J. Hesselbach, *Energie- und klimaeffiziente Produktion,* DOI 10.1007/978-3-8348-9956-9_3,
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012

Wie kommt man also an belastbare Daten? Im Prinzip ist es sehr einfach: Entweder es gibt sie schon, oder man muss sie selbst erheben. Im ersten Fall stellt sich zusätzlich die Frage, wer die Daten hat. Der erste Schritt sollte in jedem Fall der Kontakt zu Ihrem Energieversorger sein. Im zweiten Fall müssen Sie diese selbst erheben, das ist deutlich mühsamer und setzt entsprechende Kenntnisse in der Messtechnik voraus. Aber wenn Sie wirklich wissen wollen, wohin in Ihrer Produktion die Energie fließt, kommen Sie nicht umhin, dies durch gezielte Messungen herauszufinden. Hierauf gehen wir in Abschnitt 3.1 ein.

Top-down vom Gesamtverbrauch zum Prozess

Ab einem Verbrauch von mehr als 100 MWh protokollieren die Energieversorger Ihren Stromverbrauch mit einer Auflösung von 15 min. Bei Erdgas liegt die Grenze bei 1,5 Mio. kWh, und die Auflösung beträgt 1 h. Auf diese Weise ist zwar noch lange keine verursachergerechte Analyse der Energieströme möglich, aber diese Daten liefern erst wichtige Informationen über

- Gesamtverbrauch
- Verbrauchsmuster (Jahr, Monat, Woche, Tag)
- maximale, minimale und Durchschnittslast

Kombiniert mit Produktionsdaten, lassen sich daraus bereits erste kausale Rückschlüsse zwischen Produktion, Wetter und Energieströmen ableiten.

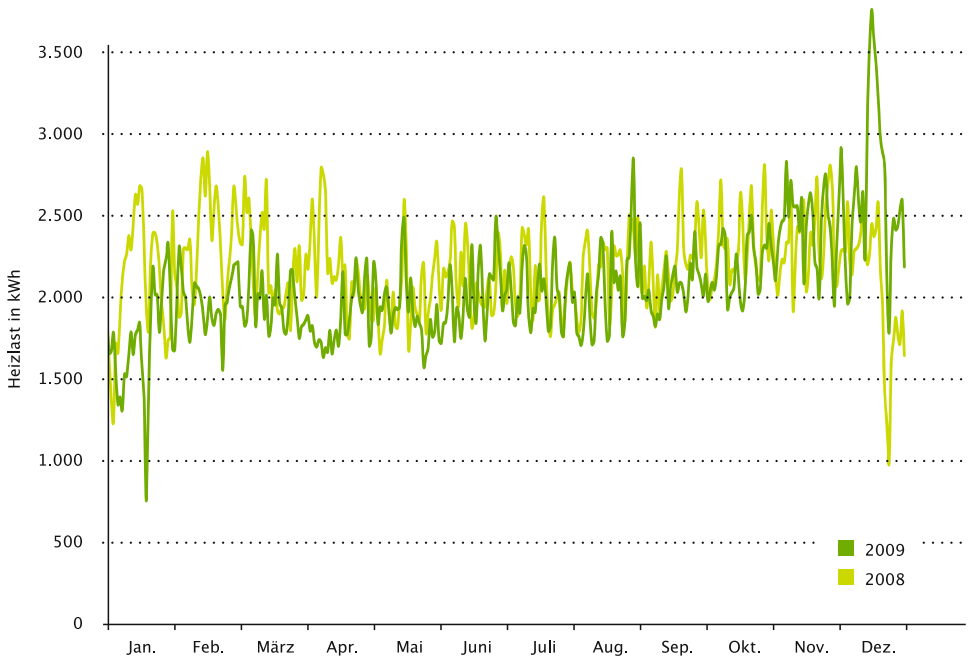

Abb. 3-1: Beispiel für einen elektrischen Lastgang

Das „Sortieren“ nach benötigter Leistung liefert aus den Lastgängen so genannte Lastdauerkurven (siehe Abb. 3-2). Mit ihrer Hilfe lassen sich erste Maßnahmen zur Reduktion von Lastspitzen identifizieren. Zudem sind sie ein wichtiges Hilfsmittel, um dezentrale Versorgungsanlagen wie Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zu dimensionieren.

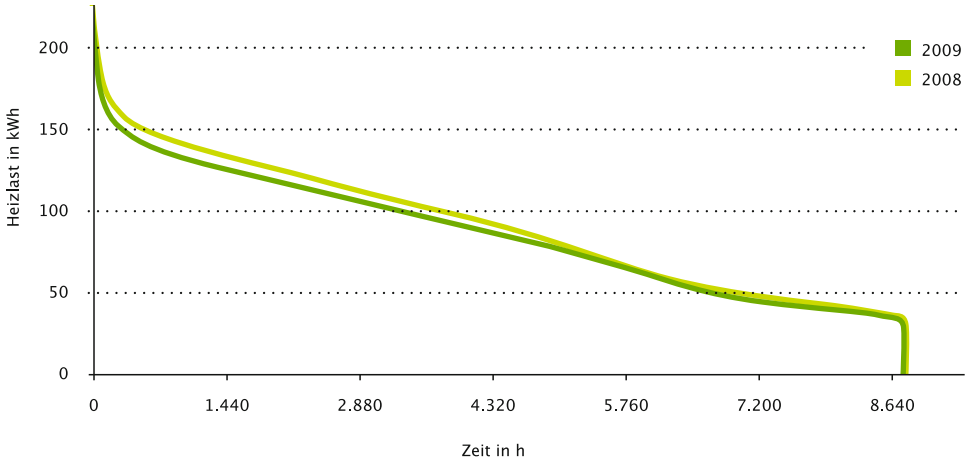

Abb. 3-2: Lastdauerkurve für Strom

Analog können diese Darstellungen auch für Erdgas verwendet werden.

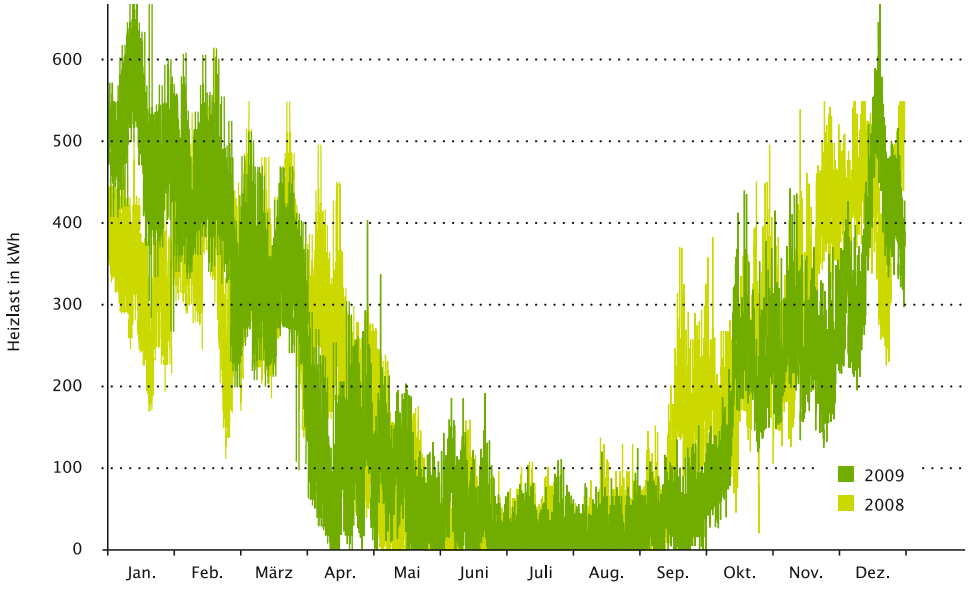

Abb. 3-3: Beispiel für einen Lastgang (Erdgas)

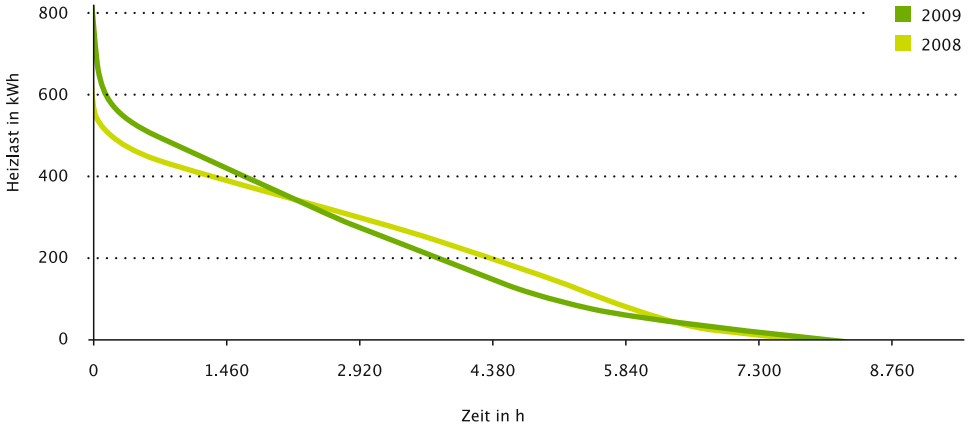

Abb. 3-4: Lastdauerkurve für Erdgas

Aus dem Lastgang für Erdgas (siehe Abb. 3-3) lässt sich eindeutig die Abhängigkeit des Verbrauches von der Witterung ableiten. Der Gasverbrauch ist also stark durch die Heizwärme dominiert. Allerdings gibt es offensichtlich auch einen heizungsabhängigen Bedarf, wie die Profile für die Sommermonate zeigen (in diesem Fall eine Küche). Für eine erste Analyse kann man aus diesem Lastgang für Erdgas den Verbrauch der Küche identifizieren und vom Heizwärmebedarf abtrennen. Die Lastgänge können also mehr Informationen liefern als nur den Gesamtverbrauch. Sie bilden zudem die Kontrollsumme für die bottom-up-Analyse (vom Einzelverbraucher bis zum Gesamtverbrauch).

Bottom-up: Mühsam ernährt sich das Eichhörnchen

Der erste Gedanke bei der Durchführung einer bottom-up-Analyse der Energieströme richtet sich auf das Typenschild der Maschinen und Anlagen – da stehen ja vermeintlich schon die gesuchte Leistung und weitere wichtige Daten drauf. An dieser Stelle müssen wir leider enttäuschen. Die auf den Typenschildern angegebenen Leistungsdaten dienen ausschließlich zur Dimensionierung der Anschlussleitungen und Sicherungen, sind also Nennleistungen. Dazu sei weiterhin angemerkt, dass sich die Angaben der Typenschilder auch für diese Aufgabe meist nicht eignen. Sie errechnen sich aus der Summe der Maximalleistung aller Einzelverbraucher (plus Sicherheitszuschlag). Dabei bleibt unberücksichtigt, dass sich unterschiedliche Funktionen in den Maschinen gegenseitig ausschließen, also nie zum gleichen Zeitpunkt ablaufen können. Diese Problematik führt zwangsläufig zu einer systematischen Überdimensionierung. Dieser Umstand wird noch dadurch verstärkt, dass auf jeder Planungsebene, also vom Einzelbauteil bis zur Trafostation, Sicherheitszuschläge von 20–30 % üblich sind. Dies führt sowohl in der Investition als auch im Betrieb zu unnötig hohen Kosten und schlechter Effizienz.

Zu einem Zweck kann man die Anschlussleistungen aber doch verwenden. Unterstellt man, dass die oben geschilderte Vorgehensweise bei allen Maschinen- und Anlagenherstellern gleich ist, lässt sich aus den Angaben eine relative Sortierung (ABC-Analyse) der verschiedenen Verbraucher erstellen. Dies wiederum gibt die Möglichkeit zur Unterscheidung von Groß- und

Kleinverbrauchern. Großverbraucher werden nach Möglichkeit messtechnisch einzeln erfasst, Kleinverbraucher hingegen möglichst zusammengefasst bzw. es werden einzelne repräsentative Verbraucher vermessen und dann die Ergebnisse auf alle anderen übertragen.

Unabhängig davon, ob man Energieströme einmalig erfassen möchte oder ein Monitoring-System zur kontinuierlichen Erfassung installieren möchte, ist die Auswahl der richtigen Messprinzipien und Sensoren von zentraler Bedeutung.

3.1 Energieströme messen

von Alexander Schlüter, Wilhelm Bleeke und Benjamin Rommel

Bevor wir uns mit den eigentlichen Messverfahren befassen, stellt sich zunächst die Frage: Welche Größen müssen wir bzw. wollen wir messtechnisch erfassen? Die geeignete Messtechnik hängt ab von:

1. Energieträger
2. Messgröße
3. Aggregatzustand (gasförmig, flüssig, fest)
4. geforderte Genauigkeit

Als Energieträger in produzierenden Unternehmen kommen in Frage:

1. Strom
2. Gase (z. B. Erdgas, Flüssiggas)
3. Feststoffe (z. B. Holz, Kohle)
4. Flüssigkeiten (z. B. Benzine, Öl, Diesel)
5. Druckluft
6. Hydrauliköl
7. Enthalpieströme zur Wärmeübertragung
   (Heißwasser, Dampf, Heißluft, Kühlwasser, Kühlluft)

Zum Verständnis, welche Messgrößen sich eignen, um die einzelnen Energieströme zu bestimmen, bedarf es eines (ganz) kurzen Rückblicks in Kapitel 2. Ein konvektiv übertragener (flächenspezifischer) Wärmestrom berechnet sich z. B. gemäß Gleichung 2.70 zu:

$$\dot{q}_{\mathrm{kon}} = \alpha_{\mathrm{kon}} \left(T_{\mathrm{wand}} - T_{\mathrm{amb}}\right) \qquad 2.70$$

Ein aus einem Enthalpiestrom resultierender Wärmestrom (z. B. im Wärmeübertrager) berechnet sich wiederum zu:

$$\dot{Q}_{\mathrm{h}} = \dot{m}\, c \left(T_{\mathrm{ein}} - T_{\mathrm{aus}}\right) \qquad 3.1$$

Zur Bestimmung der Wärmeströme werden die einzelnen Zustands- und Prozessgrößen aus obigen Gleichungen bestimmt und daraus die Wärmeströme berechnet. Dies gilt analog bei allen anderen Wärmetransportprozessen, bei der Druckluft und auch bei der Bestimmung der elektrischen Leistungen. Es handelt sich dementsprechend bei der Bestimmung von Energieströmen um indirekte Messverfahren. Energieströme werden nicht direkt gemessen (mit Ausnahme der Thermografie). Dies hat einen wesentlichen Vorteil, da man auf bestehende Messverfahren zurückgreifen kann. Es hat aber auch den Nachteil, dass man z. B. für die Bestimmung des von einem Kühlwasserstrom abgeführten Wärmestroms gemäß Gleichung 3.1 drei Messgrößen erfassen muss: 1. Massenstrom, 2. Eingangstemperatur und 3. Ausgangstemperatur. Daraus ergeben sich entsprechende Anforderungen an die Messgenauigkeit der einzelnen Messaufnehmer, um nicht über die Fehlerfortpflanzung zu ungenauen Ergebnissen zu kommen. Tabelle 3-1 gibt eine Übersicht zu den wichtigsten Energieströmen, ihre formelmäßige Basis und den zu bestimmenden Zustands- bzw. Prozessgrößen.

Tab. 3-1: Zusammenhang zwischen Energieströmen und zu erfassenden Zustands- und Prozessgrößen

Energiestrom	Formelmäßige Basis	Zustands- und Prozessgrößen	Bemerkung
Elektrische Leistung	$P = U\,I\cos\varphi$	$U(t)$, $I(t)$	In einem Messgerät integriert
Druckluft	$P_{DL} = \dot{V}\,p_{DL}$	$\dot{V}$, p_{DL}	Bei Normbedingungen
Hydraulik	$P_{Hy} = \dot{V}\,p_{Hy}$	$\dot{V}$, p_{Hy}	-
Wärme (Konvektion)	$\dot{q}_{kon} = \alpha_{kon}\,(T_{Wand} - T_{amb})$	T_{Wand}, T_{amb}	α aus Tabellen bzw. Nebenrechnungen
Wärme (Durchgang)	$\dot{q} = U_{th}\,(T_i - T_a)$	T_i, T_a	U_{th} aus Tabellen bzw. Nebenrechnungen
Wärme (Strahlung)	$\dot{q}_{rad,12} = \sigma_{12}\,(T_1^4 - T_2^4)$	T_1, T_2	Emissionskoeffizienten in σ_{12} aus Kalibriermessungen
Wärme (Enthalpiestrom)	$\dot{Q}_h = \dot{m}\,c\,(T_{ein} - T_{aus})$	$\dot{m}$, T_{ein}, T_{aus}	Wärmekapazitäten aus Tabellen
Wärme (Verbrennung)	$\dot{Q} = \eta_{WE}\,\dot{m}_{Brennstoff}\,\Delta h_{u,Brennstoff}$	$\dot{m}_{Brennstoff}$	Verbrennungsenthalpie aus Tabellen
Wärme (Phasenübergang)	$\dot{Q}_{12,rev} = \dot{m}\,r_D$	$\dot{m}$	Enthalpien für Phasenübergang aus Tabellen

Betrachtet man die zu erfassenden Zustands- und Prozessgrößen (ohne Strom), so reduziert sich der Umfang auf die Bestimmung von Temperaturen, Drücken und Durchflüssen in unterschiedlichen Aggregatzuständen. Auch die Bestimmung der elektrischen Leistung basiert auf der Messung der elektrischen Basisgrößen Strom und Spannung, wobei dies in der Praxis in einem Gerät integriert ist, welches Wirk- und Blindleistung bzw. cos φ ausgibt.

Insofern können wir uns im Folgenden auf die geeignete Messtechnik für Temperaturen, Drücke und Durchflüsse (Volumen- und Massenströme) konzentrieren. Dabei werden nur Messverfahren behandelt, die elektrische Ausgangssignale liefern. Das gute alte Thermometer für das Küchenfenster auf Basis der Volumenausdehnung einer Flüssigkeit gehört also nicht dazu.

3.1.1 Temperaturmessung

Die heute gebräuchlichsten Temperaturskalen sind die Kelvin-Skala und die Celsius-Skala. Die Kelvin-Skala ist die SI-Einheit (internationales Einheitensystem). Sie wird hauptsächlich im wissenschaftlichen Bereich verwendet. Der Beginn der Kelvinskala liegt beim absoluten Nullpunkt (0 K). Der Fixpunkt ist der Tripelpunkt des Wassers: 273.16 K oder 0.01 K höher als der Schmelzpunkt von Eis bei Normaldruck. Unabhängig vom Messverfahren sind folgende Punkte bei der Temperaturmessung zu beachten:

1. Bei kontaktierenden Sensoren muss der Sensor die zu messende Temperatur annehmen (Berührthermometer messen meist nur ihre eigene Temperatur).
2. Die Herstellung des thermodynamischen Gleichgewichts erfordert einen Energieaustausch und beansprucht hierfür Zeit (Zeitkonstante!). Damit ist festgelegt, wann der Sensor die richtige Temperatur anzeigt bzw. welche Messabweichung zu erwarten ist.
3. Sofern die Wärmekapazität des Sensors gegenüber der des Messobjektes nicht vernachlässigt werden darf, kann der Sensor dessen Temperatur auch verändern.
4. Die Sensoren führen i. d. R. über ihre Zuleitungen Wärmeenergie nach außen ab und verändern so die Temperatur des Messobjektes.

Tab. 3-2: Typische Messbereiche in der Praxis und deren Messunsicherheiten

Anwendung	Temperaturbereich in °C	Messunsicherheit in K
Stahlguss	1.400 – 1.700	1 – 5
Stahlvergütung	400 – 800	1 – 3
Kraftwerke	550 – 600	1
Kernkraftwerke	250 – 350	0,1 – 0,25
Chem. Reaktoren	200 – 350	0,3 – 1
Chemiefaser	200 – 250	0,3 – 0,5
Zuckerproduktion	100 – 125	0,1
Bioreaktoren	35 – 45	0,1
Heizung / Lüftung	-30 – 120	0,5
Wärmemengenmessung	30 – 150	0,1 – 0,5
Kühltruhen	-30 – 0	0,5
Medizin	35 – 42	0,1

Mit welcher Genauigkeit gemessen werden muss, hängt von der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Erfahrungsgemäß neigt der Ingenieur dazu, Aufgaben so genau wie möglich und nicht so genau wie nötig umzusetzen. In der Messtechnik rächt sich dies sehr schnell über extrem ansteigende Kosten.

In der Temperaturmessung haben sich im Wesentlichen zwei Typen von Sensoren durchgesetzt: Widerstandsthermometer und Thermoelemente.

Widerstandsthermometer

Bei Widerstandsthermometern wird die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands eines Leiters oder Halbleiters von der Temperatur genutzt. Bevorzugt kommen metallische Widerstände zum Einsatz, deren Widerstand gut reproduzierbar mit der Temperatur ansteigt (insbesondere Platin und Nickel). Mit entsprechendem Aufwand lassen sich Temperaturen mit einer relativen Unsicherheit von nur 10^{-4} K bestimmen. Aufgrund der sehr guten Linearität über einen großen Temperaturbereich (-220 °C bis 850 °C) hat sich vor allem Platin als Material durchgesetzt. Entsprechend den Widerstandswerten gibt es PT100 (100 Ω bei 0 °C) bis PT 9.000 (9.000 Ω bei 0 °C), wobei PT100 der am meisten gebräuchliche Typ ist. Die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur kann man beschreiben durch:

$$R(\vartheta) = R_0\,(1 + \propto \vartheta + \beta\vartheta^2 + \cdots) \qquad \textbf{3.2}$$

α und β sind der lineare bzw. quadratische thermische Widerstandskoeffizient. R_0 ist der Widerstand bei einer Bezugstemperatur, z. B. bei ϑ_0 = 0 °C. In der Regel genügt es, in der Nähe der Bezugstemperatur von einer linearen Näherung auszugehen:

$$R(\vartheta) = R_0\,(1 + \alpha'\vartheta) \qquad \textbf{3.2a}$$

α´ ist der mittlere Temperaturbeiwert, der die mittlere Widerstandsänderung im Bereich von 0 °C bis 100 °C angibt:

$$\alpha' = \frac{R(\vartheta{=}100°C) - R(\vartheta{=}0°C)}{R(\vartheta{=}0°C)\ 100°C} \qquad \textbf{3.3}$$

Tabelle 3-3 zeigt die Temperaturbeiwerte einiger Metalle und ihre Anwendungsbereiche für Widerstandsthermometer.

Tab 3-3: Temperaturbeiwerte häufig verwendeter Metalle

Material	Temperaturbereich in °C	α'
Nickel	-60 – 150	$6{,}17 \cdot 10^{-3}\ (°C)^{-1}$
Kupfer	-50 – 150	$4{,}27 \cdot 10^{-3}\ (°C)^{-1}$
Platin	-220 – 850	$3{,}85 \cdot 10^{-3}\ (°C)^{-1}$

Beim Einsatz von Widerstandsthermometern ist darauf zu achten, dass der Messstrom den Widerstand nicht nennenswert erwärmt. Bei den handelsüblichen metallischen 100-Ohm-Widerstandsthermometern sollte z. B. der Messstrom 10 mA nicht überschreiten. Die Wärmekapazität des Messobjektes und eine ggfs. schlechte thermische Ankopplung sind bei der Dimensionierung des Messstromes zu berücksichtigen!

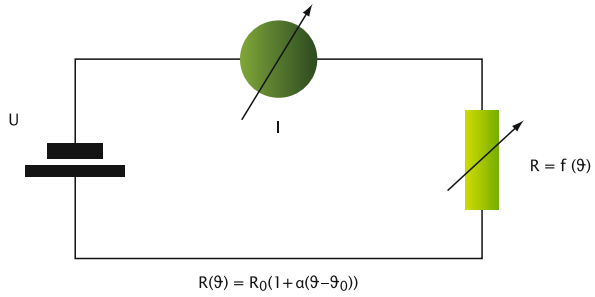

Abb. 3-5: Einfache Messschaltung für einen PT100 Temperaturfühler

Je nach Ausführung sind Widerstandsthermometer zwischen -200 °C und +850 °C einsetzbar. Bei den Messungen sind die Messwiderstände bzw. die Schutzrohre den Temperaturen direkt ausgesetzt. Die Ausführung der Messwiderstände und die Bauart des Schutzrohres entscheiden im Wesentlichen über Lebensdauer und Stabilität der Messung. Dies sollte beim Kauf unbedingt beachtet werden.

Widerstandsthermometer für industrielle Anwendungen bestehen fast immer aus Messwiderstand, Messeinsatz sowie Armatur (Kopf mit Schutzrohr). In dem Messeinsatz, der in ein Schutzrohr eingebracht ist, befinden sich je nach Ausführung ein oder zwei Messwiderstände.

Der Kopf enthält in der Regel auch den Anschlussblock mit den Klemmen zum Anschluss der weiterführenden Leitungen (Kupfer).

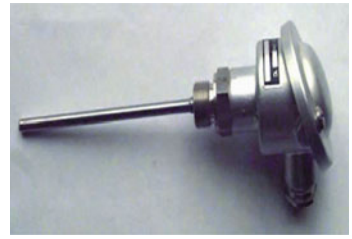

Abb. 3-6: Aufbau eines industriellen PT100 Temperaturfühlers

Die Ausführung des Messwiderstandes kann als Dünnschichtsensor, drahtgewickelter Keramikwiderstand oder als drahtgewickelter Glaswiderstand ausgeführt werden. Unabhängig von der Ausführungsart verfolgen alle Typen das Ziel, den Nennwiderstand mit möglichst wenig Material zu realisieren. Das spart teures Material (Platin) und verringert die Trägheit aufgrund der Verringerung der Wärmekapazität.

Temperaturfühler gibt es (wie andere Messaufnehmer auch) mit Zwei-, Drei- oder Vierleiteranschluss. Bei der *Zweileiterschaltung* erfolgt die Verbindung zwischen Auswerteelektronik und Messwiderstand mit einer zweiadrigen Leitung, d. h. Stromversorgung und Messsignal gehen über die gleichen Kabel. Der elektrische Widerstand der Leitung addiert sich zum Widerstand des Messfühlers, was von der Elektronik als höhere Temperatur interpretiert würde. Diesen Fehler kann man dadurch korrigieren, dass bei Inbetriebnahme der Leitungswiderstand ermittelt wird und die Auswerteelektronik diesen Widerstand „abzieht". Eine Veränderung des Leitungswiderstands aufgrund von Temperaturänderungen der Umgebung kann jedoch nicht korrigiert werden. In Produktionsbereichen mit stark schwankenden Temperaturen ist diese Anschlussart daher nicht zu empfehlen.

Bei der *Vierleiterschaltung* sind die Stromversorgung mit einem Konstantstrom und die Messleitungen für den Spannungsabfall getrennt geführt und entkoppelt. Der Leitungswiderstand spielt deshalb keine Rolle mehr. Diesen Vorteil „erkauft" man sich allerdings mit doppelt so vielen Leitungen.

Die *Dreileiterschaltung* stellt den Kompromiss dar. Dabei wird der Messwiderstand auf einer Seite mit nur einer Leitung, auf der anderen mit zwei Leitungen angeschlossen. Mit Hilfe der angebrachten dritten Leitung als Fühlerleitung kann nun der (halbe) Leitungswiderstand gemessen und dann kompensiert werden. Hierzu müssen jedoch die beiden stromführenden Leitungswiderstände gleich sein, wozu Leitungsquerschnitt und Länge identisch sein müssen. Der Vorteil gegenüber der Zweileiterschaltung besteht darin, dass lange Anschlussleitungen benutzt werden können, ohne das Messergebnis durch den Leitungswiderstand zu verfälschen. Der Vorteil gegenüber der Vierleiterschaltung ist der geringere Kabelverbrauch.

Widerstandssensoren werden in Genauigkeitsklassen eingeteilt [Tränkler 1996, S. 228]. Für Platinsensoren gibt es eine Unterteilung in Klasse A und B, die für höhere Genauigkeiten noch weiter spezifiziert werden können (z. B. 1/3 B):

Klasse A: $$d\vartheta = \pm\,(0{,}15\,°C + 0{,}002\,\vartheta)$$

Klasse B: $$d\vartheta = \pm\,(0{,}30\,°C + 0{,}005\,\vartheta)$$

1/3 Klasse B: $$d\vartheta = \pm\,\frac{1}{3}\cdot(0{,}30\,°C + 0{,}005\,\vartheta)$$

Widerstandsensoren zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Einsatzfähigkeit in hohen Temperaturbereichen
- Vibrationsfestigkeit
- Langzeitstabilität
- hohe Robustheit
- hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von Messungen
- längere Ansprechzeiten als Thermoelemente

Thermoelement

Zwischen zwei metallischen Leitern unterschiedlichen Materials fließt ein Strom. Dieser Effekt wird zur Temperaturbestimmung mittels eines Thermoelementes genutzt. Dabei ist die Temperaturdifferenz zwischen den beiden bestehenden Verbindungsstellen der Leiter proportional zur gemessenen Stromstärke, was auch unter dem Namen „thermoelektrischer Seebeck-Effekt" bekannt ist. An einem an die Verbindungsstelle angeschlossenen Spannungsmessgerät kann die Thermospannung U_T (mV) abgelesen werden, wonach es anschließend möglich ist, unter Zuhilfenahme von Kalibrierkurven auf die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ zu schließen. Eine externe Stromversorgung wird nicht benötigt. In nachfolgender Abbildung ist der Aufbau eines Thermoelementes vereinfacht dargestellt:

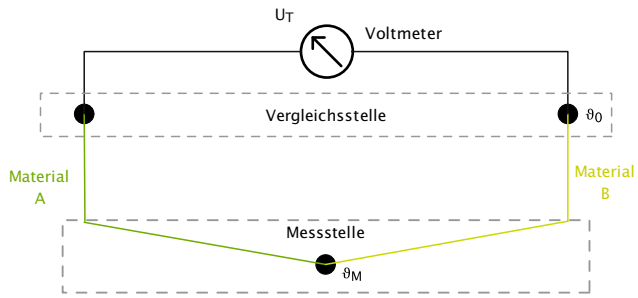

Abb. 3-7: Prinzipieller Aufbau eines Thermoelementes, angelehnt an [Parthier 2004, S. 60]

Somit muss eine der Temperaturen ($\Delta\vartheta_M$, ϑ_0) bekannt sein, um auf die andere schließen zu können. Häufig wird (vor allem im Labor) als Vergleichstemperatur der Schmelzpunkt von Wasser (0 °C = 273,15 K) gewählt. Bei industriellen Messgeräten ist entweder am Übergang von den Thermoelementmaterialien auf Kupferkabel eine Temperaturmessung integriert (PT100), mit der die Referenztemperatur bestimmt wird, oder es findet eine direkte elektrische Kompensation mit einer Brückenschaltung und einem temperaturabhängigen Widerstand statt.

Der Zusammenhang zwischen der zu messenden Thermospannung U_T und den Temperaturen an Mess- und Vergleichsstelle wird durch einen Faktor k_{AB} ermöglicht.

$$U_\mathrm{T} = k_\mathrm{AB} \cdot (\vartheta_\mathrm{m} - \vartheta_0) \qquad \textbf{3.4}$$

Die Thermopaare sind genormt und werden zur Abkürzung mit einem Großbuchstaben angegeben, zum Beispiel Eisen-Konstantan (Fe-Konst, Buchstabe: J), Kupfer-Konstantan (Cu-Konst, T) oder NiCr-CuNi, E). Als Standard-Thermoelement hat sich jedoch Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium (NiCr-NiAl, K) wegen vergleichsweise hoher Thermospannung bei guter Linearität für Temperaturen bis 1.200 °C durchgesetzt. Die Unsicherheit dieses Thermopaares beträgt bei vielen Fabrikaten 1,5 K im Bereich von -40 °C bis 375 °C, bei höheren Betriebstemperaturen ist sie mit ± 0,004 · |ϑ| angegeben [Hoffmann 2002, S. 132 f.; Nitsche Brunn 2006, S. 129].

Thermoelemente zeichnen sich durch geringe Kosten und sehr schnelles Ansprechverhalten aus. Allerdings ist die absolute Messunsicherheit (± 2,5 K) je nach Stoffpaar deutlich höher als bei Widerstandsthermometern. Dieser Nachteil kann allerdings durch Nachkalibrieren weitestgehend kompensiert werden, da eine einmal vorhandene Abweichung konstant bleibt. Das Nachkalibrieren erfolgt in der Regel mit Hilfe eines Widerstandsthermometers (PT100) und wird in der Auswerteelektronik oder dem Messrechner hinterlegt. Insbesondere für die Installation von umfangreichen Monitoring-Systemen mit vielen Temperaturmessstellen oder bei hohen Anforderungen an die Ansprechzeiten sind Thermoelemente zu bevorzugen. Lediglich bei hohen Anforderungen an die Genauigkeit (< 0,2 K) und die Langzeitstabilität sind Widerstandsthermometer die bessere Wahl.

Thermografie

Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts (0 K) emittiert Wärmestrahlung (Infrarot: 780 nm bis 1 mm). Wenn ein Körper in etwa Umgebungstemperatur hat, so hat die Abstrahlung nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz bei einer Wellenlänge von etwa 10 µm ein Maximum. In der Nähe dieser Wellenlänge hat gleichzeitig die Atmosphäre ein geringes Absorptionsverhalten. Daher arbeiten Thermografie-Kameras in der Regel in diesem Wellenlängenbereich. Das Prinzip von Thermografie-Kameras basiert auf einem geeigneten Empfänger zur Messung dieser Wärmestrahlung. Zur Erläuterung des grundsätzlichen Funktionsprinzips dient Gleichung 2.75.

$$\dot{q}_\mathrm{rad,12} = \sigma\, \varepsilon_\mathrm{M} \left(T_M^4 - T_{sky}^4\right) \qquad \textbf{2.75}$$

Der Empfänger kann aktiv auf eine bestimmte Temperatur (T_{sky}) gekühlt werden, oder die Messung erfolgt bei einer definierten Temperatur nahe der Umgebungstemperatur, die z. B. mit Hilfe von Peltier-Elementen geregelt wird. Im einfachsten Fall wird lediglich die aktuelle Umgebungstemperatur als Bezugsgröße gemessen, was jedoch zu Lasten der Genauigkeit geht. Je nach Ausführung kommen unterschiedliche Messprinzipien für den Empfänger zum Einsatz. Dies können entweder thermische Detektoren sein, welche die Strahlung absorbieren, oder Quantendetektoren, die auf Basis des Fotoeffektes arbeiten. Allen gemein ist die Bestimmung der empfangenen Wärmestrahlung $\dot{q}_{rad,12}$.

Bei gleichzeitiger Kenntnis der Empfängertemperatur (T_{sky}) lässt sich aus Gleichung 2.75 die Temperatur des betrachteten Körpers (genauer: die Oberflächentemperatur des Körpers) berechnen zu:

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{\dot{q}_{rad,12}}{\sigma\ \varepsilon_1} + T_{sky}^4} \qquad 3.5$$

Allerdings setzt dies die Kenntnis des Emissionskoeffizienten ε_1 voraus. Dies ist der Schwachpunkt der Thermografie, da bei Vermessung unbekannter Objekte die jeweiligen Emissionsgrade nicht bekannt sind.

Der Emissionsgrad ε kennzeichnet das Verhältnis der bei einer Temperatur T von einer Oberfläche emittierten Strahlung $\dot{q}(T)$ zur Strahlung $\dot{q}s(T)$, die ein schwarzer Strahler mit der gleichen Temperatur aussenden würde. Der Emissionsgrad nimmt immer Werte zwischen 0 und 1 an. Er hängt grundsätzlich von Temperatur, Wellenlänge und der Richtung der emittierten Strahlung ab. Trifft eine Strahlung auf einer Oberfläche auf, teilt sich die Strahlungsenergie in einen absorbierten (a), einen reflektierten (r) und einen transmittierten (t) Anteil auf (Abb. 3-8).

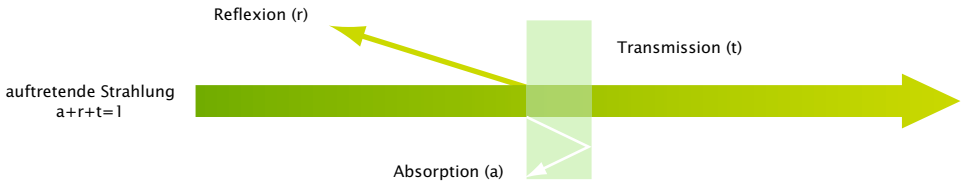

Abb. 3-8: Zusammenhang von Absorption, Reflexion und Transmission

Die Summe der Einzelanteile ergibt wieder den Energieinhalt der auftreffenden Strahlung. Dementsprechend berechnet sich die Summe der Koeffizienten zu:

$$a + r + t = 1 \qquad 3.6$$

Bei opaken Oberflächen (t = 0) vereinfacht sich die Beziehung zu:

$$a + r = 1 \tag{3.7}$$

Im Unterschied zum Emissionsgrad ist der Absorptionsgrad nicht von der Oberflächentemperatur abhängig, sondern von der Temperatur der Strahlungsquelle [Marek, R.; Nitsche, K. 2007, S. 246].

Bezugsgröße für alle realen Strahler ist der so genannte schwarze Strahler, der über das gesamte Wellenlängenspektrum einen Emissionsgrad von $\varepsilon = 1$ besitzt. Bei realen Flächen tritt in der Regel ein gewisses Maß an Reflexion auf ($r \neq 0$). Dabei muss zwischen grauen Strahlern und selektiven Strahlern unterschieden werden. Graue besitzen eine zum schwarzen Strahler ähnliche spektrale Emission über den gesamten Wellenlängenbereich. Verkürzt heißt dies, dass über alle Wellenlängen mit einem konstanten Emissionsgrad gerechnet werden kann. In der Praxis trifft dies für alle elektrischen Nichtleiter und Halbleiter zu.

Bei elektrischen Leitern (insbesondere bei blanken Metalloberflächen) ist jedoch Vorsicht geboten. Diese emittieren nur bei bestimmten Wellenlängen (dann ggf. auch mit $\varepsilon(\lambda_1) = 1$) und bei anderen Wellenlängen überhaupt nicht ($\varepsilon(\lambda_2) = 1$). Dies führt bei der Thermografie zu großen Messfehlern, da diese letztlich auf der Basis eines grauen Strahlers arbeiten. Erschwerend kommt hinzu, dass sich in den blanken Oberflächen andere Objekte in der Umgebung spiegeln und diese das eigentliche Signal überlagern. Daher müssen blanke Oberflächen vor der Untersuchung manipuliert werden (z. B. durch Schwärzen), um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten (was allerdings nicht immer möglich ist). Dies gilt in ähnlichem Maße für Glas.

Zwischen Absorptionsgrad und Emissionsgrad besteht für schwarze und graue Strahler nach dem Kirchhoff'schen Gesetz [Kirchhoff 1859] bei nicht zu großen Unterschieden in den Temperaturen von Empfänger und Sender (Produktionshalle) folgender Zusammenhang:

$$\varepsilon(T) = a(T) \tag{3.8}$$

Dies vereinfacht die Erstellung von Energiebilanzen von Oberflächen erheblich.

Ein weiterer störender Effekt stellt ggf. die umgebende Atmosphäre dar. Auch Gase und Dämpfe absorbieren und emittieren Strahlung, dies allerdings selektiv (also bei bestimmten Wellenlängen). Insofern ähneln sie den blanken Metalloberflächen. Je mehr absorbierende Moleküle sich im Strahlengang zwischen Kamera und Messobjekt befinden desto größer ist der Einfluss. Insbesondere Wasserdampf hat ein hohes Absorptionsvermögen (er hat den größten Anteil am Treibhauseffekt). Allerdings wirkt sich dieser Effekt erst bei sehr großen Distanzen aus. Für Messungen in der Produktion oder die Betrachtung von Außenfassaden ist dies irrelevant.

Zurückkommend auf die Thermografie muss theoretisch vor jeder Messung der (integrale) Emissionsgrad der Oberfläche (bei Häusern: aller Oberflächen) bestimmt werden. Zunächst wird die Oberflächentemperatur gemessen (z. B. Thermoelement) und anschließend der Emissionsgrad an der Kamera so eingestellt, dass die angezeigte Temperatur mit der gemessenen übereinstimmt. Hier stellt der Anwender zu Recht die Frage, welchen Vorteil die Thermografie bieten soll, wenn vorher zur Kalibrierung ohnehin die zu messenden Temperaturen mit anderen Verfahren bestimmt werden müssen. Dieses Vorgehen ergibt nur dann Sinn, wenn an definierten Objekten (z. B. Schaltschränken oder Maschinenoberflächen) zeitliche Veränderungen der Temperaturen erfasst werden sollen.

Eine andere Vorgehensweise ist die stellenweise Wandlung der zu betrachtenden Oberflächen in schwarze Strahler. Dies erfolgt entweder durch die Markierung von ausgewählten Stellen mit schwarzer (nicht reflektierender) Farbe oder durch das Bohren eines Loches. An dieser Stelle ist dann $\varepsilon = 1$. Die Temperatur kann nun abgelesen und der Emissionsgrad für die restliche (nicht lackierte) Fläche so eingestellt werden, dass die gleiche Temperatur angezeigt wird. Allerdings ist auch dieses Vorgehen mühsam.

Für eine erste Messung hilft uns jedoch die Natur. Fast alle nichtmetallischen Oberflächen besitzen Emissionsgrade zwischen 0,8 und 0,95 [VDI Wärmeatlas 2006]. Lediglich bei stark reflektierenden und Metalloberflächen ist, wie gesagt, Vorsicht geboten. In allen anderen Fällen können über eine erste Einstellung mit $\varepsilon = 0{,}9$ sehr brauchbare Ergebnisse erzielt werden. Daher können auch erste Untersuchungen von Hausfassaden oder auch lackierten Maschinen- und Schaltschrankoberflächen ohne aufwändige Kalibrierung erfolgen. Abbildung 3-9 zeigt eine solche Aufnahme für einen Sterilisator von Infusionsbehältern.

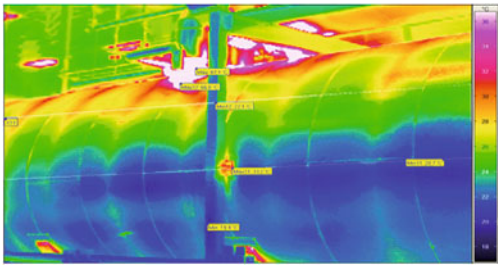

Abb. 3-9: Thermografie-Aufnahme eines Sterilisators für Infusionsbehälter

Abb. 3-10: Thermografie-Kamera

Tragbare Thermografie-Kameras kosten heute je nach Ausführung zwischen € 3.000 und € 30.000, stationäre Systeme mit Kühlung auch deutlich mehr. Für Untersuchungen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion genügen einfache Systeme (siehe Abb. 3-10).

Thermografie-Kameras liefern wertvolle Informationen über Wärmequellen in der Produktion und mit den Temperaturprofilen der Oberflächen eine wichtige Basis, um die Konvektions- und Strahlungsabgabe von Maschinen und Anlagen zu berechnen. Außerdem ist dann auch ein Blick auf die Außenfassade möglich. Wir können eine solche Anschaffung nur empfehlen. Neben den nackten Informationen schärft eine Thermografie-Kamera den Sinn für Wärmeströme.

3.1.2 Druckmessung

Der Druck ist nach der Temperatur für verfahrenstechnische Prozesse die wichtigste Größe zur Bestimmung des Systemzustandes. Bei einem über der Fläche A konstanten Druck gilt:

$$p = \frac{F}{A} \qquad 3.9$$

Die SI-Einheit für den Druck ist das Pascal (Pa), wobei 1 Pa = 1 N/m² entspricht. Die große praktische Bedeutung der Größe Druck spiegelt sich in der Vielzahl von abgeleiteten und zum Teil veralteten Einheiten wider. Ein Überblick findet sich in Tabelle 3-4.

Tab. 3-4: Umrechnungstabelle verschiedener Druckeinheiten

	SI-Einheiten			Technische Einheiten		
	in bar	in mbar	in Pa	in mmHg	in kp/cm²	in atm
1 bar	1	10^3	10^5	750,064	1,01972	0,986923
1 mbar	10^{-3}	1	100	$750{,}064 \cdot 10^{-3}$	$1{,}01972 \cdot 10^{-3}$	$0{,}986923 \cdot 10^{-3}$
1 Pa	10^{-5}	0,01	1	$7{,}50064 \cdot 10^{-3}$	$10{,}1972 \cdot 10^{-6}$	$9{,}86923 \cdot 10^{-6}$
1 mmHg	$1{,}33322 \cdot 10^{-3}$	1,33322	133,322	1	$1{,}35951 \cdot 10^{-3}$	$1{,}31579 \cdot 10^{-3}$
1 kp/cm²	0,980665	$0{,}980665 \cdot 10^3$	$98{,}0665 \cdot 10^3$	735,561	1	0,967841
1 atm	1,01325	$1{,}01325 \cdot 10^3$	$1{,}01325 \cdot 10^5$	760	1,03323	1

Aus der Definition von p wird die Analogie zur mechanischen Größe Kraft deutlich. Es ist also naheliegend, die Druckmessung auf die Messung einer Kraft zurückzuführen. Dabei wird zwischen folgenden Druckpotenzialen unterschieden:

Absolutdruck: Der Druck wird gegenüber dem Vakuum, also $p_{abs} = 0$ Pa, gemessen.
Überdruck/Unterdruck: Der Druck wird relativ zum Atmosphärendruck (ca. $p_{amb} = 10^5$ Pa) angegeben.
Differenzdruck: Die Ausgangsgröße des Sensors ist proportional zur Differenz von zwei Drücken.

Wichtig bei der Druckmessung ist, unabhängig vom Sensortyp, der richtige Anschluss. Wer die Bernoulli-Gleichung (2.82) aufmerksam betrachtet hat, wird feststellen, dass in strömenden Fluiden Energie in unterschiedlichen Formen enthalten ist.

$$\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + g\,z = konst. \qquad 2.82$$

Vernachlässigt man die potenzielle Energie *(g z)*, teilt sich die in Strömungen enthaltene Energie in kinetische Energie und Druckenergie auf. Wird die Strömung gestoppt (beispielsweise durch ein Absperrorgan), erhöht sich die Druckenergie entsprechend der Abnahme der kinetischen Energie bis zum Staudruck bei c = 0. (Wir vernachlässigen Verluste durch Reibung, rechnen also reversibel!). Den durch die kinetische Energie erzeugten Beitrag der Druckenergie nennt man kinetischen oder auch dynamischen Druck p_{dyn}. Dementsprechend wird der für die Druckenergie maßgebliche Anteil als statischer Druck p_{stat} bezeichnet. Der Gesamtdruck ergibt sich als Summe der beiden Anteile:

$$p_{ges} = p_{dyn} + p_{stat} \qquad 3.10$$

Dieser Umstand ist zum einen sehr wichtig für eine korrekte Messung des Drucks. Zum anderen eröffnet er eine sehr einfache Möglichkeit, über Druckdifferenzen Strömungsgeschwindigkeiten und gemäß der Konti-Gleichung (2.84) bei gegebenen Querschnitten Volumenströme zu bestimmen.

Bei der Druckmessung in strömenden Medien können deshalb abhängig von der Anordnung der Anschlussstutzen drei Druckarten gemessen werden: der statische Druck, der dynamische Druck und der Gesamtdruck.

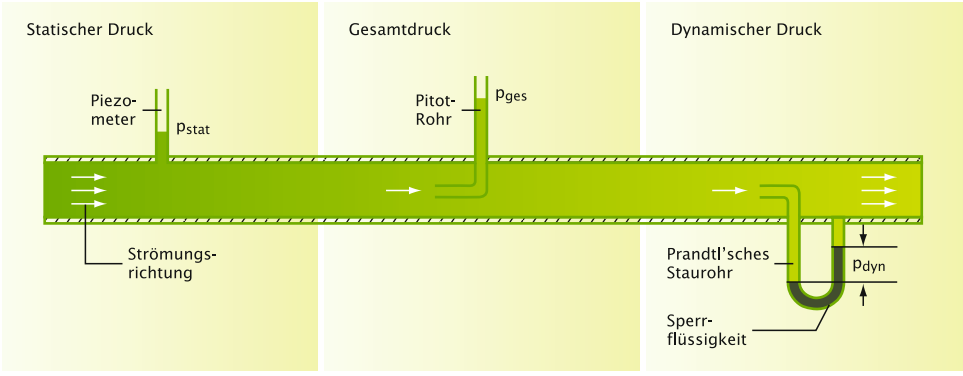

Abb. 3-11: Messung unterschiedlicher Drücke in Strömungen

Liegt die Messstelle senkrecht zur Strömungsrichtung, wird nur der *statische Druck* gemessen. Diese Messanordnung nennt man *Piezometer*. Befindet sich die Messstelle in Strömungsrichtung, wird der *Gesamtdruck* gemessen, der sich aus dem dynamischen und dem statischen Druck zusammensetzt. Das Messrohr nennt sich in diesem Fall *Pitot-Rohr*. Es ragt in das Rohr hinein und hat eine 90° Biegung, so dass die Öffnung parallel, aber entgegengesetzt zur Strömung gerichtet ist. Soll explizit der *dynamische Druck* gemessen werden, realisiert man mit dem *Prandtl'schen Staurohr* eine *Druckdifferenzmessung*. Es ist letztlich eine Kombination aus einem Pitot-Rohr und einem Piezometer. Selbstverständlich können statt einem U-Rohrmanometer, wie in Abbildung 3-11 dargestellt, auch andere Drucksensoren eingesetzt werden.

Ebenso wie bei der Temperaturmessung sind für den Einsatz in der Produktion Sensoren mit elektrischem Signalausgang zu bevorzugen. Die gängigsten Sensortypen sind:

1. Dehnungsmessstreifen (DMS)
2. piezoresistive
3. kapazitive und
4. induktive Aufnehmer

Dehnungsmessstreifen (DMS)

Unter Dehnungsmessstreifen (DMS) versteht man kleine metallische Leiterbahnen (mm-Bereich). Sie weisen eine mäanderförmige Struktur auf und werden in der Messtechnik vielfältig eingesetzt.

Durch Einwirken einer äußeren Kraft *F* vergrößert sich die Länge des Leiters und sein elektrischer Widerstand. Aufgrund der Mäanderform des Leiters wird eine Richtungssensitivität des DMS erreicht. Die Kräfte in y-Richtung verursachen nur vernachlässigbar kleine Widerstandsänderungen. Bei mehrachsigen Spannungszuständen werden mehrere DMS mit unterschiedlicher Ausrichtung aufgebracht. DMS werden eingesetzt zur Messung von Kräften, Dehnungen und Spannungen. Sie stellen das am häufigsten eingesetzte Messprinzip mit elektrischem Ausgangssignal dar.

Abb. 3-12: Prinzipieller Aufbau von Dehnungsmessstreifen

Durch Verschaltung dieser Widerstände in Form einer Wheatstonebrücke steht mit der Diagonalspannung der Brücke ein verwertbares Messsignal zur Verfügung. Es steht in eindeutigem Zusammenhang zur Verformung der Messmembran und zum aufgebrachten Druck. Aufgrund des Messprinzips sind DMS vergleichsweise unempfindlich gegen Überdruckbelastung.

Piezoresistive Aufnehmer

Setzt man einen Siliziumkristall einer Druckkraft aus, ändert sich sein spezifischer Widerstand. Beim piezoresistiven Verfahren werden keine metallischen DMS benutzt. Stattdessen wird der Widerstand von Widerstandspfaden, die in einen Siliziumkristall eindiffundiert sind, gemessen. Durch diese Technik sind kleinere Baugrößen und höhere Empfindlichkeiten möglich. Da unter der Empfindlichkeit die Änderung der Ausgangsgröße mit der Eingangsgröße, also Druck, verstanden wird, können auch kleine Drücke gemessen werden.

Der Druck wird nicht direkt, sondern über eine Füllflüssigkeit (bsp. Silikonöl) auf die Messmembran aufgetragen. Durch die Temperaturabhängigkeit dieser Übertragungsflüssigkeit wird das Verfahren durch Änderungen der Temperatur beeinflusst, welche kompensiert werden muss. Neben hohen Genauigkeiten und kleinen Baugrößen sind schnelle Reaktionszeiten und ein weiter Messbereich die Vorteile von piezoresistiven Drucksensoren.

Messumformer nach dem kapazitiven Prinzip

Für die Kapazität eines Kondensators gilt nach [Dorn Bader 1976, S. 21]:

$$C = \epsilon_{\mathrm{el,o}}\, \epsilon_{\mathrm{el,r}}\, \frac{A}{d} \qquad 3.11$$

Die Dielektrizitätszahl $\varepsilon_{el,r}$ ist der Zahlenfaktor, um den sich die Kapazität erhöht, wenn ein Dielektrikum in den Raum zwischen den Platten geschoben wird. Für Vakuum gilt $\varepsilon_{elr} = 1$. Für Luft bei 1 bar ist der Wert 1,00058, bei 100 bar dagegen 1,054 [Dorn Bader 1976, S. 19 ff]. ε_{elo} ist die elektrische Feldkonstante mit einem Wert von 8,85419 10^{-12} C/V m.

Es wird ersichtlich, dass die Kapazität durch die Variation des Dielektrikums, der Plattenfläche und des Abstands zwischen den Platten geändert werden kann. In der Praxis werden die beiden zuletzt genannten Möglichkeiten verwendet, um eine Umwandlung der Wegänderung eines Verformungskörpers in eine Veränderung der Kapazität zu realisieren. Über diese kann wiederum auf eine Druckänderung rückgerechnet werden.

Die in Abbildung 3-13 dargestellte Skizze zeigt die technische Ausführung eines Überdruckmesswerkes mit kapazitivem Abgriff. Der Sensor besteht aus zwei gewölbten Membranen mit Metallbeschichtungen. Sie bilden einen Messkondensator. Bei Veränderung des Messdrucks p1 verändert sich aufgrund der elastischen Durchbiegung der Membranen auch die Kapazität C. Sie bilden einen Messkondensator. Entspricht der Druck p_2 dem Atmosphärendruck (offener Anschlussstutzen), so handelt es sich um eine Überdruckmessung. Wird stattdessen ein zweiter veränderlicher Druck aufgeschaltet, kann eine Differenzdruckmessung erfolgen. Die Auswertung der Änderungen in der Kapazität wird üblicherweise durch Wechselstrommessbrücken vorgenommen und durch Kalibriermessungen einem Druck bzw. einer Druckdifferenz zugeordnet.

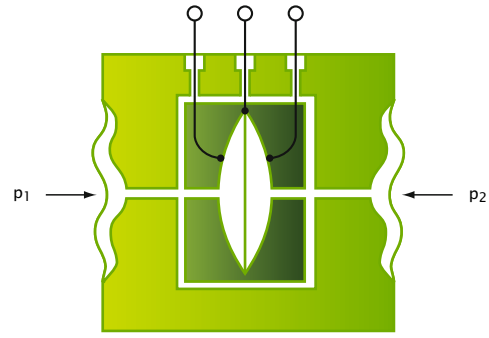

Abb. 3-13: Prinzipieller Aufbau eines kapazitiven Druckaufnehmers [Hesse, S.; Schnell, G. 2004, S. 175]

Die Verwendung dieser Methode ermöglicht eine hohe Genauigkeit und Empfindlichkeit der Messung bei kleinen Messwerten [Hesse Schnell 2004, S. 173 ff.]. Gleichzeitig sind die Aufnehmer überdruckempfindlich, sofern sie nicht durch zusätzliche Einrichtungen geschützt werden (Vorsicht beim Kauf!).

Induktive Druckmessverfahren

Statt einer kapazitiv ist auch eine induktiv induzierte Auslenkung der Membran möglich. Zwischen beiden Verfahren besteht kein wesentlicher Unterschied, was den Aufbau des Sensors selbst betrifft. Induktive Aufnehmer nutzen das Prinzip, dass sich die Induktivität einer Spule durch Einbringen oder Entfernen von Eisen im Kern ändert. Verändert sich die Eisenmenge im Kern, ändert sich auch die in der Sekundärspule induzierte Spannung (Differential-Transformator).

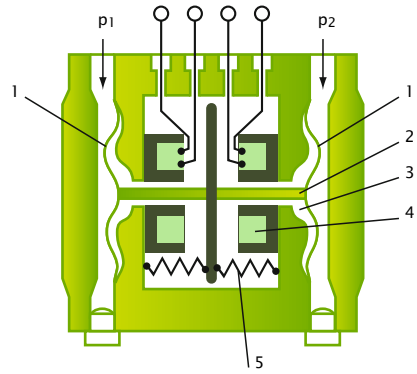

Abb. 3-14: Prinzipieller Aufbau eines induktiven Druckaufnehmers

Die Membran (1) hat die Aufgabe, den Sensor vom Prozess zu trennen und den Druck in die mechanische Größe Dehnung umzusetzen. Bei Auftreten einer Druckdifferenz $p_1 - p_2$ verschiebt die Membran die Mittelachse (2) in die Ölfüllung (3), woraus eine Änderung der Induktivität der Spulen (4) resultiert. Ausgewertet wird diese Information üblicherweise ebenfalls unter Verwendung von Wechselstrommessbrücken. Die in der Abbildung eingezeichneten Federn (5) dienen zur Einstellung des Messbereiches. Ebenso wie kapazitive Aufnehmer müssen induktive Aufnehmer vor Überdruck geschützt werden. Dies ist insbesondere bei Differenzdruckmessungen in hohen Druckbereichen wichtig, da instationäre Zustände kurzfristig zu hohen Absoluteruckunterschieden auf beiden Seiten führen können. Dem begegnet man durch das Vorschalten von Drosseln, die Druckspitzen puffern. Allerdings verringern sie die Ansprechzeit, ein Kompromiss ist also gefragt.

Einen Vergleich der unterschiedlichen Druckmessverfahren zeigt Tabelle 3-5.

Tab. 3-5: Vergleich gängiger Druckmessverfahren

Druckaufnehmer	Genauigkeit in %	Empfindlichkeit in mV/hPa	Messbereich in bar
DMS	0,1 – 1	1 – 10	1 – 3.500
Piezoresistiv	0,1 – 1	10 – 100	1 – 150
Kapazitiv	0,05 – 0,5	1 – 5	0,01 – 500
Induktiv	0,5 – 1	0,1 – 1	0,01 – 200

Induktive und kapazitive Verfahren eignen sich für niedrige Druckbereiche, wohingegen DMS-basierte Aufnehmer eher für hohe Druckbereiche geeignet sind.

Preislich große Unterschiede resultieren weniger aus den Messprinzipien, sondern aus den Genauigkeiten, der Überdruckempfindlichkeit und der Langzeitstabilität. Insofern ist die Wahl des geeigneten Sensors vom jeweiligen Einsatzzweck abhängig. Piezoresistive Sensoren stellen einen robusten Kompromiss dar, sofern die Drücke nicht zu hoch sind.

3.1.3 Durchflussmessung

Betrachtet man die Anzahl der möglichen und gängigen Messprinzipien, so nimmt die Variabilität von Temperatur- über Druck- bis zur Durchflussmessung deutlich zu. Es erfolgt daher eine klare Begrenzung auf die gängigen Verfahren mit elektrischem Signalausgang. Für Neugierige sei auf [Bonfig 2002] verwiesen.

Bei der Durchflussmessung muss prinzipiell zwischen einer Volumenstrom- und einer Massenstrommessung unterschieden werden. Dies ist insbesondere bei Gasen als kompressible Fluide wichtig, da hier die Dichte deutlich von Temperatur und Druck abhängt, also nicht einfach über die Multiplikation des Volumenstromes mit einer konstanten Dichte auf den Massenstrom umgerechnet werden kann. Für die Bestimmung von Energieströmen werden die Massenströme benötigt. Die wichtigsten Messverfahren sind:

1. Volumenzähler
2. Schwebekörper
3. Wirkdruckverfahren
4. Staudruckverfahren
5. Laminar-Flow-Elemente (LFE)
6. Magnetisch-induktiveVerfahren
7. Hitzdrahtanemometer
8. Wirbelstromverfahren
9. Coriolis-Sensoren
10. Ultraschall
11. Laserverfahren

Im Folgenden werden die Messprinzipien kurz erläutert. Ziel ist, die Vor- und Nachteile der Verfahren aufzeigen, um für die jeweiligen Aufgabenstellungen die richtige Wahl zu treffen. Auf diese Weise ist man auch den jeweiligen Firmenvertretern für Messgeräte nicht hilflos ausgeliefert.

Volumenzähler (Volumenstrom)

Volumenzähler basieren auf dem regelmäßigen Befüllen und Entleeren eines definierten Volumens. Dies kann über Kolben oder Kammern erfolgen. Über die Entleerfrequenz und das Volumen kann der Volumenstrom einfach berechnet werden. Das Verfahren entspricht der mechanischen Ausführung eines digitalen Messverfahrens. Die Größe des Volumens entspricht der Auflösung. Bekannte Messsysteme sind die Gasuhr oder der Wasserzähler im Haus. In der Regel besitzen diese Messverfahren keine elektrischen Signalausgänge und werden manuell abgelesen. Grundsätzlich können sie zwar mit elektrischen Messgebern nachgerüstet werden, für den Einsatz in Produktionssystemen sind sie jedoch auch dann nicht zu empfehlen. In [Bonfig 2002] werden unterschiedliche Volumenzähler umfassend beschrieben.

Schwebekörper (Volumenstrom)

Schwebekörperdurchflussmesser finden häufig im Labor Anwendung. In Produktionsanlagen dienen sie oftmals als redundante Durchflussanzeigen, d. h. man sieht auf einen Blick, ob etwas fließt oder nicht. In der VDI/VDE-Richtlinie 3513 finden sich umfangreiche Angaben zur Funktionsweise. Bei einem Schwebekörperdurchflussmesser wird ein Widerstandskörper von einem Medium von unten nach oben angeströmt. Entweder ist der Widerstandskörper in einem konischen Messrohr oder ein konischer Widerstandskörper ist in einer Messblende eingebaut. Durch die konische Bauweise ändert sich der Widerstandsbeiwert cW in Abhängigkeit von der Höhe des Widerstandskörpers.

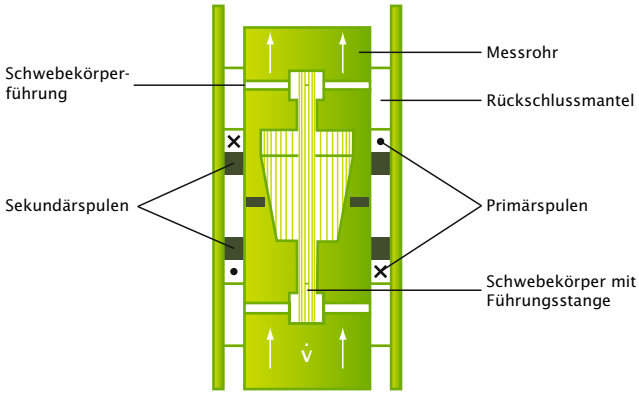

Abb. 3-15: Prinzip eines Schwebekörpers mit konischem Messkörper und elektrischer Abtastvorrichtung [Bonfig 2002, S. 90]

Da Auftriebskraft und Gewichtskraft bei gegebenem Aufbau immer konstant bleiben, ergibt sich ein Kräftegleichgewicht zwischen Auftrieb, Gewicht und der Kraft, welche die Strömung an dem Widerstandskörper ausübt.

$$V_K\, g\, (\rho_K - \rho_F) = c_W\, A_K\, \frac{\rho_F}{2}\, c^2 \qquad 3.12$$

Bei gegebenem Aufbau (Querschnittfläche des Widerstandskörpers A_K und Volumen V_K) und bekannten Dichten der Medien (ρ_K, ρ_F) ergibt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit v und dem c_W-Wert. Da sich der c_W-Wert aufgrund des konischen Aufbaus mit der Höhe h ändert, gibt es auch einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Höhe. Neben den Trägheitskräften greifen jedoch auch Reibungskräfte an dem Widerstandskörper an. Damit ist der c_W-Wert auch eine Funktion der Reynoldszahl Re [Bonfig 2002].

$$c_W = f(h, Re) \qquad 3.13$$

Diese Abhängigkeit ist nicht analytisch zu bestimmen. Daher werden für die Schwebekörperdurchflussmesser Kalibrierkurven erstellt, welche die Basis für die Anzeigen an den Messrohren sind.

Die Kalibrierung folgt den Angaben in [VDI-VDE-Richtlinie 3513] unter Zugrundelegung einer allgemeinen Durchflussgleichung.

$$\dot{V} = \frac{\alpha}{\rho_F\, D_K} \sqrt{g\, m_K\, \rho_F\, (1 - \frac{\rho_F}{\rho_K})} \qquad 3.14$$

Dabei ist D_K der größte Durchmesser des Widerstandskörpers mit der Masse m_K. Die Durchflusszahl α ist wiederum von weiteren Größen abhängig [Bonfig 2002, S. 90]. Diese wird jedoch aus den Kalibriermessungen der Hersteller ermittelt und gilt für Schwebekörperdurchflussmesser mit gleicher Nennweite, Geometrie und Dichte des Widerstandskörpers.

In der Regel werden Schwebekörperdurchflussmesser abgelesen. Sie können jedoch auch mit elektrischen Abtastvorrichtungen ausgestattet werden (siehe Abb. 3-15). Sie haben gegenüber alternativen Systemen den Vorteil, dass man den Durchfluss physisch sehen kann. Ein Nachteil besteht darin, dass die Messröhren entweder aus Glas oder Kunststoff gefertigt sind und eine gewisse Gefahr der Beschädigung im rauen Produktionsalltag besteht. Auch hohe Verschmutzungsgrade in den Medien führen zu Störungen. Zusammenfassend ist zu sagen, dass es für den kontinuierlichen Einsatz in Energiemonitoring-Systemen bessere Alternativen gibt.

Wirkdruckverfahren (Volumenstrom)

In Kapitel 2 wurden die Zusammenhänge von Druck und Durchfluss anhand der Bernoulli-Gleichung erläutert. Unter Voraussetzung einer reibungsfreien und inkompressiblen Strömung lautet die Bernoulli-Gleichung unter Vernachlässigung der potenziellen Energie:

$$p + \frac{\rho_F}{2} c_F^2 = konst. \qquad 3.15$$

Gleichzeitig gilt unter gleichen Voraussetzungen die Kontinuitätsgleichung:

$$A_1 c_{F,1} = A_2 c_{F,2} \qquad 3.16$$

Durch den Einbau einer Verjüngung ($A_2 < A_1$) in den Strömungsweg entsprechend Abbildung 3-16 wird die Geschwindigkeit erhöht, und der Druck fällt entsprechend ab. Setzt man nun Gleichung 3.16 in 3.15 ein und löst nach der Geschwindigkeit c_1 auf, ergibt sich:

$$c_{F,1} = \sqrt{\frac{2\,\Delta p}{\rho_F\left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1\right)}} \qquad 3.17$$

Damit ergibt sich der Massenstrom zu:

$$\dot{m} = \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2\,\Delta p\,\rho_F} \qquad 3.18$$

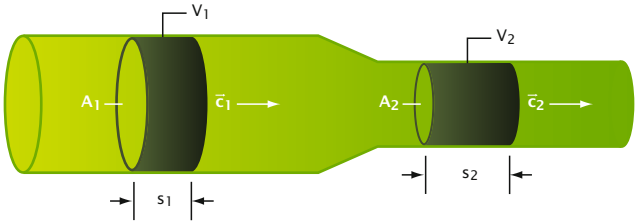

Abb. 3-16: Prinzip des Wirkdruckverfahrens

In der Realität ist der Massenstrom jedoch geringer, da Reibung vernachlässigt wurde. Bei Gasen verändert sich zudem die Dichte bei veränderlichem Druck (polytrop: $p\,v^n$ = konst.). In einer realen Strömung bildet sich zudem ein Strömungsprofil aus. In glatten runden Rohren ist das Profil in der Regel rotationssymmetrisch mit der größten Geschwindigkeit in der Mitte und der geringsten am Rand. Bei laminaren Strömungen ist das Verhältnis von maximaler zu mittlerer Geschwindigkeit 2, bei turbulenten Strömungen zwischen 1 und 1,3 (siehe Abb. 3-17).

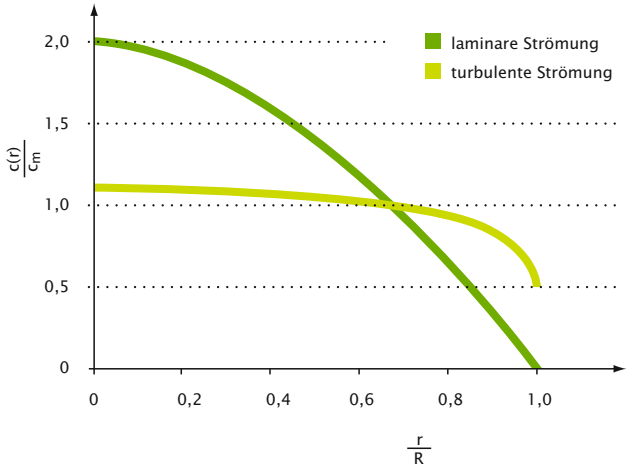

Abb. 3-17: Geschwindigkeitsprofile in Rohrströmungen

Da die Druckmessstutzen am Rand (r = R) angebracht sind, ergeben sich erhebliche Fehler in der Durchflussbestimmung. Um diese Problematik zu umgehen, werden unterschiedliche Drosselgeräte eingesetzt. Dies sind vor allem:

- Blenden
- Düsen
- Venturirohre

Allen gemein ist die Messung des Differenzdruckes vor und nach einer definierten Verjüngung des Strömungsweges. Die oben angeführten Einflussfaktoren wie Kompressibilität, Lage der Druckstutzen, Geschwindigkeitsprofil und Reibung werden in den empirischen Beiwerten α und ε zusammengefasst.

$$\dot{m} = \alpha\, \varepsilon\, \frac{\pi}{4}\, d_1^2 \sqrt{2\, \Delta p\, \rho_F} \qquad 3.19$$

Die Expansionszahl ist bei inkompressiblen Medien (Flüssigkeiten) ε = 1, bei Gasen nimmt sie Werte ε < 1 an. Die Durchflusszahl α hängt bei definiertem Aufbau nur von der Reynoldszahl ab. Nähere Beschreibungen finden sich für alle drei Bauarten in der DIN 1952.

Letztlich liefert der Hersteller auf Basis der obigen Grundlagen Kalibrierkurven für den Zusammenhang von gemessenem Differenzdruck und Volumenstrom. Allen Verfahren gemein ist der notwendige Einbau in die Strömungsführung. Abhängig vom Messverfahren bedarf es längerer Einlaufstrecken, was ggf. zu Platzproblemen führen kann. Insbesondere Blenden werden häufig für die Messung in Gasen verwendet.

Staudruckverfahren (Volumenstrom)

Staudruckverfahren zeichnen sich durch ihre einfache Bauweise und günstige Kosten aus. Das bekannteste Messgerät ist das so genannte Prandtl-Staurohr (siehe Kapitel 2). Es misst über zwei unterschiedliche Entnahmestellen gleichzeitig den Staudruck und den statischen Druck in einer Strömung. Hieraus kann wieder über die Bernoulli-Gleichung die Geschwindigkeit berechnet werden zu:

$$c_F = \sqrt{\frac{2}{\rho}\left(p_{stau} - p_{stat}\right)} \qquad 3.20$$

Der Staudruck ergibt sich durch vollständiges Abbremsen der Strömung im Messstutzen. Bei bekanntem Querschnitt errechnet sich der Volumenstrom ebenfalls aus der Konti-Gleichung. Entscheidend ist aufgrund des Strömungsprofils auch hier die richtige Entnahmestelle. Entweder müssen mehrere Messungen über den gesamten Strömungsquerschnitt erfolgen, oder man misst das Geschwindigkeitsmaximum in der Strömungsmitte und rechnet sich in Abhängigkeit von der Strömungsart (laminar oder turbulent) die mittlere Geschwindigkeit aus. Letzteres reicht zumindest für eine erste überschlägige Messung aus. Für eine dauerhafte Installation in Monitoringsystemen ist dies eher nicht zu empfehlen.

Laminar-Flow-Elemente (Volumenstrom)

Im Unterschied zu den Wirkdruckverfahren basiert die Durchflussmessung mit Laminar-Flow-Elementen (LFE) auf dem durch Reibung verursachten Druckverlust einer laminaren Strömung. Über ein Kräftegleichgewicht in einer laminaren Strömung und Integration über den Strömungsquerschnitt erhält man:

$$\dot{V} = \frac{A\, d^2}{32\, \eta\, l}\, \Delta p \qquad 3.21$$

Messgröße ist somit eine Druckdifferenz über eine definierte Länge l. Zudem hängt der Durchfluss über die dynamische Zähigkeit η vom fließenden Medium ab. Bedingung für die Funktionsfähigkeit ist das sichere Einstellen einer laminaren Strömung (Re < 2.300). Die Reynoldszahl ist definiert zu:

$$Re = \frac{c_F\, \rho\, d}{\eta} \qquad 3.22$$

Bei definiertem Medium kann die Reynoldszahl insbesondere durch den Durchmesser der strömungsführenden Leitung beeinflusst werden. Ein Laminar-Flow-Element unterteilt den Strömungsquerschnitt über Kapillare in viele kleine Einzelkanäle.

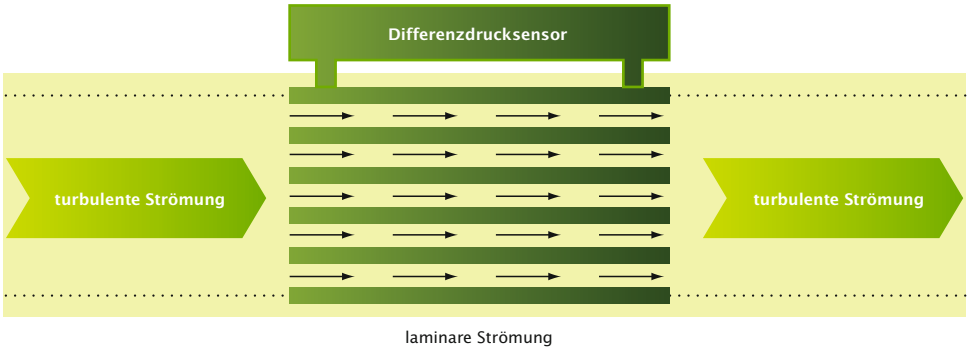

Abb. 3-18: Prinzipieller Aufbau Laminar Flow Element

Auf diese Weise wird die Reynoldszahl bei insgesamt gleich bleibendem Durchfluss abgesenkt. Zur Ausprägung der Laminarströmung bedarf es allerdings einer geraden Ein- und Auslaufstrecke, die durchaus jeweils 20–30 cm betragen kann. Wie bei allen Volumenstrommessverfahren müssen zur Umrechnung auf den Massenstrom (zur Erinnerung: Für Bestimmung von Energieströmen benötigen wir Massenströme!) parallel die Temperatur und der Druck bestimmt werden, um die Dichte bestimmen zu können. LFE werden überwiegend bei der Messung von Gasen eingesetzt. Ein großer Vorteil besteht darin, dass keinerlei „aktive" Teile (z. B. stromführend) mit der Strömung in Berührung kommen. Daher werden LFE häufig für die Durchflussmessung in brennbaren Gasen eingesetzt. Der Nachteil besteht im Druckverlust und den notwendigen Einlaufstrecken.

Magnetisch-induktive Verfahren (Volumenstrom)

In einem Leiter bzw. einem leitfähigen Medium, das sich in einem Magnetfeld B bewegt, wird eine bestimmte Spannung U induziert (Faraday'sches Induktionsgesetz). Diese Spannung ist proportional zum Abstand der Messelektroden D und zur Bewegungsgeschwindigkeit c_F des Fluids.

$$U = k\, B\, D\, c_F \qquad 3.23$$

In Gleichung 3.23 wurden bereits einige Vereinfachungen (rotationssymmetrisches Strömungsprofil, unendlich langes homogenes Magnetfeld) zu Grunde gelegt, die auch in den am Markt erhältlichen Bauformen umgesetzt werden. Bei magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten wird die induzierte Spannung entweder über zwei Messelektroden, die in leitendem Kontakt mit dem Messstoff stehen, oder berührungslos, kapazitiv abgegriffen. Ein elektronischer Messumformer verstärkt das Signal. Damit die induzierte Spannung nicht von der Rohrwand kurzgeschlossen wird, ist das Messrohr aus elektrisch isolierendem Material hergestellt oder innen mit einer Isolierung ausgekleidet [Krohne 2009].

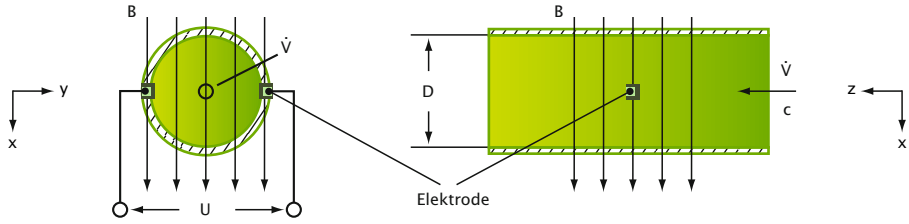

Abb. 3-19: Prinzip der magnetisch-induktiven Durchflussmessung [Bonfig 2002, S. 108]

Aufgrund des Messprinzips kann der MID nur bei Flüssigkeiten mit einer elektrischen Leitfähigkeit von mindestens 5 µS/cm eingesetzt werden. Destilliertes Wasser scheidet somit beispielsweise aus. Für Messungen in Kühl- oder Heizwassersystemen ist der MID jedoch sehr gut geeignet. Er zeichnet sich durch Robustheit, hohe Genauigkeit und ein gutes Preis/Leistungs-Verhältnis aus. Aus vielfältigen Erfahrungen können wir den MID sowohl für Einzelmessungen als auch für den dauerhaften Einsatz empfehlen.

Hitzdrahtanemometer (Massenstrom)

Beim Hitzdrahtanemometer wird ein elektrisch beheizter Draht aus einem hitzebeständigen und korrosionsfesten Material (Platin, Wolfram) in einen zu bestimmenden Gasmassenstrom eingebracht. Dieser kühlt den Draht in Abhängigkeit von Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Wärmekapazität und Dichte. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Verfahren: Beim Konstant-Strom-Anemometer (CCA) wird über eine Brückenschaltung der Heizstrom (oder die Span-

nung) des Drahtes konstant gehalten. Aufgrund der Wärmeabfuhr durch die Strömung verändert sich der Widerstand des Heizdrahtes. Diese Änderung kann z. B. über eine Brückenschaltung bestimmt werden und ist ein Maß für den Massenstrom (siehe Abb. 3-20). Beim Konstant-Temperaturverfahren wird die Temperatur T_{HD} und der Widerstand R_{HD} des Heizdrahtes konstant gehalten. Die hierfür notwendige Heizleistung ist ein Maß für den Massenstrom bzw. für die Strömungsgeschwindigkeit c_F bei gegebener Geometrie des Sensors.

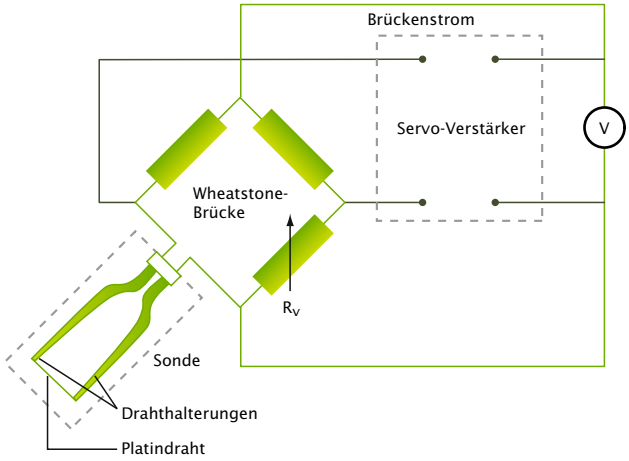

Abb. 3-20: Prinzip eines Hitzdrahtanemometers

Über die Wärmebilanz an einem querangeströmten zylindrischen Draht [VDI-Wärmeatlas 2006] kommt man zum King'schen Gesetz für inkompressible Strömungen:

$$\dot{Q} = P_{el} = I^2 R_{HD} = (T_{HD} - T_F)\,(a + b\,c_F)^n \qquad 3.24$$

Die zugeführte elektrische Leistung entspricht dem abgeführten Wärmestrom $\dot{Q}$. Die Konstanten a und b sowie der Exponent n sind abhängig vom Sensoraufbau und dem Fluid. n nimmt üblicherweise Werte zwischen 0,4 und 0,5 an. Für diese Parameter müssen entsprechende Kalibrierungen seitens der Hersteller vorgenommen werden.

Mit Hitzdrahtanemometern können sehr gut kleine und mittlere Geschwindigkeiten (bzw. Durchflüsse) bestimmt werden. Für sehr kleine und sehr große Geschwindigkeiten kommt das Verfahren nicht in Betracht. Entsprechend dem Sensoraufbau besteht eine Empfindlichkeit gegen Verschmutzung, da dies den Wärmeübergang am Heizdraht verändert. Das Ansprechverhalten bei schnellen Änderungen des Durchflusses ist aufgrund der geringen Wärmekapazität des Heizdrahtes sehr gut. Auch der Druckverlust ist, bedingt durch den Aufbau, gering, so dass sich das Verfahren gut als Basis für die Bestimmung von Gas- bzw. Luftdurchflüssen eignet, zumal es aufgrund des physikalischen Prinzips den Massenstrom bestimmt.

Wirbelstromverfahren (Volumenstrom)

Wirbelstromverfahren arbeiten nach dem Prinzip der Kármán'schen Wirbelstraße. Hinter einem angeströmten Staukörper bilden sich abwechselnd beidseitig Wirbel mit entgegengesetztem Drehsinn (siehe Abb. 3-21). Durch die Wirbel entsteht jeweils ein lokaler Unterdruck. Mit Hilfe von Druckaufnehmern (piezoresistiv oder kapazitiv) werden die Druckschwankungen erfasst. Die Frequenz der Wirbelablösung verhält sich proportional zum Volumendurchfluss [Strouhal 1978].

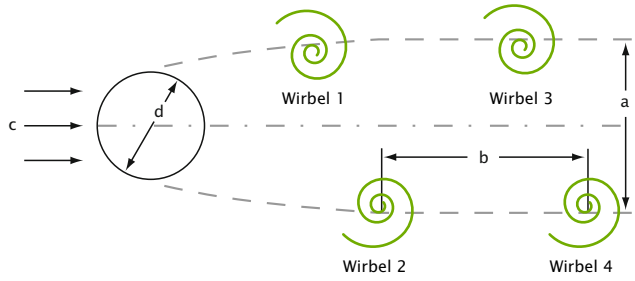

Abb. 3-21: Prinzip der Wirbelstrommessung mit einem zylindrischen Prallkörper (a/b = konst.) [Endress & Hauser 2009]

Das Messverfahren kann gleichermaßen für Gase, Dämpfe und auch Flüssigkeiten eingesetzt werden. Wirbelstromverfahren haben den Vorteil, dass sie keine Drift haben. Von daher sind regelmäßige Kalibrierungen zur Überprüfung des Nullpunktes lediglich in großen Abständen notwendig.

Coriolis-Sensoren (Massenstrom)

Die gyroskopische Durchflussmessung basiert auf der kontrollierten Erzeugung von Coriolis-kräften. Diese Kräfte treten in einem System immer dann auf, wenn sich gleichzeitig translatorische und rotatorische Bewegungen überlagern (z. B. auf der sich drehenden Erde). Die Größe der Corioliskraft hängt von der bewegten Masse m, deren Geschwindigkeit $\vec{c}_F$ im System und somit vom Massendurchfluss ab.

$$\vec{F}_{Co} = -2\, m\, (\vec{c}_F \times \vec{\omega}) \qquad 3.25$$

Coriolis-Sensoren, die dieses Prinzip zur Durchflussmessung nutzen, bestehen aus einem vom Massenfluss durchströmten u-förmigen Rohr, dessen freies Ende beispielsweise durch einen elektromagnetischen Wandler zu sinusförmigen Schwingungen angeregt wird, wodurch sich die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ ergibt. Ist kein Massedurchfluss $(\dot{m} = O)$ vorhanden, bleibt die Schwingungsform der Erregerschwingung erhalten. Fließt ein Medium mit der Geschwindigkeit $\vec{c}_F$ durch das schwingende Rohr, treten Coriolis-Kräfte $\vec{F}_{Co}$ auf, die als Kräftepaar am U-Rohr angreifen und auf diese Weise ein Drehmoment erzeugen. Dieses Moment verformt in

Abhängigkeit der Wirkungsrichtung der Corioliskraft periodisch das u-förmige Rohr um einen Winkel α, der ein direktes Maß für den Massedurchfluss ist. Dieses Verfahren der Durchflussmessung eignet sich insbesondere für die Dosierung kleinster und mittlerer Mengen bei Messunsicherheiten von ± 0,5 % vom Messwert. Die Schwingfrequenz kann 80 Hz bei Amplituden von ca. 1 mm betragen. Die Scheitelwerte der Verformungen, die durch die Corioliskraft erzeugt werden, liegen dann bei etwa 10 µm, bei einem mittleren Massedurchfluss [Hauptmann, Adler 2007].

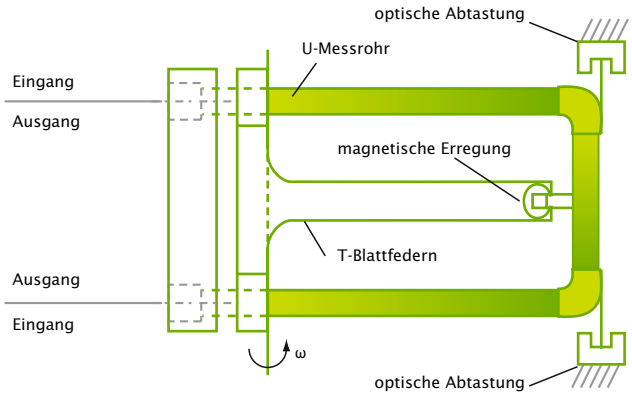

Abb. 3-22: Prinzip der Coriolismessung in U-Rohrausführung [Bonfig 2002, S. 217]

Neben den Bauformen mit U-Rohren gibt es auch Ausführungen mit Geradrohren. Das Grundprinzip bleibt jedoch unverändert. Coriolis-Sensoren haben den Vorteil, dass sie direkt den Massenstrom bestimmen. Sie können prinzipiell für Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe eingesetzt werden. Bei kleinen Gasdurchflüssen kommt das Verfahren an seine Grenzen, da die bewegte Masse zu klein wird, um messbare Auslenkungen durch die Corioliskräfte zu induzieren. Dies gilt gleichermaßen bei sehr kleinen Flüssigkeitsströmen. Trotz der geringen Auslenkungen sind Coriolis-Sensoren die genauesten Messverfahren, allerdings auch die teuersten. Insofern muss genau abgewogen werden, ob der finanzielle Aufwand wirklich gerechtfertigt ist.

Ultraschall (Volumenstrom)

Ultraschall wird bei der Anwendung von Laufzeitdifferenzverfahren eingesetzt. Bei einem ruhenden Fluid breitet sich ein eingebrachtes akustisches Signal mit der Schallgeschwindigkeit c_{Schall} aus. Bei einem strömenden Medium nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Strömungsrichtung zu, entgegen der Strömungsrichtung ab. Dementsprechend verändert sich die notwendige Zeit, die ein Schallsignal für die Überwindung einer definierten Strecke benötigt. Der große Vorteil von Ultraschallverfahren liegt darin, dass die Durchflussmessung durch die Rohrwand erfolgen kann, also kein aufwändiger Einbau notwendig ist. Allerdings müssen ggf. vorhandene Dämmungen vorher entfernt werden, damit eine gute Einkopplung des Schallsignals möglich wird. Aus diesem Grund eignen sich Ultraschallverfahren sehr gut für kurzzeitige

Messungen, beispielsweise im Zuge von Vorstudien. Das Verfahren eignet sich aufgrund der physikalischen Zusammenhänge vor allem für die Messung in Flüssigkeiten. Üblicherweise verwendet man einen Aufbau entsprechend Abbildung 3-23.

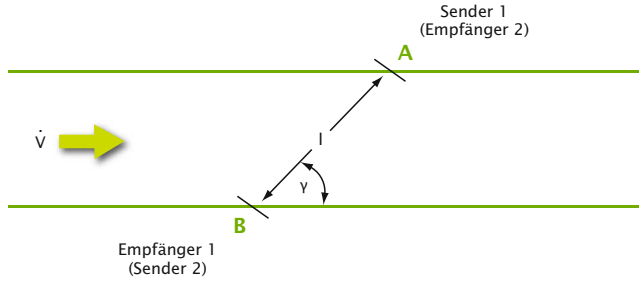

Abb. 3-23: Prinzipieller Aufbau der Durchflussmessung mittels Ultraschall

Die Ultraschallsignale werden von Sensoren ausgesendet, die auf der Rohrleitung installiert sind. Auf der jeweils schräg gegenüberliegenden Seite des Rohres (Winkel γ) werden diese Signale nach einer Zeit t_1 bzw. t_2 empfangen. Gegen Strömungsrichtung benötigt das Signal die Zeit

$$t_1 = \frac{l}{c_{\text{Schall}} - c_{\text{F}}} \quad \text{und in Strömungsrichtung} \quad t_2 = \frac{l}{c_{\text{Schall}} + c_{\text{F}}} \qquad \textbf{3.26/27}$$

Durch Subtraktion der beiden Gleichungen kann die Schallgeschwindigkeit eliminiert werden. Dies ist sehr vorteilhaft, da sich diese mit der Temperatur ändert und eine Korrektur in Abhängigkeit der aktuellen Fluidgeschwindigkeit notwendig wäre. Die mittlere Fluidgeschwindigkeit lässt sich aus der Laufzeitdifferenz der Ultraschallsignale bestimmen zu:

$$c_{\text{F,m}} = \frac{l}{\cos\gamma}\left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1}\right) \qquad \textbf{3.28}$$

Dies erfordert allerdings, wie in obiger Abbildung dargestellt, ein so genanntes Zweikanalsystem, welches auf beiden Seiten jeweils einen Empfänger und Sender besitzt.

In der praktischen Anwendung ist die störungsfreie Einkopplung der Schallsignale nicht immer einfach und erfordert gerade bei unebenen Oberflächen einiges Geschick. Die sorgfältige Auswahl einer geeigneten Messstelle erspart viel Ärger. Die Messgenauigkeit ist begrenzt, besser als 2 % vom Messwert ist nur mit großem Aufwand möglich. Für erste orientierende Messungen ist dies jedoch vollständig ausreichend.

Laserverfahren
Laserverfahren basieren auf der Streuung von Licht durch in der Strömung vorhandene Staubpartikel. Ein Laserstrahl wird über ein Prisma in zwei parallele Strahlen gleicher Intensität aufgeteilt. Diese beiden Strahlen durchleuchten die Strömung in senkrechter Richtung und haben einen definierten Abstand. Über zwei Linsen werden die Strahlen in Strömungsmitte fokussiert. Durchströmt nun ein Staubpartikel beide Brennpunkte, wird das Laserlicht an ihnen gestreut. Diese Streustrahlung wird über Linsen gebündelt und einer Fotozelle zugeführt. Aus der Zeitdifferenz der beiden Impulse kann über den Abstand der beiden parallelen Laserstrahlen die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden.

Laserverfahren sind sehr aufwändig und teuer. Zudem erfordern sie ein hohes Maß an Präzision bei der Installation. Sie eignen sich eher für den Einsatz im Labor als für den rauen Alltag in einer Produktion.

3.1.4 Elektrische Leistungsmessung

Auch die elektrische Leistung wird nicht explizit, sondern indirekt über die Spannung und den Strom bestimmt $(P = U\,I)$. Insofern setzt sich die Leistungsbestimmung aus einer Spannungsmessung und einer Strommessung zusammen. Während die Spannungsmessung parallel, also ohne Auftrennen des Stromkreises, erfolgen kann, muss für eine Strommessung der Stromkreis normalerweise aufgetrennt werden. Bei Gleichspannung und auch bei üblichem Wechselstrom mit 220 V und einer Phase gelingt dies noch relativ einfach.

Bei dreiphasigem Wechselstrom, wie er in der Industrie für die Versorgung von Maschinen und Anlagen eingesetzt wird, gestaltet sich dies aufwändiger. Zudem muss entsprechend Abschnitt 2.5 zwischen Wirk- und Blindleistung unterschieden werden ($P = U I \cos\varphi$ bzw. $Q = U I \sin\varphi$). Weiterhin können Verbraucher bei Verwendung von dreiphasigem Wechselstrom entweder in Stern- oder Dreieckschaltung angeschlossen werden. Bei der Sternschaltung (siehe Abb. 3-24) gibt es insgesamt sechs unterschiedliche Spannungen: U_1, U_2, U_3 sind so genannte Sternpunktspannungen, U_{21}, U_{23} und U_{31} sind Leiter-Leiter-Spannungen oder auch verkettete Spannungen. Die Leiter-Leiter-Spannungen ergeben sich nach [Ahlers 2010] aus den Sternpunkt- oder Strangspannungen zu:

$$U_{\text{Leiter}} = \sqrt{3}\,U_{\text{Strang}} \qquad 3.29$$

Zur Leistungsmessung verwendet man in der Regel die Leiter-Leiter-Spannungen, da diese direkt an den Anschlusspunkten abgegriffen werden können.

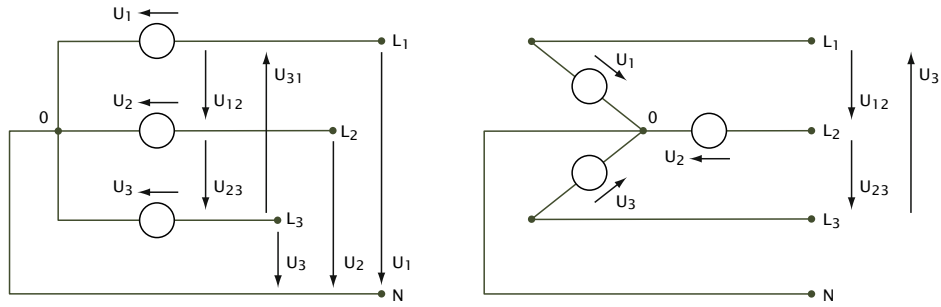

Abb. 3-24: Sternschaltung; 0 = Sternpunkt [Ahlers 2010]

Da der Leiterstrom auch durch den Strang fließt, gilt bei der Sternschaltung:

$$I_{\text{Leiter}} = I_{\text{Strang}} \qquad \textbf{3.30}$$

Bei der Dreieckschaltung sind die Strang- und Leiterspannungen gleich, es gibt nur drei unterschiedliche Spannungen. Damit gilt:

$$U_{\text{Leiter}} = U_{\text{Strang}} \qquad \textbf{3.31}$$

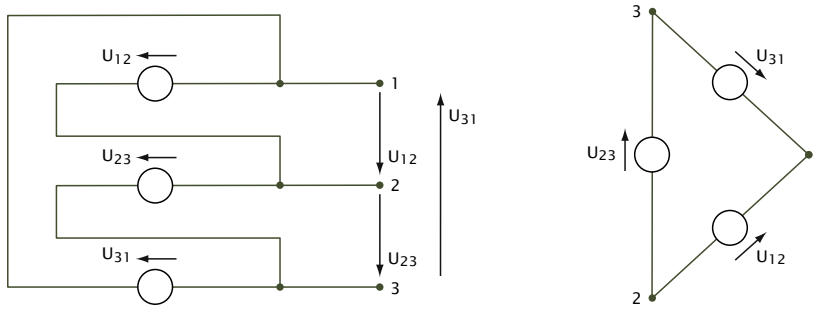

Abb. 3-25: Dreieckschaltung [Ahlers 2010]

Die Ströme errechnen sich zu:

$$I_{\text{Leiter}} = \sqrt{3}\, I_{\text{Strang}} \qquad 3.32$$

Zur Bestimmung der Gesamtleistung müssen nun für jede Phase (Strang) die Einzelleistungen bestimmt und diese dann zur Gesamtleistung aufsummiert werden. Bei Produktionsmaschinen liegt in der Regel eine symmetrische Belastung vor, d. h. jede Phase ist mit der gleichen Leistung belastet. Insofern ergibt sich die Gesamtleistung zu:

$$P_{\text{ges}} = 3\, U_{\text{Strang}}\, I_{\text{Strang}} = \sqrt{3}\, U_{\text{Leiter}}\, I_{\text{Leiter}} \qquad 3.33$$

Dies gilt unabhängig davon, ob eine Stern- oder eine Dreieckschaltung vorliegt. Die Wirk- bzw. Blindleistungen ergeben sich unverändert entsprechend den Gleichungen in Abschnitt 2.5.

Die Spannungen können leicht an den Anschlussklemmen abgegriffen werden. Bei symmetrischer Belastung genügt die Messung von Spannung und Strom an einer Zuleitung.

Um die Ströme zu bestimmen, bleibt das Problem der Reihenschaltung, die ein Öffnen der Stromkreise, also ein Abklemmen, erfordert. Dies kann durch die Verwendung von Induktionsklemmen umgangen werden. Hierzu werden die Anschlusskabel mit einer speziellen Klemme umschlossen, die quasi einem Eisenkern entspricht. Der Strom induziert ein Magnetfeld und dieses wiederum in einer Sekundärspule wieder einen Strom, der proportional zum Leitungsstrom ist. Im Prinzip entspricht der Aufbau einem Transformator. Das Anbringen der Messzangen ist nicht ganz einfach und hängt von der Zugänglichkeit der Anschlussleitungen ab. Auch das Anklemmen der Anschlüsse für die Spannungsmessung ist im Einzelfall nicht so einfach.

In jedem Fall bedarf es bei der elektrischen Leistungsmessung immer der Unterstützung der Kollegen aus der Elektrotechnik. Und ganz wichtig: Hauptschalter und Sicherung raus, bevor man an den Kabeln arbeitet!

3.2 Energiemonitoring

Wir sind einen wichtigen Schritt weiter. Nach dem Verständnis der Grundlagen zu Energie sind wir nun auch in der Lage, uns die notwendigen Daten zu besorgen, sei dies vom Energieversorger oder über geeignete Messtechnik. Die nächste Frage schließt sich allerdings direkt an. Was fängt man nun mit den Daten an? Und wie kann man daraus ableiten, ob ein Prozess oder ein Produktionsbereich energieeffizient betrieben wird? In der Regel fehlt die Vergleichsmöglichkeit, der Benchmark, um diese Antwort zu geben.

Nach ersten ausgewählten Messungen über kurze Zeiträume kommt schnell die Erkenntnis, dass zur systematischen Umsetzung von Energieeffizienz längerfristig ausgerichtete Maßnahmen notwendig sind:

1. (Kontinuierliche) Identifikation der energetischen Hauptverbraucher
2. Kontinuierliche Erfassung der relevanten Energieströme
3. Zuordnung von Energieverbrauch und Produktionszuständen
4. Bewertung des Energieverbrauches durch geeignete Kennzahlen

Ohne diese Maßnahmen endet man schnell im Datenchaos, was letztlich zur Frustration und dann zum Scheitern führt. Um dies zu vermeiden, bedarf es der Installation eines geeigneten Energiemonitoring-Systems. Wichtig ist, dass es sich nicht nur um ein Datenerfassungs- und Visualisierungssystem handelt. Die nüchterne Erfassung und Dokumentation der Energieströme bringt nichts. Wenn nichts produziert wird, ist der Energiebedarf auch niedriger. Aber ist dies ein erstrebenswerter Zustand? Insofern liegt nahe, die Energieströme analog zur Definition der Energieproduktivität mit der ausgebrachten Betriebsleistung zu korrelieren. Dieser Schritt geht zwar in die richtige Richtung, reicht aber in der Regel nicht aus. Der Energiebedarf der HLK-Technik hängt z. B. oft stark von den Wetterbedingungen ab. Insofern bedarf es weiterer Korrelationen. Aus einzelnen Kennzahlen werden Kennlinien bzw. Kennfelder. Jedes Unternehmen muss daher *seine* spezifischen und signifikanten Kennzahlen definieren. Gute Energiemonitoring-Systeme helfen dabei und sind flexibel.

Energiemonitoring-Systeme werden häufig mit Energiemanagementsystemen verwechselt. Energiemanagementsysteme sind jedoch keine eigenständigen Produkte, sondern analog zu Umwelt- oder Qualitätsmanagementsystemen betriebsinterne, organisatorische Maßnahmen. Für alle drei Systeme gibt es entsprechende Normungen: Qualität: DIN EN ISO 9001, Umwelt: DIN EN ISO 14001 und Energie: DIN EN 16.001.

Energiemonitoring-Systeme (EMS) können Teillösungen bei der Implementierung von Energiemanagementsystemen sein, müssen aber nicht. Ein EMS setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

1. Messtechnik
2. Übertragungstechnik (Verkabelung)
3. Signalwandlung
4. Messwerterfassung – Datenbank
5. Auswertesystem
6. Visualisierungssystem

Welche Energieströme Sie erfassen wollen, müssen Sie selbst entscheiden. Große Unternehmen untergliedern ihre Produktionen z. B. in drei Ebenen:

1. Standort
2. Fertigungsbereich (z. B. Gießerei oder Karosseriebau)
3. Einzelverbraucher

Es sollte darauf geachtet werden, dass sich die Untergliederung an bestehenden Kostenstellenstrukturen orientiert. Denn auf diese Weise fällt es später leichter, Kostenstellenverantwortliche über Zielvereinbarungen in Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz einzubinden.

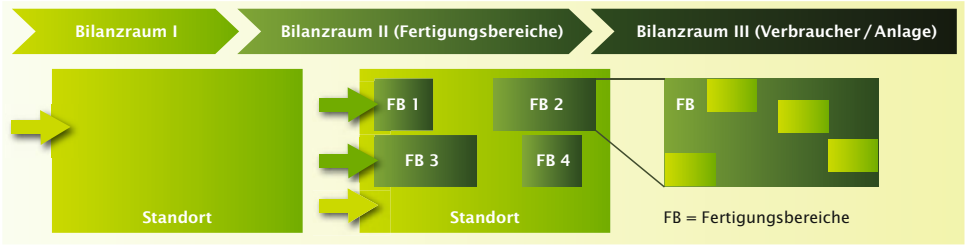

Abb. 3-26: Gliederung von Produktionsstandorten [Nieschwitz 2010]

Bei den Einzelverbrauchern konzentriert man sich naturgemäß auf identifizierte Großverbraucher und Einzelverbraucher, die häufig vorkommen. Die notwendige Messtechnik haben wir im vorhergehenden Abschnitt behandelt und sind nun in der Lage, die richtigen Sensoren auszusuchen. Beim Anschluss sind entweder Dreileitersysteme (siehe Temperaturmessung) oder bei großen Entfernungen auch funkbasierte Sensoren zu empfehlen. Als Messsignal sollte immer bevorzugt Strom (4–20 mA) verwendet werden, um Verfälschungen durch Spannungsabfälle zu vermeiden. Wo möglich, bietet eine Signalwandlung vor Ort und die anschließende Verwendung von Bussystemen die beste Lösung. Vorhandene Sensoren können ebenfalls mit in das System eingebunden werden. Abbildung 3-27 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines EMS.

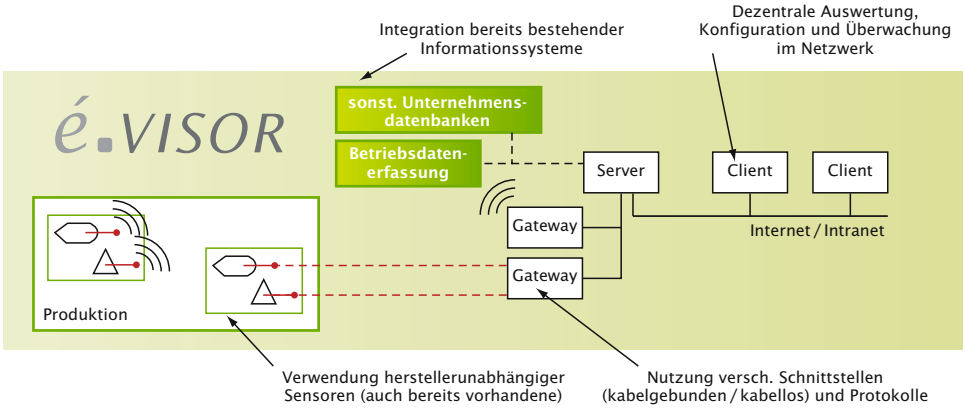

Abb. 3-27: Aufbau und Integration eines Energiemonitoring-Systems [Limón 2010]

Je nach Unternehmen bietet es sich an, weitere vorhandene Informationen aus bestehenden Datensystemen wie Betriebsdatenerfassungssystemen (BDE), Prozess- und Gebäudeleittechnik oder auch SAP einzubinden. Insbesondere Produktionsdaten aus SAP eignen sich, um energiesignifikante Kennzahlen zu bilden (siehe Abb. 3-28). Hierzu müssen im EMS die entsprechenden Schnittstellen vorhanden sein.

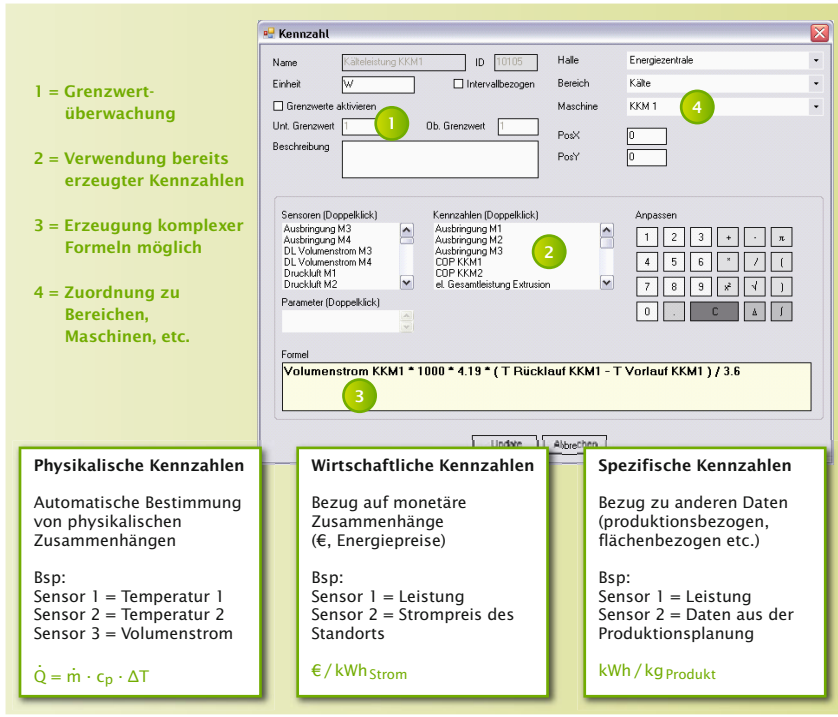

Abb. 3-28: Bedienoberfläche mit Kennzahlenbildung in einem Energiemonitoring-System [Limón 2010]

Mit diesen Kennzahlen lassen sich schließlich Bewertungen im Sinne von Gut / Schlecht durchführen und grafisch darstellen (siehe Abb. 3-29).

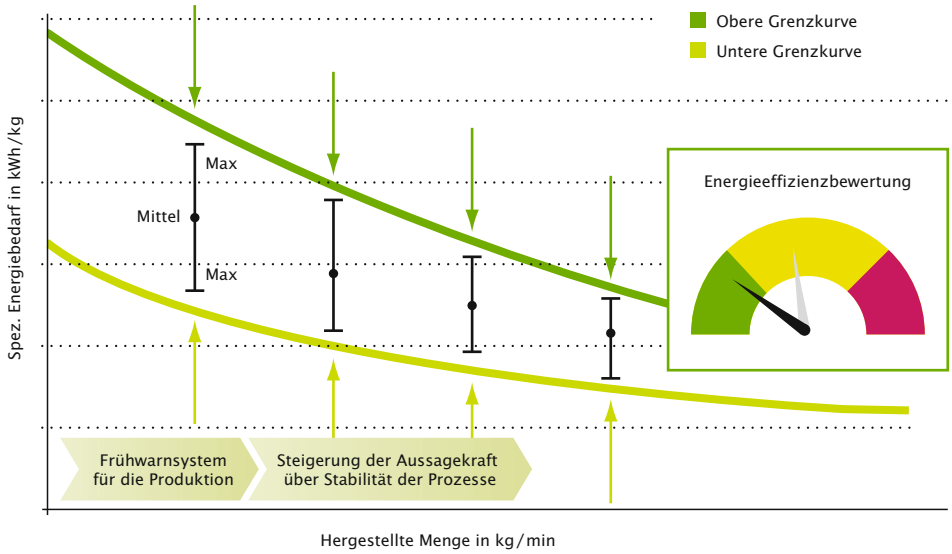

Abb. 3-29: Bewertung über Verhältniszahlen [Limón 2010, Monitoringsystem é.VISOR]

Für eine aussagekräftige Bewertung müssen geeignete Kombinationen von Kennzahlen identifiziert werden. Damit ist es neben der Information zum aktuellen Energiestatus auch möglich, EMS als Frühwarnsysteme für grundsätzliche Produktionsfragen zu verwenden. Der Verschleiß eines Antriebes äußert sich meist auch in einem erhöhten Energiebedarf bei unveränderter Anforderung im Betrieb.

Nach erfolgreicher Installation eines Energiemonitoring-Systems haben Sie nun (endlich) die Basis geschaffen, um fundierte Aussagen über den energetischen Zustand Ihrer Produktion treffen zu können. Jetzt können Sie sich aufmachen, um Effizienzpotenziale zu identifizieren und umzusetzen. Allerdings möchten wir davor warnen, sofort die ganze Produktion umzukrempeln. Dies wird einerseits auf wenig Gegenliebe bei den Produktionsverantwortlichen stoßen. Üblicherweise sind diese froh, wenn alles reibungsfrei läuft, und stehen jeder Veränderung skeptisch gegenüber, da sie diesen Zustand der Stabilität verändern könnte. So lange nur von der eigentlichen Produktion entkoppelte Verbraucher wie Beleuchtung oder Heizung angegangen werden, gibt es noch wenig Gegenwehr. Aber wehe, man tastet die eigentlichen Kernprozesse an. Genau dort liegen aber erfahrungsgemäß hohe Effizienzpotenziale. Wie kann man diese also heben?

Der Weg geht, wie so häufig, nur über Fakten, am besten ökonomische. Ein erprobtes Instrument zur Ermittlung von Potenzialen, ohne sofort in die (risikobehaftete) Umsetzung einzusteigen, ist die Simulation. Insbesondere bei komplexen Zusammenhängen, die eine analytische Bestimmung von Effizienzpotenzialen unmöglich machen, ist dies auch in anderen Bereichen das erprobte Mittel der Wahl. Über die Simulation haben Sie die Möglichkeit, der Unternehmensleitung quantitativ aufzuzeigen, welche Einsparmöglichkeiten es gibt. Dies macht es für Widersacher deutlich schwerer, Sie auszubremsen. Nutzen Sie diese, auf nach Kapitel 4!