reaktion. Wird zwischen den beiden Polen eine leitfähige Verbindung hergestellt, fließt ein elektrischer Strom. Die Einheit der Spannung ist Volt [V].

Die physikalische Größe elektrischer Strom I gibt an, wie viel Ladung Q pro Zeit t fließt. Die Einheit des elektrischen Stroms ist Ampere [A].

$$I = \frac{Q}{t} \quad (3.28)$$

Dem Stromfluss stellt sich im elektrischen Leiter ein Widerstand R entgegen, der vom Leiterquerschnitt A , vom spezifischen Widerstand ρ des Leitermaterials und der Länge des Leiters l abhängig ist. Zugleich ist der Widerstand der Quotient aus Spannung und Strom.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{U}{I} \quad (3.29)$$

Wechselspannung

Bei Wechselstrom (AC, alternating current) ändern sich der Betrag und die Polarität der Spannung und des Stroms zyklisch. Die Zyklen folgen in der Regel der Sinusfunktion. Die Anzahl der Sinusschwingungen pro Sekunde heißt Frequenz F und wird in Herz [Hz] angegeben.

$$1 \text{ Hz} = 1 \frac{1}{s} \quad (3.30)$$

Auf Grund der zeitlichen Veränderlichkeit von Wechselstrom bzw. -spannung muss zwischen Effektivwert, Scheitelwert und Spitze-Spitze-Wert der Spannung und der Stromstärke unterschieden werden (s. Abb. 3.6).

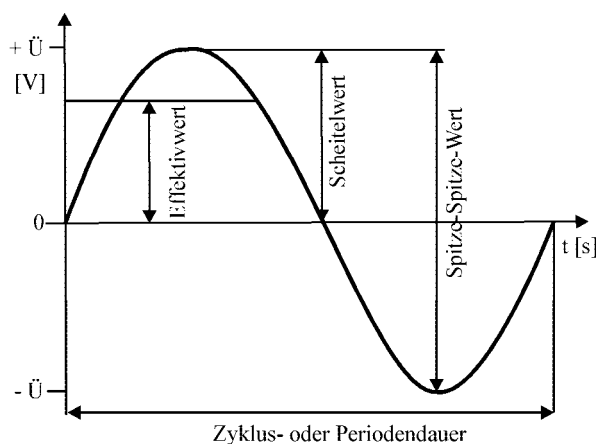


Abb. 3.6. Sinusförmige Wechselspannung

Der Effektivwert der Spannung U_{eff} berechnet sich aus der Periode T der Schwingung und dem Flächenintegral über der Momentanspannung u . Eine andere Berechnung nutzt nur den Scheitelwert \hat{u} .

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \quad (3.31)$$

Die Effektivspannung entspricht der in der Technik und im Alltag verwendeten Größe für die Netzspannung. Für Einphasen-Wechselspannung beträgt die Netzspannung in Europa 230 Volt, bei dreiphasiger Wechselspannung (Drehstrom) 400 Volt. Die Netzfrequenz beträgt in beiden Fällen 50 Hz.

Dreiphasiger Wechselstrom (Drehstrom) kommt zu Stande, weil die Generatoren in den Kraftwerken mit drei um 120 Grad versetzt angeordneten Magnetspulen arbeiten. Bei jeder Umdrehung des Generators werden in den Spulen drei Spannungen induziert, deren Sinusschwingungen zeitlich versetzt den Scheitelpunkt bzw. Nulldurchgang erreichen. Die drei Phasen werden mit L1, L2 und L3 bezeichnet und belegen im Energieversorgungsnetz getrennte Leiter. Über einen vierten Leiter, dem Neutralleiter N, erfolgt der Rückfluss des Stroms zum Erzeuger. An dieses Vierleitersystem bestehen verschiedene Anschlussmöglichkeiten (s. Abb. 3.7). Verbraucher ab ca. 2,2 kW werden mit 400 Volt an allen drei Phasen betrieben. Kleinere Verbraucher arbeiten mit 230 Volt aus einer Phase.

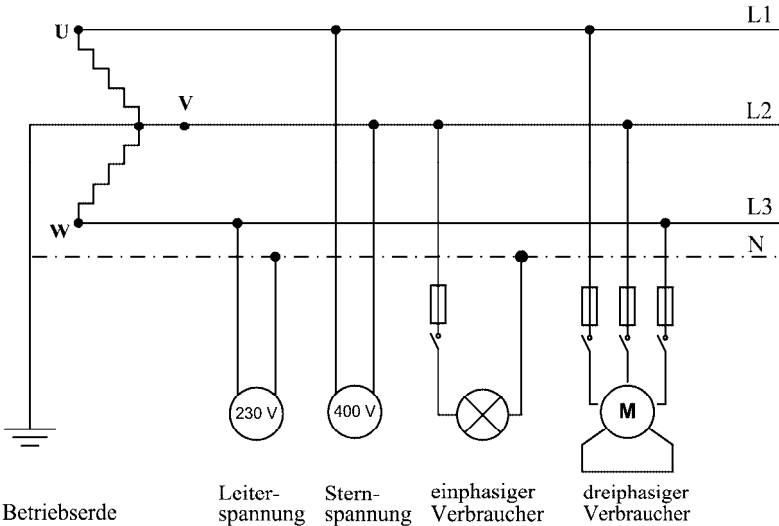


Abb. 3.7. Anschlussmöglichkeiten an das Vierleiter-Dreiphasennetz, eigene Darstellung in Anlehnung an (Schütz 2003)

Der Anschluss dreiphasiger Verbraucher kann dabei in Stern- oder Dreieckschaltung erfolgen (s. Abb. 3.8). Tabelle 3.5 zeigt die Berechnung von Strangspannung, Strangstrom und Wirkleistung. Die Größen unterscheiden sich zwischen Dreieck- und Sternschaltung im Verhältnis 1:3.

Dieser Unterschied wird z. B. bei der Stern-Dreieck-Schaltung genutzt: Große, leistungsstarke Kurzschlussläufermotoren (ab ca. 5,5 kW), die normal in Dreieckschaltung betrieben werden, werden beim Anlauf auf Stern geschaltet, um beim Einschalten große Stromspitzen (und das Auslösen von Sicherungen) zu vermeiden.

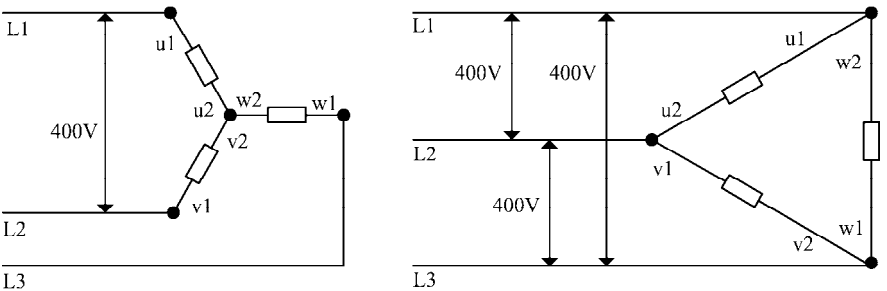
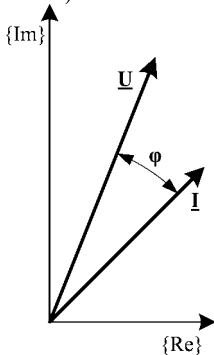


Abb. 3.8. Stern- und Dreieckschaltung

Tabelle 3.5. Strangspannung, -strom und Wirkleistung bei Stern- und Dreieckschaltung

	Sternschaltung Y	Dreieckschaltung Δ	Verhältnis Y: Δ
Strangspannung	$U_Y = \frac{U}{\sqrt{3}}$	$U_\Delta = U$	1:3
Strangstrom	$I_Y = I = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot R}$	$I_\Delta = \frac{I}{\sqrt{3}} = \frac{U}{R}$	1:3
Wirkleistung	$P = P_1 + P_2 + P_3$	$P = P_1 + P_2 + P_3$	1:3

Befinden sich induktive und kapazitive Verbraucher im Stromkreis, so können diese eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom bewirken. Die Effektivwerte für Spannung und Strom werden dann in komplexer Schreibweise in einem Zeigerdiagramm mit reeller und imaginärer Achse angeben, um neben dem Betrag auch die Lage zur Phase zu berücksichtigen. Die Phasenverschiebung zwischen dem Spannungs- und Stromzeiger wird mit dem Winkel φ ausgedrückt (s. Abb. 3.9).


Abb. 3.9. Komplexe Effektivwerte für Spannung \underline{U} und \underline{I} sowie Phasenverschiebungswinkel φ im Zeigerdiagramm

Die Phasenverschiebung hat folgenden Hintergrund und folgende Auswirkung auf die elektrische Arbeit: Induktive Verbraucher, wie Asynchronmotoren, Drosselspulen, Transformatoren, Induktionserwärmungsanlagen und Leuchtstofflampen, bauen während ihres Betriebs funktionsbedingt magnetische Felder auf; kapazitive Verbraucher, wie Kondensator-Motoren, erzeugen elektrische Felder.¹⁷ Zum Aufbau der magnetischen bzw. elektrischen Felder wird eine Leistung – die sogenannte Blindleistung – benötigt. Die Blindleistung bildet mit der Scheinleistung und der Wirkleistung im Zeigerdiagramm ein Leistungsdreieck (s. Abb. 3.10).

¹⁷ Kapazitive Verbraucher haben jedoch für produzierende Unternehmen – bis auf Ausnahmen wie 230-Volt-Handwerkzeuge – wenig Bedeutung.

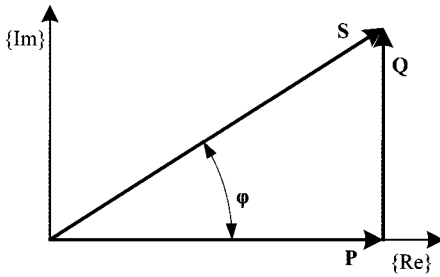


Abb. 3.10. Leistungszeigerdiagramm

Die Blindleistung ergibt sich aus Scheinleistung und Wirkleistung. Die Blindleistung wird – zur Unterscheidung von der Wirkleistung – in Var [var] oder Volt-ampere [VA] angegeben ($1 \text{ var} = 1 \text{ VA} = 1 \text{ W}$).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.32)$$

Je nach Betriebszustand (Auf- oder Abbau der Felder) pendelt ein mehr oder minder großer Strom zwischen Verbraucher und Versorger hin und her. Dieser Strom lässt sich zwar nicht für eine Wirkarbeit nutzen, er erfordert aber größere Leistungsquerschnitte, Generatoren und Transformatoren. Daher ist die Blindarbeit, wenn sie eine gewisse Größe übersteigt, dem Versorger bzw. Netzbetreiber zu vergüten (derzeit ca. ein Cent/kVAh). Ein üblicher Maßstab für die Blindleistung Q ist der Leistungsfaktor $\cos \varphi$, d. h. das Verhältnis von Wirkleistung P zur Scheinleistung S . Ein $\cos \varphi$ größer 0,97 gilt als guter Wert, bei dem meist keine zusätzlichen Kosten für Blindarbeit anfallen.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3.33)$$

Die Scheinleistung ist das Produkt aus den Effektivwerten von Strom I und Spannung U und gleichzeitig die geometrische Summe aus Wirkleistung und Blindleistung. Elektrische Betriebsmittel, die Leistung übertragen (z. B. Transformatoren, elektrische Leitungen), müssen auf die Scheinleistung ausgelegt werden. Die Scheinleistung wird – zur Unterscheidung von der Wirkleistung – in Voltampere [VA] angegeben.

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.34)$$

Die Wirkleistung – die tatsächlich am Verbraucher umgesetzte Leistung – berechnet sich im Wechselstromkreis wie folgt:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.35)$$

Die Gleichung der Wirkarbeit im Wechselstromkreis gleicht der Gleichung für Gleichspannung. P verkörpert hier jedoch die Wirkleistung:

$$W = P \cdot t \quad (3.36)$$

Dass der Faktor Zeit in diese Gleichung der elektrischen Arbeit eingeht, ist für das Planen und Betreiben energieeffizienter Fabriken von großer Bedeutung. Auch ohne sich eingehender mit der elektrischen Leistung von Energieverbrauchern zu beschäftigen, haben Produktionsingenieure die Möglichkeit, allein durch Verringerung der Zeit, in der elektrische Verbraucher betrieben werden, den Energiebedarf der Fabrik zu senken.

Weitere Schlussfolgerungen werden in Zusammenschau mit den energiewirtschaftlichen Aspekten am Ende des Abschn. 3.4.1 gezogen.

3.4 Energiewirtschaftliche Grundlagen

3.4.1 Elektrizitätswirtschaft

3.4.1.1 Struktur der Elektrizitätswirtschaft

Die Elektrizitätswirtschaft produziert, handelt und verteilt Elektroenergie an die Endkunden. Seit der Einführung des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) im Jahre 1998 wird unterschieden zwischen:

- Netzbetreibern (Übertragungsnetzbetreiber, Versorgungsnetzbetreiber),
- Energieerzeugern und
- Energielieferanten.

Energielieferanten sind im Wesentlichen als Händler zu verstehen, die jedoch auch eigene Kraftwerke besitzen können. Insbesondere zwischen Netzbetreibern und Energielieferanten (Energieversorger) erfolgt jedoch eine klare organisationale und gesellschaftsrechtliche Trennung (sogenanntes Unbundling). Daraus ergeben sich unterschiedliche Beziehungen zwischen den Akteuren der Elektrizitätswirtschaft, die in Abb. 3.11 vereinfacht dargestellt sind.

Die Notwendigkeit, komplexe Stromversorgungsnetze aufzubauen und zu unterhalten, resultiert aus den physikalischen Eigenschaften des elektrischen Stroms und den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Stromerzeugung:

- Elektroenergie kann nur schlecht gespeichert werden. Im Wesentlichen muss die Energie zu dem Zeitpunkt erzeugt werden, an dem sie verbraucht wird. In den Stromnetzen muss also zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen eingespeister und abgegebener Energie herrschen.
- Die Erzeugung von Elektroenergie ist derzeit vor allem in großen Kraftwerken wirtschaftlich. Die Kraftwerkstandorte liegen oft weit entfernt von den Verbrauchern; sie richten sich nach der örtlichen Verfügbarkeit von Primärenergieträgern (z. B. Braunkohle), nach Sicherheitsaspekten (z. B. Erdbebensicherheit für Atomkraftwerke), nach der Genehmigungsfähigkeit u. a. m.
- Einige Kraftwerkstypen wie Kohlekraftwerke sind in ihrem Betriebsverhalten relativ träge. Sie können ihre Leistung kaum und schon gar nicht in kurzer Zeit an die Nachfrage anpassen.
- Die Übertragung von Energie über weite Strecken ist nur bei hoher Spannung wirtschaftlich (bis zu 110 kV). Auf der Ebene der Verbraucher soll dagegen aus Sicherheitsgründen nur eine niedrige Spannung anliegen.

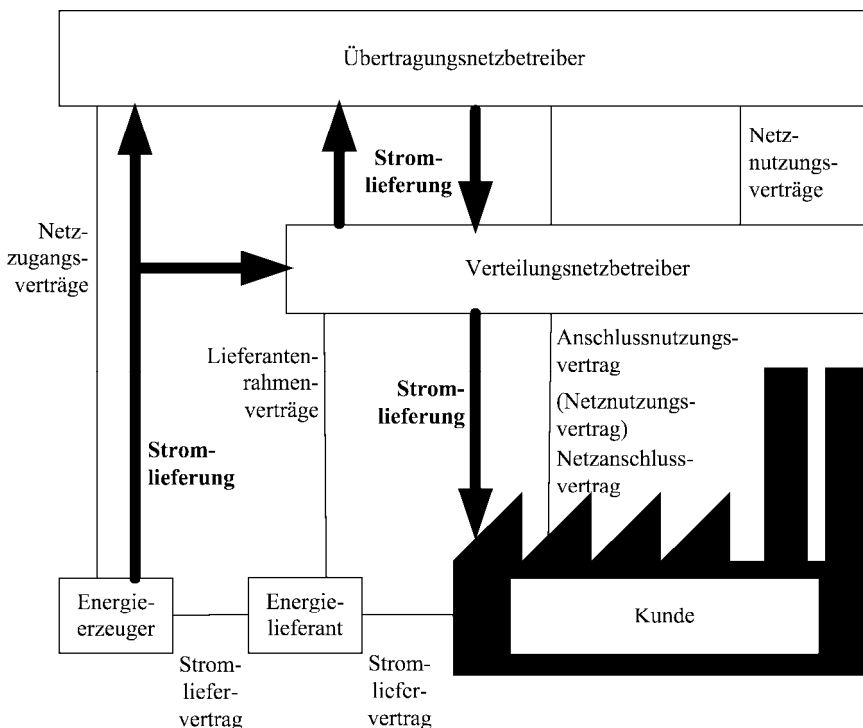


Abb. 3.11. Akteursbeziehungen in der Elektrizitätswirtschaft, eigene Darstellung in Anlehnung an (Heuck et al. 2007)

Die in Abb. 3.11 dargestellte Netzstruktur umfasst neben internationalen Verbundnetzen die überregionalen Übertragungsnetze und die regionalen bzw. lokalen Verteilungsnetze. Die Netze sind in Regelzonen und weiter in Bilanzkreise aufgeteilt, in denen die Einspeisung in die Netze, die Abnahme aus den Netzen sowie Stromlieferungen über die Regelzonen- bzw. Bilanzkreisgrenzen hinweg in Einklang gebracht werden müssen.

Dazu werden aus den Fahrplänen der Verbraucher – den geplanten bzw. prognostizierten Lastgängen – die Einsatzpläne der Kraftwerke für den Folgetag erstellt.¹⁸ Dabei wird versucht, die jeweils zu einer bestimmten Tageszeit geforderte Leistung durch eine technisch und wirtschaftlich optimierte Kombination von Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastkraftwerken abzudecken. Abbildung 3.12 erläutert die Begriffe Grund-, Mittel- und Spitzenlast.

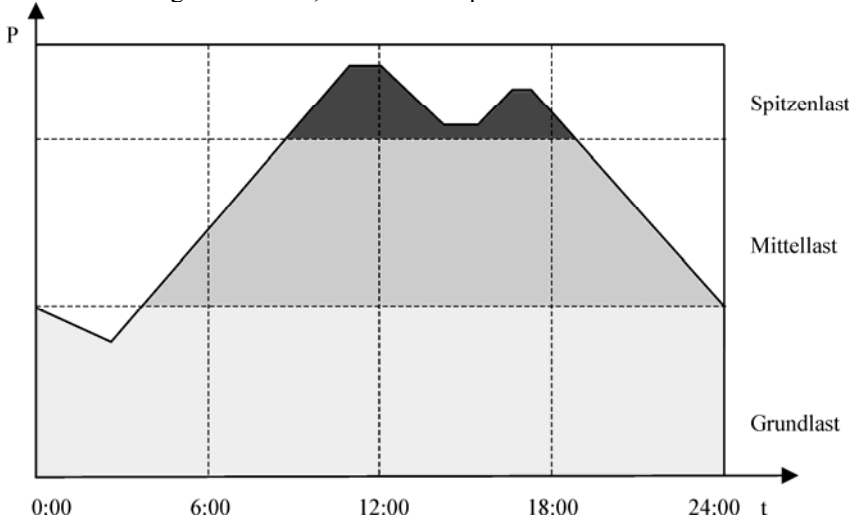


Abb. 3.12. Grund-, Mittel- und Spitzenlast, eigene Darstellung in Anlehnung an (Schufft 2007)

Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastkraftwerke unterscheiden sich in der Zeit, die benötigt wird, um die Kraftwerke hoch- bzw. herunterzufahren. Dabei sind Spitzenlastkraftwerke zeitlich am flexibelsten, d. h., die dort eingesetzten Anlagen – meist Gasturbinen – können extrem schnell hoch- bzw. heruntergefahren werden. Grundlastkraftwerke, z. B. Kohlekraftwerke, sind dagegen relativ träge, gegenüber Spitzenlastkraftwerken sind die Herstellkosten für die kWh Elektroenergie jedoch deutlich günstiger.

Nicht prognostizierbare, kurzfristig auftretende Lastspitzen werden durch automatisch (über die Netzfrequenz) gesteuerte Regelkraftwerke abgefangen (Regelenergie). Außerdem sind mit einigen Kunden sogenannte abschaltbare Leistungen

¹⁸ Die Erstellung der Einsatzpläne ist tatsächlich wesentlich komplexer: So müssen nicht oder schlecht prognostizierbare Energieeinspeiser wie Wind- oder Fotovoltaik-Kraftwerke ebenso berücksichtigt werden wie geplante Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten an konventionellen und Atomkraftwerken.

vereinbart, d. h. der Kunde fährt nach Aufforderung des Energieversorgers oder durch automatische Steuerung seine Verbraucher herunter und trägt so kurzfristig dazu bei, Lastspitzen im Netz abzubauen.

Neben der Deckung der Last müssen beim Betrieb der Netze weitere Parameter eingehalten werden, um die Ausfallsicherheit (thermische Belastung, Kurzschlussfestigkeit u. a.) und die Qualität der Stromversorgung (Frequenz-, Spannungsschwankungen u. a.; vgl. DIN EN 50160) zu garantieren (s. Abschn. 3.4.1.3)

3.4.1.2 Energiewirtschaftliche Verträge und Tarife

Für den strombeziehenden Produktionsbetrieb sind besonders die aus dem in Abb. 3.11 gezeigten Beziehungsgeflecht resultierenden Kundenverträge von Interesse.

Der wichtigste Vertrag ist der zwischen dem Kunden und dem Energielieferanten. Die zwischen produzierendem Unternehmen und Stromversorger geschlossenen *Stromlieferverträge* laufen meist über einen Zeitraum von ein bis zwei Jahren. Die Lieferung kann an einen oder mehrere Zähler oder einen Bilanzkreis erfolgen.

Nachfolgend werden wichtige Merkmale von Stromlieferverträgen für Lieferungen an Zähler behandelt:

- Jahresverbrauch [MWh/a], ggf. aufgliedert nach Monaten und nach dem Verhältnis von Hochtarif- und Niedertarifmengen (s. u.),
- Jahreshöchstleistung [kW],
- Lieferstelle(n), Zählernummer(n),
- Spannung (Mittel- oder Niederspannung),
- Grundgebühr,
- Arbeitspreis,
- Jahres- oder Monatsleistungspreis,
- Vertragsdauer,
- Modalitäten zur Zählerablesung bzw. zur Übermittlung von Messdaten,
- Zahlungsmodalitäten.

Bei großen Liefermengen unterscheidet sich der Arbeitspreis nach Tarifzeiten, die zwischen Sommer und Winter variieren können:

- Hochtarif (HT), z. B. 8.00 bis 20.00 Uhr,
- Niedertarif (NT), z. B. 20.00 bis 8.00 Uhr.

Weiterhin kann der Arbeitspreis über die Laufzeit des Vertrags variabel gestaltet werden. Dazu erfolgt eine Bindung an Preisindizes. Üblich ist eine Bindung an Strommarktpreise der europäischen Strombörse EEX (European Energy Exchange). Der Arbeitspreis AP ergibt sich dann aus einem bei Vertragsabschluss verhandelten Basisarbeitspreis und strommarktpreisabhängigen Zuschlägen. Die Zuschläge werden aus einem Bindungsfaktor (α bzw. β) und der Differenz des aktuellen Base- oder Peakpreises und einem zugehörigen Basisbase- oder Basispeakpreis kalkuliert.

$$AP = AP_0 + \alpha \cdot (Base_t - Base_0) + \beta \cdot (Peak_t - Peak_0) \quad (3.37)$$

Zusätzlich ist bei großen Liefermengen bzw. hohen Leistungen auch der zeitliche Verlauf des Strombezugs zu berücksichtigen. Hierzu werden folgende Parameter vereinbart:

- Jahres-, Monats-, Wochen-, Tageslastgang [kW] und dazugehörige
- Toleranzen (z. B. Leistungstoleranzband, zulässige monatliche Abweichungen vom Verhältnis der Hochtarif- zu den Niedertarifmengen) und ggf. Pönalen für Abweichungen sowie
- der Leistungspreis, optional:
 - Monatsleistungspreis (höchster Viertelstundenmittelwert eines Monats, s. Abb. 3.13),
 - Jahresleistungspreis (arithmetisches Mittel aus den zwei oder drei höchsten Monatshöchstleistungen),
 - Jahreshöchstleistungspreis (höchste Leistung innerhalb eines Jahres).

Für Verbraucher mit einem Jahresverbrauch von mehr als 100 MWh/a werden die tatsächlichen Lastgänge gemessen (sogenannte gemessene Lastprofile). Dazu werden Viertelstundenlastgangzähler verwendet, die per Telekommunikation auslesbar sind (s. Abschn. 6.5.1.3). Die Viertelstundenmittelwerte sind auch als Informationsquelle für das betriebliche Energiemanagement nutzbar. Produzierende Unternehmen sollten daher bei Vertragsabschluss darauf drängen, dass ihnen der Energieversorger die Viertelstundenwerte in geeigneter Form überlässt.

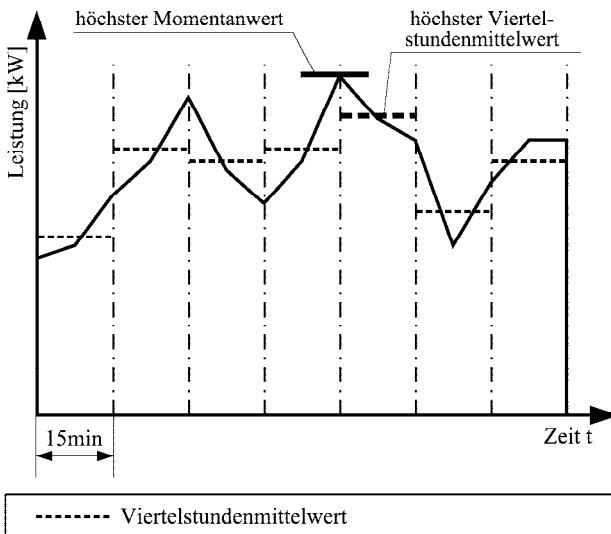


Abb. 3.13 Viertelstundenmittelwerte der elektrischen Leistung

Für Verbraucher mit geringerem Jahresverbrauch ist die Lastgangmessung zu aufwändig. Für diese Verbraucher kommen sogenannte Standardlastprofile zum Einsatz, die das typische zeitliche Verbrauchsverhalten einer charakteristischen Kundengruppe oder Branche aufzeigen. Dabei werden neun Standard-Tageszeitprofile unterschieden (drei Typtage: Wochentag, Samstag, Sonntag; drei jahreszeitliche Abschnitte: Übergangsjahreszeit, Sommer, Winter). Durch Gewichtung der Standardlastprofile an Hand der geschätzten bzw. in der letzten Abrechnungsperiode gemessenen Jahresarbeitsmenge und ggf. unter Berücksichtigung von Außentemperaturprognosen werden die Lastprofile für (Klein-)Verbraucher erstellt. Aus der Kombination der verschiedenen Parameter der Stromlieferverträge ergeben sich die in Tabelle 3.6 genannten Tariftypen.

Tabelle 3.6. Tariftypen (Menke 2007)

Tariftyp	Beschreibung	Beispiel
Pauschaltarif	fixer Grundpreis, kein Arbeitspreis, unabhängiger Verbrauch, Kostenstruktur wird relativ gut abgebildet, keine Messtechnik erforderlich	Telefonzellen, Mobilfunkanlagen
Zählertarif	fixer Arbeitspreis, ein Grundpreis, abhängig vom Verbrauch, Kostenstruktur wird relativ schlecht abgebildet, Messtechnik erforderlich	Preisbegrenzung
Grundpreistarif	fixer Grundpreis, fixer Arbeitspreis, abhängig vom Verbrauch, Kostenstruktur kann durch geeignete Wahl von Grund- und Arbeitspreis berücksichtigt werden, Messtechnik erforderlich	Grundversorgung und Ersatzversorgung
Zonentarif	unterschiedliche Arbeits- und/oder Gruppenpreise in abgrenzbaren Zonen, Zonen sind z. B. verbrauch- oder zeitabhängig, Kostenstruktur ist relativ genau abbildbar, hohe Anforderungen an die Messtechnik	Hochtarif, Niedertarif

Für die Durchleitung des Stroms durch Übertragungs- und Verteilungsnetze bis hin zu einer Lieferstelle ist ein *Netznutzungsvertrag* abzuschließen. Gegebenenfalls ist zusätzlich ein *Anschlussnutzungsvertrag* – für die Nutzung des Anschlusses der Lieferstelle an das unmittelbar anliegende Verteilungsnetz – nötig. Diese Nutzungsverträge regeln das Verhältnis zwischen Kunden und Verteilungsnetzbetreiber, der anteilige Nutzungsentgelte auch an übergeordnete Übertragungsnetzbetreiber weiterleitet. Zusätzlich kann eine Messgebühr vereinbart werden. In einigen Fällen ist auch die Blindarbeit [kVAh] zu vergüten (s. Abschn. 5.2.1.2).

Oft übernimmt der Stromlieferant für den Kunden den Abschluss von Netz- und Anschlussnutzungsverträgen. Regelungen zur Netz- und Anschlussnutzung werden dann Bestandteil der Stromlieferverträge. Der Stromlieferant seinerseits regelt seine Beziehungen zu den Netzbetreibern in Rahmenverträgen.

Falls die Lieferstelle bisher noch nicht an das Netz angeschlossen war, ist zudem ein *Netzanschlussvertrag* nötig. Dieser kommt zwischen dem Grundstücks- bzw. Hauseigentümer (Anschlussnehmer) und dem Verteilungsnetzbetreiber zu Stande. Für die Einrichtung des Netzanschlusses fallen einmalig Kosten an.

Aus den Stromliefer- und den Netz- bzw. Anschlussnutzungsverträgen ergeben sich dagegen dauerhaft sowohl fixe als auch variable Kosten. Bei den variablen Kosten sind weiterhin leistungsabhängige und arbeitsabhängige Kosten zu unterscheiden (s. Tabelle 3.7).

Tabelle 3.7. Beispiel für variable Kosten aus einem Stromliefervertrag eines KMU

	Leistung	Arbeit	Preis pro Einheit	Gesamtkosten
Elektroenergieverbrauch HT	-	275.666 kWh/Jahr	0,0603 €/kWh	16.622,66 €/Jahr
Elektroenergieverbrauch NT	-	56.036 kWh/Jahr	0,0552 €/kWh	3.093,19 €/Jahr
Blindarbeit	-	171.738 kVarh/Jahr	0,0100 €/kVarh	1.717,38 €/Jahr
Jahresspitzenleistung	135 kW	-	94,50 €/kW	12.757,50 €/Jahr
Summe (ohne Blindarbeit)	-	331.702 kWh/Jahr	-	34.190,73€/Jahr

Klein- und mittlere Kunden erhalten häufig standardisierte Verträge und Tarife. Für größere Bezugsmengen werden individuelle Verträge ausgearbeitet, denen eine detaillierte Prognose des Kundenlastgangs zu Grunde liegt. Die Arbeitspreise sind dabei oft an Einkaufspreise bzw. Preisindizes gekoppelt (s. o.).

Außerdem spielen staatlich determinierte Preisbestandteile eine Rolle. Dazu zählen Energie- und Ökosteuern sowie die Umlagen der Einspeisevergütungen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) und dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Tabelle 3.8 zeigt, welche Bestandteile des Energiepreises an welchen Zahlungsempfänger gehen.

Tabelle 3.8. Bestandteile des Strompreises in Deutschland und Zahlungsempfänger (BMU 2008)

	Energie-Netz- erzeugerbetreiber	Energie- versorger	Anlagen- betreiber (EEG bzw. KWKG)	Bund	Länder	Kom- munen	Renten- versiche- rung
Strom- erzeugung	x	-	-	-	-	-	-
Transport	-	x	-	-	-	-	-
Vertrieb	-	-	-	-	-	-	-
Messung	-	x ¹⁹	-	-	-	-	-
Umlage EEG	-	-	x	-	-	-	-
Umlage KWKG	-	-	x	-	-	-	-
Konzessions- abgabe	-	-	-	-	-	x	-
Stromsteuer	-	-	-	x	-	-	x
Umsatzsteuer	-	-	-	x	x	x	z. T.

¹⁹ z. T. auch beauftragte Dritte

Die Ökosteuer kann in einigen Fällen anteilig erstattet werden. Zwischen Lieferanten und Kunden ist auszuhandeln, ob und nach welchem Verfahren die Umlagen berechnet werden oder ob der Lieferant seine Preise inklusive Umlagen anbietet.

Während die Preisgestaltung vor allem durch kaufmännische und juristische Expertisen beeinflussbar ist, bietet der physische Elektroenergiebedarf ein breites Gestaltungsfeld für Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Ausgehend von der Gl. 3.25 für die elektrische Arbeit liegen die wichtigsten Ansatzpunkte für Energieeinsparungen in der Verringerung bzw. zeitliche Steuerung:

- der elektrische Leistung der Betriebsmittel und
- deren Einschaltzeit.

Tabelle 3.9 zeigt, welche energiebezogenen Kosten durch Änderungen an der elektrischen Leistung der Verbraucher oder der Betriebszeit der Verbraucher beeinflusst werden können.

Tabelle 3.9. Beeinflussbarkeit von Energiekosten durch Leistung und Zeit

	Leistung	Zeit
<i>Betriebskosten</i>		
- Arbeit [Cent/kWh]	Momentanleistung	Betriebszeit
- Leistung [€/kW]	Maximalleistung	-
- Blindarbeit [Cent/kVA]	Blindleistung	Betriebszeit
- Netznutzung, Messgebühr	-	-
<i>Investitionskosten</i>		
- energietechnische Anlagen	Anschlussleistung	-

Insgesamt ergeben sich aus den elektrotechnischen und elektrizitätswirtschaftlichen Zusammenhängen folgende Ansätze für den sparsamen Elektroenergieeinsatz in Fabriken:

1. Stromverbrauch absolut verringern (Reduktion der Wirkarbeitskosten)!
2. Strombedarfe aus der Hochtarif- in die Niedertarifzeiten verschieben (Reduktion der Wirkarbeitskosten, ggf. sind zulässige Toleranzen für die Verschiebung zu berücksichtigen)!
3. Blindarbeit gering halten (Reduktion der Blindarbeitskosten)!
4. Anschlussleistung senken (Reduktion der Anschlusskosten)!
5. Leistungsspitzen vermeiden (Reduktion der Jahres- oder Monatsleistungskosten oder von Pönalen für Mehrleistung)!
6. Zuverlässigkeit der Lastgangprognose erhöhen (Minderung der Gefahr von Pönalen; Chance auf günstigere Arbeitspreise, wenn engeren Leistungstoleranzen zugestimmt wird)!
7. Gegebenenfalls abschaltbare Leistungen vereinbaren (Chance auf Erlöse)!

Abbildung 3.14 zeigt ein Beispiel für das Vermeiden von Leistungsspitzen durch ein aktives Lastmanagement. Im Beispiel werden das Ein- und Ausschalten

der Last 1 zeitlich verschoben. Dadurch gelingt eine in Relation zu Last 2 und 3 azyklische Fahrweise, in deren Folge die höchste Gesamtleistung auf 60 Prozent sinkt.

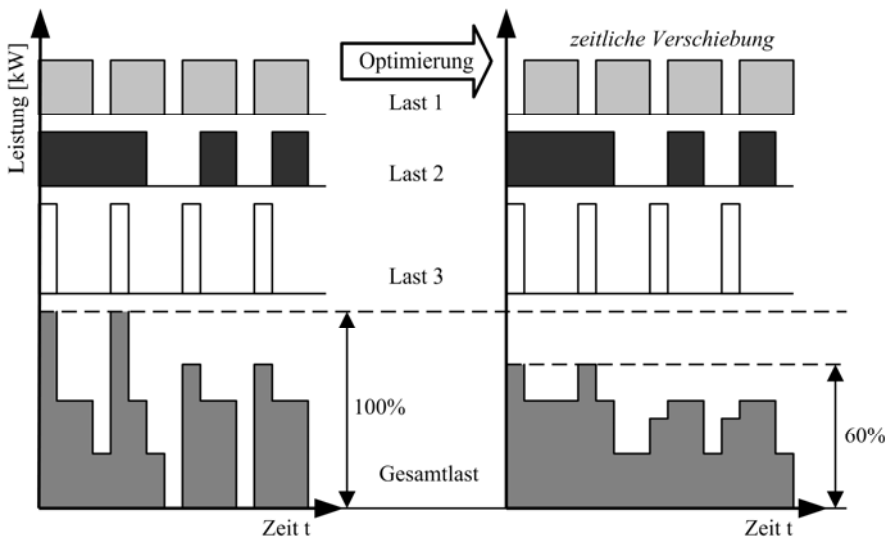


Abb. 5.14. Vermeiden von Leistungsspitzen durch Lastmanagement

Bei der wirtschaftlichen Bewertung von Energieeinsparungen ist zu berücksichtigen, dass unternehmensintern meist mit einem Mischpreis kalkuliert wird. Hierzu werden häufig alle über ein Jahr angefallenen Kosten aus Abrechnungen des Energieversorgers und ggf. des Netzbetreibers summiert und durch die bezogene Energiemenge geteilt. Dieses Verfahren ist in vielen Fällen hinreichend. Zielt eine Energieeinsparmaßnahme dagegen einseitig auf spezielle Aspekte der Stromnutzung ab (z. B. das Vermeiden von Spitzenlasten oder das Verschieben von Verbräuchen aus Hochtarif- in Niedertarifzeiten), so müssen die Einspareffekte für die einzelnen Strompreisbestandteile detailliert analysiert werden.

3.4.1.3 Netzqualität

In den letzten Jahren dokumentierten großflächige Versorgungsunterbrechungen in verschiedenen Ländern die Abhängigkeit der Wirtschaft und der privaten Haushalte von einer sicheren elektrischen Energieversorgung. Neben der Verfügbarkeit von Kraftwerken und Netzen spielt dabei auch die Netzqualität eine Rolle.

Probleme mit der Netzqualität kosten die europäische Wirtschaft jährlich mehr als 150 Milliarden Euro (Targosz u. Manson 2007). Allein Spannungseinbrüche und kurzzeitige Unterbrechungen verursachen 50 Prozent der Verluste, die vor allem den Industriesektor treffen. Dabei sind viele Netzstörungen vermeidbar, da sie ihre Ursache auch im Spannungsnetz der Endverbraucher haben.

Netzqualität – auch Stromqualität, Spannungsqualität oder Power Quality genannt – bezeichnet die Übereinstimmung der Eigenschaften einer Spannungsquelle beim Verbraucher mit den zugesagten oder spezifizierten Eigenschaften des Energieversorgers.

Nach der Norm DIN EN 50160 sind am Übergabepunkt zwischen Energieversorger und Kunden folgende Parameter relevant:

- Netzfrequenz f : Wiederholrate der Grundschiwingung der Versorgungsspannung, gemessen über ein bestimmtes Zeitintervall,
- Höhe der Versorgungsspannung, Nennspannung U_N : Effektivwert der Spannung an der Übergabestelle zu einem bestimmten Zeitpunkt, gemessen über ein bestimmtes Intervall,
- langsame Spannungsänderung, Nennspannungsänderung ΔU_N in Prozent: eine Erhöhung oder Abnahme der Spannung, üblicherweise auf Grund von Laständerungen,
- schnelle Spannungsänderung, Nennspannungsänderung ΔU_N in Prozent: eine einzelne, schnelle Änderung des Effektivwerts einer Spannung zwischen zwei aufeinander folgenden Spannungswerten mit jeweils bestimmter, aber nicht festgelegter Dauer,
- Flimmern, Flicker: Eindruck der Unstetigkeit visueller Empfindungen, hervorgerufen durch Lichtreize mit zeitlicher Schwankung der Leuchtdichten oder der spektralen Verteilung:
 - Kurzzeit-Flickerstärke P_{st} : gemessen über ein Zeitintervall von zehn Minuten,
 - Langzeit-Flickerstärke P_{lt} : berechnet aus einer Folge von zwölf P_{st} -Werten über ein Zwei-Stunden-Intervall,
- Einbruch der Versorgungsspannung (Anzahl, Dauer und Tiefe der Einbrüche): Plötzlicher Rückgang der Versorgungsspannung auf einen Wert zwischen 90 und einem Prozent der vereinbarten Versorgungsspannung, dem nach kurzer Zeit eine Spannungswiederkehr folgt.
- kurze Unterbrechung der Versorgungsspannung (Anzahl der Unterbrechungen pro Jahr und Dauer der Unterbrechung): Zustand, in dem die Spannung an der Übergabestelle über einen Zeitraum bis zu drei Minuten weniger als ein Prozent der vereinbarten Spannung beträgt.
- lange Unterbrechung der Versorgungsspannung (Anzahl pro Jahr und Dauer der Unterbrechung): Zustand, in dem die Spannung an der Übergabestelle über einen Zeitraum von über drei Minuten weniger als ein Prozent der vereinbarten Spannung beträgt.
- zeitweilige netzfrequente Überspannung zwischen Außenleitern und Erde (Vielfaches der vereinbarten Versorgungsspannung U_N): Überspannung an einem bestimmten Ort mit verhältnismäßig langer Dauer
- Transiente Überspannung zwischen Außenleiter und Erde (Vielfaches der vereinbarten Versorgungsspannung U_N): kurzzeitige, schwingende oder nicht

schwingende Überspannung, die in der Regel stark gedämpft ist und eine Dauer von einigen Millisekunden oder weniger aufweist.

- Unsymmetrie der Versorgungsspannung, Unsymmetriegrad U_2/U_1 und U_0/U_1 : Zustand in einem Mehrphasensystem (z. B. Dreiphasenwechselstromkreis), in dem die Effektivwerte der Spannung zwischen den Leitern (Grundschwingungsanteil) oder die Phasenwinkeldifferenzen zwischen aufeinander folgenden Leiterspannungen nicht alle gleich sind. Der Grad der Ungleichheit wird üblicherweise als Verhältnis der Gegenkomponente der Spannung (negative Halbschwingung) und der Nullkomponente der Spannung zur Mitkomponente der Spannung (positive Halbschwingung) ausgedrückt.
- Oberschwingungsspannung: sinusförmige Spannung mit einer Frequenz, die ein ganzzahliges Vielfaches (Ordnungszahl) der Grundschwingungsfrequenz der Versorgungsspannung ist. Zur Charakterisierung existieren zwei Größen:
 - Oberschwingungsspannung U_h in Prozent der Grundschwingungsspannung U_N und
 - Gesamtoberschwingungsgehalt (THD = Total Harmonic Distortion).
- Zwischenharmonische Spannung: sinusförmige Spannung, deren Frequenz zwischen denen der Oberschwingungen liegt, das heißt, ihre Frequenz ist kein ganzzahliges Vielfaches der Grundschwingungsfrequenz.

Gegenwärtig sind Schäden an elektrischen Betriebsmitteln und Produktionsausfälle, die auf mangelnde Spannungsqualität zurückgehen, eher selten. Besonders im Zuge der verstärkten informations-, kommunikations- und steuerungstechnischen Vernetzung der Produktion steigt jedoch auch die Anfälligkeit gegenüber Netzstörungen. Insofern kann es lohnen, bei unerklärten Prozessunsicherheiten und Qualitätsproblemen in der Fertigung auch die Netzqualität als Fehlermöglichkeit zu betrachten. Im Sinne eines umfassenden Qualitätsmanagements wird es künftig vermehrt notwendig sein, die Netzqualität präventiv zu sichern.

Qualitätsanforderungen an betriebliche Elektrizitätsnetze sind jedoch derzeit nicht normiert und müssen im Einzelfall durch eine Zusammenarbeit von Elektro-, Automatisierungs- und Informationstechnikern mit Technologen und Qualitätsexperten spezifiziert werden. Die für öffentliche Netze geltende DIN EN 50160 reicht ggf. für sensible Fertigungen nicht aus.

In jedem Fall ist zu vermeiden, dass die Betriebsmittel, die in der Fabrik betrieben werden, ihrerseits das öffentliche – und das betriebliche – Netz stören. Bei der Ausschreibung von Ausrüstungen sind daher auch Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit zu stellen.

In diesem Zusammenhang ist das Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln (EMVG) zu beachten. Das Gesetz betrifft ausdrücklich auch Industrieausrüstungen, es ist sowohl an Hersteller als auch an Betreiber adressiert.

Für die Umsetzung des Gesetzes gilt insbesondere der Stand der Technik nach der Norm DIN EN 61000. Diese definiert für die elektromagnetische Verträglichkeit zwei Parameter:

- den Verträglichkeitspegel (die am Anschlusspunkt zu erwartenden Qualitätsminderungen) und
- den Störfestigkeitsgrenzwert (Sollwert, bis zu dem ein System gegenüber einer externen Störquelle ungestört arbeiten kann).

Tabelle 3.10 führt die Bestandteile der Norm im Detail auf. Neben der Definition von Umgebungsbedingungen und Grenzwerten regelt die Norm auch die anzuwendenden Prüf- und Messverfahren.

Tabelle 3.10. Bestandteile und Inhalte der DIN EN 61000

Norm DIN EN	Inhalt
61000-2-2	EMV-Umgebungsbedingungen: Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen
61000-2-4	EMV-Umgebungsbedingungen: Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen
61000-2-12	EMV-Umgebungsbedingungen: Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in öffentlichen Mittelspannungsnetzen
61000-3-2	EMV-Grenzwerte: Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräteeingangsstrom ≤ 16 A/Leiter)
61000-3-12	EMV-Grenzwerte: Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräteeingangsstrom > 16 A und ≤ 75 A/Leiter)
61000-3-3	EMV-Grenzwerte: Grenzwerte für Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungsnetzen für Geräteeingangsstrom ≤ 16 A/Leiter
61000-3-11	EMV-Grenzwerte: Grenzwerte für Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungsnetzen für Geräteeingangsstrom > 16 A und ≤ 75 A/Leiter
61000-4-7	EMV-Prüf- und Messverfahren: Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten
61000-4-15	EMV-Prüf- und Messverfahren: Flickermeter-Funktionsbeschreibung und Auslegungsspezifikation

Die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln steht im Zusammenhang mit den generellen Anforderungen an die Maschinensicherheit seitens der EG-Maschinen-Richtlinie und den geltenden Vorschriften (z. B. EN 60204 zur „Sicherheit von Maschinen/Elektrische Ausrüstung von Maschinen“). Deshalb geht die elektromagnetische Verträglichkeit auch in die Konformitätsprüfung zum Erwerb des CE-Kennzeichens ein. Der Erwerb CE-gekennzeichneter Ausrüstung ist daher zu empfehlen.

Tabelle 3.11 stellt dar, welche Störphänomene von welchen Ursachen abhängen und wer diese Störungen beeinflussen bzw. abwenden kann. Dabei kommt eine Mitverantwortung des Verbrauchers, z. B. des Betreibers von Fabriken, deutlich zum Ausdruck.

Tabelle 3.11. Beispielhafte Störungen, Ursachen und Beeinflussbarkeiten, in Anlehnung an (Höck 2009)

Störphänomen	Hauptursachen	beeinflussbar durch Versorger	beeinflussbar durch Verbraucher
Frequenzschwankung	Laständerungen, Verlust von Erzeugungsleistung	ja	nein
langsame Spannungsänderungen	Laständerungen	ja	nein
schnelle Spannungsänderungen/Flicker	Schalthandlungen, spezielle Lasten, Schweranlauf	nein	ja
Spannungsunsymmetrie	unsymmetrische Belastung der Phasen, unsymmetrischer Systemwiderstand	teilweise	ja
Oberschwingungen und Zwischenharmonische	nichtlineare Last, Resonanzen, Trafo-Sättigung	teilweise	ja
Signalspannungen	Informationsübertragung	ja	ja
Gleichströme oder -spannungen	spezielle Geräte (Einweggleichrichtung)	nein	ja
Spannungseinbrüche und -unterbrechungen	Fehler im Versorger-/Verbrauchernetz (Kurzschlüsse, Unterbrechungen), Schweranlauf, Lastabwurf	nein	nein
zeitweilige Überspannung	Fehler im Verbrauchernetz, Resonanzen im Netz	nein, teilweise	teilweise, nein
transiente Überspannung	Blitzeinschläge, Schaltvorgänge	nein	nein

3.4.2 Gaswirtschaft

Die Gaswirtschaft produziert, handelt und verteilt Stadt- und Ferngas (z. B. Kokei-Ferngas), Naturgas (Erdgas) und Flüssiggas (Propan, Butan) an die Endkunden. Nachfolgend wird nur auf die Versorgung mit Erdgas eingegangen. Dabei werden zwei Sorten unterschieden:

1. Erdgas H (high gas): Der Brennwert liegt zwischen 10 und 11,1 kWh/m³. Das in Mitteleuropa verwendete Gas stammt aus der GUS, Norwegen, den Niederlanden und Dänemark.
2. Erdgas L (low gas): Der Brennwert liegt zwischen 8,2 und 8,9 kWh/m³. Das Gas wird in der Nordsee und in den Niederlanden gefördert.

Erdgas wird von der Förderstelle über ein international verflochtenes Leitungsnetz bis zum Kunden transportiert. In dieses Netz wird zusätzlich verflüssigtes

Gas (LNG: liquified natural gas) eingespeist, das mit Tankschiffen in ausgewählten europäischen Häfen anlandet. Das deutsche Netz umfasst drei Stufen:

1. Ferngasleitungen transportieren Gas richtungsgebunden von einem Einspeisepunkt zu einem Ausspeisepunkt. Der Betriebsdruck liegt bei 60 bis 80 bar.
2. Regionalgasleitungen transportieren Gas von einem Einspeisepunkt (Übergang zum Ferngasnetz) zu mehreren Ausspeisepunkten. Der Betriebsdruck beträgt zwischen 15 und 40 bar.
3. Endverteilternetze transportieren das Gas weiter bis zum Endabnehmer. Der Betriebsdruck liegt unter 16 bar.

In das Gasnetz sind verschiedene Speicher (z. B. Untertagespeicher, Röhrenspeicher, Kugelspeicher) integriert, mit denen Schwankungen zwischen Verbrauch und Gasförderung ausgeglichen werden können. Gasdruckregel- und Gasdruckmessanlagen sorgen für ausreichenden und gleichmäßigen Druck sowie für die Erfassung der Gasmengen beim Übergang zwischen verschiedenen Netzteilen.

Gas lässt sich deutlich besser speichern als Elektroenergie. Daher muss in Gasnetzen lediglich die stündliche Bilanz von Einspeisung und Ausspeisung aus einem Bilanzkreis ausgeglichen sein. Erst wenn dieses Kriterium nicht eingehalten wird, ist Ausgleichsenergie zu beziehen.

Nach der Novellierung des Energiewirtschaftsgesetzes wurde auch der Gasmarkt liberalisiert. Seit 2007 sind die Netzbetreiber rechtlich selbständige Einheiten. Jedem Gaslieferanten muss ein diskriminierungsfreier Zugang zu den Netzen gewährt werden. Infolgedessen entstanden ähnliche Akteurs- und Vertragsbeziehungen, wie sie schon für die Stromwirtschaft vorgestellt wurden (s. Abb. 3.15).

Aus Sicht des Endkunden – z. B. des Fabrikbetreibers – ist der Gasliefervertrag, der mit dem Gashändler geschlossen wird, die wichtigste vertragliche Beziehung.²⁰ Zwischen Gashändler und Endkunden können Lieferverträge zur Vollversorgung, Fahrplanlieferungen oder die Lieferung von Bändern (Jahres-, Saisonal-, Quartals- und Monatsbänder) vereinbart werden.

Wichtige Parameter von Gaslieferverträgen sind:

- Lieferstelle,
- Gassorte,
- Druck an der Übergabestelle (in der Regel Niederdruck),
- Ausspeisekapazität [kW],
- Jahresmenge [kWh],
- Stundenhöchstleistung [kW],
- Laufzeit des Vertrags sowie
- Abrechnungs- und Zahlungsmodalitäten.

²⁰ Davon abgesehen ist im Rahmen der Standortwahl zu klären, ob das Fabrikgrundstück durch eine Gasleitung erschlossen ist. Für Netznutzung und Netzanschluss existieren dann meist standardisierte Verträge. Die Preise für die Netznutzung unterliegen der staatlichen Aufsicht.

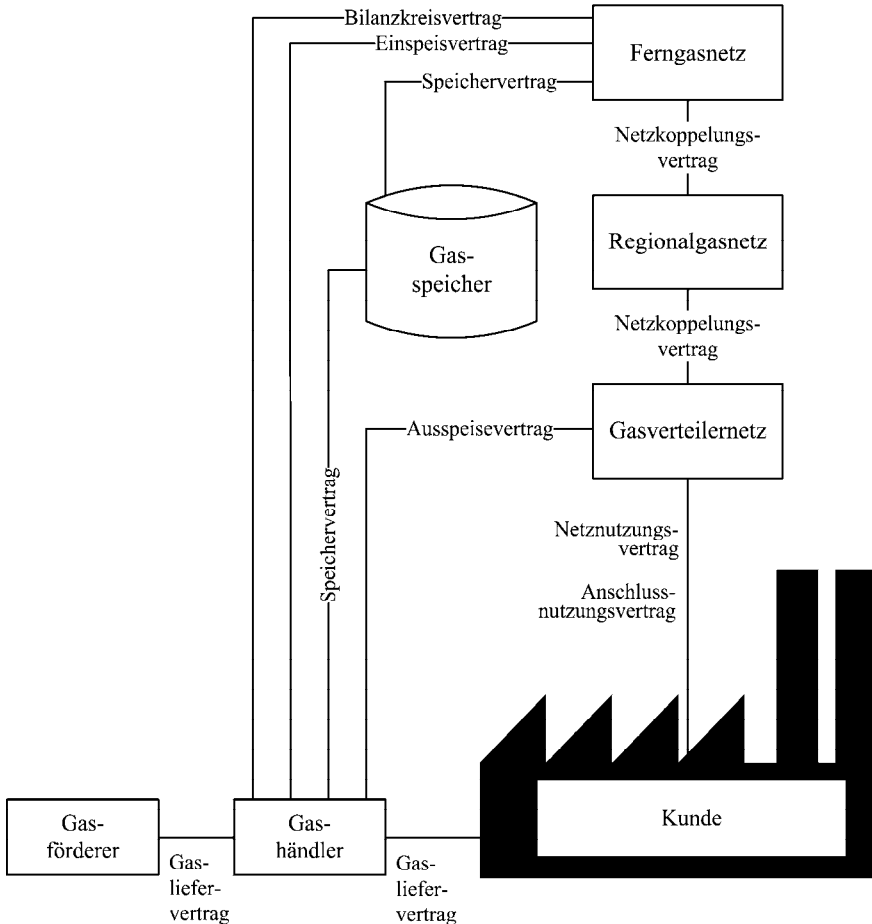


Abb. 3.15. Akteursbeziehungen in der Gaswirtschaft

Preisbestandteile von Gaslieferverträgen sind:

- der Grundpreis (Euro, optional),
- der Arbeitspreis (Preis für die gelieferte Wärmeeinheit in Cent/kWh),
- der Leistungspreis (Preis für die bestellte und vorgehaltene oder maximal in Anspruch genommene Wärmemenge pro Zeiteinheit, z. B. in Cent/kWh/d/a) und
- ggf. ein Überschreitungspreis, der bei Überschreitung der Stundenhöchstleistung fällig wird (Euro/kW).

Arbeits- und Leistungspreise können als fixer oder variabler Preis bestimmt werden. Variable Preise sind mittlerweile für Industriekunden üblich.

Der variable Arbeitspreis AP ergibt sich aus einem Basisarbeitspreis AP_0 , der zum Zeitpunkt der Vertragsunterzeichnung festgelegt wird, einem Zuschlag, der

die Bindung an den Konkurrenzenergiepreis herstellt, und Nachlässen, die aus der Erdgassteuer resultieren (N_S) oder auf die bezogene Menge gewährt werden (N_M). Üblich ist eine Bindung an schweres Heizöl (HSL) oder leichtes Heizöl (HEL). Beispielhaft wird die Bindung an HEL dargestellt: Der Zuschlag ergibt sich aus der Multiplikation eines verhandelten Bindungsfaktors k mit der Differenz zwischen dem jeweils aktuellen Heizölpreis HEL_t und dem Heizölpreis zum Zeitpunkt der Vertragsunterzeichnung HEL_0 . Die Höhe der Referenzpreise für HEL wird amtlichen Statistiken entnommen. Die Kalkulation des Arbeitspreises wird in der Regel für bestimmte Stichtagstermine oder für Mittelwerte bestimmter Perioden (Monat, Woche) durchgeführt.

$$AP = [AP_0 + k \cdot (HEL_t - HEL_0)] - N_S - N_M \quad (3.38)$$

Die Leistung wird als Bestandteil der Preisbildung berücksichtigt, um die Bereitstellung der Transportkapazitäten im Netz verursachergerecht vergütet zu bekommen. Der Leistungspreis wird in der Regel als Jahresleistungspreis vereinbart, ist aber monatlich zahlbar. Die Abrechnung der Leistung bedingt eine registrierende Leistungsmessung (automatische Erfassung und Speicherung der stündlichen Verbrauchswerte). Diese ist ab einem Jahresverbrauch von ca. 500.000 kWh/a bzw. einer Anschlussleistung von ca. 300 kW bis 500 kW wirtschaftlich.

Für die Leistungsabrechnung sind zwei Varianten üblich:

1. Tagesleistungsabrechnung: Hierbei wird der Mittelwert aus den zwei höchsten Monatsleistungen errechnet, wobei zusätzlich ein Abstand von 14 Tagen zwischen den beiden höchsten Monatsleistungen zu beachten ist.
2. Stundenleistungsabrechnung: Hierbei wird die maximal aufgetretene Leistung in einer Stunde zur Abrechnung herangezogen. Die Stundenleistungsabrechnung ist für größere Kunden gebräuchlich.

Auch der Leistungspreis LP kann über die Laufzeit des Gaslieferungsvertrags variabel gestaltet werden. Dazu wird ein Basisleistungspreis LP_0 vereinbart und ein veränderlicher Zuschlag addiert. Der Zuschlag kann über einen Bindungsfaktor k an verschiedene Indizes, die über wirtschaftlich relevante Preisveränderungen Auskunft geben, gebunden werden (z. B. Lohnindizes). Für die Berechnung wird die Differenz zwischen dem jeweils aktuellen Indexpreis L und dem Basisindexpreis L_0 zum Zeitpunkt der Vertragsunterzeichnung gebildet.

$$LP = LP_0 + k \cdot (L - L_0) \quad (3.39)$$

Für nicht leistungsgemessene Kunden wird ersatzweise die volumetrische Abrechnung angewandt. Sie erfolgt auf Basis des gemessenen Volumens an verbrauchtem Gas [m^3] und unter Verwendung eines Abrechnungsbrennwertes, der den Mittelwert der Brennwerte in den einzelnen Monaten verkörpert. Die Abrechnung erfolgt jährlich.

Weitere Kosten für den Endnutzer entstehen aus dem *Anschlussnutzungsvertrag* (inklusive Messgebühren) und dem *Netzanschlussvertrag*. Für beide Verträge sind die Verhältnisse am Gasmarkt vergleichbar mit denen am Elektrizitätsmarkt. Lediglich für die Blindarbeit existiert in der Gaswirtschaft kein Äquivalent. Für Gas sind momentan keine Umlagen nach EEG und KWKG und keine speziellen Steuern (außer Umsatzsteuer) zu entrichten.

Für Fabrikplanung und Fabrikbetrieb ergeben sich aus den gaswirtschaftlichen Zusammenhängen folgende Gestaltungsansätze:

1. Absolute Höhe des Gasverbrauchs mindern (Reduktion der Arbeitskosten)!
2. Erforderliche Ausspeisekapazität des Anschlusses verringern (Reduktion der Anschlusskosten)!
3. Leistungsspitzen vermeiden (Reduktion der Jahresleistungskosten oder Abwehr von Überschreitungskosten)!
4. Zuverlässigkeit der Lastgangprognose verbessern (Minderung der Gefahr von Überschreitungskosten; Chance auf günstigere Arbeitspreise, wenn engeren Leistungstoleranzen zugestimmt wird)!
5. Gegebenenfalls abschaltbare Leistungen vereinbaren (Chance auf Erlöse)!

3.5 Zusammenfassung

Aus den dargestellten energetischen Grundlagen lassen sich für das Planen und Betreiben energieeffizienter Fabriken folgende wichtige Zusammenhänge und Handlungsansätze erkennen:

1. Die Gesamtheit aller Energien in einem abgeschlossenen System bleibt über die Zeit konstant (Energieerhaltungssatz). Nur durch einen Energieaustausch mit der Umwelt kann ein System Energie gewinnen oder abgeben. Energie ist also eine Bilanzgröße. Durch Energiebilanzen (Gegenüberstellen der Energieeingaben und -ausgaben der Fabrik) können die Energieflüsse in der Fabrik analysiert und kontrolliert werden.
2. Technisch und wirtschaftlich wertvoll sind frei verfügbare und vollständig wandelbare Energien (physikalisch: Exergie, z. B. Elektroenergie). Bei ihrer Umwandlung werden diese Energien nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik zu Energien entwertet, die nicht mehr (vollständig) gewandelt werden können (physikalisch: Anergie, z. B. niederkalorische Wärme). Dieser Vorgang wird physikalisch nicht korrekt – aber in Technik und Alltag üblich – als Energieverbrauch bzw. Energieverlust bezeichnet. Aus dieser Energieentwertung ergeben sich folgende Forderungen für das Planen und Betreiben energieeffizienter Fabriken:
 - Minderung des Bedarfs an Nutzenergie,
 - Minderung energetischer Verluste bei der Umwandlung der zugeführten Endenergie in Nutzenergie,

- Wieder- und Weiterverwenden von Verlustenergie und
 - besonders sparsamer Umgang mit hochwertiger, vollständig wandelbarer Energie (z. B. Elektroenergie) bzw. bevorzugter Einsatz von Energie, deren Niveau gerade noch für die technische Anwendung ausreicht (z. B. niederkalorische Wärme für Niedertemperaturheizungen).
3. Energieverluste treten bereits entlang der Energieumwandlungsketten von der Energierohstoffgewinnung (Primärenergie) bis zur Lieferung der Endenergie an die Fabrik auf. Bei der Planung von Fabriken und bei der Beschaffung der Endenergie sollten daher Endenergieformen bevorzugt werden, für die wenig Primärenergie aufgewendet werden musste. Ein Maß dafür ist der Primärenergiefaktor.
 4. Sowohl in der externen als auch in der fabrikinternen Energieumwandlungskette sind wenige Energieumwandlungsstufen tendenziell von Vorteil, da sich die Wirkungsgrade der einzelnen Energieumwandlungsstufen zu einem Gesamtwirkungsgrad multiplizieren. Jeder Wirkungsgrad ist auf Grund des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik kleiner eins, so dass das Produkt aus mehreren Wirkungsgraden oft sehr klein ist.
 5. Eine der wichtigsten Nutzenergien in der Produktion ist die mechanische Energie. Um der Forderung nach einer Minderung des Bedarfs an Nutzenergie nachzukommen, existieren für mechanische Energie folgende physikalisch begründete Ansätze:
 - Minderung der Masse bewegter Körper,
 - Reduktion der Rotationsradien von rotierenden Körpern,
 - Minderung der Geschwindigkeit von bewegten Körpern,
 - Verkürzung der Wege, über die Körper bewegt werden,
 - Verringerung der Reibung und
 - Reduktion von Beschleunigungen.
 6. Eine weitere bedeutende Nutzenergie in der Produktion ist die thermische Energie. Um den Bedarf an thermischer Energie bzw. Wärme zu mindern, können aus physikalischer Sicht folgende Ansätze verfolgt werden:
 - Minderung der Masse von Körpern oder Flüssigkeiten, die zu erwärmen, zu schmelzen oder zu verdampfen sind (z. B. durch angemessene Dimensionierung von Behältern),
 - Minderung von Verlusten an wärmeübertragenden Bauteilen (Wärmeleiter) durch den Einsatz von Materialien mit großer Wärmeleitzahl,
 - Minderung von Verlusten an wärmeisolierten Anlagen- und Gebäudeteilen durch den Einsatz von Materialien mit kleiner Wärmeleitzahl und großer Schichtdicke,
 - Nutzung der freien Konvektion zur Abfuhr von Abwärme und Schadstoffen aus dem Aufenthaltsraum von Mitarbeitern,
 - Verhinderung unerwünschter Konvektion durch offene Tore und Fenster sowie undichte Bauteile (Zugluft),

- Minderung von Verlusten in wärmeführenden Leitungen durch geradlinige Leitungsführung und großzügige Biegeradien,
 - Minderung von Verlusten an Wärmeübergangsflächen durch regelmäßige Reinigung,
 - Minderung von Verlusten in Wärmestrahlungssystemen durch Sicherung der ungehinderten Abstrahlung von den emittierenden Flächen und der ungehinderten Einstrahlung auf die absorbierenden Flächen (unverbaut, unverstellt und sauber).
7. Die wertvollste Endenergie, die in Fabriken eingesetzt wird, ist die elektrische Energie. Bei der Verringerung des Elektroenergieverbrauchs sind physikalische und energiewirtschaftliche Zusammenhänge zu berücksichtigen:
- Minderung des absoluten Stromverbrauchs (Reduktion der Arbeitskosten); Elektrische Arbeit ist das Produkt aus elektrischer Leistung und Zeit. Die Einsparung von Zeiten ist eine originäre Aufgabe bei der Fabrikplanung und im Fabrikbetrieb. Werden bei zeitökonomischen Verbesserungen auch die verschiedenen Zeiten elektrischer Betriebsmittel (Volllast, Teillast, Leerlauf, Stand-by) berücksichtigt, kann Elektroenergie – oft auch ohne größere Änderungen am elektrischen Verbraucher – eingespart werden.
 - Verschiebung von Strombedarfen aus der Hochtarif- in die Niedertarifzeiten (Reduktion der Wirkarbeitskosten; ggf. sind zulässige Toleranzen für die Verschiebung zu berücksichtigen),
 - Minimierung der Blindarbeit (Reduktion der Blindarbeitskosten),
 - Senkung der Anschlussleistung (Reduktion der Anschlusskosten),
 - Vermeidung von Leistungsspitzen (Reduktion der Jahres- oder Monatsleistungskosten oder von Pönalen für Mehrleistung),
 - Erhöhen der Zuverlässigkeit der Lastgangprognose (Minderung der Gefahr von Pönalen; Chance auf günstigere Arbeitspreise, wenn engeren Leistungstoleranzen zugestimmt wird),
 - Vereinbarung von abschaltbaren Leistungen (Chance auf Erlöse).
8. Eine weitere wichtige Endenergie, die von produzierenden Unternehmen bezogen wird, ist Erdgas. Aus den gaswirtschaftlichen Zusammenhängen ergeben sich folgende Gestaltungsansätze für energieeffiziente Fabriken:
- Minderung des absoluten Gasverbrauchs (Reduktion der Arbeitskosten),
 - Senkung der erforderlichen Ausspeisekapazität des Anschlusses (Reduktion der Anschlusskosten),
 - Vermeiden von Leistungsspitzen (Reduktion der Jahresleistungskosten oder Abwehr von Überschreitungskosten),
 - Zuverlässigkeit der Lastgangprognose (Minderung der Gefahr von Überschreitungskosten; Chance auf günstigere Arbeitspreise, wenn engeren Leistungstoleranzen zugestimmt wird) und
 - Vereinbaren von abschaltbaren Leistungen (Chance auf Erlöse).

Erkenntnisse für das Planen und Betreiben energieeffizienter Fabriken

Aus physikalischen und energiewirtschaftlichen Gleichungen und Zusammenhängen können grundlegende Regeln und Gestaltungsansätze für das Planen und Betreiben energieeffizienter Fabriken abgeleitet werden.

Literatur

- AG Energiebilanzen (2008) Primärenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland. www.ag-energiebilanzen.de Zugriffsdatum 18.11.2008
- BMU (Hrsg) (2008) Strom aus erneuerbaren Energien. Broschüre, Berlin
- DIN (1996 ff.) DIN 61000 ff. – Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Beuth Verlag, Berlin
- DIN (1999 ff.) DIN EN 60204 ff. – Sicherheit von Maschinen/Elektrische Ausrüstung von Maschinen. Beuth Verlag, Berlin
- DIN (2003) DIN 4701-10 – Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen – Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Beuth Verlag, Berlin
- DIN (2008) DIN EN 50160 – Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen. Beuth Verlag, Berlin
- Fleischer LG (2008) Reflexionen zur Triade Energie-Entropie-Exergie – einer universellen Qualität der Energie. LIFIS ONLINE, Leibnitz Institut, Berlin, www.leibnitz-institut.de Zugriffsdatum 21.08.2008
- Heuck K, Dettmann KD, Schulz, D (2007) Elektrische Energieversorgung. 7. Aufl, Vieweg, Wiesbaden
- Höck G (2009) „Dirty Power“ Oberschwingungen durch nichtlineare Verbraucher. GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH. www.gmc-instruments.ch/src/download/dDirty_Power.pdf Zugriffsdatum 09.01.2009
- Menke N (2007) Elektroenergiewirtschaft. In: Schufft W (Hrsg) Taschenbuch der Elektrischen Energietechnik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München
- Schieferdecker B (2006) Technische Tools im Industriellen Energiemanagement. In: Schieferdecker B (Hrsg) Energiemanagement-Tools. Springer, Berlin, Heidelberg
- Schufft W (2003) Elektrische Energietechnik. Vorlesungsskript. Technische Universität Chemnitz
- Schufft W (2007) Energiebegriff, allgemeine Grundlagen. In: Schufft W (Hrsg) Taschenbuch der Elektrischen Energietechnik. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München
- Schütz P (2003) Ökologische Gebäudeausrüstung. Springer, Wien
- Targosz R, Manson J (2007) Pan European LPQI Power Quality Survey. In: Proceedings of 19th International Conference on Electricity Distribution, Council of European Energy Regulators, Vienna, 21–24 May 2007