Kuratorium für Forschung und Technik
der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V.

INFOR-Projekt Nr. 145

Empfehlung für eine praxistaugliche Verbrauchs-ermittlung von Dampf und Wärme als Basis für Energieeinsparung und Zertifizierung

Schlussbericht

Mai 2011

Papiertechnische Stiftung (PTS)
München

Dr. Frank Miletzky

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Holger Jung

PTS THE PAPER TECHNOLOGY SPECIALISTS

vdp Verband Deutscher Papierfabriken e.V.

Verband Deutscher Papierfabriken e.V.
Bonn

EMPFEHLUNGEN FÜR EINE PRAXISTAUGLICHE VERBRAUCHSERMITTLUNG VON DAMPF UND WÄRME ALS BASIS FÜR ENERGIEEINSPARUNG UND ZERTIFIZIERUNG

INFOR-Projekt Nr. 145

Kuratorium für Forschung und Technik
der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V.

INFOR-Projekt Nr. 145

Empfehlung für eine praxistaugliche Verbrauchs-ermittlung von Dampf und Wärme als Basis für Energieeinsparung und Zertifizierung

Schlussbericht

Mai 2011

Papiertechnische Stiftung (PTS)
München

Dr. Frank Miletzky

Projektleiter:
Dipl.-Ing. Holger Jung

EMPFEHLUNGEN FÜR EINE PRAXISTAUGLICHE VERBRAUCHSERMITTLUNG VON DAMPF UND WÄRME ALS BASIS FÜR ENERGIEEINSPARUNG UND ZERTIFIZIERUNG

Forschungsstelle	Papiertechnische Stiftung (PTS) Heßstraße 134 80797 München
Bearbeitung	Dipl.-Ing. Holger Jung Dipl.-Ing. (FH) Andreas Well Dipl.-Ing. (FH) Achim Hutter
Laufzeit	01.06.2010 – 31.05.2011
Projektbegleiter	Dr. Konrad Bergmann (Ahlstrom Osnabrück GmbH) Matthias Pieper (Ahlstrom Osnabrück GmbH) Jörg von der Heyde (Gebr. Grünewald GmbH & Co. KG) Wolf-Joachim Krach (SCA Hygiene Products GmbH) Frank Prätsch (WEPA Industrieholding SE)

Zuwendungsgeber	Das Forschungsprojekt wurde gefördert über das Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), Bonn.

München, Juni 2011

Zusammenfassung

Ausgangssituation und Problemstellung

Die Papierindustrie gehört zu den fünf größten industriellen Energieverbrauchern in Deutschland. Ein wesentlicher Schritt bei der Optimierung des Energiebedarfs ist die Überwachung und Messung des Energieeinsatzes und -verbrauchs in den Betrieben. Insbesondere im Bereich Wärme- bzw. Dampfbedarf steht die Papierindustrie vor dem Problem einer unzureichenden Überwachung und Messung des Energieeinsatzes. Folgen der fehlenden Transparenz sind:

- Differenzierte Bewertungen und Festlegungen von Maßnahmen zu Wärmeeinsparungen sind erschwert bzw. unmöglich
- Ein Nachweis der erzielten Einsparungen nach Umsetzung von Einzelmaßnahmen ist nahezu unmöglich.
- Eine differenzierte Formulierung von Energieeinsparzielen gelingt nicht
- Eine Erhebung und Bewertung von Einsparpotenzialen ist nur bedingt möglich.

Forschungsziel

Ziel des Projektes ist die Erarbeitung von Empfehlungen für eine systematische, praktikable und wirtschaftliche Erfassung des Wärme- und Dampfbedarfs in Papierfabriken als Basis für die Reduzierung des Energiebedarfs und die Zertifizierung.

Erfassung des Dampf- und Wärmebedarfs

Bei großen Werken sind bis zu 100 Einzelverbraucher vorhanden. Während das Kraftwerk in der Regel gut mit Messgeräten ausgestattet ist, fehlen in der Produktion häufig Messungen von Einzelverbrauchern. Häufig ist nur eine Gesamtmessung je Papiermaschine vorhanden. Ein Herunterbrechen des Gesamtverbrauchs auf Einzelaggregate ist in der Regel nicht möglich

Auf der Gasseite sind weniger Einsatzstellen als bei Dampf vorhanden. Es existiert immer eine Hauptmessung an der Übergabestation des Versorgers und in der Regel werden alle Verbraucher erfasst. Ein Herunterbrechen des Gesamtverbrauchs auf Einzelaggregate ist meist möglich.

Messtechnik

Die klassische Wirkdruckmesstechnik nach ISO 5167 ist nach wie vor das einzige Verfahren, das auf international gültige Regelwerke rückführbar ist. Dennoch ist sie, wie alle Dampfmessungen nicht eichfähig.

Die Messung von Gasvolumenströmen ist etabliert und zuverlässig arbeitende Messgeräte sind verfügbar. Turbinenradzähler sind in Papierindustrie weit verbreitet. Sie erfüllen die Anforderungen für eine Zertifizierung (z.B. für EEG-Ausgleichsregelung oder EN 16001)

Berechnungs- und Schätz-verfahren

Folgende Berechnungs- und Schätzverfahren werden angewendet bzw. sind verfügbar:

- Wärmeeintrag auf Sekundärseite erfassen
- Abschätzung Dampfmenge an Reduzierventilen über Durchflusskoeffizient des Ventils und Differenzdruck
- Installierte Leistung & Betriebsstunden
- Bilanzierung nicht gemessener Verbraucher über Gesamtverbrauch und Einzelverbrauchsmessungen
- Ermittlung Dampfmenge über Kondensatmenge

Für Berechnungs- und Schätzverfahren, die eine nachvollziehbare und praxistaugliche Ermittlung des Dampf- bzw. Wärmebedarfs von Einzelaggregaten ermöglichen, sind zusätzliche Parameter zur Ermittlung notwendig.

Anforderungen der Zertifizierung

Nach EEG müssen alle Energie verbrauchenden Anlagen und Geräte erfasst und analysiert werden. Nach DIN EN 16001 muss der frühere und aktuelle Energieverbrauch auf Basis von Messungen und anderen Daten ermittelt werden. Konkrete Vorgaben, wie die Messungen zu erfolgen haben bzw. welche Messverfahren verwendet werden sollen, werden nicht gemacht.

Empfehlungen für die Erfassung des Wärmebedarfs

Im Idealfall sollte jeder Wärmeverbraucher mit einem eigenen geeigneten Messgerät ausgerüstet werden, um den Wärmebedarf exakt nachvollziehen zu können.

Um den Gasverbrauch exakt nachvollziehen zu können, sollte jeder Gasverbraucher, wie es bereits heute üblich ist, mit einem eigenen Messgerät ausgerüstet werden. Bei bestimmten Anwendungen ist auch die gemeinsame Erfassung von mehreren Verbrauchern denkbar, beispielsweise bei zwei Brennern in einer Hochleistungshaube.

Berechnungsverfahren unter Nutzung anderer messtechnisch erfassbarer Parameter bieten eine Alternative zur herkömmlichen Dampfmessung. Die Art der Erfassung des Dampfbedarfs einzelner Verbraucher (Messung, Berechnung, Abschätzung) kann abhängig von folgenden Faktoren festgelegt werden:

- Anteil am Gesamtverbrauch
- Weiterer Nutzen (z.B. Regelung einer Anlage, Lastmanagement, …)
- Aufwand
- Verfügbare Alternativen

Alle Messungen sollten an das Datenerfassungssystem angeschlossen sowie die Daten gespeichert und ausgewertet werden. Nur so lassen sich historische Verbrauchskurven generieren, Optimierungspotenziale lokalisieren und deren Erschließung dokumentieren.

Inhalt

Zusammenfassung ... **3**

1 Ausgangssituation und Problemstellung ... **6**

2 Forschungsziel ... **8**

3 Projektinhalte und Vorgehen ... **9**

4 Ergebnisse ... **11**

4.1 Erfassung des Dampf- und Wärmebedarfs in der deutschen Papierindustrie ... 11
4.1.1 Wärmeverbraucher ... 11
4.1.2 Erfassung des Wärmebedarfs ... 14

4.2 Verfügbare Messtechnik zur Messung des Wärmebedarfs ... 17
4.2.1 Verfügbare Geräte zur Messung des Gasverbrauchs ... 17
4.2.2 Verfügbare Geräte zur Messung des Dampfverbrauchs ... 28

4.3 Berechnungs- und Schätzverfahren zur Ermittlung des Wärmebedarfs ... 32
4.3.1 Vorgehen ... 32
4.3.2 Wärmeübertragung ins Wasser ... 33
4.3.3 Wärmeübertragung in das Stoffsystem ... 36
4.3.4 Wärmeübertragung in die Luft ... 40
4.3.5 Abschätzung Dampfmenge an Druckregelventilen ... 46
4.3.6 Weitere Verfahren ... 49
4.3.7 Bewertung der benötigten Messverfahren ... 49

4.4 Energiemanagementsysteme und Anforderungen bei der Zertifizierung ... 55

4.5 Empfehlungen für die Erfassung des Dampf- und Wärmebedarfs ... 58
4.5.1 Vorgehen ... 58
4.5.2 Dampfbedarf der Papierproduktion ... 58
4.5.3 Gasbedarf der Papierproduktion ... 62
4.5.4 Wärmebedarf in Nebenanlagen ... 62
4.5.5 Wärmebedarf in der Zellstoffproduktion ... 63
4.5.6 Anwendung und wirtschaftliche Bedeutung für die Papierindustrie ... 63

5 Danksagung ... **65**

6 Anhang ... **66**

6.1 Abschätzung Dampfmenge an Druckregelventilen ... 66

6.2 Vergleich ISO 14001 und DIN EN 16001 [52] ... 72

6.3 Formelzeichen ... 78

6.4 Indizes ... 79

6.5 Abkürzungen ... 79

6.6 Literatur ... 80

1 Ausgangssituation und Problemstellung

Energieintensive Industrien

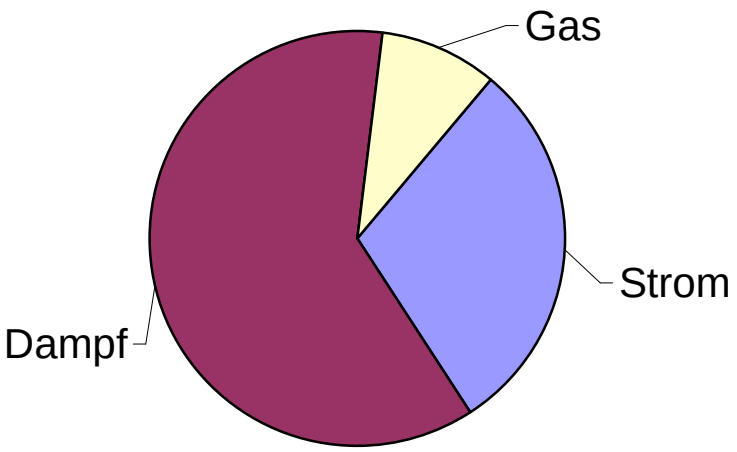
Die Papierindustrie gehört neben den Branchen Baustoffe, Chemie, Glas, Nichteisenmetalle und Stahl zu den energieintensiven Industrien Deutschlands. In den letzten Jahren ist der Anteil der Energiekosten an der Umsatz- und Kostenstruktur in der deutschen Papierindustrie durchschnittlich auf etwa 14 % gestiegen, während gleichzeitig die Umsatzrendite der Papierindustrie auf 2 % gefallen ist [1].Vor dem Hintergrund des Handels mit Emissionszertifikaten als Folge des Allokationsplans zur Umsetzung des Treibhaus-Emissionshandels-Gesetzes, des eingeschränkten Wettbewerbs auf dem Energieversorgungssektor und des Ausstiegs aus der atomaren Stromerzeugung muss mit einer weiteren Erhöhung der Energiepreise gerechnet werden.

Spezifischer Energiebedarf

Das Thema Energieeinsparung und damit verbunden die Reduzierung der CO_2-Emmissionen ist somit heute umso mehr eine wichtige Aufgabe für die Papierindustrie. Die Hersteller von Papier haben schon frühzeitig nach Möglichkeiten zur Verringerung des Energieeinsatzes gesucht. Die Verbesserung der Energieeffizienz wurde in den letzten Jahrzehnten durch technische Optimierung in Kraftwerken, Papiermaschinen sowie durch die Änderung der Rohstoffstruktur erreicht. Der mittlere spezifische Energiebedarf in der deutschen Papierindustrie sank dadurch von über 8.000 kWh/t Produkt auf heute etwa 3.100 kWh/t Produkt [2].

Zusammensetzung des Energiebedarfs

Die Anteile der einzelnen Energieträger variieren in Abhängigkeit von der produzierten Papiersorte. Im Mittel entfallen etwa 70 % des Gesamtenergiebedarfs auf den Wärmebedarf [2]. Nachfolgende Abbildung zeigt dies beispielhaft anhand eines Werkes zur Herstellung gestrichener holzfreier Druckpapiere [3].



Erfassung des Energiebedarfs

Ein wesentlicher Schritt bei der Optimierung des Energiebedarfs ist die Überwachung und Messung des Energieeinsatzes und -verbrauchs in den Betrieben. Insbesondere im Bereich Wärme- bzw. Dampfbedarf steht die Papierindustrie vor dem Problem einer unzureichenden Überwachung und Messung des Energieeinsatzes. Ein Herunterbrechen des Gesamtverbrauchs auf Einzelaggregate ist in der Regel nicht möglich.

Der Dampf- bzw. Wärmebedarf von einzelnen Dampf- und Wärmeverbrauchern kann nicht ohne weiteres über den Gesamtdampf- bzw. Gesamtwärmeverbrauch ermittelt werden. Dies ist nur durch die Installation von Dampf- bzw. Wärmezählern am jeweiligen Endverbraucher realisierbar. Je nach Anzahl an Endverbrauchern im Betrieb kann dies einen sehr hohen Aufwand bedeuten:

- hohe Anschaffungskosten für Messgeräte (Dampfzähler: abhängig von Druck und Temperatur)
- hoher Personalaufwand durch Kontrolle, Zählerstanderfassung, Dokumentation
- regelmäßige Eichung oder Kalibrierung von Messgeräten (Voraussetzung für eine Zertifizierung)
- regelmäßige Wartung von Messgeräten

Problemstellung

Die Folgen dieser fehlenden Transparenz sind:

- Eine differenzierte Bewertung und die Festlegung von Maßnahmen zur Reduzierung des Wärmebedarfs sind erschwert oder sogar unmöglich.
- Ein Nachweis der erzielten Einsparungen nach Umsetzung von Einzelmaßnahmen insbesondere bei kleineren Potenzialen ist bei einer summarischen Betrachtung des Energieeinsatzes von Wärme und Dampf nahezu unmöglich.
- Eine Erhebung und Bewertung von Einsparpotenzialen, die seit dem Inkrafttreten der Novelle des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) im Jahr 2009 für die Nutzung der sogenannten Härtefall- oder Ausgleichsregelung des EEG im Rahmen einer Zertifizierung erforderlich ist, ist nur bedingt möglich.
- Die differenzierte Formulierung von Energiesparzielen, die prüf- und messbar sind und im Rahmen von Energiemanagementsystemen gemäß der gerade neu eingeführten DIN EN 16001 kontinuierlich fortgeschrieben werden könnten, ist für die Papierproduktion kaum möglich. Im Kraftwerk sind Einsparungen zum Teil auch ohne Dampfmessungen prüf- und messbar. So können z. B. Verbesserungen des Kesselwirkungsgrades mit dem Sauerstoffgehalt und der Abgastemperatur nachgeprüft werden.

---

2 Forschungsziel

Ziel

Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Erarbeitung von Empfehlungen für eine systematische, praktikable und wirtschaftliche Erfassung des Wärme- und Dampfbedarfs in Papierfabriken als Basis für die Reduzierung des Energiebedarfs und die Zertifizierung.

3 Projektinhalte und Vorgehen

Vorgehen

Das Forschungsprojekt gliedert sich in fünf Arbeitspakete (AP).

AP	Titel des Arbeitspakets
A	Analyse und Bewertung der Erfassbarkeit des Dampf- und Wärmebedarfs
B	Analyse von Berechnungsverfahren und Messtechnik
C	Anforderungen an zertifizierte Systeme
D	Beiträge aus dem Kreis der Projektbegleiter
E	Ableitung von Empfehlungen für die Erfassung des Wärme- und Dampfbedarfes

Analyse und Bewertung der Erfassbarkeit des Dampf- und Wärmebedarfs

In einem ersten Schritt soll der Ist-Zustand bei der Erfassung des Dampf- bzw. Wärmebedarfs in der Papierindustrie untersucht werden, um den messtechnischen Bedarf zu erfassen. Um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen, werden dabei sowohl Produktionsanlagen als auch Nebenanlagen berücksichtigt.

Analyse von Berechnungsverfahren und Messtechnik

In einem zweiten Schritt sollen geeignete Berechnungs- und Schätzverfahren ermittelt werden, die eine nachvollziehbare und praxistaugliche Ermittlung des Dampf- bzw. Wärmebedarfs von Einzelaggregaten ermöglichen. Darüber hinaus sollen die derzeit auf dem Markt verfügbaren Messinstrumente zur Dampf- bzw. Wärmemengenmessung hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten, Genauigkeiten und Kosten (inkl. Folgekosten für Wartung und Kalibrierung) bewertet werden.

Anforderungen an zertifizierte Systeme

Analyse der Anforderungen hinsichtlich Erfassung und Analyse der Dampf- und Wärmeverbraucher, welche zertifizierte Systeme erfüllen müssen (z.B. EEG, DIN EN 16001).

Beiträge aus dem Kreis der Projektbegleiter

Wesentlich für das vorgeschlagene Projekt ist die Konformität vorgeschlagener Empfehlungen mit den Anforderungen von Energiemanagementsystemen (EMS) bzw. Zertifizierungen nach §41 EEG. In Gesprächen mit den durch die Projektbegleiter vertretenen Industrieunternehmen werden Industrieerfahrungen zu EMS und Zertifizierungen abgefragt und im Projekt berücksichtigt.

Ableitung von Empfehlungen für die Erfassung des Wärme- und Dampfbedarfes

Basierend auf den gewonnenen Kenntnissen sollen Empfehlungen für die systematische und umfassende Erfassung des Dampf- und Wärmebedarfs abgeleitet werden. Wesentliche Randbedingung ist, den in diesem Zusammenhang zusätzlich erforderlichen Aufwand für die Papierfabriken durch geeignete Berechnungs- und Schätzverfahren und ergänzende Messtechnik so gering wie möglich zu halten. Die erarbeiteten Empfehlungen sollen dazu beitragen, den Energieeinsatz und -verbrauch differenziert zu analysieren. Damit sollen Einsparpotenziale identifiziert und quantifiziert werden. Die verbesserte messtechnische Erfassung und die vereinfachte Formulierung und Nachverfolgung von Maßnahmen leisten einen Beitrag für ein erfolgreiches Energiemanagement.

Zeitplan

Kurztitel der Arbeitspakete		Zeitplan											
	Monat	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai
	Jahr	10	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11
Schritt A	Analyse und Bewertung der Erfassbarkeit des Dampf- und Wärmebedarfs												
Schritt B	Analyse von Berechnungsverfahren und Messtechnik												
Schritt C	Anforderungen an zertifizierte Systeme												
Schritt D	Beiträge aus dem Kreis der Projektbegleiter												
Schritt E	Ableitung von Empfehlungen für die Erfassung des Wärme- und Dampfbedarfes												
	Sitzungen des PBA												

4 Ergebnisse

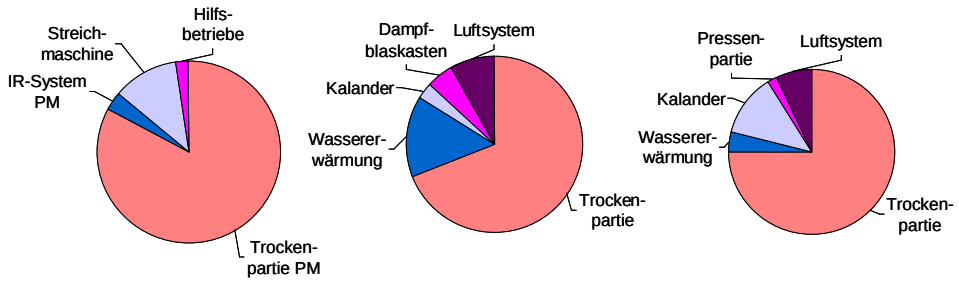
4.1 Erfassung des Dampf- und Wärmebedarfs in der deutschen Papierindustrie

4.1.1 Wärmeverbraucher

Wärme-verbraucher

In der Papierindustrie wird Wärme in Form von Dampf, gasbeheizten Brennern oder elektrischen Heizungen/Strahlern an vielen verschiedenen Stellen eingesetzt. Bei großen Werken sind bis zu 100 Einzelverbraucher vorhanden. Während der Wärmeeinsatz zur Trocknung der Papierbahn allgegenwärtig ist, gibt es Wärmeverbraucher, die abhängig von der produzierten Sorte sowie den eingesetzten Rohstoffen sind. Hinzu kommen noch die Bereiche in denen Dampf erzeugt bzw. in Strom umgewandelt wird.

Der weitaus größte Wärmebedarf besteht bei der thermischen Trocknung der Papierbahn, wie nachfolgende Abbildung anhand von drei Beispielen [3, 4, 5] illustriert. Meist erfolgt die Trocknung der Papierbahn mit Dampf über eine klassische Zylindertrocknung. Yankeezylinder in Kombination mit gasbefeuerten Hochleistungshauben werden überwiegend im Bereich der Tissueproduktion eingesetzt. Zu den mit Gas befeuerten Trocknungsaggregaten gehören auch die Infrarot-Strahler die z. B. zur Strichtrocknung eingesetzt werden.



A – gestrichen holzfrei B – Zeitungsdruckpapier C – SC Papier

Vorgehen

Zur Ermittlung des Ist-Zustands hinsichtlich der Erfassung des Wärmebedarfs wurden im Rahmen des Forschungsprojektes drei Papierfabriken untersucht sowie auf die Erfahrungen der Forschungsstelle sowie der Projektbegleiter zurückgegriffen.

Nachfolgende Tabellen geben einen Überblick über typische Einsatzstellen von Dampf und Gas in der Papiererzeugung. Die angeführten Verbrauchswerte gelten in der Regel für moderne Anlagen und stellen typische Bereiche für den jeweiligen Einsatzzweck dar. Sie sind jedoch nicht allgemein gültig. Insbesondere bei älteren Anlagen kann der Energiebedarf auch deutlich außerhalb dieser Bereiche liegen.

Die genannten Verbrauchswerte sind nicht als Benchmarkwerte verwendbar. Der Verbrauch hängt unter anderem von der Papiersorte und den Produktionsrandbedingungen ab.

Dampfeinsatz in der Papiererzeugung

Die wesentlichen Dampfverbraucher in der Papierproduktion sind nachfolgend aufgelistet.

Dampfeinsatz in der Papiererzeugung		
Verbraucher	**Typischer Dampfbedarf**	**Datenquelle**
Bleichen	0,09 – 0,27 t_D/t_P	[6, 7]
Dampfblaskasten	0,05 – 0,22 t_D/t_P	[8, 9, 10]
Dispergierung	0,15 – 0,45 t_D/t_P	[6, 7, 11]
Frischwasserheizung	0,06 – 0,35 t_D/t_P	[8, 9]
Trockenzylinder	1,10 – 1,20 $t_D/t_{verd.\ W}$	[12, 13]
Yankeezylinder	0,82 – 1,12 t_D/t_P	[14]
Zuluft Trockenpartie	0,10 – 0,20 $t_D/t_{verd.\ W}$	[12, 13, 15]

Neben den oben tabellarisch aufgeführten Dampfverbrauchern gibt es noch eine Vielzahl weiterer Dampfverbraucher, wie zum Beispiel Prozesswasserheizung, Gebäudeheizung, Pulperheizung, Stärkeaufbereitung und Stoffauflaufheizung. Der Dampfbedarf dieser Verbraucher ist zum Teil stark sortenabhängig und folgt häufig auch einer Jahresganglinie. In der Literatur konnten keine Werte gefunden werden.

Gaseinsatz in der Papiererzeugung

Die wesentlichen Gaseinsatzstellen in der Papierproduktion sind nachfolgend aufgelistet.

Gaseinsatz in der Papiererzeugung		
Verbraucher	**Typischer Gasbedarf**	**Datenquelle**
Hochleistungshaube	600 – 1.200 kWh/t_P	[14]
TAD	940 – 1.250 kWh/ $t_{verd.\ W}$	[5]
IR-Trockner	1.390 – 2.220 kWh/ $t_{verd.\ W}$	[5]
Heißluft-Schwebe-trocknung	830 – 1.390 kWh/ $t_{verd.\ W}$	[16]
Prallströmtrocknung (Impingement)	830 – 1.390 kWh/ $t_{verd.\ W}$	[5, 16]

Neben den oben tabellarisch aufgeführten Gasverbrauchern gibt es noch weiterer Gasverbraucher, wie zum Beispiel Kalanderheizung oder direkt befeuerte Gebäudeheizungen. In der Literatur konnten jedoch keine Verbrauchswerte gefunden werden.

Wärmebedarf in der Zellstoff-erzeugung

Bei der Zellstofferzeugung wird Wärme im Wesentlichen in den in nachfolgender Tabelle aufgeführten Bereichen benötigt.

Wärmebedarf in der Zellstofferzeugung [17, 18]	
Verbraucher	**Typischer Wärmebedarf**
Holzplatz	0 – 140 kWh/t_{ZS}
Zellstoffkocher	470 – 890 kWh/t_{ZS}
Zellstoffbleiche	110 – 170 kWh/t_{ZS}
Zellstofftrocknung	750 – 805 kWh/$t_{verd.\ W}$ bzw. 555 – 860 kWh/t_{ZS}
Eindampfanlage	800 – 1.100 kWh/$t_{verd.\ W}$
Kaustifizierung und Kalkofen	12 kWh/t_{ZS}

Erzeugung von Holzstoff und Holzschliff

Bei der Erzeugung von Holzschliff bzw. Holzstoff wird Wärme zum Beispiel zur Hackschnitzelvorwärmung und zur Prozesswasserheizung eingesetzt. Bei Einsatz von Druckschliff- und TMP-Verfahren kommt es darüber hinaus bei geeigneter Wärmerückgewinnung noch zu einer Dampferzeugung.

Nebenanlagen

Auch in Nebenanlagen, wie zum Beispiel dem Kraftwerk, in der Abwasserreinigungsanlage, der Ausrüstung oder dem Sanitärbereich wird Gas und Dampf eingesetzt, was bei einer detaillierten Erfassung berücksichtigt werden muss:

- Kraftwerk: Erdgasverbrauch für Kessel und Gasturbinen
- Abwasserreinigungsanlage: Schlammtrocknung, Gebäudeheizung
- Ausrüstung & Lager: Kreppmaschine, Thermoölheizung Kalander, Schrumpfofen, Gebäudeheizung

Wärmeverbraucher in den untersuchten Werken

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die jeweiligen Einsatzstellen und deren Anzahl von Dampf bzw. Gas in den drei untersuchten Werken.

Papierfabrik A					
Dampfverbraucher	**Anzahl**	**Messung**	**Gasverbraucher**	**Anzahl**	**Messung**
Trockenpartie (Zylinder)	4	nein	Thermoölheizung Kalander	1	ja
Glättzylinder	1	nein	IR-Trockner	9	ja
Zuluft Trockenpartie	3	nein	Airfoil	1	ja
Zwischendeckenheizung	3	nein			
Pulper	1	nein			
Stärkekocher	5	nein			
Siebwasserheizung	1	nein			
Gebäudeheizungen	50 *	nein			
Kreppmaschine	1	nein			
Summe	**69**		**Summe**	**11**	

Papierfabrik B					
Dampfverbraucher	**Anzahl**	**Messung**	**Gasverbraucher**	**Anzahl**	**Messung**
Yankeezylinder	1	nein	Hochleistungshaube	1	ja
Disperger	1	ja	Gaskessel	2	ja
Stärkekocher	1	nein	Gebäudeheizung direkt	2	nein
Pulper	1	nein			
Gebäudeheizungen	3	nein			
Gebäudeheizung direkt	20 *	nein			
Summe	**27**		**Summe**	**5**	

Papierfabrik C					
Dampfverbraucher	**Anzahl**	**Messung**	**Gasverbraucher**	**Anzahl**	**Messung**
Yankeezylinder	2	ja	Hochleistungshaube	2	ja
Stärkekocher	1	nein	Gaskessel	2	ja
Disperger	2	ja	Gebäudeheizung direkt	2	ja
Gebäudeheizungen	30 *	zum Teil			
Summe	**35**		**Summe**	**6**	

* geschätzt

4.1.2 Erfassung des Wärmebedarfs

Erfassung des Dampfbedarfs

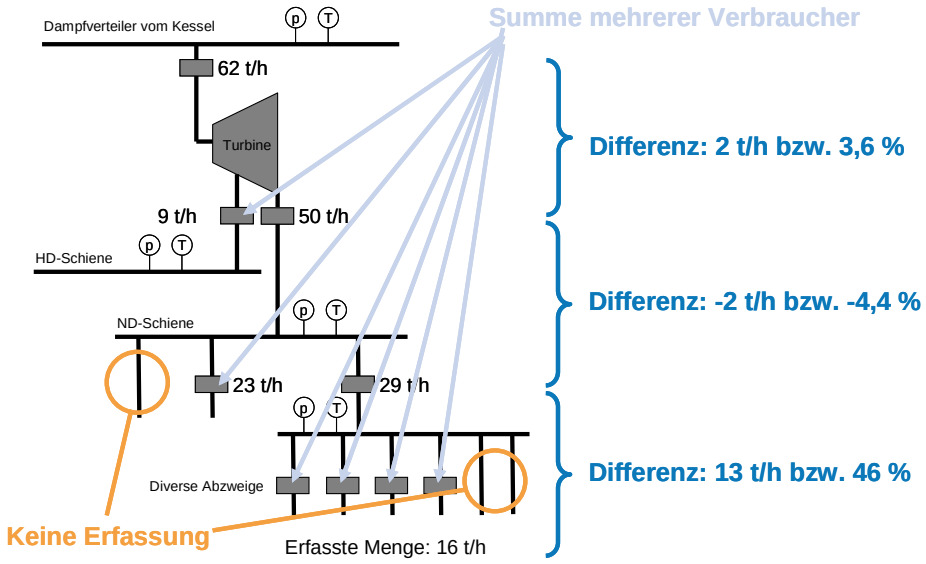
Während das Kraftwerk in der Regel gut mit Messgeräten ausgestattet ist, fehlen in der Produktion häufig Messungen von Einzelverbrauchern. Häufig ist nur eine Gesamtmessung je Papiermaschine vorhanden. Ein Herunterbrechen des Gesamtverbrauchs auf Einzelaggregate ist in der Regel nicht möglich

Bei den eingesetzten Messgeräten sind viele „Altbestände“ vorhanden. Bei Neuinstallationen werden in der Regel Vortexmessungen bzw. Staudruckson-den mit T/p-Kompensation eingesetzt.

Die Erfassung des Dampfverbrauches erfolgt entweder online, per Schreiber, oder durch manuelle Ablesung. Die Frequenz der manuellen Zählerablesung variiert deutlich.

Grafische Darstellung

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Ist-Situation bei der Messung des Dampfbedarfs in einem der untersuchten Werke.



Probleme bei der Erfassung des Dampfbedarfs

Probleme treten dadurch auf, dass installierte Messblenden nicht zugänglich sind und somit der Zustand ungewiss ist. Der Austausch von installierten Blenden ist aufwendig – insbesondere bei Hochdruckdampfleitungen. Darüber hinaus sorgen fehlende Temperatur- bzw. Druckkompensationen für Ungenauigkeiten. Reduzierstationen und Einspritzungen werden selten berücksichtigt und es kommt häufig hohen Abweichungen zwischen Input- und Outputströmen, die teilweise sehr hoch sind.

Erfassung des Gasbedarfs

Auf der Gasseite sind weniger Einsatzstellen als bei Dampf vorhanden. Es existiert immer eine Hauptmessung an der Übergabestation des Versorgers und in der Regel werden alle Verbraucher einzeln messtechnisch erfasst. Ein Herunterbrechen des Gesamtverbrauchs auf Einzelaggregate ist somit meist möglich. Jedoch werden nicht immer alle installierten Zähler abgelesen. Als Messgeräte werden Drehkolbenzähler und Turbinenradzähler verwendet. Die Erfassung des Gasverbrauches erfolgt entweder online, per Schreiber, oder durch manuelle Ablesung. Die Frequenz der manuellen Zählerablesung variiert deutlich.

Kondensat & Speisewasser

Bei der Erfassung des Wärmebedarfs ist für eine Bilanzierung des Kraftwerks die Erfassung des Kondensats und Speisewassers notwendig. In der Praxis wird jedoch die Kondensatmenge oft nur zum Teil erfasst. Häufig erfolgt eine Bilanzierung über die aufbereitete Speisewassermenge und die Dampferzeugung. Dagegen wird die aufbereitete Speisewassermenge in der Regel gemessen. Als Messgeräte werden eingesetzt:

- Speisewasser: IDM
- Kondensat: Vortexmessung, Ovalradmessung

Die Erfassung erfolgt entweder online, per Schreiber, oder durch manuelle Ablesung. Die Frequenz der manuellen Zählerablesung variiert deutlich. Probleme treten auf durch die hohen Temperaturen und häufig stark korrodierten Kondensatleitungen sowie häufige Defekte der Messgeräte.

Erfassung Wärmebedarf in den untersuchten Werken

Papierfabrik A

Einmal pro Monat werden die Zählerstände abgelesen und die Brennstoffmengen erfasst. Anschließend erfolgen Kontrolle der Werte und die Erstellung des Monatsberichts. Eine differenzierte Aussage ist kaum möglich, da ein breites Sortenspektrum produziert wird.

Papierfabrik B

Es gibt einen täglichen Rundgang zur Ablesung Zählerstände. Aber erst am Monatsende werden die Daten überprüft und bei Auffälligkeiten die Tagesprotokolle rückwirkend ausgewertet.

Papierfabrik C

Papierfabrik C verfügt über eine sehr detaillierte, Zählerstand basierte Onlineerfassung aller Energieverbrauche, bilanzierend als Netzwerke (z.B. für automatische Leckageüberwachung Druckluft). Somit gibt es eine weitgehende Transparenz aller Energiedaten über ein Online-Tool für alle Mitarbeiter. Die Datenarchivierung erfolgt über einen Zeitraum von 10 Jahren und ermöglicht ein konzernweites Onlinebenchmarking der spezifischen Energieverbrauche einzelner Aggregate (z.B. der Papiermaschinen).

Fazit

Die aktuelle Situation hinsichtlich der Anzahl der installierten Messgeräte ist in vielen Fällen historisch bedingt und eine Folge der Philosophie der einzelnen Eigentümer. Es ist eine wesentliche Aufgabe innerbetrieblich den Nutzen einer gezielten Erfassung des Energiebedarfs deutlich zu machen. Hierbei können zum Beispiel Anzeigen zu den entstehenden Energiekosten im Prozessleitsystem die Mitarbeiter sensibilisieren und dazu beitragen, dass die einzelnen Mitarbeiter verantwortungsbewusster mit der Ressource Energie umgehen.

4.2 Verfügbare Messtechnik zur Messung des Wärmebedarfs

4.2.1 Verfügbare Geräte zur Messung des Gasverbrauchs

Grundlagen

Wird Gas als Ware gehandelt, so bildet in Deutschland das „ Gesetz über das Mess- und Eichwesen“ vom 23.02.1992 mit seinen Ausführungsverordnungen und den späteren Veränderungen die gesetzliche Grundlage des Eichwesens. Außerdem sind das „Gesetz über Einheiten im Messwesen“ vom 22.02.1985 und die „Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Messwesen“ vom 13.12.1985 mit den zusätzlichen Änderungsverordnungen zu beachten. Danach werden die Gasmessungen als Volumenmessungen durchgeführt, wobei der jeweilige Gaszustand beachtet werden muss. Im Eichgesetz sind die Eichpflicht und in der Eichordnung die Eichfristen von Messgeräten festgelegt. Die einzuhaltenden Vorschriften werden von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig erarbeitet.

Eichfehlergrenzen, Verkehrsfehlergrenzen, Eichgültigkeitsdauer [19]

Bei in Betrieb befindlichen Messgeräten dürfen die Messwerte nicht mehr als einen fest vorgegebenen Abstand (Fehlergrenzen) vom Wert der Messgröße abweichen. Wird ein Messgerät geeicht, dürfen dabei die durch die Eichfehlergrenzen vorgeschriebenen Abweichungen nicht überschritten werden. Nach Abschluss der Eichung gelten die für den normalen Betrieb in Haushalten und Industrieunternehmen geltenden Verkehrsfehlergrenzen, welche doppelt so groß sind, wie die Eichfehlergrenzen. Die Eichgültigkeitsdauer beschreibt den Zeitraum, für den ein geeichtes Messgerät im gesetzlichen Sinne richtig misst. Nach Ablauf der Eichgültigkeitsdauer muss eine neue Eichung erfolgen.

Eich- und Verkehrsfehlergrenzen von Gaszählertypen

Nachfolgende Übersicht fasst die Eich- und Verkehrsfehlergrenzen verschiedener Gaszählertypen zusammen [19].

	Eichfehlergenze %		Verkehrsfehlergrenze (= 2 x Eichfehlergrenze) %		Eichgültigkeitsdauer (Nacheichfrist)	Jahre
Balgengaszähler	$Q_{min} \le Q < 2Q_{min}$ ±3	$2Q_{min} \le Q \le 2Q_{max}$ ±3	$Q_{min} \le Q < 2Q_{min}$ ±6	$2Q_{min} \le Q \le 2Q_{max}$ ±4	≤ NB 6/G 6[2] NB 10/G 10 ≥ NB 20/G 20	8 12 16
Drehkolbengaszähler	$Q_{min} \le Q < 0{,}2Q_{max}$ ±2	$0{,}2Q_{max} \le Q < Q_{max}$ ±1	$Q_{min} \le Q < 0{,}2Q_{max}$ ±4	$0{,}2Q_{min} \le Q \le Q_{max}$ ±2	≥ NB 20/G 20 bis 1000/G 1000	16
Turbinenradgaszähler	$Q_{min} \le Q < 0{,}2Q_{max}$ ±2	$0{,}2Q_{max} \le Q < Q_{max}$ ±1	$Q_{min} \le Q < 0{,}2Q_{max}$ ±4	$0{,}2Q_{min} \le Q \le Q_{max}$ ±2	Mit dauergeschmierten Lagern Mit Schmiereinrichtung ≤ NB 3000/G 2500 G 4000 G 6500	8 12 16 16
Drehkolbenzähler, Turbinenradgaszähler	$Q_{min} \le Q < 0{,}2Q_{max}$ ±2	$0{,}2Q_{max} \le Q < Q_{max}$ ±1	$Q_{min} \le Q < 0{,}2Q_{max}$ ±4	$0{,}2Q_{min} \le Q \le Q_{max}$ ±2	Drehkolbengaszähler ab NB 1500/G 1600 Turbinenradgaszähler mit Schmiereinrichtung ab NB 10000/G 10000	unbefristet unbefristet

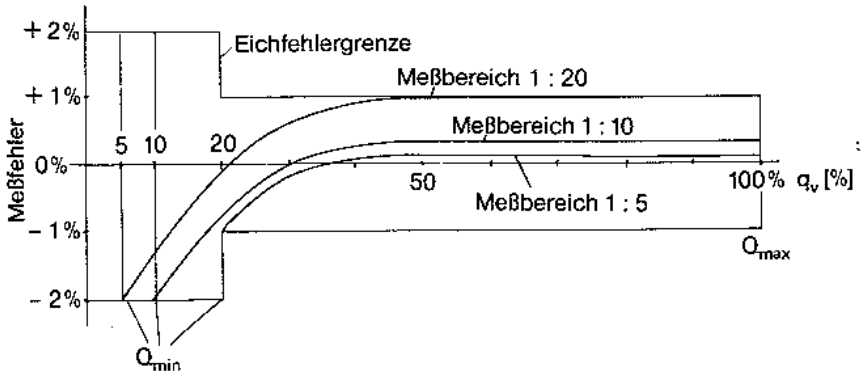
[1] Bei bestendenem Stichproben-Prüfverfahren verlängert sich die Gültigkeit der Eichung um 4 Jahre.

Größenklassen für Gaszähler [21]

Die Größenbezeichnungen für Gaszähler staffeln sich nach einer Potenzreihe.

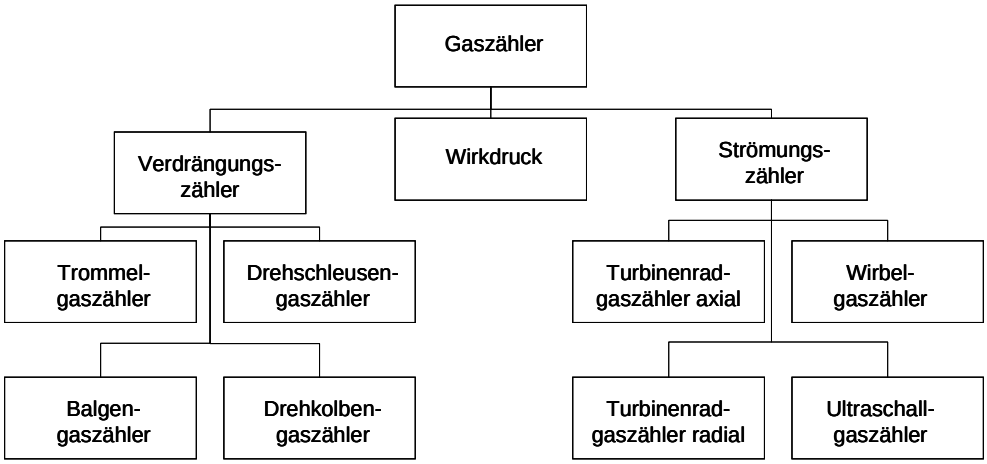
G	Q_{max} m^3/h	Belastungsbereich klein	mittel	groß
		Q_{min} m^3/h		
16	25	5	2,5	1,3
25	40	8	4	2
40	65	13	6	3
65	100	20	10	5
100	160	32	16	8
160	250	50	25	13
250	400	80	40	20
400	650	130	65	32
650	1000	200	100	50
1000	1600	320	160	80
und den dezimalen Vielfachen der letzten fünf Zeilen				

Die früher gebräuchliche Bezeichnung NB (Nennbelastung) wird durch die EU-einheitlichen Bezeichnung G ersetzt. Die Belastungsbereiche sind wählbar zwischen 1:5, 1:10 und 1:20. Ein großer Belastungsbereich scheint vorteilhaft, die Fehlerkurve kann aber bei Einschränkung auf einen kleineren Belastungsbereich näher an die Nulllinie gelegt werden.



Bauarten von Gaszählern

Die verfügbaren Bauarten von Gaszählern beruhen auf unterschiedlichen Messprinzipien. Eine Übersicht ist nachfolgender Abbildung zu entnehmen [19].



Anwendungsbereiche von Gaszählern

Durch die unterschiedlichen Charakteristika verschiedener Zählerarten haben sich folgende Einsatzbereiche etabliert [19]:

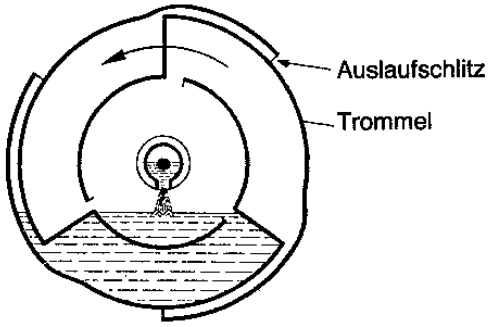
Zählerart	Größenbereich (Q_{max})	Maximaler Betriebsdruck
Balgenzähler	G 1,6 – G 100	DP 1
Drehkolbenzähler	G 40 – G 1000	DP 25
Wirbelzähler	G 40 – G 25000	DP 100
Turbinenradzähler	G 40 – G 25000	DP 100

Drehschleusengaszähler

Drehschleusengaszähler sind Verdrängungszähler mit sich drehenden Messkammerwänden. Die Zähler bestehen aus Drehflügel- und Schleusenkolben, bei denen einer der sich drehenden Kolben mit seinen Flügeln als Messraumbegrenzung, ein anderer Kolben als Schleuse zur Rückführung der Flügel dient. Durch die bei Gasentnahme erzeugte Druckdifferenz fließt eingangsseitig Gas ein und setzt den Drehflügelkolben im ringförmigen Messraum in Rotation, wobei zugleich über ein festes Übersetzungsverhältnis der Schleusenkolben mitbewegt wird. Drehschleusengaszähler verursachen nur geringe Pulsationen und werden daher fast ausschließlich als Normalgerät eingesetzt. [20]

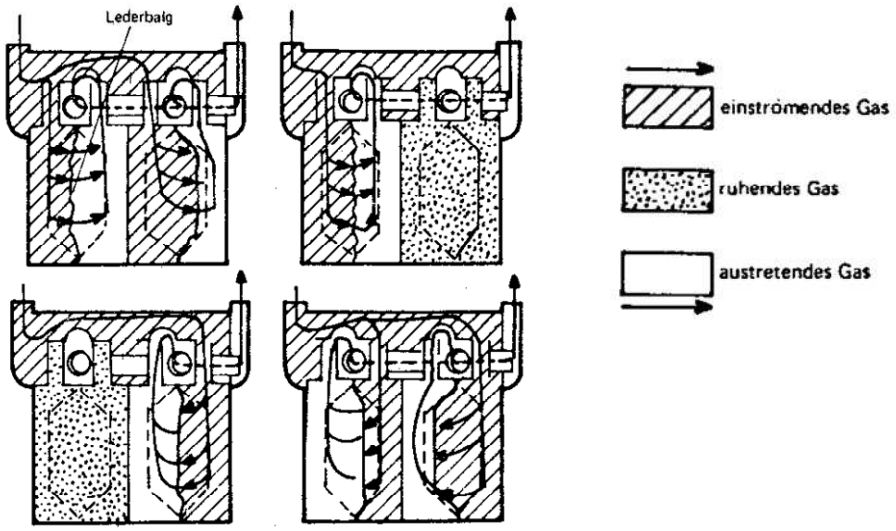
Trommelgaszähler

Trommelgaszähler sind ebenfalls Verdrängungsgaszähler. Die Trommel, das eigentliche Messwerk ist in vier bzw. fünf gleichgroße Kammern unterteilt, die sich nacheinander mit Gas füllen und wieder entleeren. Das in den Zähler einströmende Gas füllt den Innenraum des Zählergehäuses oberhalb der Sperrflüssigkeit vollständig aus. Hierbei wird gleichzeitig eine aufgetauchte Messkammer gefüllt. Durch das bei der Entnahme entstehende Druckgefälle zwischen Ein- und Ausgang des Zählers wird die Trommel in Drehbewegung gesetzt. Bei dieser Drehbewegung wird durch die Füllflüssigkeit jeweils eine Kammer vom Ein- und Ausgang abgeschlossen und somit ein immer gleiches Volumen abgetrennt und gemessen. Trommelgaszähler werden für Volumenströme von 0,2 bis 500 m³/h eingesetzt. In einem Messbereich von 1:20 beträgt der Messfehler ±0,5 bis ±1 %. Sie gehören zu den am genauesten messenden Gaszählern und werden von der PTB als Eichnormale benutzt. Allerdings haben die Messgeräte noch größere Abmessungen als Balgenzähler. Das Funktionsprinzip verdeutlicht untenstehende Abbildung [21].



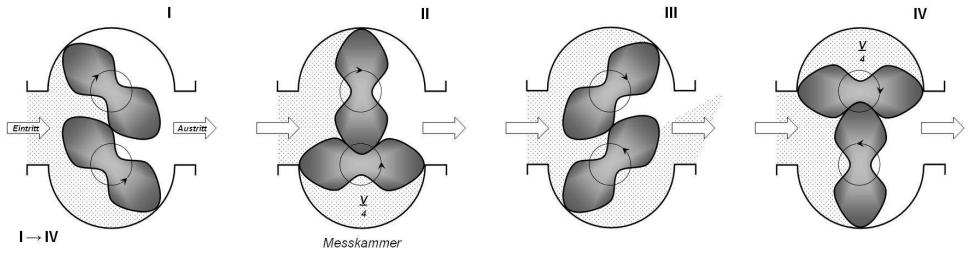
Balgengaszähler

Balgengaszähler sind Verdrängungsmessgeräte, die einen geringen Druckverlust gewährleisten. Die durch Membranen voneinander getrennten Messkammern werden abwechselnd gefüllt und entleert (siehe untenstehende Abbildung [21]). Die Membranbewegung wird mittels eines Gelenkgetriebes auf eine Kurbelwelle übertragen, die zwei Schieber antreibt, welche den Gasstrom steuern. Dieser wird somit abwechselnd durch einen Balg (Kippwaage) geleitet. Die Rotationsbewegung des Getriebes wird mittels Kupplung auf ein Zählwerk übertragen. Balgengaszähler kommen überwiegend in Haushalten zum Einsatz und bei Industrieanwendungen im Niederdruckbereich (bis 0,5 bar Überdruck). Hochdruckanwendungen bis 64 bar sind ebenfalls möglich. Balgengaszähler messen im Haushaltsbereich bis 10 m³/h, im Gewerbebereich bis 40 m³/h und Industriebereich bis max. 400 m³/h. Dazu sind sie recht preiswert, robust und langlebig. Sie verbrauchen keine Fremdenergie, benötigen keine Einlaufstrecke und haben einen geringen Druckverlust. Da das durchströmende Gas die Umgebungstemperatur annimmt, führt das zu Messfehlern (3°C Temperaturänderung = 1% Volumenänderung). Abhilfe schaffen gebogene Bimetallstreifen (mechanische Temperaturkompensation), die mittels Justierschrauben eingestellt werden und temperaturabhängig die Schieberwege bzw. die Öffnungszeiten der Schieber verändern. Der Messbereichsumfang beträgt 1:160.



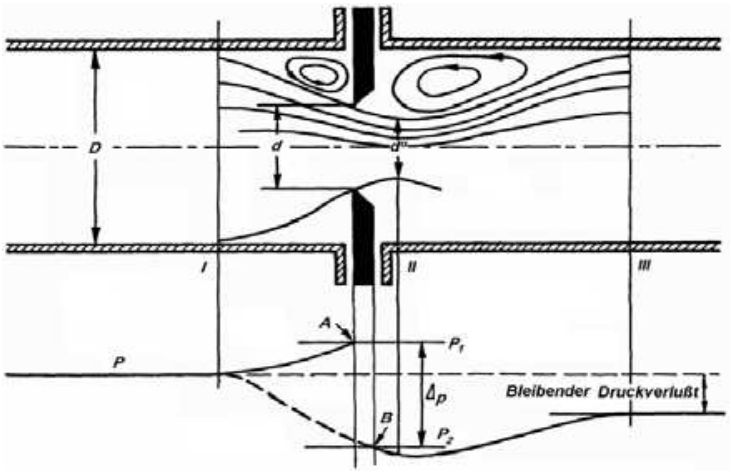
Drehkolbengaszähler

Drehkolbengaszähler sind volumetrische Gaszähler, die nach dem Verdrängungsprinzip mit zwei gegenläufigen, speziell geformten Kolben arbeiten. Die vom durchströmenden Medium angetriebenen Kolben, die über Präzisionszahnräder miteinander verbunden sind, bilden beim Ineinandergreifen Messkammern mit einem definierten Volumen. Das Volumen des durchströmenden Mediums ist proportional der Anzahl der Kolbenumdrehungen. Damit entspricht die Anzahl der Umdrehungen dem Volumen der durchströmenden Menge. Über einen im Messwerk liegenden Getriebesatz und eine Magnetkupplung werden die Umdrehungen der Kolben nach außen auf ein Zählwerk übertragen. Drehkolbengaszähler werden bei niedrigen oder schwankenden Volumenströmen eingesetzt. Das Messprinzip ist auf nachfolgender Abbildung verdeutlicht [22]. Diese Bauform zeichnet sich durch eine robuste und widerstandsfähige Konstruktion, Langlebigkeit, geringen Wartungsaufwand und messtechnische Qualitäten aus. Die Fertigungstoleranzen sind sehr gering, da sich die Kolben weder gegenseitig noch das Gehäuse berühren. Es sind Geräte für Volumenströme von 100 bis 65.000 m³/h und bis 100 bar Betriebsdruck verfügbar. Je größer der Volumenstrom, desto größer das Gewicht und die Abmessungen, z. B. wiegt ein Zähler für 10.000 m³/h Nennvolumenstrom ca. 3,6 t. Der Druckabfall liegt je nach Größe und Gasdichte bei max. 50 mbar.



Wirkdruckgaszähler - Blende

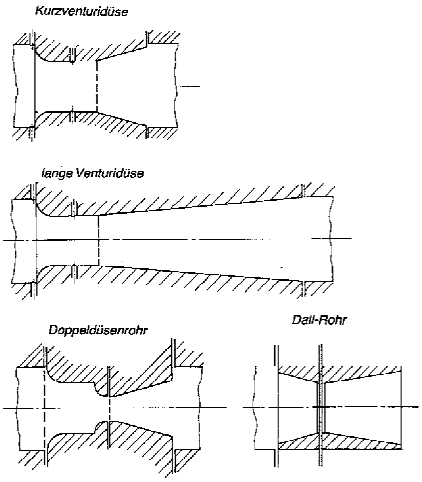
Wirkdruckmesszähler bestehen aus einer Blendenmesstrecke, Wirkdrucksensoren, Wirkdruckrechner und Sensoren für Temperatur und Druck des Gases. Der genaue Aufbau ist in DIN ISO 5167 (früher DIN 1952) geregelt. Das Messprinzip beruht auf der Einschnürung des Rohrinnendurchmessers mittels einer Blende. Durch den geringeren Öffnungsdurchmesser in der Blende wird das Gas beschleunigt, was eine Absenkung des statischen Druckes im Gas bewirkt. Mit Druckaufnehmern kann der Druckunterschied vor und nach der Blende gemessen (siehe Abbildung [23]) und auf diese Weise der Durchfluss berechnet werden.

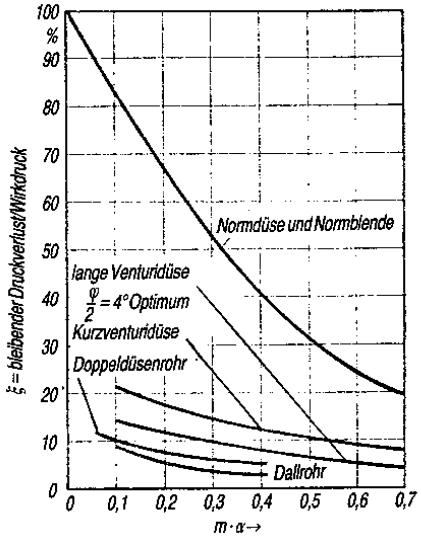


Das Geschwindigkeitsprofil des anströmenden Gases muss sehr gleichmäßig sein. Daher werden hohe Anforderungen an die Einlaufstrecke gestellt, aber auch an die Oberflächenbeschaffenheit der Rohrinnenseite und die Konstanz des Rohrinnendurchmessers. Die Kantenschärfe der Blende ist ebenfalls ein sehr wichtiges Kriterium. Wird die Kante im Lauf der Zeit durch Verunreinigungen etc. abgeschliffen, können Messfehler die Folge sein, besonders bei kleinen Öffnungsdurchmessern. Außerdem wird bei der Blendenmessung ein bleibender Druckverlust erzeugt. Die Technik ist jedoch international anerkannt. Bei Gasanwendungen sollte eine Anströmgeschwindigkeit von 15 m/sec. nicht überschritten werden.

Wirkdruckgas-zähler - Venturi-düse

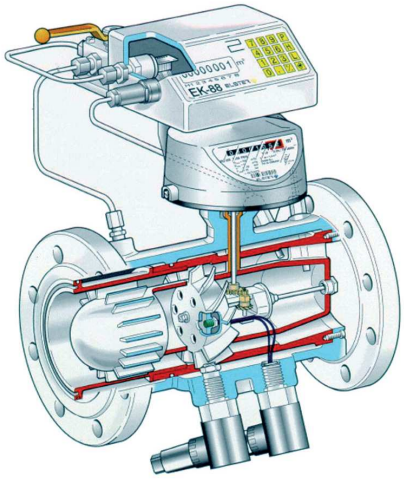
Statt Blenden können auch Normdüsen oder Venturidüsen verwendet werden. Sie verschmutzen nicht so schnell, der bleibende Druckverlust ist niedriger und sie haben eine größere Durchflusszahl als Blenden bei gleichem Wirkdruck. Im Vergleich mit Düsen sind Blenden jedoch preiswerter. Bei Blenden und Düsen ist der bleibende Druckverlust relativ hoch. Günstiger sind Venturirohre, da durch die konische Auslauföffnung der Wirkdruck weitestgehend wieder zurückgewonnen werden kann. Je nach Anwendungsfall können unterschiedliche Geometrien sinnvoll sein (siehe nachfolgende Abbildungen [21]).





Turbinenradgaszähler

Turbinenradgaszähler unterscheiden sich nach radialer und axialer Anordnung des Turbinenrades, wobei die radiale Anordnung nur selten anzutreffen ist. Das einströmende Gas trifft zunächst auf einen Verdrängungskörper, der den durchströmten Querschnitt verengt und somit die Strömungsgeschwindigkeit des Gases erhöht. Das durchströmende Gas versetzt ein Turbinenrad in Rotation, dessen Rotationsgeschwindigkeit ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit des Gases ist. Impulsgeber verwenden die Flügelspitzen, um Impulse zu generieren und so die Rotationsgeschwindigkeit des Turbinenrades zu messen. Diese Art der Messzähler ist jedoch empfindlich gegen nicht optimale Anströmgeschwindigkeitsprofile. Entsprechende Ein- und Auslaufstrecken sind daher vorzusehen. Bei unregelmäßigen Strömungsgeschwindigkeiten läuft das Turbinenrad länger nach, als das es beschleunigt wird. Es sind daher geeignete Vorrichtungen, z. B. Nachlaufbremsen vorzusehen. Den Aufbau eines Turbinenradzählers zeigt nachfolgende Abbildung [25]. Sie werden üblicherweise in gewerblichen Anwendungen für größere Volumenströme zwischen und 65 und 25.000 Nm³/h eingesetzt, wobei der Druckverlust je nach Belastung und Betriebsdruck zwischen 0,5 und 3 mbar liegt.

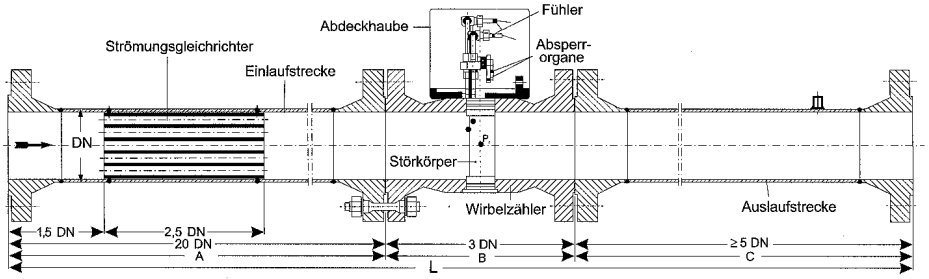


Abhängig vom Druck und damit der Gasdichte ist der Messbereich von Turbinenradzählern [21].

Druck in bar	Meßbereich	Druck in bar	Meßbereich
1	1 : 28	16	1 : 82
2	1 : 36	20	1 : 90
3	1 : 40	25	1 : 102
4	1 : 45	30	1 : 110
5	1 : 49	40	1 : 128
6	1 : 53	50	1 : 143
7	1 : 56	60	1 : 156
8	1 : 60	70	1 : 168
9	1 : 63	80	1 : 180
10	1 : 66		

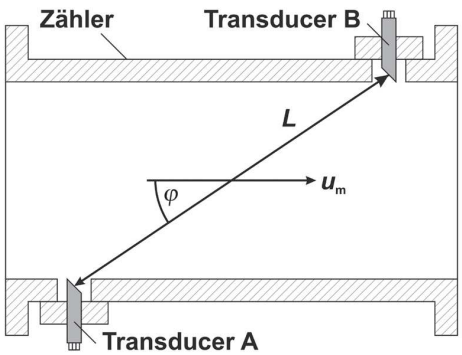
Wirbelgaszähler

Wirbelgaszähler nutzen den Effekt der Ablösung einer Kármánschen Wirbelstraße an einem angeströmten Körper. Der Zähler besteht aus einem Gehäuse mit Kreisquerschnitt und einem T-förmigen scharfkantigen Störkörper. Die Anströmung erfolgt senkrecht zur Stirnseite, so dass sich zu beiden Seiten Wirbel einer Kármánschen Wirbelstraße ablösen. Mit zunehmendem Volumenstrom wird die Frequenz der Wirbelentstehung höher. Die dadurch entstehenden Druckschwankungen werden mittels Thermistoren (beheizte Widerstände) registriert, in Spannungsschwankungen umgesetzt und zur Erzeugung von Rechteckimpulsen genutzt. Die gezählten Impulse sind proportional zum Volumen, welches den Zähler durchströmt hat. Wirbelgaszähler brauchen lange Einlauf- (20 Rohrinnendurchmesser D) und Auslaufstrecken (5 D) gleichen Durchmessers, um den Einfluss von Vorstörungen zu minimieren [24]. Nachfolgende Abbildung [19] zeigt einen Wirbelgaszähler inkl. Ein- und Auslaufstrecke sowie aller erforderlichen Sensoren und Strömungsgleichrichter. Üblicherweise werden alle Teile der Messstrecke in einer Einheit geliefert.



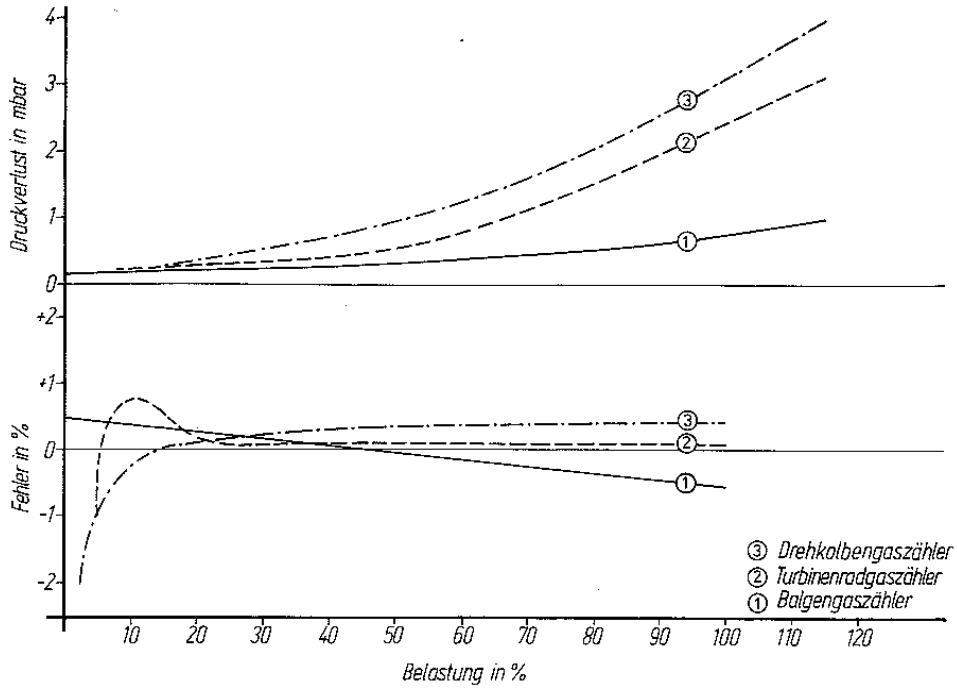
Ultraschallgaszähler

Der Vorteil an Ultraschallgaszählern ist die Abwesenheit beweglicher Teile, so dass kein mechanischer Verschleiß erfolgen kann. Die Differenzen der gemessenen Laufzeiten zwischen Sender und Empfänger und umgekehrt werden zur Geschwindigkeitsmessung des strömenden Gases verwendet. Da bei Großgaszählern mit DN 80 auch bei größeren Einlaufstrecken nicht von einem gleichmäßigen Strömungsprofil ausgegangen werden kann, sind zugelassene Ultraschallgaszähler mit mindestens drei Pfaden ausgestattet [24]. Unten stehende Abbildung zeigt das Messprinzip eines Ultraschallgaszählers mit einem Messpfad [25]. Es sind auch mobile Ultraschallmessgeräte mit aufschnallbaren Messköpfen verfügbar.



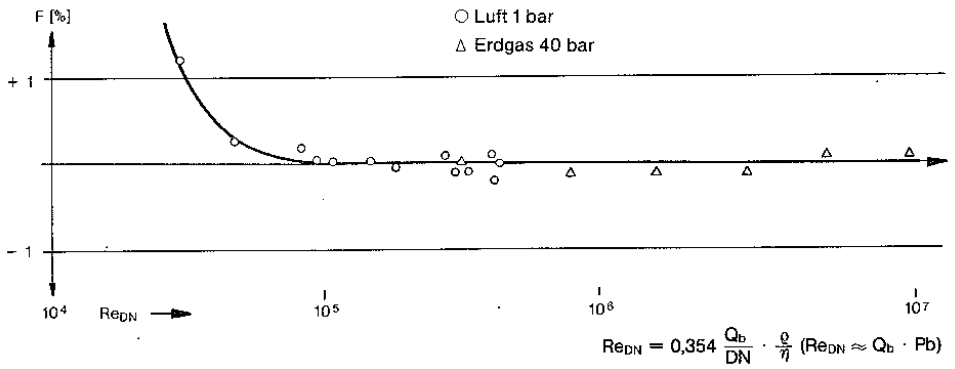
Fehlerkurven verschiedener Gaszähler

Unten stehende Abbildung zeigt die Fehlerkurven von Drehkolben-, Turbinenrad- und Balgengaszählern [19].



Fehlerkurve Wirbelzähler

Beispielhaft ist hier eine Fehlerkurve eines Wirbelgaszähler DN 150 / G 650 zusehen. Auf der x-Achse wird nicht der Durchfluss, sondern die Reynolds-Zahl angezeigt, welche proportional der Dichte ist. Die Messergebnisse bewegen sich innerhalb geringer Fehlergrenzen unabhängig vom Druck [21].



Übersicht Gasmessung

		Balgengaszähler	Drehkolben	Turbinenrad
Druckverlust		sehr gering	sehr gering	sehr gering
Messgenauigkeit		± 1,5%*	± 1%**	± 1,0%***
Messbereich		1:160	1:160	1:30
max. Einsatzdruck	bar	PN 0,5	PN 16	PN 100
Q max	m³/h	160	6.500	25.000
max. Baugröße	mm	DN 100	DN 200	DN 600
max. Betriebstemperatur	℃	-10 bis + 50 ℃	-25 bis + 55 ℃	-10 bis +60 ℃

		Wirbelzähler	Blende
Druckverlust		gering	mittel - hoch
Messgenauigkeit		± 1,0%****	< 1%*****
Messbereich		1:40	1:50
max. Einsatzdruck	bar	PN 250	PN 160
Q max	m³/h	19.700	170.000
max. Baugröße	mm	DN 300	DN 1000
max. Betriebstemperatur	℃	max. 400 ℃	max. 1000 ℃

* von 0,1*Qmax bis Qmax
** von 0,05*Qmax bis Qmax
*** von 0,2*Qmax bis Qmax
**** vom Messwert
***** des berechneten Volumens/Masse

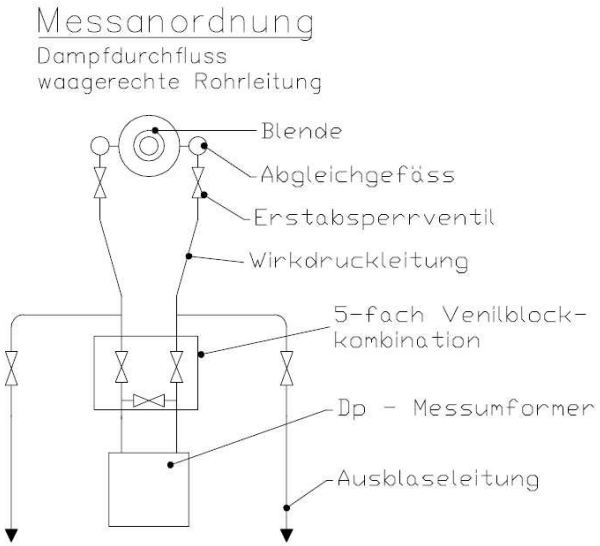
4.2.2 Verfügbare Geräte zur Messung des Dampfverbrauchs

Grundlagen

Die klassische Wirkdruckmesstechnik nach ISO 5167 ist nach wie vor das einzige Verfahren, das auf international gültige Regelwerke rückführbar ist. Jedoch sind Dampfmessungen nicht eichfähig, was eindeutig in der Eichordnung definiert ist (EO 22 Anhang A). Aus diesem Grund muss unter Umständen auf andere geeignete Verfahren zurückgegriffen werden.

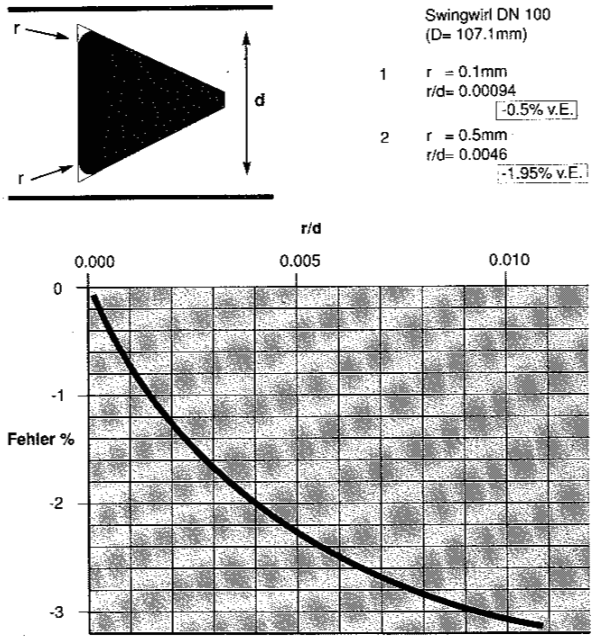
Wirkdruck

Das Prinzip der Wirkdruckmessung wurde unter Kapitel 4.2.1 bereits beschrieben. Bei Dampfanwendungen sollten in Heißdampfleitungen Anströmgeschwindigkeiten von 70 m/sec. nicht überschritten werden. Bei Sattdampfleitungen gilt als maximaler Wert 30 m/sec. Durch die im Sattdampf enthaltenen Wassertröpfchen und die hohe Geschwindigkeit kann Abrasion an der Messblendenöffnung auftreten, was die Geometrie der Öffnung und die Kantenschärfe beeinträchtigt. Falsche Messwerte sind die Folge. Aktuell verfügbare Messtechnik ermöglicht Messbereiche von 50:1 bei einer Messunsicherheit von 0,5% bezogen auf den Massen- und Energiedurchfluss. Wichtig ist die korrekte Einschätzung des Dampfzustandes (Nass-, Satt- oder überhitzter Dampf) sowie des Strömungszustandes des Dampfes. Eine Messanordnung zur Dampfmessung nach dem Wirkdruckverfahren beschreibt die folgende Abbildung [26].



Wirbelzähler

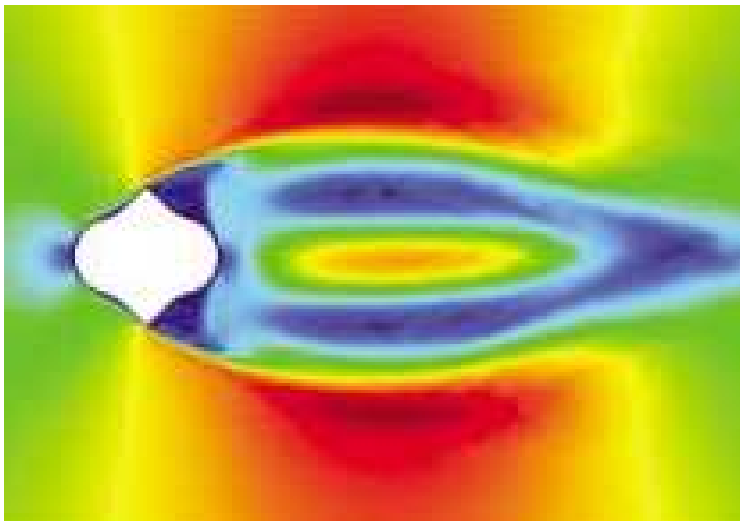
Das Messprinzip der Wirbelzählermessung wurde unter Kapitel 4.2.1 bereits beschrieben. Es ist auch für Dampfanwendungen geeignet. Der Wirbelzähler bildet gemeinsam mit Ein- und Auslaufstrecke sowie der Druck- und Temperaturmessung eine Einheit. Im Gegensatz zur Wirkdruckmessung sind allgemein anwendbare Untersuchungen oder Normen nicht verfügbar. Eine Herstellerkalibrierung der Einzelkomponenten ist nicht ausreichend. Zur korrekten Kalibrierung sollte die Messstrecke auf einem akkreditierten Prüfstand überprüft werden. Ebenso wie bei der Gasmessung kommt der Kantenschärfe des Störkörpers besondere Bedeutung zu, da diese maßgeblich die Messgenauigkeit beeinflusst (siehe Abbildung [21]). Weiterhin ist auf die Einhaltung der Ein- und Auslaufstrecken zu achten.



Bei schwankenden Durchflüssen kann die Parallelschaltung von zwei unterschiedlich großen Wirbelzählern sinnvoll sein [27].

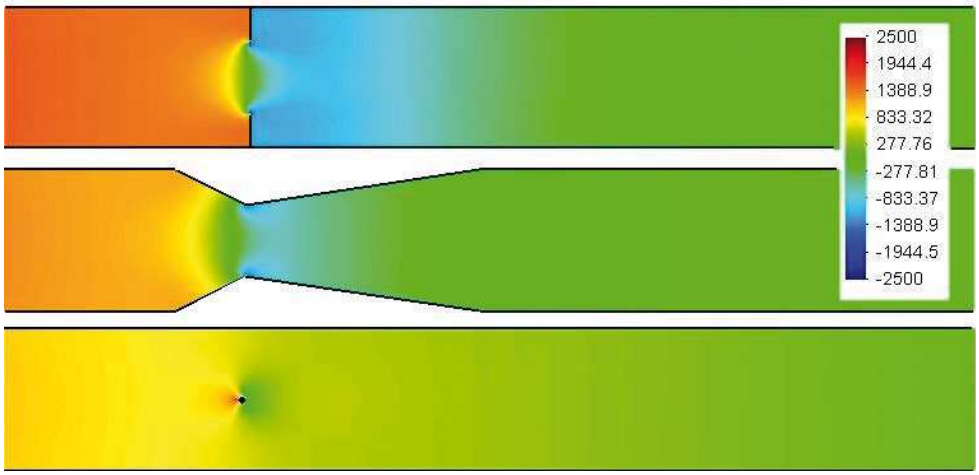
Staudrucksonde

Eine weitere Möglichkeit der Messung von Dampfströmen kann mittels Staudrucksonden erfolgen. Dabei wird ein speziell geformtes Messrohr mit exakt positionierten Messöffnungen in die Strömung eingebracht. Gemessen wird der Unterschied zwischen dynamischen Überdruck, dem. sog. Staudruck (Messöffnung zeigt entgegen der Strömungsrichtung) und statischem Druck (Sondenrückseite oder seitlich). Der gemessene Druckunterschied beider Messstellen ist proportional zum Quadrat der Fließgeschwindigkeit. Unerlässlich für eine korrekte Messung sind genau definierte Strömungsverhältnisse, da Staudrucksonden nur in einer Strömungsebene messen. Die Messbohrungen sind so angeordnet, dass das arithmetische Mittel der Gesamtdrücke gleich ist dem Gesamtdruck, der der mittleren Strömungsgeschwindigkeit entspricht. Da das Geschwindigkeitsprofil am Messort idealerweise rotationssymmetrisch sein sollte, werden hohe Anforderungen an die Ein- und Auslaufstrecken gestellt. Wenn Sonden bei Messungen in Rohren nur einseitig fixiert sind, wirken jedoch Wirbelablösungs- und Fließkräfte auf die Sonde und es besteht die Gefahr der Entstehung von Resonanzschwingungen durch dynamische Belastungen. Übliche Messbereiche von Staudrucksonden sind ca. 1:10. Vorteilhaft ist der geringe bleibende Druckverlust. Verschmutzungen spielen nur eine geringe Rolle und das Messgerät kann einfach ausgebaut und gewartet werden. Die Abrisskanten der Strömung seitlich der Sonde müssen möglichst definiert sein, um stabile Messergebnisse zu erhalten. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein optimiertes Sondenprofil [28]. Erreichbar sind damit Messbereiche von 1:30. Durch Auswahl geeigneter Materialien können unterschiedlichste Temperaturbereiche abgedeckt werden.



Bleibender Druckverlust

Nachfolgende Abbildung [28] zeigt den Druckverlust bei den unterschiedlichen Messverfahren an. Den höchsten bleibenden Druckverlust erzeugt die Blendenmessung, gefolgt von Venturidüse und Staudrucksonde.



Übersicht Dampfmessung

		Wirbelzähler	Differenzdruck	
			Blende	Staudrucksonde
Druckverlust		gering	mittel - hoch	gering
Messgenauigkeit		± 1,0%*	< 1%**	1%**
Messbereich		1:40	1:50	30:1
max. Einsatzdruck	bar	PN 250	PN 160	PN 250
Q max	m³/h	19.700	170.000	400.000
max. Baugröße	mm	DN 300	DN 1000	DN 12000
max. Betriebstemperatur	℃	max. 400 ℃	max. 1000 ℃	bis 1200 ℃

* vom Messwert
** des berechneten Volumens/Masse

4.3 Berechnungs- und Schätzverfahren zur Ermittlung des Wärmebedarfs

4.3.1 Vorgehen

Ermittlung des Wärmebedarfs

Wärme wird in Papierfabriken direkt am Verbraucher erzeugt bzw. auf andere Medien übertragen. Die verwendeten Energieströme müssen für ein erfolgreiches Energiemanagementsystem und eine Zertifizierung möglichst pro Verbraucher zur Verfügung stehen, um eine genaue Aussage über den Ist-Zustand und die erreichten Verbesserungen zu ermöglichen.

Diverse Berechnungs- und Schätzverfahren bieten sich zur Erfassung des Wärmebedarfs von Einzelaggregaten in der Papierindustrie an.

Benötigte Parameter

Für Berechnungs- und Schätzverfahren, die eine nachvollziehbare und praxistaugliche Ermittlung des Dampf- bzw. Wärmebedarfs von Einzelaggregaten ermöglichen, sind zusätzliche Parameter zur Ermittlung notwendig. Fallspezifisch handelt es sich um folgende Größen:

- Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf
- Spezifische Wärmekapazität des Mediums
- Volumen-/Massenstrom des Mediums
- Behältervolumen und Anzahl Füllungen
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Druck bzw. Druckdifferenz
- Ventilatordrehzahl, aufgenommene Leistung bzw. Ventilatorkennlinie
- Durchflusskoeffizient Druckreduzierventil
- Auslegungsdaten (z.B. Nennleistung)

Berechnungs- und Schätzverfahren

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Berechnungs- und Schätzverfahren für folgende Bereiche betrachtet und bewertet.

- Wärmeübertragung ins Wasser
- Wärmeübertragung in das Stoffsystem
- Wärmeübertragung in die Luft
- Allgemeine Verfahren

4.3.2 Wärmeübertragung ins Wasser

Wärmeübertragung ins Wasser

Wärmeübertragung mit Dampf bzw. Gas ins Wasser kann in der Papierindustrie an mehreren Stellen auftreten.

- Frischwasserheizung
- Siebwasser-/Klarwasserheizung
- Gebäudeheizung über Pumpenwarmwassersystem
- Warmwasser für Sanitäranlagen
- Warmwassererzeugung für Stärkekocher
- Enddampfkondensator des Dampf- und Kondensatsystems (Hiko)

Der letzte Punkt ist kein Wärmeverbraucher im eigentlichen Sinn, eine Erfassung der dort niedergeschlagenen Wärmemenge eignet sich aber gut zur Bewertung der Effizienz des Dampf- und Kondensatsystems und zeigt die dort auftretenden Verluste anschaulich auf.

Benötigte Parameter

Folgende Parameter werden benötigt um die übertragene Wärmemenge auf der Wasserseite zu ermitteln.

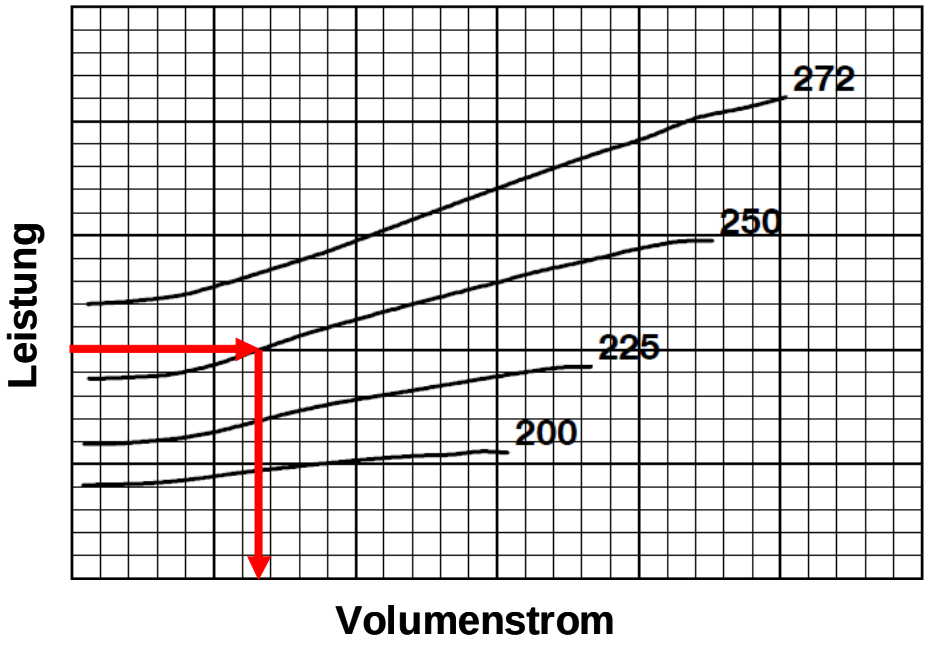
- Volumenstrom Wasser
- Temperatur Vorlauf
- Temperatur Rücklauf

Volumenstrom-messung

Zur Ermittlung des Volumenstroms können sowohl fest installierte (magnetisch induktiv, Coriolis oder Wirbelzähler) als auch mobile Messverfahren (Ultraschall) eingesetzt werden. Die Vor- und Nachteile sowie Anwendungsbereiche der Messverfahren werden in Kapitel 4.3.7 diskutiert.

Volumenstro-mermittlung über die Pumpenkenn-linie

Alternativ zur Messung besteht die Möglichkeit den Volumenstrom anhand der Stromaufnahme sowie der Pumpenkennlinie zu ermitteln. Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Ermittlung des Volumenstroms einer Pumpe anhand einer Pumpenkennlinie [29].



Sollte weder ein Messgerät noch die Pumpenkennlinie verfügbar sein, kann der Nenndurchfluss der Pumpe einen groben Hinweis auf die Größenordnung des Durchflusses liefern.

Ermittlung Temperaturen

Die Ermittlung der Vor- und Rücklauftemperaturen kann sowohl mit fest installierten Einsteckfühlern als auch mit Clamp-On-Temperaturfühlern erfolgen. Clamp-On-Temperaturfühler bieten sich in Kombination mit einem mobilen Datenlogger für Kontrollmessungen bzw. Kurzzeitmessungen an. Kapitel 4.3.7 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile der gängigsten Temperatursensoren.

Wird ein Wasserstrom (z. B. Frischwasser) an mehreren Stellen im Werk separat aufgeheizt, so ist es nicht unbedingt erforderlich den Vorlauf an jeder Stelle einzeln zu messen. Es kann stichprobenartig überprüft werden, ob die Temperatur an jeder Vorlaufstelle gleich hoch ist.

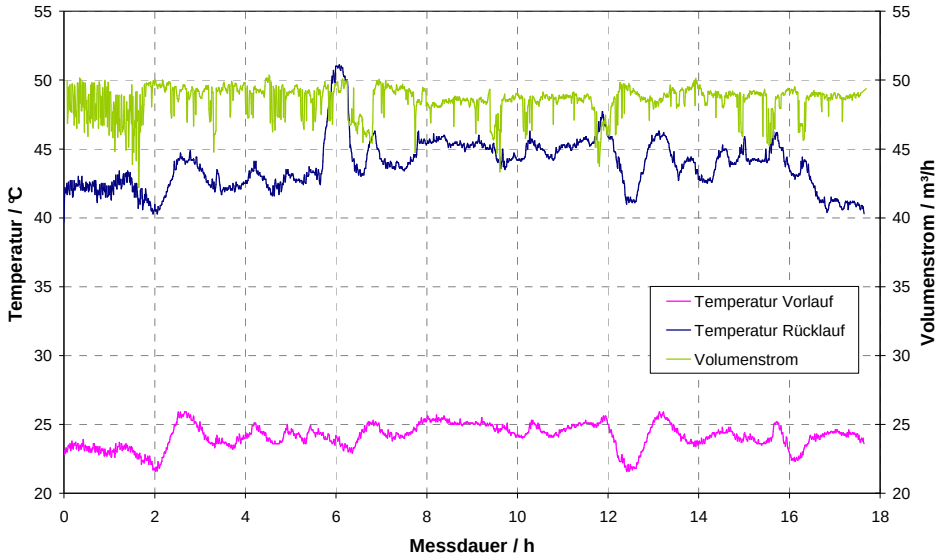
Berechnung der ins Wasser übertragenen Wärmemenge

Die ins Wasser übertragene Wärmemenge lässt sich mit nachfolgender Formel aus den ermittelten Daten berechnen.

$$\dot{Q} = \left(T_{Rücklauf} - T_{Zulauf}\right) \cdot c_p \cdot \dot{m}$$

Messung von Volumenstrom und Temperatur

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Vermessung eines Enddampfkondensators mit einem Ultraschall-Laufzeit-Messgerät und externen Temperaturloggern.



Basierend auf dem gemessenen Volumenstrom und den Temperaturen von Vor- und Rücklauf kann die übertragene Wärme berechnet werden.

Temperatur Vorlauf	Temperatur Rücklauf	Volumenstrom	Übertragene Wärme
24 °C	44 °C	49 °C	1.110 kW

Vor- und Nachteile

Eine Bestimmung des Wärmeeintrags ins Wasser ist sowohl mittels stationären als auch mittels mobilen Messgeräten möglich. Die verfügbaren Messgeräte greifen auf bewährte Verfahren zu und weisen in der Regel eine gute Messgenauigkeit auf.

Bei Messungen mit Clamp-On-Temperatursensoren muss jedoch berücksichtigt werden, dass aufgrund der Wärmeleitung durch das Rohrmaterial und der Konvektion auf der Rohraußenseite die gemessene Temperatur von der realen Temperatur im Medium abweicht.

Bei einem lokal begrenztem Wärmeeintrag (z. B. Dampflanze im Siebwasser) ist die zur Berechnung des Wärmestroms benötigte Messung der Temperatur nur schwer messbar und mit hohen Ungenauigkeiten verbunden, so dass davon abzuraten ist.

4.3.3 Wärmeübertragung in das Stoffsystem

Wärmeübertragung in das Stoffsystem

Wärmeübertragung mit Dampf bzw. Gas ins Stoffsystem kann in der Papierindustrie an mehreren Stellen auftreten.

- Pulperheizung
- Heizschnecke vor der Dispergierung
- Dampfblaskasten in Sieb- oder Pressenpartie
- IR-Trockner in Pressen- und Trockenpartie
- Trocken-/Yankeezylinder

Spezifische Wärmekapazität

Wasser gehört zu den Stoffen mit den höchsten Wärmekapazitäten. Zum Vergleich dazu sind die spezifischen Wärmekapazitäten anderer Papierbestandteile, wie Fasern oder Füllstoffen, deutlich niedriger. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die spezifischen Wärmekapazitäten einzelner Papierbestandteile. Die angegebenen Werte gelten bei Raumtemperatur. Bei höheren Temperaturen ergeben sich aufgrund der Temperaturabhängigkeit abweichende Werte.

Material	Spezifische Wärmekapazität bei Raumtemperatur	Datenquelle
Wasser	4,18 kJ/kg K	[30]
Faser	1,25 – 1,45 kJ/kg K	[31, 32, 33]
trockene Luft	1,01 kJ/kg K	[30]
TiO_2	0,71 kJ/kg K	[31]
$CaCO_3$	0,82 – 0,84 kJ/kg K	[31, 32]
Clay	0,92 – 0,94 kJ/kg K	[31, 32]
Talk	0,81 kJ/kg K	[31]
Füllstoffe	1,0 kJ/kg K	[33]
Streichfarbe, trocken	1,0 kJ/kg K	[33, 34]
trockenes Papier	1,2 – 1,4 kJ/kg K	[34, 35, 36, 37]

Berechnung des Wärmebedarfs

Aufgrund der stark unterschiedlichen spezifischen Wärmekapazitäten sollte insbesondere bei höheren Stoffdichten Wasser und Stoff separat bei der Berechnung berücksichtigt werden. Es ergibt sich:

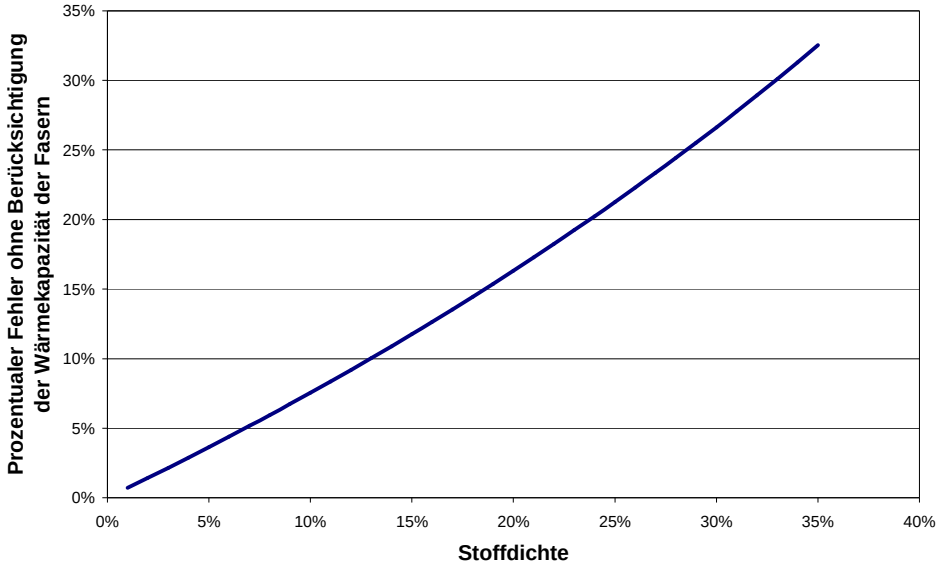
$$\dot{Q} = \Delta T \cdot \dot{m} \cdot \sum_i \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}} \cdot c_{pi}$$

Der Wärmebedarf zur Aufheizung einer Wasser-Faser-Suspension ergibt sich dann wie folgt.

$$\dot{Q} = \Delta T \cdot \left(c_{p_{Wasser}} \cdot \dot{m}_{Wasser} + c_{p_{Faser}} \cdot \dot{m}_{Faser} \right)$$

Einfluss der spez. Wärmekapazität auf die Berechnung des Wärmebedarfs

Nachfolgende Abbildung zeigt in Abhängigkeit von der Stoffdichte den prozentualen Fehler, der auftritt, wenn nur die spezifische Wärmekapazität von Wasser in die Berechnung des Wärmebedarfs zur Aufheizung einer Wasser-Faser-Suspension einfliest.



Ermittlung Massenströme

Wie oben dargestellt ist die Ermittlung des Massenstroms beider Komponenten erforderlich. Neben der messtechnischen Erfassung des Volumenstroms ist somit eine Stoffdichtemessung notwendig. Ist keine Volumenstrommessung (z. B. magnetisch induktiv) installiert kann der Fasermassenstrom über die Produktionsmenge bzw. bei mehrlagigen Produkten über das Lagengewicht ermittelt und die Wassermenge über die Stoffdichte rückgerechnet werden.

Diskontinuierliche Verbraucher

Der Dampfbedarf diskontinuierlicher Dampfverbraucher, wie zum Beispiel Pulperheizung, kann über das Behältervolumen, die Anzahl der Füllungen (n) pro Zeiteinheit sowie die sich ergebende Temperaturdifferenz berechnet werden. Die Wärmemenge kann dann wie folgt berechnet werden.

$$\dot{Q} = \Delta T \cdot c_p \cdot m \cdot n$$

Dampfbedarf Zylindertrocknung

Die im Trocknungsgut enthaltene Feuchtigkeit wird vom flüssigen in den dampfförmigen Aggregatzustand umgewandelt. Diese Änderung des Aggregatzustandes erfordert Energie, die mit Hilfe von dampfbeheizten Trockenzylindern in das Trockengut eingebracht werden muss. Im einfachsten Fall wird gerade die Energiemenge benötigt, die zur Aufheizung der Papierbahn und des darin befindlichen Wassers sowie zur Verdampfung des Wassers erforderlich ist. Dieser Energiebedarf lässt sich wie folgt berechnen:

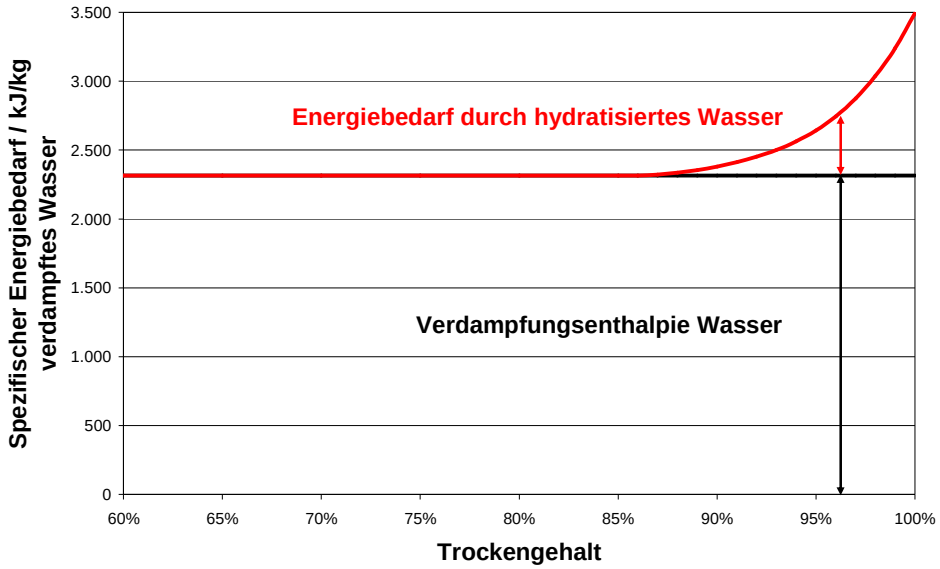
$$\dot{Q} = \Delta T \cdot \left(c_{p_{Wasser}} \cdot \dot{m}_{Wasser} + c_{p_{Faser}} \cdot \dot{m}_{Faser} \right) + \dot{m}_{Wasser} \cdot \Delta h_v$$

Da die Papierbahn in der Regel eine Trocknungskurve mit schwankender Temperatur durchläuft muss näherungsweise eine mittlere Trocknungstemperatur für die Ermittlung des Wertes für die Verdampfungsenthalpie angenommen werden.

Tatsächlich ist der Energiebedarf jedoch höher, da zum einen Wärmeverluste ausgeglichen werden müssen. Diese setzten sich aus Leckage- und Abstrahlungsverlusten der Trockenhaube sowie durch die auf das Papier übertragene Wärme zusammen und können auch bei sorgfältigster Auslegung der Trockenpartie 12-20 % der zugeführten Energie betragen [34, 38]. Zum anderen liegt das Wasser nicht nur frei vor, sondern zu einem gewissen Teil auch hydratisiert.

Energiebedarf durch hydratisiertes Wasser

Zum Aufbrechen der Bindungskräfte innerhalb der Hydratschichten ist Energie notwendig. Wie nachfolgende Abbildung zeigt, wird dieser zusätzliche Energieaufwand bei Trockengehalten größer 85% nennenswert. Er beträgt maximal etwa 1.200 kJ/kg Wasser [38].



Berechnung des Dampfbedarfs für die Papiertrocknung

Im Rahmen des Forschungsprojektes AiF ZUTECH 158 Z „Produktbezogene Referenzwerte zur Bestimmung von Emissionsintensitäten und zugehörigen Kostenreduktionspotenzialen in kmU“ [34] wurde eine Wärmebilanz für den Fall einer kombinierten Kontakt- und Konvektionstrocknung erstellt. Auf dieser Basis lässt sich der Dampfbedarf für die Kontakttrocknung durch kondensierenden Sattdampf berechnen:

$$\dot{m}_D = \frac{\frac{1}{f} \cdot \left(\dot{m}_{RP} \cdot \Delta x \cdot \Delta h_v \right)}{h_D - h'}$$

Dabei stellt f den prozentualen Anteil der belegten Trocknungsfläche bezogen auf die gesamte Oberfläche der Zylinder dar. Die restlichen Formelzeichen sowie Indizes sind im Anhang erläutert.

4.3.4 Wärmeübertragung in die Luft

Wärmeübertragung in die Luft

Luft wird in der Papierindustrie als Heizmedium vor allem im Bereich der Trockenpartie und zur Gebäudeheizung verwendet. Die benötigte Wärme wird dabei sowohl durch Dampf auch durch Gasbrenner eingebracht. In einigen Fällen wird dabei noch ein Pumpenwarmwassersystem zwischengeschaltet. Orte der Lufterwärmung sind:

- Zuluft Trockenpartie
- Gebäudeheizung
- Hochleistungshaube bei Yankeezylindern
- TAD-Trocknung von Tissue
- Heißluft-Schwebetrockner

IR-Trockner dienen zur raschen Erwärmung der Papierbahn und des darin enthaltenen Wassers. Sie werden überwiegend bei der Stricktrocknung eingesetzt. Eine luftseitige Erfassung der übertragenen Wärme ist jedoch nicht möglich, da keine geeignete Messstelle nach dem Strahler vorhanden ist. Da IR-Trockner entweder mit Gas oder elektrisch betrieben werden ist die Erfassung des Energiebedarfs jedoch in der Regel problemlos möglich.

Benötigte Parameter

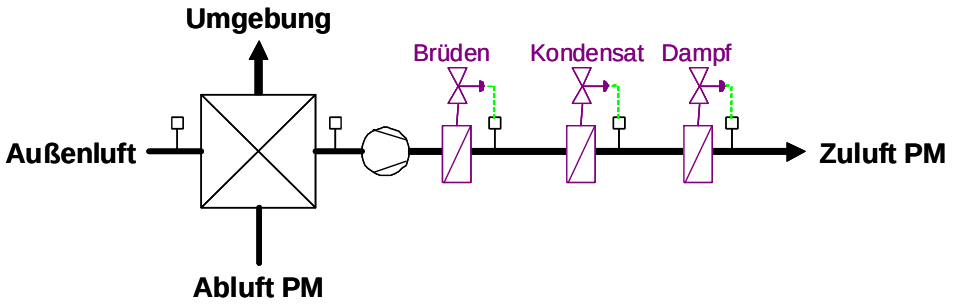
Folgende Parameter werden benötigt um die übertragene Wärmemenge auf der Luftseite zu ermitteln.

- Volumenstrom trockene Luft
- Temperatur vor und nach Wärmeübertragung
- Relative Feuchte
- Luftdruck

Anzahl der Messstellen

Die oben aufgeführten Parameter sollten dabei an folgenden Stellen gemessen werden (siehe auch nachfolgende Abbildung):

- Der Volumenstrom kann entweder auf der Saugseite oder auf der Druckseite des Ventilators gemessen werden. Wichtigste Voraussetzung für eine genaue Messung ist die Eignung des Messortes (Mindestabstand zu Störstellen, Strömungsprofil).
- Für die Bestimmung der Feuchte ist prinzipiell eine Messstelle ausreichend, da der absolute Wassergehalt sich in einem einwandfreien Zuluftsystem nicht ändert. Weitere Messstellen sind jedoch hilfreich um Leckagen sowohl im Bereich der Wärmerückgewinnung als auch bei den Heizregistern identifizieren zu können (Feuchteeintrag).
- Die Temperatur, als wesentlicher Parameter für die Bestimmung des Wärmeeintrags ist prinzipiell nur vor und nach dem gesamten Wärmeeintrag notwendig. Weitere Messungen vor und nach dem einzelnen Heizregister können ergänzend aufgenommen werden um die Regelung und den Einsatz der einzelnen Wärmeträger zu optimieren.



Messung des Volumenstroms

Zur Ermittlung des Volumenstroms können sowohl fest installierte als auch mobile Messgeräte eingesetzt werden. Generell stehen folgende Messverfahren zur Verfügung:

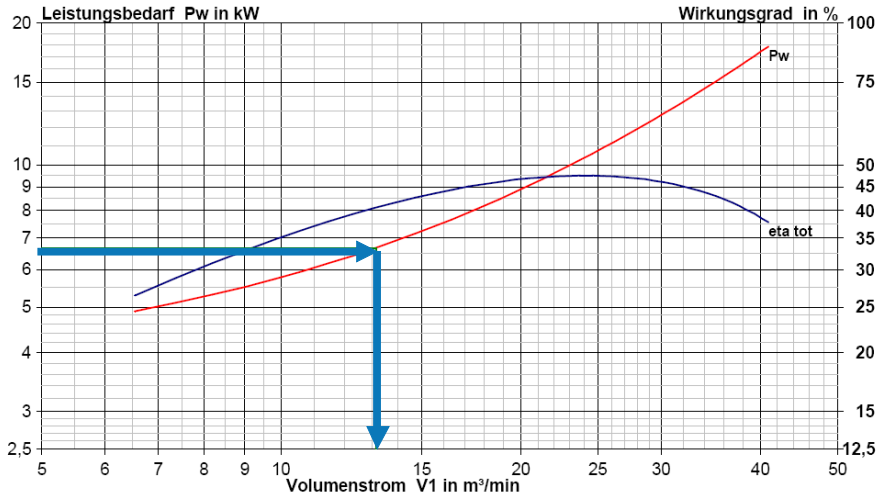
- Flügelrad / Turbinenrad
- Vortex-/Wirbelzähler
- Thermische/Kalorimetrische Messung
- Staudrucksonde

Die Vor- und Nachteile sowie Anwendungsbereiche der Messverfahren werden in Kapitel 4.3.7 diskutiert. Wegen der in der Regel großen Luftkanalquerschnitte erfolgt die Messung an einer oder mehreren repräsentativen Stellen im Strömungsquerschnitt.

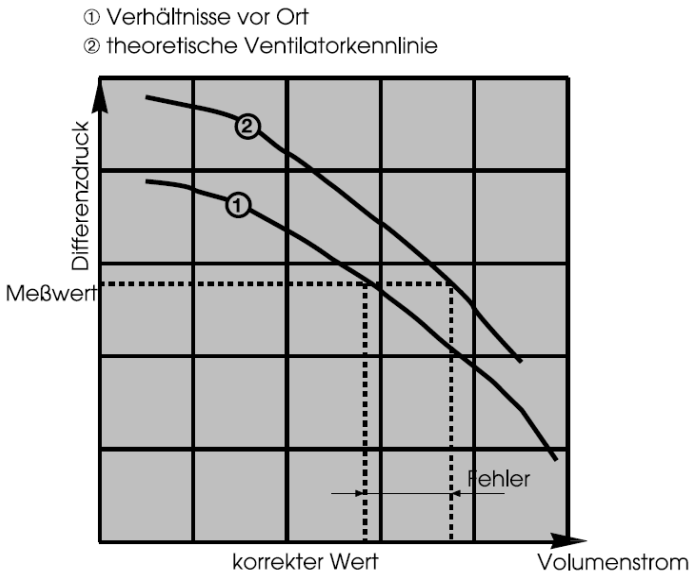
Volumenstrom-ermittlung über die Ventilator-kennlinie

Wenn eine Gerätekennlinie des Ventilators vorliegt, ist eine näherungsweise Ermittlung des Volumenstroms einer lufttechnischen Anlage über eine Messung der Stromaufnahme bzw. einer Differenzdruckmessung möglich.

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Ermittlung des Volumenstroms einer Ventilators anhand einer Ventilatorkennlinie [39] bei bekannter Stromaufnahme.

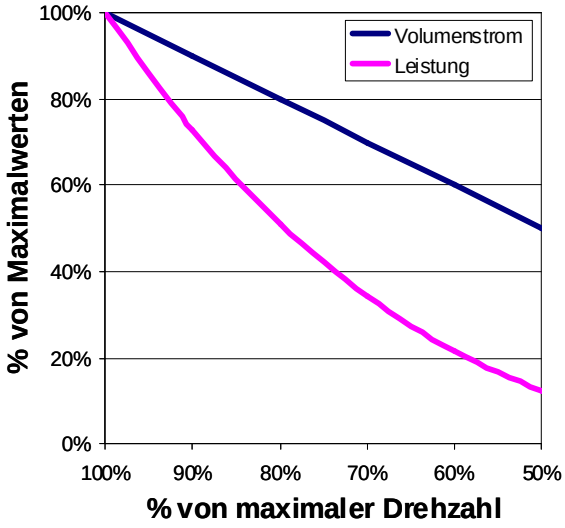


Ermittelt man den Volumenstrom anhand einer Differenzdruckmessung und einer Ventilatorkennlinie aus Firmenunterlagen, können sich je nach der Einbausituation des Ventilators große Abweichungen vom tatsächlichen Volumenstrom ergeben, wie nachfolgende schematische Darstellung zeigt [40]. Die Ventilatorkennlinie wird auf einem genormten Prüfstand ermittelt. Dabei weichen die An- und Abströmverhältnisse zum Teil erheblich von denen im Produktionsbetrieb ab. Eine höhere Genauigkeit kann nur durch eine Vor-Ort-Kalibrierung erzielt werden.



Ermittlung Volumenstrom über Drehzahl bzw. Stromaufnahme

Bei Änderung der Drehzahl ändert sich der Luftvolumenstrom proportional. Der Leistungsbedarf des Ventilators sinkt dagegen bei abnehmender Drehzahl unter der Voraussetzung eines konstanten Ventilator-Wirkungsgrades mit der dritten Potenz der Drehzahl.



$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 = \left(\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2}\right)^3$$

Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die Leistung des Ventilators proportional zur Dichte der Luft ändert.

Enthalpie und Massenstrom

Mit Hilfe eines Mollier-h-x-Diagramms lässt sich aus den Parametern Temperatur und relative Feuchte die spezifische Enthalpie h der feuchten Luft sowie der Wasserdampfpartialdruck p_D ermitteln. Aus Luftdruck und Wasserdampfpartialdruck kann die Dichte der trockenen Luft und damit aus dem Volumenstrom der Massenstrom der trockenen Luft bestimmt werden.

$$\rho_{trockene\ Luft} = \frac{p_{Luft} - p_D}{R_{Luft} \cdot T_{Luft}}$$

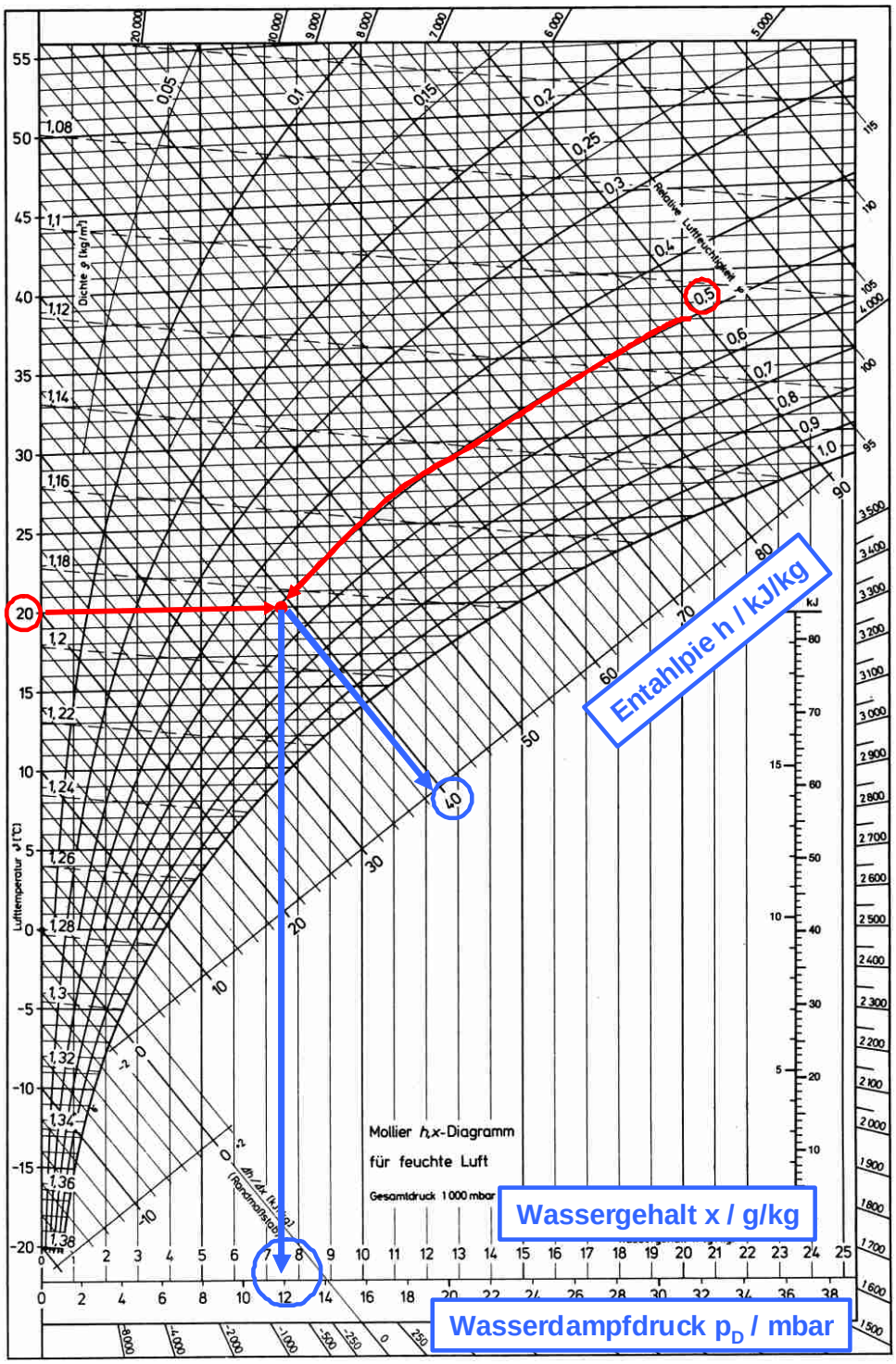
$$\dot{m}_{trockene\ Luft} = \frac{\dot{V}}{\rho_{trockene\ Luft}}$$

Berechnung Wärmemenge

Die übertragene Wärmemenge lässt sich dann wie folgt berechnen:

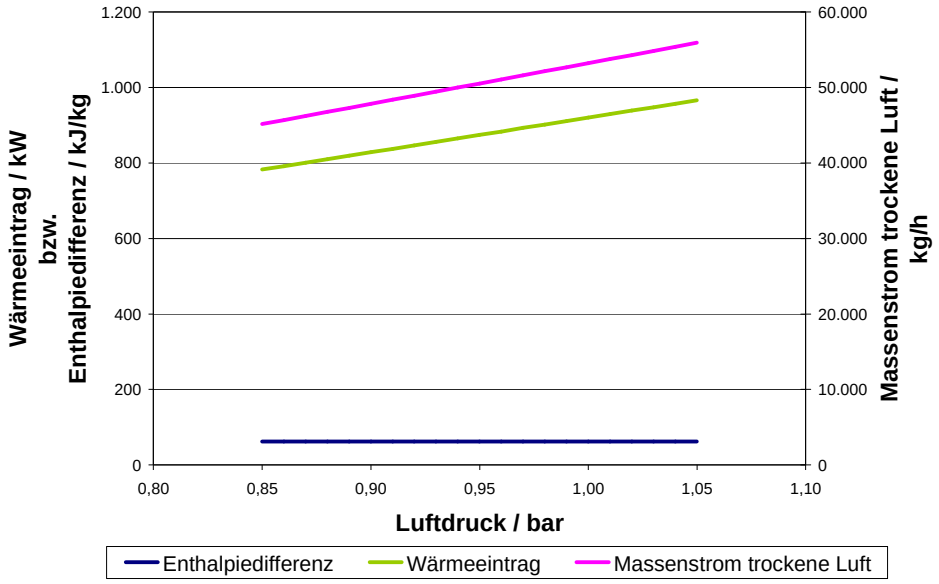
$$\dot{Q} = \dot{m}_{trockene\ Luft} \cdot \Delta h_{feuchte\ Luft}$$

Mollier-h-x-Diagramm [41]



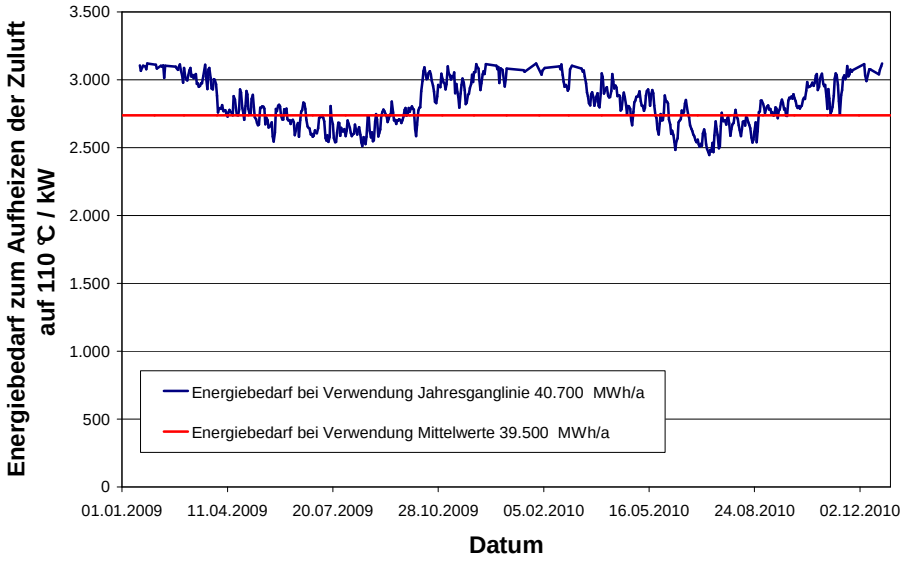
Einfluss des Luftdrucks

Der Luftdruck geht in die Berechnung des Luftmassenstroms sowie des Wärmeeintrags ein. Nachfolgende Abbildung zeigt den Einfluss des Luftdrucks auf diese beiden Parameter.



Verwendung von Klimadaten

Für den Fall, dass Außenluft als Zuluft angesaugt wird, kann bei einer Jahresbilanzierung auf die Feuchte und Temperaturmessung der Zuluft verzichtet werden, wenn man eine gewisse Messunschärfe in Kauf nimmt und öffentlich verfügbare Klimadaten für eine Abschätzung zur Verfügung stehen. Nachfolgende Abbildung zeigt einen Vergleich des ermittelten Energiebedarfs unter Verwendung einer Jahresganglinie sowie unter Verwendung eines Jahresmittelwerts für die Temperatur und Feuchte.



4.3.5 Abschätzung Dampfmenge an Druckregelventilen

Auslegung von Druckregelventilen

Die Auslegung von Druckregelventilen erfolgt über den K_{vs}-Wert. Dieser beschreibt den maximalen Durchfluss durch das Ventil bei Normbedingungen und ist in der Regel in technischen Dokumentationen angegeben. Verschiedene Hersteller geben vereinfachte Berechnungswege basierend auf dem K_v-Wert an, die zu hinreichend genauen Ergebnissen führen [42, 43, 44]. Beispielhaft ist nachfolgend die Berechnungsformel nach MANKENBERG aufgeführt. Im Anhang werden weitere Möglichkeiten dargestellt.

Berechnung Kv-Wert

Der K_v-Wert ist ein Durchflusskoeffizient, der einem Wasserdurchfluss in m³/h bei einem Differenzdruck von 1 bar und einer Wassertemperatur zwischen 5 und 30 °C entspricht.

- Bei einem unterkritischem Druckgefälle, d. h. wenn $\Delta p < \frac{p_{ein}}{2}$ gilt

$$K_v = \frac{\dot{m}}{461} \cdot \sqrt{\frac{t_{ein} + 273}{\Delta p \cdot p_{aus}}}$$

- Bei einem überkritischem Druckgefälle, d. h. wenn $\Delta p > \frac{p_{ein}}{2}$ gilt

$$K_v = \frac{\dot{m}}{230 \cdot p_{ein}} \cdot \sqrt{t_{ein} + 273}$$

Um den K_{vs}-Wert zu erhalten, den das auszuwählende Ventil mindestens haben sollte, wird der errechnete K_v-Wert mit einem Sicherheitszuschlag von 30 % versehen.

$$K_{vs} \geq 1{,}3 \cdot K_v$$

Abschätzung Dampfmenge an Druckregelventilen

Sind der K_{vs}-Wert eines Dampfdruckregelventils sowie die Ein- und Austrittsdrücke bekannt, kann durch Umkehrung obiger Gleichungen, in denen der Wasserdampf als ideales Gas behandelt wird, die Dampfmenge abgeschätzt werden. Nach MANKENBERG ergibt sich beispielsweise

- bei einem unterkritischem Druckgefälle

$$\dot{m} = \frac{\frac{K_{vs}}{1{,}3} \cdot 461}{\sqrt{\frac{t_{ein} + 273}{\Delta p \cdot p_{aus}}}}$$

- und bei einem überkritischem Druckgefälle

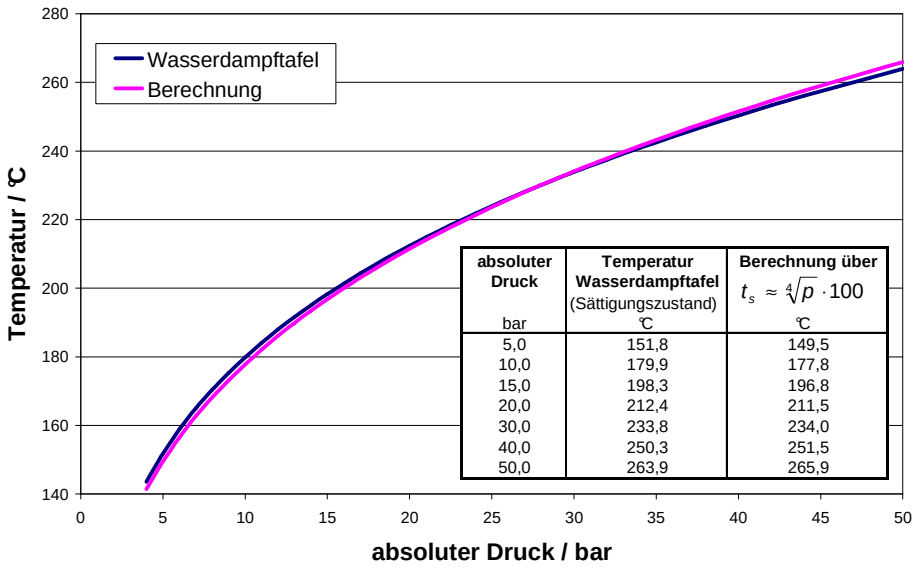
$$\dot{m} = \frac{\frac{K_{vs}}{1{,}3} \cdot 230 \cdot p_{ein}}{\sqrt{t_{ein} + 273}}$$

Temperatur Sattdampf

Die Temperatur von Wasserdampf im Sättigungszustand (Sattdampf) kann, sofern nicht gemessen, einer Wasserdampftafel entnommen werden oder überschlägig mit nachfolgender Formel berechnet werden [42].

$$t_s \approx \sqrt[4]{p_{ein}} \cdot 100$$

Nachfolgende Abbildung zeigt einen Vergleich der mit obiger Formel berechneten Sattdampftemperatur mit den Werten aus der Wasserdampftafel (Sättigungszustand). Die detaillierten Daten befinden sich im Anhang (Tabelle A 1).



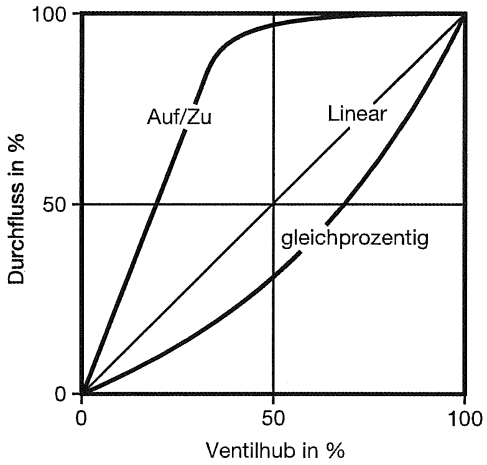
absoluter Druck bar	Temperatur Wasserdampftafel (Sättigungszustand) °C	Berechnung über $t_s \approx \sqrt[4]{p} \cdot 100$ °C
5,0	151,8	149,5
10,0	179,9	177,8
15,0	198,3	196,8
20,0	212,4	211,5
30,0	233,8	234,0
40,0	250,3	251,5
50,0	263,9	265,9

Grafische Ermittlung aus Kennlinien

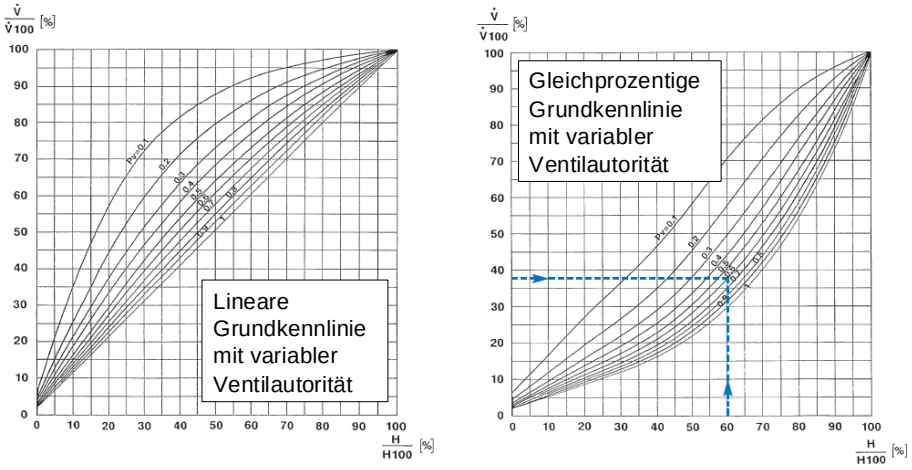
Stehen Kennlinien der Druckregelventile zur Verfügung besteht auch die Möglichkeit einer grafischen Ermittlung des (maximalen) Dampfmassenstroms, wie die im Anhang dargestellten Beispiele veranschaulichen.

Abhängigkeit von der Ventilöffnung

Der K_{VS}- bzw. K_V-Wert ist ein Maß für den maximal möglichen Durchsatz bei Nennhub bzw. für den Durchflusskoeffizienten bei Ventilauslegung. Häufig werden Druckregelventile in der Papierindustrie nicht am Auslegungspunkt bzw. bei Nennhub betrieben. Um den Einfluss der Ventilöffnung berücksichtigen zu können, müssen sowohl die Ventilstellung als auch die Ventilkennlinie bekannt sein. Nachfolgende Abbildung [45] zeigt den Verlauf typischer Kennliniencharakteristiken.



Diese Grundkennlinien werden allerdings nur mit der Ventilautorität gleich eins eingehalten, d. h. nur dann, wenn der Druckabfall über dem 100% geöffneten Ventil gleich dem anstehenden Druck am geschlossenen Ventil ist. In der Regel ist die Ventilautorität kleiner als 1 und dadurch die Grundkennlinie deformiert, wie nachfolgende Abbildung [46] zeigt.



Bewertung	Dieses Verfahren ist für die Auslegung von Dampfdruckventilen geeignet. Eine Umkehrung zur Berechnung von Dampfmengen kann bei kleinen und mittleren Dampfmengen und relativ konstanten Dampfdrücken vor und nach dem Ventil durchgeführt werden (z. B. bei Frischdampfreduzierstationen).

4.3.6 Weitere Verfahren

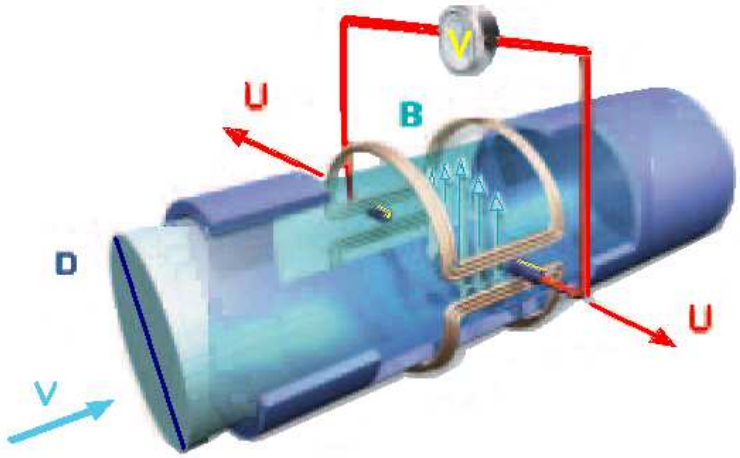
Erfassung Kondensat	Die Messung des Kondensatvolumenstroms ist mit Hilfe geeigneter Durchflussmessgeräte möglich. Insofern stellt die Erfassung des Kondensatvolumenstroms eine weitere Möglichkeit dar, den Dampfbedarf zu ermitteln. Zusätzlich sind zur Bestimmung der Wärmemenge die Temperaturen und der Dampfdruck zu bestimmen.
Installierte Leistung	Ist die installierte Leistung eines Wärmetauschers bekannt (z. B. Dampfheizregister), so lässt sich über diesen Auslegungswert sowie die Anzahl der Betriebsstunden der Wärmebedarf abschätzen.
Bilanzierung	Die Bilanzierung nicht gemessener Verbraucher über Gesamtverbrauch und vorhandene Einzelverbrauchsmessungen ermöglicht die Berechnung des Wärmebedarfs dieser Verbraucher.

4.3.7 Bewertung der benötigten Messverfahren

Volumenstrom flüssige Medien	Die Messung von Volumenströmen ist von zentraler Bedeutung bei der indirekten Ermittlung des Wärmebedarfs. Im Folgenden wird eine Auswahl wichtiger Messverfahren beschrieben, die gebräuchlich sind und in der Praxis häufig angewendet werden. Darüber hinaus gibt es zahlreiche andere Verfahren (z. B. Coriolis, Wirbelzähler), die für den jeweiligen Einsatzzweck ebenfalls geeignet sein können • Magnetisch induktiv • Ultraschall Laufzeitverfahren • Ultraschall Dopplerverfahren Zu beachten ist hierbei jeweils die empfohlene störungsfreie Einlauf- und Auslaufstrecken (zum Beispiel Einlauf: 5 x DN, Auslauf: 3 x DN).

Magnetisch induktiv

Die Messung erfolgt von außen mittels eines durch Spulen aufgebrachten senkrecht zur Flussrichtung orientierten Magnetfelds. Die Ladungsträger in der Flüssigkeit werden abgelenkt und an Elektroden wird durch Ladungstrennung eine Spannung erzeugt. Die gemessene Spannungshöhe ist proportional zum Volumenstrom. Der Messwert entspricht einem Mittelwert über den gesamten Rohrquerschnitt.

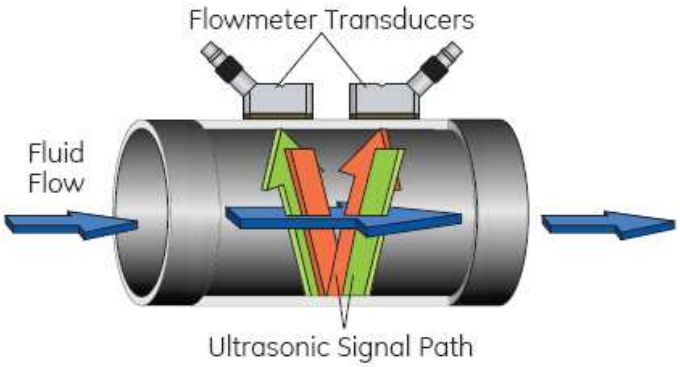


Bildquelle: Krohne Messtechnik GmbH & Co. KG

Die Messgenauigkeit ist in der Regel sehr gut (<1%). Trotz Kontaktes zum zu messenden Medium sind sie auch für aggressive Medien geeignet. Es entsteht kein zusätzlicher Rohrwiderstand, jedoch ist gegebenenfalls eine Einschnürung des Rohrquerschnitts erforderlich. Die Messung ist unabhängig von Druck, Temperatur, Konzentration und Viskosität. Es ist jedoch eine Mindestleitfähigkeit erforderlich, so dass es nicht für vollentsalztes Wasser geeignet ist.

Ultraschall Laufzeitverfahren

Bei der Ultraschall-Laufzeit-Messung werden an der Außenseite der Rohrleitung versetzt gegenüberliegend zwei Ultraschallsonden installiert. Die Sonden fungieren jeweils abwechselnd als Sender und Empfänger. Das Signal wird von der zweiten Sonde aufgefangen. Dabei kann bei entsprechender Anordnung der Sonden auch eine einfache oder mehrfache Reflexion (V-Anordnung, W-Anordnung) an der Rohrwand stattfinden. In einem zweiten Schritt wird ein Signal in der Gegenrichtung ausgesandt. Es wird jeweils die Zeit gemessen, die das Signal zum Durchqueren des Rohres benötigt. Dabei erfährt das Signal in der Fließrichtung eine Beschleunigung innerhalb des strömenden Mediums. Gegen die Fließrichtung wird es verzögert. Die Laufzeitdifferenz ist proportional der Geschwindigkeit des Mediums in der Rohrleitung. Aus der Geschwindigkeit und dem Strömungsquerschnitt errechnet sich der Durchfluss. Die Messung erfasst nicht den kompletten Strömungsquerschnitt, sondern nur eine Ebene



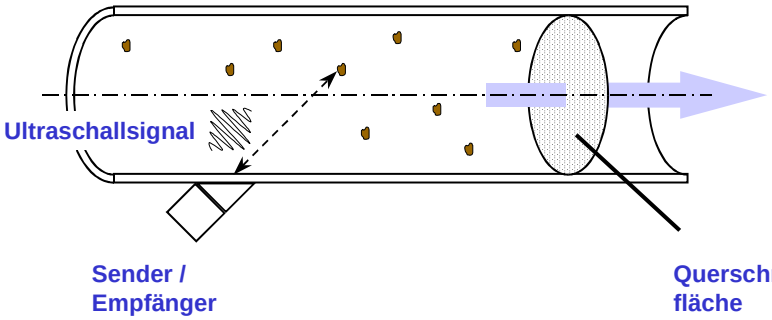
Bildquelle: GE Panametrics

Ultraschalldurchlussmessgeräte eignen sich sehr gut für den mobilen Einsatz. Die Messgenauigkeit ist im Vergleich zur magnetisch induktiven Messung niedriger (ca. ±3%). Es erfolgt kein Kontakt zum Medium, dadurch entsteht kein zusätzlicher Rohrwiderstand und es erfolgt keine Beeinflussung des Strömungsprofils. Wandablagerungen führen zu Messfehlern und Feststoffe bzw. Luftblasen behindern die Messung.

Ultraschall Dopplerverfahren

Bei der Ultraschall-Doppler-Messung müssen im zu messenden Medium Feststoffe enthalten sein. An der Außenseite der Rohrleitung werden eine oder mehrere Ultraschallsonden installiert. Sender und Empfänger können in einer Sonde zusammengefasst sein. Die in der Flüssigkeit enthaltenen Feststoffe streuen das Signal. Das zurückgestreute Signal wird vom Empfänger aufgefangen. Wird eine Schallwelle an einem Partikel reflektiert, welches sich bewegt, so erfährt die Schallwelle eine Frequenzverschiebung (Dopplereffekt). Die Frequenzverschiebung ist proportional der Geschwindigkeit des Partikels. Der Durchfluss errechnet sich wieder aus der Geschwindigkeit und dem Strömungsquerschnitt. Die Messung erfasst nicht den kompletten Strömungsquerschnitt, sondern nur eine Ebene.

Ultraschall-Dopplerverfahren



Auch das Dopplerverfahren ist geeignet für den mobilen Einsatz. Die Messgenauigkeit ist nur eingeschränkt gut. Wie beim Laufzeitverfahren erfolgt kein Kontakt zum Medium, dadurch entsteht kein zusätzlicher Rohrwiderstand und es erfolgt keine Beeinflussung des Strömungsprofils. Wandablagerungen führen zu Messfehlern. Das Verfahren ist nicht für Frischwasser geeignet, da Feststoffe zur Messung erforderlich sind.

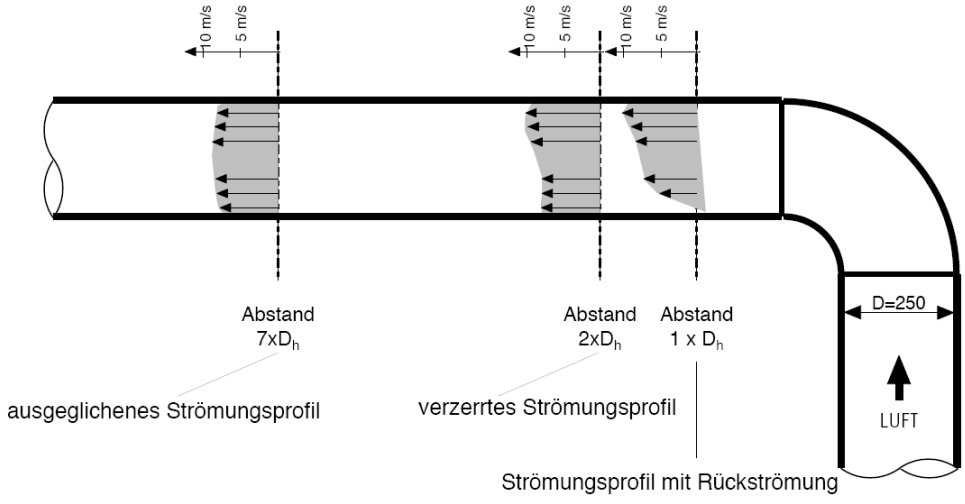
Volumenstrom-messung Luft

Bei der indirekten Erfassung des Wärmebedarfs in Luftströmen ist die Messung des Volumenstroms ein wesentlicher Bestandteil. Abhängig von den Bedingungen vor Ort eignen sich hierfür verschiedene Messverfahren.

- Flügelradsonden: Das Messprinzip beruht darauf, dass ein Flügelrad eine Drehzahl proportional zur Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids annimmt, in das es eingetaucht wird. Die Drehzahl ist nahezu unabhängig von Dichte, Druck und Temperatur des Messmediums.
- Prandtl-Sonde: Die Prandtl-Sonde stellt eine Kombination aus Pitotrohr und statischer Drucksonde dar und hat zwei Druckentnahmestellen. Mit einem Manometer kann die Differenz dieser beiden Drücke gemessen werden. Nach dem Gesetz von Bernoulli entspricht diese Differenz dem dynamischen Druck (Staudruck), der dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit proportional ist.
- Thermische Massesonden: Das Messverfahren basiert darauf, dass ein in das Fluid eingebrachtes Sensorelement elektrisch erwärmt wird. Durch den entstehenden Wärmestrom an das umgebende Gas lässt sich. der Massestrom des Gases bestimmen.
- Vortexmessung: Diese Messprinzip beruht darauf, dass sich an einem Wirbelablöseelement im Sensorkopf periodisch Wirbel bilden. Deren Ablösefrequenz wird mit Hilfe eines Ultraschallfelds erfasst. Hierdurch lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit und der Volumenstrom von Luft/Gasen bestimmen [47].

Bei einer mobilen Messung werden häufig Flügelrad- oder Staudrucksonden eingesetzt.

Hauptfehlerquellen bei der Luftmengenmessung sind der Einsatz von Messgeräten im unteren Teil des Messbereichs sowie Fehler aufgrund einer ungeeigneten Messstelle, die zu einem unregelmäßigen Strömungsprofil führt [40].



Temperatur

Temperatursensoren sind meist elektronische Bauelemente, die eine Temperatur in eine elektrische Größe umwandeln. Häufig werden „Widerstandsthermometer“ oder Thermoelemente eingesetzt.

- PTC-Kaltleiter (Positive Temperature Coefficient) basieren auf einer Widerstandsänderung unter Temperatureinfluss und bestehen aus Platin, Silizium oder Keramik. Sie erfassen die Temperatur über einen Sensor (z. B. Pt-100) durch den ein Messstrom von etwa 1 mA durchgeführt wird. Widerstandsthermometer aus Platin weisen einen nahezu temperaturlinearen Widerstandsverlauf auf und können in einem Bereich von -200 ℃ bis 850 ℃ eingesetzt werden. Sie werden hauptsächlich in der Mess-, Steuer- und Regeltechnik eingesetzt und dienen z. B. zur Überwachung in der modernen Gebäudeleittechnik [48]. Neben diesen PTC-Kaltleitern existieren auch NTC-Heißleiter (Negative Temperature Coefficient) oder Thermistoren. Heißleiter werden aus den Halbleiterwerkstoffen, wie Fe_2O_3, $ZnTiO_4$ oder $MgCr_2O_4$ gefertigt [49].
- Thermoelemente bestehen aus zwei unterschiedlichen Metallen, die an einem Ende miteinander verbundenen sind. Durch den Seeback-Effekt wird bei einer Temperaturdifferenz entlang der Leiter eine Spannung erzeugt, die als Messgröße dient. Je nach Einsatzgebiet werden Thermoelemente in verschiedenen Bauformen gefertigt. Sie werden speziell zur Temperaturmessung in industriellen Prozessen eingesetzt, um auch bei hohen Temperaturen (bis zu 1.200 ℃) sowie rauhen Umgebungsbed ingungen einen genauen Messwert zu erhalten [48].

Feuchte

Zur Feuchtemessung werden in der Regel kapazitive Sensoren eingesetzt, die die relative Feuchte eines Luftstromes bestimmen. Die Genauigkeit ist in der Regel kleiner 2-3 % relative Feuchte. Die Angabe der relativen Feuchte bezieht sich immer auf einen Temperaturwert, so dass parallel die Temperatur gemessen werden muss.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die gemessene absolute Feuchte über lange Kanalstrecken konstant bleibt, vorausgesetzt es kommt nicht zu einer zwischenzeitlichen Trocknung oder Befeuchtung, wie es zum Beispiel durch Kondensationseffekte der Fall sein könnte [40].

4.4 Energiemanagementsysteme und Anforderungen bei der Zertifizierung

EEG-Härtefallregelung

Da durch das EEG für besonders energieintensive Unternehmen hohe Kosten entstehen, ist für diese mit § 40 ff. EEG-2009 eine Härtefallregelung geschaffen worden. Danach können weiterhin stromintensive Unternehmen des produzierenden Gewerbes und auch Schienenbahnen beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) einen Antrag auf Begrenzung der Abnahmepflicht von Strom aus erneuerbaren Energien stellen. Damit sollen die finanziellen Auswirkungen des EEG abgemildert werden.

Einen derartigen Antrag können alle Unternehmen des produzierenden Gewerbes stellen:

- die einen höheren Stromverbrauch als 10 GWh haben und
- deren Stromkosten einen Anteil von mehr als 15 % an der Bruttowertschöpfung aufweisen und
- bei denendie Strommenge nach § 37 EEG-2009 anteilig an das Unternehmen weitergereicht und von diesem selbst verbraucht worden ist und
- die nachweisen können, dass eine Zertifizierung erfolgt ist

---

Aktualisierung BAFA-Merkblatt vom 06.05.2011

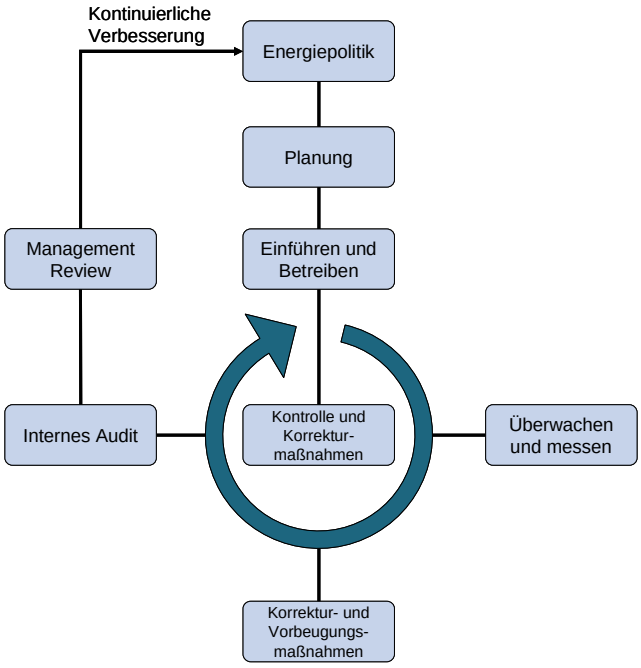
Um die EEG-Härtefallregelung in Anspruch zu nehmen, muss die Zertifizierung bereits im letzten abgeschlossenen Geschäftsjahr ausgestellt worden sein. D. h., will ein Unternehmen 2012 die EEG-Härtefallregelung in Anspruch nehmen, muss nach aktuellem BAFA-Untermerkblatt bis spätestens 31.12.2011 eine Zertifizierung mindestens nach ISO 14001 ausgestellt worden sein, falls das Geschäftsjahr gleich dem Kalenderjahr ist. Für eine Antragsstellung zur EEG-Härtefallregelung sind ab dem Jahr 2012 nur noch EN 16001 und EMAS bzw. die bis dahin voraussichtlich in Kraft getretene internationale Norm ISO 50001 (entspricht DIN EN 16001) als Voraussetzung zulässig. [50]

Mögliche Zertifizierungswege

Um bei der EEG-Härtefallregelung Berücksichtigung zu finden, kann die Zertifizierung auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Ist eine EMAS-Zertifizierung vorhanden, wird eine Zusatzbescheinigung ohne weitere Prüfung ausgestellt. Eine weitere Möglichkeit ist die Neu-Zertifizierung direkt für EN 16001. Die bestehenden Systeme, z. B. ISO 9001 oder 14001 können darin integriert werden. Bei vorhandenem Zertifikat nach ISO 14001 ist eine zusätzliche Prüfung mit anschließender Ausstellung einer Zusatzbescheinigung erforderlich.

Bausteine des Energiemanagementsystems nach DIN EN 16001

Wichtige Bausteine eines Energiemanagementsystems nach DIN EN 16001 sind die Definition der Energiepolitik, das Formulieren von Energiezielen, die Einführung eines Energie-Controllings und die Durchführung von Effizienzprojekten. Nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Funktionsweise eines Energiemanagementsystems [51].



In folgender Abfolge wird eine Zertifizierung durchgeführt und überprüft:

1. Voraudit
2. Dokumentationsprüfung
3. Zertifizierungsaudit
4. Zertifikatserteilung
5. Überwachungsaudits (jährlich)
6. Re-Zertifizierung nach 3 Jahren

Erweiterung von ISO 14001 durch DIN EN 16001

Bei vorhandener ISO 14001-Zertifizierung kann eine Erweiterung auf DIN EN 16001 erfolgen. Verschiedene Aspekte sind unter ISO 14001 schwächer formuliert. Es sind vorwiegend zusätzliche Aussagen speziell zur Energie notwendig. Weiterhin ist unter ISO 14001 eine ständige Verbesserung des Umweltmanagementsystems gefordert, nicht jedoch der Umweltleistung (Energieeffizienz). Eine konkrete Zusammenstellung der notwendigen Erweiterungen wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) zusammengestellt und ist im Anhang finden [52].

Erweiterung von EMAS durch DIN EN 16001

EMAS deckt die Anforderung von DIN EN 16001 weitgehend ab, weshalb auch keine zusätzliche Prüfung vor Ausstellung der nötigen Zusatzbescheinigung erforderlich ist.

Änderungen sind nur in den Aussagen zur Energiepolitik notwendig, da eine Verpflichtung zur ständigen Verbesserung der Energieeffizienz eingegangen wird und die Sicherstellung der Verfügbarkeit von Informationen und aller Ressourcen zur Erfüllung der Ziele. Die Überprüfung durch das Top-Management und die Ergebnisses des Management-Reviews müssen ebenfalls um spezielle Aussagen zur Energie ergänzt werden.

Anforderungen an Messung des Wärmebedarfs

Nach EEG müssen alle Energie verbrauchenden Anlagen und Geräte erfasst und analysiert werden. Nach DIN EN 16001 muss der frühere und aktuelle Energieverbrauch auf Basis von Messungen und anderen Daten ermittelt werden.

Für das Projekt relevante Aspekte aus dem Text der DIN EN 16001 sind in folgenden Kapiteln enthalten:

Kap. 3.3.1: Ermittlung und Überprüfung von Energieaspekten

- Früheren und aktuellen Energieverbrauch auf Basis von Messungen und anderen Daten ermitteln

Kap. 3.3.3: Strategische und operative Energieziele und Programm(e)

- Ziele müssen messbar, dokumentiert und mit Zeitrahmen versehen sein

Kap. 3.5.1 Überwachung und Messung

- Wesentliche Energieverbrauche in festgelegten Zeitabständen messen, überwachen und aufzeichnen

Kap. 3.5.5 Interne Auditierung des EMS

- Status aller Maßnahmen und Verpflichtungen überprüfen und bewerten

Datenerfassung

Der Text der DIN EN 16001 gibt keine konkreten Vorgaben, wie die Datenerfassung zu geschehen hat. Es wird empfohlen, die Bereiche zu betrachten, die einen hohen Anteil am Gesamtenergieverbrauch haben. Welcher Energieverbrauch wesentlich ist, obliegt jedoch der Organisation.

Nach Meinung verschiedener Autoren kann die Datenerfassung vorgenommen werden durch Erfassung unter anderem von (siehe z. B. [53]):

- Verbrauchsdaten (Strom, Öl/Erdgas/Wärme, Druckluft, etc.)
- Vorhandenen Anschlusswerten (Ventilatoren, Maschinen, Kompressor, Wärmeerzeuger, etc.)
- Aufzeichnung des Lastganges der leitungsgebundenen Energieträger
- Betriebszeiten (Betriebsstunden Sommer/Winter, Wochenenden, Produktionsstillstände, etc.)
- Inhalte der Energiebezugsverträge (Preise, Tarifstruktur)
- Betriebsdaten Produktion (Art der Produkte, Mengen, etc.)

4.5 Empfehlungen für die Erfassung des Dampf- und Wärmebedarfs

4.5.1 Vorgehen

Vorgehen

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen sowie den gesetzlichen Regelungen für eine Zertifizierung nach EEG-Ausgleichs- bzw. Härtefallregelung und DIN EN 16001, die die Erfassung und Analyse aller Energie verbrauchenden Anlagen und Geräte sowie die Messung des Energieverbrauchs vorschreiben, wurden Empfehlungen erarbeitet, die eine systematische und umfassende Erfassung des Dampf- und Wärmebedarfs ermöglichen. Wesentliche Randbedingung war dabei, den zusätzlich erforderlichen Aufwand für die Papierfabriken durch geeignete Berechnungs- und Schätzverfahren und ergänzende Messtechnik so gering wie möglich zu halten.

4.5.2 Dampfbedarf der Papierproduktion

Empfehlungen für die Erfassung des Dampfbedarfs

Im Idealfall sollte jeder Dampfverbraucher mit einem eigenen geeigneten Messgerät ausgerüstet werden, um den Dampfverbrauch exakt nachvollziehen zu können. Eine Empfehlung für ein einzelnes Messverfahren kann nicht gegeben werden, da die klassische Wirkdruckmesstechnik nach ISO 5167 nach wie vor das einzige Verfahren ist, das auf international gültige Regelwerke rückführbar ist [54], jedoch nach den in diesem Projekt gemachten Erfahrungen nicht in jedem Fall bei der Zertifizierung akzeptiert wird. Darüber hinaus haben Dampfmessungen den Nachteil, dass sie nicht eichfähig sind. Eine Temperatur- und Druckkompensation sollte bei sich stark ändernden Temperaturen und Drücken vorgesehen werden.

Berechnungsverfahren unter Nutzung anderer messtechnisch erfassbarer Parameter bieten eine Alternative zur herkömmlichen Dampfmessung. Die Art der Erfassung des Dampfbedarfs einzelner Verbraucher (Messung, Berechnung, Abschätzung) kann abhängig von folgenden Faktoren festgelegt werden:

- Anteil am Gesamtverbrauch
- Weiterer Nutzen (z.B. Regelung einer Anlage, Lastmanagement …)
- Aufwand
- Verfügbare Alternativen

Alle Messungen sollten an das Datenerfassungssystem angeschlossen sowie die Daten gespeichert und ausgewertet werden. Nur so lassen sich historische Verbrauchskurven generieren, Optimierungspotenziale lokalisieren und deren Erschließung dokumentieren.

Trockenpartie

Ist-Zustand

Die Trockenpartie ist der wärmespezifische Hauptverbraucher in der Papierfabrik. In der der Regel ist keine separate Erfassung des Wärmebedarfs von Trockenzylindern und Haubenzuluft vorhanden. Aufgrund der Nutzung von Brüden und Kondensat aus der Zylindertrocknung in der Zuluft der Trockenpartie ist eine separate, direkte Erfassung des Dampfbedarfs auch sehr aufwändig.

Verfügbare Mess-, Berechnungs- und Schätzverfahren

- Direkte Dampfmengenmessung
- Abschätzung Dampfmenge an Druckregelventilen über K_{VS}-Wert
- Indirekte Erfassung über Kondensatmessung und Hikomessung
- Indirekte Erfassung Dampfmenge durch Luftmessung für Haubenzuluft

Empfehlung für Erfassung des Dampfbedarfs

Es wird eine Online-Messung des Dampfbedarfs mit Temperatur- und Druckkompensation für die gesamte Trockenpartie (ohne Nebenverbraucher, wie z.B. Dampfblaskasten) empfohlen. Sofern vorhanden, sollte dies optimalerweise getrennt für Vor- und Nachtrockenpartie erfolgen. Ein Herunterbrechen des Dampfbedarfs auf einzelne Trockengruppen / Zylinder ist sehr aufwändig und kostenintensiv. Ein zusätzlicher Nutzen (z.B. bessere Regelbarkeit) entsteht nicht.

Eine Abschätzung des Dampfverbrauchs über den K_{VS}-Wert ist nicht zu empfehlen, da die Trockenpartie der Hauptverbraucher ist und zu hohe Fehlerquellen vorhanden sind. Eine indirekte Erfassung über Kondensatmessung und Hikomessung kann ggf. eine Alternative darstellen, sofern keine anderen Dampfverbraucher angeschlossen sind.

Eine separate Erfassung des Wärmebedarfs der Haubenzuluft ermöglicht eine differenzierte Betrachtung des Luftsystems und der Zylindertrocknung. Aufgrund der Nutzung von Brüden und Kondensat aus der Trockenpartie ist eine alleinige Messung des Dampfes hierfür nicht ausreichend. Es ist eine Installation von lufttechnischen Online-Messungen (Temperatur, Volumenstrom, ggf. Feuchte) zu empfehlen, da diese auch eine optimierte Regelung des Haubenluftsystems (Bewertung Wärmerückgewinnung, Anpassung Haubenluftbilanz, Taupunktregelung) und damit Energieeinsparungen ermöglicht.

Yankeezylinder

Ist-Zustand

Bei Trocknung mit einem Yankeezylinder liegt eine geringere Anlagenkomplexität vor als bei Zylindertrocknung. In der der Regel erfolgt bereits eine separate Erfassung des Wärmebedarfs von Yankeezylinder und der meist gasbefeuerten Hochleistungshaube.

Empfehlung für Erfassung des Dampfbedarfs

Da nur eine geringe Anzahl an Messstellen (1 x Dampf, 1-2 x Gas) vorhanden ist, sollten diese auch separat erfasst werden.

Aufheizung von Wasser

Ist-Zustand

Der Dampfbedarf wird nur in Ausnahmefällen separat erfasst. Auf der anderen Seite sind Prozessparameter, die für eine indirekte Erfassung des Wärmebedarfs notwendig sind, wie Volumenströme und Temperaturen, oft bekannt. Bei einem lokal begrenztem Wärmeeintrag, wie er zum Beispiel durch Dampfeintrag ins Siebwasser mittels einer Dampflanze erfolgt, ist die Temperaturdifferenz allerdings schwer bzw. nur sehr ungenau messbar. Darüber hinaus gibt es keinen Kondensatanfall.

Verfügbare Mess-, Berechnungs- und Schätzverfahren

- Dampfmengenmessung
- Indirekte Erfassung über Kondensatmessung
- Indirekte Erfassung Wärmebedarf über Temperaturdifferenz und Wassermenge

Empfehlung für die Erfassung des Dampfbedarfs

Zur Bestimmung des Wärmeeintrags in Wasser ist in der Regel eine indirekte Erfassung ausreichend genau und damit sehr gut geeignet. Die verfügbaren Messgeräte sind ausgereifte Verfahren und verfügen über eine hohe Messgenauigkeit. Die zusätzliche Installation einer Dampfmessung ist nicht notwendig.

- **Frischwasserheizung**: Eine indirekte Erfassung auf Wasserseite ist sehr gut geeignet. Eine Onlinemessung ist insbesondere bei variierenden Wassermengen sinnvoll (Monitoring Energie- und Wasserbedarf)
- **Siebwasserheizung**: Erfolgt der Wärmeeintrag über einen Dampf-Wasser-Wärmetauscher ist eine indirekte Erfassung leicht möglich. Bei Wärmeeintrag über eine Dampflanze oder ähnliches, sollte eine Dampfmengenmessung installiert werden. Eine Onlinemessung ist bei jahreszeitlich variierendem Bedarf empfehlenswert.
- **Gebäudeheizung über Pumpenwarmwassersystem**: Da Vor- und Rücklauftemperatur typischerweise gemessen werden und häufig ein konstanter Volumenstrom vorliegt empfiehlt sich eine indirekte Erfassung des Wärmebedarfs. Der Volumenstrom kann entweder über Kurzzeitmessungen erfasst werden oder auf Basis von Auslegungsdaten ermittelt werden.
- **Stärkekocher**: Eine indirekte Erfassung kann über die Stärkeeinsatzmenge und/oder über die eingesetzte Wassermenge sowie die Temperaturen erfolgen.

Aufheizung des Stoffsystems

Ist-Zustand

Der Dampfbedarf wird nur in Ausnahmefällen separat erfasst. Dagegen werden für eine indirekte Erfassung des Wärmebedarfs benötigte Parameter prozessbedingt häufig erfasst.

Verfügbare Mess-, Berechnungs- und Schätzverfahren

- Dampfmengenmessung
- Indirekte Erfassung über Kondensatmessung
- Indirekte Erfassung Wärmebedarf über Temperaturdifferenz und Massenstrom

Empfehlung für die Erfassung des Dampfbedarfs

- Dampfverbraucher, wie **Pulperheizung** und **Heizschnecke** vor Dispergierung können gut indirekt erfasst werden, da die dafür notwendigen Größen (Stoffdichte, Temperatur, Massenstrom) in der Regel gemessen werden oder ableitbar sind. Aufgrund der stark unterschiedlichen spezifischen Wärmekapazitäten sollte Stoffdichten Wasser und Stoff separat berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.3.3).
- Dampfverbraucher wie **Dampfblaskasten** können ebenso indirekt erfasst werden. Allerdings ist die messtechnische Erfassung der notwendigen Parameter, wie Trockengehalt der Papierbahn im Bereich Dampfblaskasten und Temperatur der Papierbahn vor und nach Dampfblaskasten, schwieriger bzw. unüblich. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll den Dampfbedarf eines Dampfblaskastens separat mittels einer Dampfmengenmessung zu messen. Dies wird in mehreren Papierfabriken bereits praktiziert. Aufgrund des zum Teil schwankenden Bedarfs ist unter Umständen die Parallelschaltung von zwei unterschiedlich großen Zählern eine Alternative.
- Die im Papier enthaltene Feuchtigkeit wird vom flüssigen in den dampfförmigen Aggregatzustand umgewandelt. Im idealen Fall wird gerade die Energiemenge benötigt, die zur Aufheizung der Papierbahn und des darin befindlichen Wassers sowie zur Verdampfung des Wassers erforderlich ist. Eine indirekte Erfassung des Dampfbedarfs für die Papiertrocknung ist jedoch nicht so einfach, da zum einen die Trocknungskurve eine schwankender Temperatur aufweist, die Wärmeverluste durch Leckage- und Abstrahlungsverluste und Restwärme Papier berücksichtigt werden müssen sowie ein Teil des Wasser hydratisiert vorliegt (siehe Kapitel 4.3.3). Somit kann eine indirekte Berechnung nicht empfohlen werden.

4.5.3 Gasbedarf der Papierproduktion

Empfehlungen für die Erfassung des Gasbedarfs

Die Anwendung von Gas in der Papierindustrie ist in der Regel auf eine überschaubare Anzahl von Anwendungen (z. B. Strichtrocknung oder Hochleistungshaube) beschränkt. Die Messung von Gasvolumenströmen ist etabliert und zuverlässig arbeitende Messgeräte sind verfügbar.

Um den Gasverbrauch exakt nachvollziehen zu können, sollte jeder Gasverbraucher mit einem eigenen geeigneten Messgerät ausgerüstet werden. Bei bestimmten Anwendungen ist auch die gemeinsame Erfassung von mehreren Verbrauchern denkbar, beispielsweise bei zwei Brennern in einer Hochleistungshaube.

Um besonders geringe Messfehler zu erreichen, sollte der Messbereich genau passend ausgewählt werden. Kann der Messbereich verkleinert werden, kann die Fehlerkurve näher an die Nulllinie gelegt werden.

Zusätzlich sollten die einzelnen Gaszähler an ein Datenerfassungssystem angeschlossen sowie die Daten gespeichert und ausgewertet werden. So lassen sich am Besten historische Verbrauchskurven generieren, Optimierungspotenziale lokalisieren und deren Erschließung dokumentieren.

4.5.4 Wärmebedarf in Nebenanlagen

Empfehlungen für die Erfassung des Wärmebedarfs

Empfehlung für die Erfassung des Dampfbedarfs

- Kraftwerk: Zur Steuerung und Regelung des Kessels und der Turbine sind Dampfmessungen sinnvoll. Für eine Bilanzierung ist eine Erfassung des Kondensates von den Produktionsanlagen, der Zusatzwassermenge und des Speisewassers hilfreich.
- Gebäudeheizung: Aufgrund der hohen Anzahl an Einzelaggregaten und des in Summe niedrigen Anteils am Gesamtenergiebedarf wird eine Ermittlung des Energiebedarfs über Betriebsstunden und Auslegungsdaten als ausreichend genau angesehen.
- Schlammtrocknung: Hier eignet sich eine indirekte Erfassung des Wärmebedarfs analog des in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Vorgehens (Massenstrom, spezifische Wärmekapazität, Temperaturdifferenz). Alternativ kann ein Gaszähler oder Dampfmessung eingebaut werden.
- Schrumpfofen: In der Regel werden derartige Aggregate mit Gas oder Strom betrieben, d.h. eine separate direkte Messung ist leicht möglich.
- Individuelle Aggregate, wie zum Beispiel eine Kreppmaschine oder eine Kaschiermaschine müssen im Einzelfall betrachtet werden. Bei Dauerbetrieb ist aber eine Dampfmengenmessung zu empfehlen.

4.5.5 Wärmebedarf in der Zellstoffproduktion

Empfehlungen für die Erfassung des Wärmebedarfs

Ist-Zustand

Zellstofffabriken sind besonders betroffen vom Auslaufen der Übergangsregelung für die besondere Ausgleichsregelung (§ 40 ff EEG) in 2012 und der Notwendigkeit für die Einführung eines Energiemanagementsystems, da sie eine große Menge Energie nach EEG erzeugen (Schwarzlaugenkessel).

Empfehlung für die Erfassung des Wärmebedarfs

- **Holzplatz:** Der Wärmebedarf am Holzplatz kann aufgrund seiner im Vergleich zu den weiteren Verbrauchern geringen Menge über den Gesamtverbrauch bilanziert werden. Alternativ kann ein Zähler installiert werden.
- **Zellstoffkocher:** Eine indirekte Erfassung über Temperaturdifferenz, Massenstrom und spez. Wärmekapazität ist für die Zellstoffkocher im Prinzip möglich. Aufgrund des hohen Energiebedarfs ist jedoch eine separate Messung für die Kocher zu empfehlen.
- **Warmwasser/Prozesswasserheizung**: Hier eignet sich eine indirekte Erfassung des Wärmebedarfs analog des in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Vorgehens (Massenstrom, spezifische Wärmekapazität, Temperaturdifferenz)
- **Zellstoffbleiche**: Hier eignet sich eine indirekte Erfassung des Wärmebedarfs analog des in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Vorgehens (Massenstrom, spezifische Wärmekapazität, Temperaturdifferenz)
- **Eindampfanlage**: Eine indirekte Erfassung über Temperaturdifferenz, Massenstrom und spez. Wärmekapazität ist für die Eindampfung theoretisch möglich. Aufgrund des hohen Energiebedarfs ist jedoch eine separate Messung für die Eindampfanlage zu empfehlen.
- **Zellstofftrocknung/-maschine:** Die Zellstofftrocknung sollte genau so behandelt werden, wie die Trockenpartie der Papiererzeugung und somit je nach Trocknungstechnologie mittels einer Dampfmengenmessung bzw. einem Gaszähler erfasst werden.

4.5.6 Anwendung und wirtschaftliche Bedeutung für die Papierindustrie

Reduzierung Dampfbedarf

Die Forschungsergebnisse ermöglichen es den Unternehmen, ihren Wärme- bzw. Dampfbedarf transparenter darzustellen und zu bewerten. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die weitere Reduzierung des Energiebedarfs. Die Handlungskompetenz der Unternehmen wird in diesem Bereich gestärkt. Zusätzlich wird der Erfolg von Maßnahmen zur Dampfeinsparung nachweisbar.

Energiemanagementsystem

Im Rahmen der Zertifizierung und der Implementierung von Energiemanagementsystemen können die erarbeiteten Empfehlungen dazu beitragen, den Dampf- und Wärmebedarf besser zu dokumentieren und quantifizierbare Ziele für eine Einsparung zu erarbeiten. Damit werden Voraussetzungen geschaffen, die es Unternehmen ermöglichen, materielle Vergünstigungen, wie beispielsweise Energiesteuerrückerstattungen nach §40 EEG (Härtefallregelung), zu erhalten, die zukünftig an die Einführung eines zertifizierten Energiemanagementsystems gebunden sein können.

Stand der deutschen Papierindustrie

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass die Werke der deutschen Papierindustrie bei der Erfassung des Dampf- und Wärmebedarfs sehr unterschiedlich aufgestellt sind. Während einige Werke bereits heute nahezu jeden wesentlichen Verbraucher messen und ein konzernweites Energiemanagementsystem aufgebaut haben, stehen andere Werke noch am Anfang. Speziell für diese wird es in Zukunft einen erheblichen Aufwand bedeuten, die Vorgaben, die für die Zertifizierung notwendig sind, zu erfüllen. Die im Rahmen des Projektes gemachten Empfehlungen können helfen, den Aufwand hierfür im Rahmen zu halten.

Kostenschätzung

Im Rahmen einer Beispielrechnung wurde basierend auf einer Modellpapierfabrik und Richtpreisangeboten bzw. Listenpreisen der Kostenaufwand abgeschätzt, der durch Installation von Dampfmessungen an allen Dampfverbrauchern entsteht. Die Kosten zur Einbindung in das Prozessleitsystem und Installation wurden pauschal mit einem Aufschlag berücksichtigt. Planungskosten (auch des Betreibers), Abnahmen, Dokumentation und Stillstandskosten wurden nicht berücksichtigt.

Der Aufwand wurde mit den Einsparungen verglichen, die entstehen wenn, wie in dem Projekt empfohlen, einzelne Dampfverbraucher durch geeignete Berechnungs- und Schätzverfahren erfasst werden.

Dampfverbraucher	Anzahl	Kosten Dampfmessung €	Empfehlung für Erfassung des Wärmebedarfs	resultierende Kosten €
Trockenpartie	2	30.000	Dampfmessung mit T- und p-Kompensation	30.000
Frischwasserheizung	1	6.000	indirekte Erfassung aus Prozessdaten *	0
Zuluft Vortrockenpartie	2	11.000	indirekte Erfassung durch Luftmessung	12.000
Zuluft Nachtrockenpartie	1	6.000	indirekte Erfassung durch Luftmessung	6.000
Disperger	1	10.000	indirekte Erfassung aus Prozessdaten *	0
Stärkekocher	1	3.000	indirekte Erfassung aus Prozessdaten *	0
Gebäudeheizung	20	50.000	Abschätzung über installierte Leistung u. Betriebsstunden	0
Gesamtkosten		**116.000**		**48.000**

* wenn Messung nicht vorhanden können weitere Kosten entstehen

5 Danksagung

Projektbegleiter und Papierfabriken

Unser besonderer Dank gilt den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses sowie den Vertretern der beteiligten Werke für ihre intensive Unterstützung!

VDP

Dem Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), Bonn danken wir für die finanzielle Förderung des Projektes.

6 Anhang

6.1 Abschätzung Dampfmenge an Druckregelventilen

Auslegung von Druckregelventilen nach SAMSON

SAMSON gibt abweichende Formeln für eine vereinfachte Berechnung des K_v-Wertes von Ventilen an [43]. Hierbei ist jedoch die Verwendung einer Wasserdampftafel zur Ermittlung der Stoffdaten notwendig.

- Bei einem unterkritischem Druckgefälle, d. h. wenn $\Delta p < \frac{p_{ein}}{2}$ gilt

$$K_v = \frac{\dot{m}}{31{,}62} \cdot \sqrt{\frac{v_{aus}}{\Delta p}}$$

- Bei einem überkritischem Druckgefälle, d. h. wenn $\Delta p > \frac{p_{ein}}{2}$ gilt

$$K_v = \frac{\dot{m}}{31{,}62} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot v^*}{p_{ein}}}$$

Wurden bei der Berechnung reale Betriebswerte eingesetzt, gilt allgemein:

- für Regler ohne Hilfsenergie: $K_{vs} = 1{,}33 \cdot K_v$
- für Motorventile: $K_{vs} = 1{,}11 \cdot K_v$

Abschätzung Dampfmenge an Druckregelventilen nach SAMSON (1)

Durch Umkehrung dieser Gleichungen kann wiederum die Dampfmenge abgeschätzt werden.

- Bei einem unterkritischem Druckgefälle ergibt sich

$$\dot{m} = \frac{K_v \cdot 31{,}62}{\sqrt{\frac{v_{aus}}{\Delta p}}}$$

- Bei einem überkritischem Druckgefälle ergibt sich

$$\dot{m} = \frac{K_v \cdot 31{,}62}{\sqrt{\frac{2 \cdot v^*}{p_{ein}}}}$$

Abschätzung Dampfmenge an Druckregelventilen nach SAMSON (2)

Bei Wasserdampf kann nach SAMSON zur Berechnung des Massenstroms auch folgende Gleichung angewandt werden [44].

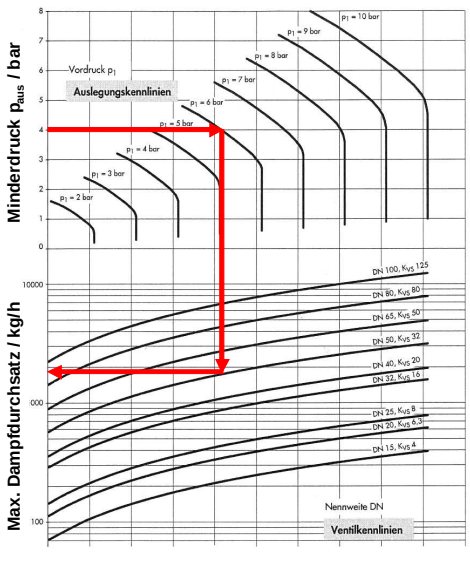
$$\dot{m} = K_v \cdot Z \cdot m$$

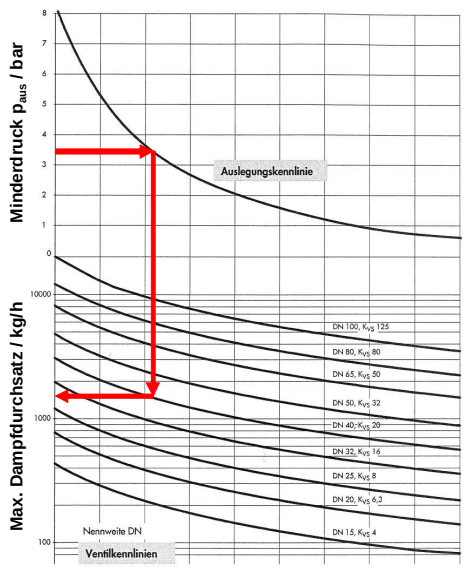
Der dimensionslose Realgasfaktor Z kann entsprechend dem Vordruck p_{ein} aus Tabelle A 2 entnommen werden. Dabei ist zwischen Sattdampf und überhitztem Dampf zu unterscheiden.

Der dimensionslose Druckverlustkoeffizient m kann aus Tabelle A 3 bzw. für Zwischenwerte aus dem beigefügten Diagramm entsprechend $\chi = 1{,}135$ entnommen werden

Grafische Ermittlung nach SAMSON [55]

Bei einzelnen Herstellern lässt sich der Dampfbedarf auch grafisch aus Kennlinien ermitteln.





Grafische Ermittlung nach SPIRAX SARCO [56]

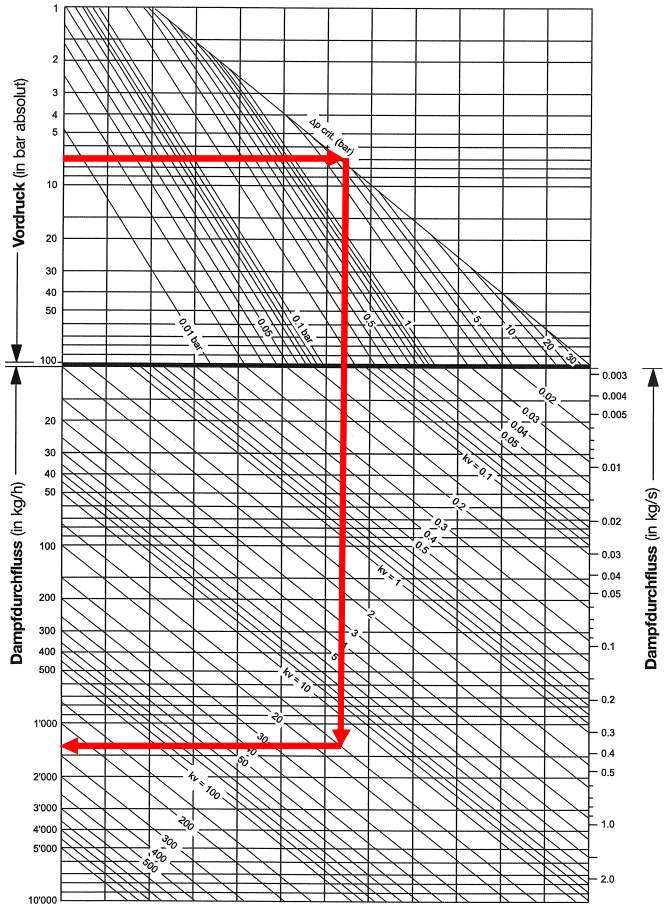


Tabelle A 1 Vergleich Sattdampftemperatur Wasserdampftafel gegen Berechnung

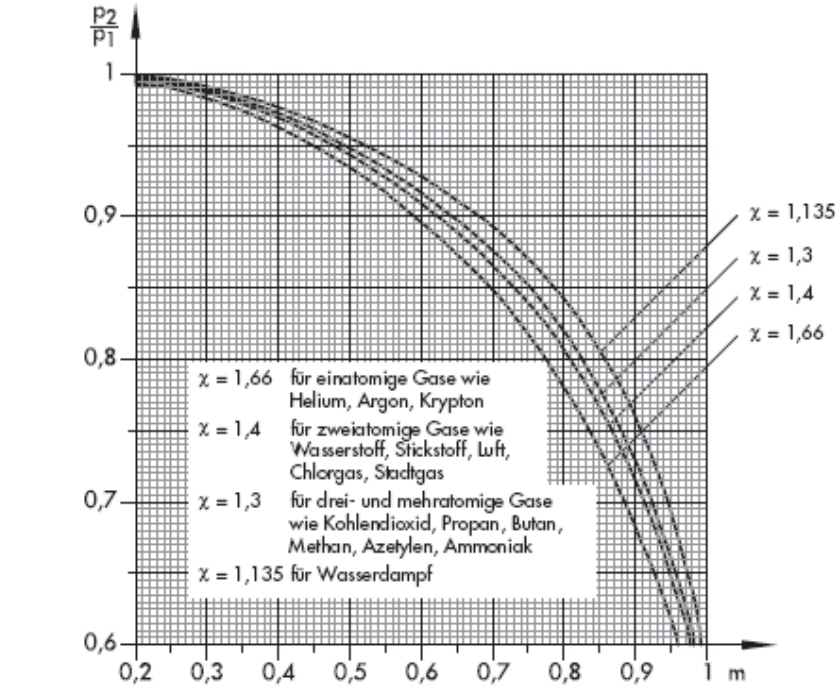
Überdruck bar	**absoluter Druck** bar	**Temperatur Wasserdampftafel** (Sättigungszustand) ℃	**Berechnung über** $t_s \approx \sqrt[4]{p} \cdot 100$ ℃
3,0	4,0	143,6	141,4
4,0	5,0	151,8	149,5
5,0	6,0	158,8	156,5
6,0	7,0	165,0	162,7
7,0	8,0	170,4	168,2
8,0	9,0	175,4	173,2
9,0	10,0	179,9	177,8
10,0	11,0	184,1	182,1
11,0	12,0	188,0	186,1
12,0	13,0	191,6	189,9
13,0	14,0	195,0	193,4
14,0	15,0	198,3	196,8
15,0	16,0	201,4	200,0
16,0	17,0	204,3	203,1
17,0	18,0	207,1	206,0
18,0	19,0	209,8	208,8
19,0	20,0	212,4	211,5
20,0	21,0	214,9	214,1
21,0	22,0	217,2	216,6
22,0	23,0	219,6	219,0
23,0	24,0	221,8	221,3
24,0	25,0	223,9	223,6
25,0	26,0	226,0	225,8
26,0	27,0	228,1	228,0
27,0	28,0	230,1	230,0
28,0	29,0	232,0	232,1
29,0	30,0	233,8	234,0
31,0	32,0	237,5	237,8
33,0	34,0	240,9	241,5
35,0	36,0	244,2	244,9
37,0	38,0	247,3	248,3
39,0	40,0	250,3	251,5
41,0	42,0	253,2	254,6
43,0	44,0	256,1	257,6
45,0	46,0	258,8	260,4
47,0	48,0	261,4	263,2
49,0	50,0	263,9	265,9

Tabelle A 2 Realgasfaktor Z für Berechnung Dampfmassenstrom nach SAMSON [44]

Realgasfaktor Z für ...													
p_1 in bar	Satt-dampf	überhitzten Dampf bei folgenden Temperaturen ...											
		60° C	80° C	100° C	120° C	140° C	160° C	180° C	200° C	250° C	300° C	350° C	400° C
0,1	1,16	1,13	1,1	1,07	1,04	1,02	0,99	0,97	0,95	0,90	0,86	0,83	0,80
0,2	2,27	2,27	2,21	2,15	2,09	2,04	1,99	1,95	1,90	1,81	1,73	1,66	1,59
0,3	3,37		3,31	3,22	3,14	3,06	2,99	2,92	2,86	2,71	2,59	2,49	2,39
0,4	4,45		4,42	4,29	4,18	4,08	3,98	3,89	3,81	3,62	3,46	3,32	3,19
0,5	5,53			5,37	5,23	5,10	4,98	4,86	4,76	4,52	4,33	4,15	3,99
0,6	6,58			6,45	6,28	6,12	5,97	5,84	5,72	5,43	5,19	4,98	4,78
0,7	7,65			7,53	7,33	7,15	6,97	6,82	6,67	6,34	6,06	5,80	5,59
0,8	8,71			8,62	8,39	8,17	7,97	7,79	7,63	7,25	6,91	6,64	6,37
0,9	9,76			9,70	9,44	9,19	8,98	8,77	8,58	8,16	7,90	7,37	7,18
1,0	10,8			10,8	10,5	10,2	9,98	9,76	9,53	9,07	8,66	8,30	7,98
1,1	11,9				11,5	11,3	11,0	10,8	10,5	10,0	9,50	9,10	8,70
1,2	12,9				12,6	12,3	12,0	11,8	11,4	10,9	10,4	10,0	9,60
1,3	13,9				13,7	13,3	13,0	12,7	12,3	11,8	11,2	10,8	10,4
1,4	15,0				14,7	14,3	14,0	13,7	13,4	12,7	12,1	11,6	11,2
1,5	16,0				15,8	15,4	15,0	14,7	14,3	13,6	13,0	12,4	12,0
1,6	17,0				16,9	16,4	16,0	15,6	15,3	14,5	13,9	13,3	12,8
1,7	18,0				17,9	17,5	17,0	16,6	16,3	15,4	14,7	14,1	13,6
1,8	19,1				19,0	18,5	18,0	17,6	17,2	16,4	15,6	14,9	14,4
1,9	20,1				20,1	19,5	19,0	18,6	18,1	17,3	16,5	15,8	15,2
2,0	21,1				21,1	20,6	20,0	19,6	19,1	18,2	17,3	16,6	16,1
2,2	23,2					22,6	22,1	21,5	21,0	20,0	19,1	18,3	17,6
2,4	25,2					24,7	24,1	23,5	23,1	21,8	20,8	20,0	19,2
2,6	27,2					26,8	26,0	25,5	24,9	23,6	22,6	21,5	20,8
2,8	29,3					28,9	28,1	27,5	26,8	25,5	24,3	23,2	22,4
3,0	31,0					31,0	30,2	29,4	28,8	27,3	26,0	24,9	24,0
3,2	33,4					33,1	32,2	31,4	30,7	29,1	27,8	26,6	25,6
3,4	35,4					35,2	34,3	33,4	32,6	31,0	29,6	28,2	27,2
3,6	37,4					37,3	36,3	35,4	34,6	32,8	31,3	29,9	28,9
3,8	39,4						38,3	37,4	36,5	34,7	33,0	31,6	30,4
4,0	41,4						40,4	39,4	38,5	36,5	35,1	33,3	32,0
4,5	46,4						45,6	44,4	42,8	41,1	39,1	37,3	36,1
5,0	51,4						50,8	49,4	48,2	45,7	43,6	41,8	40,0
5,5	56,4						56,0	54,4	53,0	50,2	47,8	46,7	44,2
6,0	61,4						61,2	59,5	57,9	54,9	52,3	50,2	48,2
6,5	66,3							64,6	62,9	59,4	56,6	54,2	52,2
7,0	71,3							69,7	67,8	64,2	61,1	58,3	56,2
8,0	81,2							79,9	77,6	73,4	69,8	67,0	64,3
9,0	91,0							90,2	87,7	82,6	78,7	75,0	72,4
10,0	101							101	97,9	92,2	87,4	83,2	80,4
11,0	111								108	102	96,5	92,1	88,5
12,0	121								118	111	105	99,7	96,7
13,0	130								128	121	114	109	105
14,0	140								139	130	123	118	113
15,0	150								150	139	132	125	121
16,0	160									149	141	134	129
17,0	170									159	150	143	137
18,0	180									169	159	151	146
19,0	189									178	168	161	154
20,0	199									188	177	168	162
21,0	209									198	187	178	170
23,0	229									218	205	195	187
25,0	248									238	224	213	203
27,0	268									258	242	230	216
29,0	288									279	261	248	236
31,0	308									300	280	264	253
33,0	328									322	299	282	270
35,0	348									343	318	301	286
37,0	368									365	338	319	304
39,0	388									387	356	337	320
41,0	408										376	354	338

Tabelle A 3 Druckverlustkoeffizient m für Berechnung Dampfmassenstrom nach SAMSON [44]

Druckverhältnis p_2/p_1	0 bis 0,6	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,99
Druckverlustkoeffizient m	1,0	0,96	0,92	0,86	0,77	0,66	0,48	0,22



Für $\frac{p_2}{p_1} < 0{,}6 \Rightarrow m = 1$

6.2 Vergleich ISO 14001 und DIN EN 16001 [52]

DIN EN 16001		Voraussetzungen ISO 14001			Was ist bei vorhandener ISO 14001 noch zu tun?
Kapitel		Kapitel			
3	**Anforderungen an Energiemanagementsystem**	4	**Anforderungen an Umweltmanagementsystem**		**Grundsätzlich muss Energie als wichtiger Faktor unter ISO 14001 definiert werden.**
3.1	**Anforderungen (allgemeine)**	4.1	**Anforderungen (allgemeine)**		Grundsätzlich enthalten
	EnMS einführen, dokumentieren, verwirklichen und aufrechterhalten		UMS einführen, dokumentieren, verwirklichen, aufrecht-erhalten, ständig verbessern		
	Anwendungsbereich und Grenzen des EnMS bestimmen und dokumentieren		Anwendungsbereich UMS festlegen und dokumentieren		Definieren Sie die Grenzen Ihres EnMS.
	Ständige Verbesserung der Energieeffizienz		Ständige Verbesserung UMS, nicht der Umweltleistung		In der ISO 14001 wird eine Verbesserung des UMS, jedoch nicht der Umweltleistung erwartet. Definieren Sie Energieeffizienz und die Verbesserung Ihrer Energieleistung als wichtigen Aspekt und fokussieren Sie Ihre Aktivitäten auf die kontinuierliche Verbesserung Ihrer Energieeffizienz.
3.2	Energiepolitik	4.2	Umweltpolitik		Die Energiepolitik lässt sich leicht in die Umweltpolitik integrieren. Um hierbei den Anforderungen der DIN EN 16001 zu genügen, müssen sie die folgenden Aspekte beachten:
	Top-Management muss Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen für Einführung, Verwirklichung, Aufrecht-erhaltung und Verbesserung der energetischen Leistung sicherstellen		Top-Management muss Umweltpolitik der Organisation festlegen		Fügen Sie in Ihrer Umweltpolitik einen Abschnitt hinzu, der sich auf eine verbesserte Energienutzung bezieht.
	Anwendungsbereich und Grenzen				Anwendungsbereich und Grenzen der Energiepolitik müssen mit in die Umweltpolitik aufgenommen werden.
	Art und Umfang Energienutzung und angemessener Einfluss		Ist angemessen in Bezug auf Art, Umfang und Umwelt-auswirkungen, Tätigkeiten, Produkte und Dienstleistungen		Grundsätzlich enthalten
	Verpflichtung ständige Verbesserung der Energie-effizienz		Verbesserung UMS, sowie Vermeidung von Umwelt-belastungen		Eine Verbesserung der Umweltleistung (Energieeffizienz) muss mit in die Umweltpolitik aufgenommen werden.
	Sicherstellung der Verfügbarkeit von Informationen sowie aller Ressourcen zur Erfüllung der Ziele		Nicht in Umweltpolitik enthalten, aber unter 4.4.1 Dokumentation wird klar, dass die Informationen zur Verfügung stehen müssen		Muss zusätzlich in die Umweltpolitik mit aufgenommen werden.
	Rahmen für Festlegung und Überprüfung der Energieziele		Rahmen für Festlegung und Bewertung der umwelt-bezogenen Zielsetzungen und Einzelziele		Grundsätzlich enthalten
	Verpflichtung zur Einhaltung aller geltenden Anforderungen		Verpflichtung zur Einhaltung der geltenden rechtlichen Verpflichtungen und anderer Anforderungen		Grundsätzlich enthalten
	Dokumentation, Einführung, Aufrechterhaltung und Kommunikation		Dokumentiert, implementiert und aufrechterhalten sowie allen Personen mitgeteilt, die für Organisation oder im Auftrag arbeiten		Grundsätzlich enthalten
	Regelmäßige Überprüfung und Aktualisierung		Nicht in Umweltpolitik enthalten, aber durch 4.5.2 Bewer-tung der Einhaltung abgedeckt		Muss zusätzlich in die Umweltpolitik mit aufgenommen werden
	Zugänglichkeit für Öffentlichkeit		Zugänglichkeit für Öffentlichkeit		Grundsätzlich enthalten

DIN EN 16001		Voraussetzungen ISO 14001			Was ist bei vorhandener ISO 14001 noch zu tun?
Kapitel		Kapitel			
3.3	Planung	4.3	Planung		
3.3.1	Ermittlung und Überprüfung der Energieaspekte	4.3.1	Umweltaspekte		
	Erstmalige Ermittlung, Überprüfung und Aktualisierung der Energieaspekte. Priorisierung wesentlicher Energieaspekte für weitere Analyse		Ermittlung der Umweltaspekte, Beachtung bedeutender Umweltaspekte		Grundsätzlich enthalten. Ergänzen Sie die nachfolgenden Aspekte für das Energiemanagement bei bestehender ISO 14001:
	Früherer und gegenwärtiger Energieverbrauch und Energiefaktoren		Es wird keine Methode vorgegeben, wie man Umweltaspekte (inklusive Energie) darstellt		Ermitteln und überprüfen Sie Ihren früheren und Ihren aktuellen Energieverbrauch.
	Identifikation von Bereichen mit hohem Energieverbrauch und Veränderungen zur vorherigen Periode		Es wird keine Methode vorgegeben, wie man Umweltaspekte (inklusive Energie) darstellt		Identifizieren Sie die Bereiche, in denen am meisten Energie verbraucht wird und diejenigen, bei denen es zu den meisten Veränderungen gekommen ist. Letztere können wichtige Faktoren für Energieeinsparungen darstellen.
	Abschätzung voraussichtlicher Energieverbrauch		Es wird keine Methode vorgegeben, wie man Umweltaspekte (inklusive Energie) darstellt		Schätzen Sie Ihren zu erwartenden Energieverbrauch, um ihn mit dem aktuellen Energieverbrauch vergleichen zu können.
	Identifikation aller für den Energieverbrauch wichtigen Personen		Es wird keine Methode vorgegeben, wie man Umweltaspekte (inklusive Energie) darstellt		Identifizieren Sie alle Personen, die zum Energieverbrauch beitragen.
	Identifikation und Priorisierung von Verbesserungsmöglichkeiten im Bereich der Energieeffizienz		Es wird keine Auflistung der Verbesserungsmöglichkeiten erwartet		Identifizieren und priorisieren Sie Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz und zu Energieeinsparungen. Führen Sie eine Liste.
3.3.2	Rechtliche Verpflichtungen/ andere Anforderungen	4.3.2	Gesetzliche/ andere umweltbezogene Anforderungen		Grundsätzlich enthalten. Gehen Sie sicher, dass alle energierelevanten Gesetze eingehalten werden.
	Ermittlung und Zugang zu geltenden rechtlichen Verpflichtungen und anderen Anforderungen		Ermittlung und Zugang zu geltenden rechtlichen Verpflichtungen und anderen Anforderungen		Grundsätzlich enthalten
	Bestimmung, wie rechtliche Anforderungen auf Energieaspekte anwendbar sind		Bestimmung, wie rechtliche Anforderungen auf Umweltaspekte anwendbar sind		Grundsätzlich enthalten
3.3.3	Strategische/ operative Energieziele/ Programm	4.3.3	Zielsetzung/ Einzelziele/ Programm		Grundsätzlich enthalten. Gehen Sie sicher, dass sich Ihre Ziele auf die Verbesserung der Energieeffizienz und Leistung beziehen.
	Einführung, Verwirklichung und Aufrechterhaltung von strategischen und operativen Energiezielen, Ziele müssen im Einklang mit Energiepolitik sein, einschließlich der Verpflichtung zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Einhaltung von gesetzlichen Vorschriften; Ziele müssen messbar, dokumentiert und mit Zeitrahmen versehen sein		Einführung, Verwirklichung und Aufrechterhaltung von umweltbezogenen Zielsetzungen und Einzelzielen; Ziele müssen praktikabel, messbar und im Einklang mit Umweltpolitik sein; schließt die Vermeidung von Umweltbelastungen und Einhaltung von rechtlichen Vorschriften mit ein		Definieren Sie messbare Ziele für alle Parameter, die einen wesentlichen Einfluss auf ihre Energieeffizienz und ihre Energieeinsparungen haben.
	Festlegung Verantwortlichkeit für Energiemanagementprogramm		Festlegung der Verantwortlichkeiten für Erreichung der Ziele		Grundsätzlich enthalten
	Festlegung Mittel und Zeitrahmen für Erreichung der operativen Ziele		Festlegung von Mitteln/Zeitrahmen für Erreichung		Grundsätzlich enthalten

DIN EN 16001		Voraussetzungen ISO 14001				Was ist bei vorhandener ISO 14001 noch zu tun?
Kapitel		Kapitel				
	Dokumentation Energieziele und Energieprogramm und Aktualisierung in vorgegebenen Zeitintervallen		Keine Vorgaben			Dokumentieren und aktualisieren Sie Ihre Energieziele und Programme regelmäßig.
3.4	**Verwirklichung / Betrieb**	**4.4**	**Verwirklichung / Betrieb**			
3.4.1	Ressourcen, Aufgaben, Verantwortlichkeiten, Befugnis	4.4.1	Ressourcen, Aufgaben, Verantwortlichkeiten, Befugnis			Grundsätzlich enthalten. Stellen Sie sicher, dass die Ressourcen zur Kontrolle aller energierelevanten Aspekte zur Verfügung stehen.
	Top-Management muss Verfügbarkeit von notwendigen Ressourcen für die Einführung, Verwirklichung, Aufrechterhaltung, Verbesserung des EnMS sicherstellen		Leitung Organisation soll Verfügbarkeit benötigter Ressourcen für Einführung, Aufrechterhaltung und Verbesserung des UMS sicherstellen			Grundsätzlich enthalten
	Managementverantwortlicher stellt sicher, dass EnMS eingeführt, verwirklicht und aufrechterhalten wird		Sicherstellung, dass ein UMS eingeführt, verwirklicht und aufrechterhalten wird			Grundsätzlich enthalten
	Managementvertreter berichten an Top-Management über Leistung des EnMS zwecks Bewertung und erstellt Empfehlungen		Managementbeauftragter berichtet über Leistung des Umweltmanagements zu dessen Bewertung, inklusive Empfehlungen zur Verbesserung an Top-Management			Grundsätzlich enthalten. Je nach Unternehmensgröße kann der Energiemanager und der Verantwortliche für das Umweltmanagement ein und dieselbe Person sein.
3.4.2	Schulung, Bewusstsein, Fähigkeit	4.4.2	Schulung, Bewusstsein, Fähigkeit			Grundsätzlich enthalten, aber in ISO 14001 werden die verschiedenen Aspekte schwächer formuliert, sodass bei der Einführung der DIN EN 16001 sichergestellt werden muss, dass alle Aspekte unter ISO 14001 wirklich umgesetzt wurden.
	Qualifikation und Kompetenz Energiebeauftragter		Es wird keine Aussage über Qualifizierung des Umweltbeauftragten getroffen			Es muss sichergestellt werden, dass der Energiebeauftragte / Umweltbeauftragte die notwendigen Kompetenzen und Qualifikationen erfüllt.
	Mitarbeiter haben Kenntnis über Energiepolitik und Energiemanagementprogramme, Anforderungen Energiemanagement, Einfluss Tätigkeit auf Energieverbrauch, Aufgaben und Verantwortlichkeiten, Vorteile verbesserter Energieeffizienz		Unternehmen soll Maßnahmen ergreifen, damit Mitarbeiter Kenntnis erhalten; verschiedene Aspekte sind schwächer formuliert			Stellen Sie sicher, dass Ihre Mitarbeiter Kenntnis über die verschiedenen Aspekte des Energiemanagements haben. Stellen Sie sicher, dass Ihr Trainingsangebot um energierelevante Schulungen erweitert wird und dass alle Mitarbeiter über die Vorteile der Energieeffizienz informiert sind.
	Personal muss ausreichend befähigt sein; notwendige Schulungsmaßnahmen müssen festgelegt werden		Mitarbeiter müssen sich bewusst über UMS sein; Schulungsbedarf muss ermittelt werden und Schulungen sollen angeboten werden			In der Regel enthalten. Ergänzen Sie gegebenenfalls um spezielle Energiethemen.
	Management informiert und ausreichend geschult		Jede Person, von der bedeutende Umweltauswirkungen ausgehen, muss sich darüber bewusst sein			Grundsätzlich enthalten
3.4.3	Kommunikation	4.4.3	Kommunikation			
	Interne Kommunikation mit dem Ziel, dass Mitarbeiter aktiv am Energiemanagement teilnehmen können; Organisation entscheidet, inwiefern sie extern kommunizieren möchte; wenn Entscheidung zugunsten externer Kommunikation, dann Erstellung Plan für externe Kommunikation		Interne Kommunikation zwischen verschiedenen Ebenen und Funktionsbereichen der Organisation sowie Entgegennahme, Dokumentierung und Beantwortung relevanter Äusserungen Externer			Die Anforderungen an die interne Kommunikation sind in der ISO 14001 und der DIN EN 16001 ähnlich. Fokussieren Sie Ihre Kommunikation auf Energieaspekte. Stellen Sie sicher, dass alle Mitarbeiter über das Energiemanagement informiert sind und aktiv an diesem teilnehmen können. Wenn Sie sich entscheiden Ihr Energiemanagement extern zu kommunizieren, erstellen Sie einen Kommunikationsplan.

DIN EN 16001		Voraussetzungen ISO 14001				Was ist bei vorhandener ISO 14001 noch zu tun?
Kapitel		Kapitel				
3.4.4	Dokumentation	4.4.4	Dokumentation			Grundsätzlich enthalten. Stellen Sie sicher, dass alle energierelevanten Dokumente vorgehalten werden.
	Beschreibung Kernelemente EnMS		Dokumentation des UMS muss Umweltpolitik, Zielsetzungen und Einzelziele, Beschreibung des Geltungsbereichs des UMS, Beschreibung der Hauptelemente des UMS und Wechselwirkungen, Dokumente einschließlich Aufzeichnungen, die von Norm gefordert werden und Dokumente, die als erforderlich eingestuft werden, enthalten			Grundsätzlich enthalten
	Ermittlung Standort der relevanten Dokumentation		implizit erfüllt			Grundsätzlich enthalten
3.4.5	Lenkung Dokumente	4.4.5	Lenkung Dokumente			Grundsätzlich enthalten. Stellen Sie sicher, dass alle für das EnMS relevanten Dokumente integriert werden.
	Aufzeichnungen und Dokumente auffindbar und rückverfolgbar		Sicherstellung, dass Änderungen und Status von Dokumenten gekennzeichnet werden und relevante Fassungen aller wichtigen Dokumente vor Ort verfügbar sind			Grundsätzlich enthalten
	Regelmäßig überprüft und eventuell überarbeitet		Bewertung und bei Bedarf Aktualisierung und erneute Freigabe			Grundsätzlich enthalten
	Aktuelle Versionen an allen wesentlichen Standorten verfügbar		Sicherstellung, dass relevante Fassungen aller maßgeblichen Dokumente vor Ort verfügbar sind			Grundsätzlich enthalten
	Müssen so verwahrt sein, dass leicht zugänglich und gegen Verlust und Beschädigung geschützt		Art der Aufbewahrung wird nicht definiert			Stellen Sie sicher, dass Dokumente gesichert aufbewahrt werden.
	Überholte Dokumente müssen entweder aus rechtlichen Gründen aufbewahrt oder eventuell entfernt werden		Verhinderung, dass veraltete Dokumente unbeabsichtigt verwendet werden und gekennzeichnet sind, falls sie verwahrt werden			Grundsätzlich enthalten
3.4.6	Ablauflenkung	4.4.6	Ablauflenkung			Erweitern Sie die Kontrolle ihrer Prozesse und Abläufe um Energieeffizienz.
	Vermeidung von Konstellationen, die zu Abweichung von Energiepolitik oder Energiezielen führen können		Einrichtung von Verfahren, die dazu führen, dass es keine Abweichungen gibt			Grundsätzlich enthalten
	Bestimmung von Kriterien für Betrieb / Instandhaltung		Festlegung von Kriterien, aber nicht konkret dargestellt in welchen Bereichen			Legen Sie Kriterien für den Betrieb und die Instandhaltung von Anlagen, Einrichtungen und Gebäuden fest.
	Berücksichtigung von Energieeffizienz bei Beschaffung		Einbindung von Zulieferern, aber keine konkreten Vorgaben für die Beschaffung			Integrieren Sie Energieeffizienz und Energieverbrauch als ein zusätzliches Kriterium in ihre Beschaffung. Stellen Sie sicher, dass ihre Zulieferer über die Tatsache, dass Energie ein wichtiges Kriterium ihrer Beschaffungspolitik ist, informiert sind.
	Berücksichtigung von Energieeffizienz bei Veränderung / Instandsetzung von Wirtschaftsgütern		Keine Vorgaben			Berücksichtigen Sie Energieeffizienz bei der Veränderung und Instandsetzung von Wirtschaftsgütern.
	Kommunikation gegenüber Personal		Keine Vorgaben			Erweitern Sie Ihre Kommunikation auf Ihr Personal und alle anderen, die im Auftrag ihrer Organisation arbeiten und einen Einfluss auf den Energieverbrauch haben.

DIN EN 16001		Voraussetzungen ISO 14001			Was ist bei vorhandener ISO 14001 noch zu tun?
Kapitel		Kapitel			
3.5	**Überprüfung**	**4.5**	**Überprüfung**		
3.5.1	Überwachung/ Messung	4.5.1	Überwachung/ Messung		
	Anforderungen an Messung, Überwachung und Zielsetzung müssen beschrieben werden (spezifisch für Energieverbrauch)		Erfüllt durch Messung und Überwachung von Arbeitsabläufen mit bedeutender Wirkung auf die Umweltaspekte		Grundsätzlich enthalten. Stellen Sie sicher, dass die Überwachung auch das Monitoring des Energieverbrauchs umfasst.
	Angemessenheit von Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen		Sicherstellung, dass kalibrierte bzw. nachweislich überprüfte Überwachungs- und Messgeräte benutzt werden		Grundsätzlich enthalten. Stellen Sie sicher, dass die Messgeräte auch den spezifischen Energieverbrauch messen können.
	Bestimmung des Energieverbrauchs und damit verbundener Energiefaktoren, Bewertung von erwarteten und tatsächlichem Energieverbrauch in festgelegten Zeitabständen		Nicht explizit gefragt		Vergleichen und bewerten Sie den erwarteten und tatsächlichen Energieverbrauch in festgelegten Abständen.
	Vorhaltung von Aufzeichnungen über signifikante ungeplante Abweichungen vom erwarteten Energieverbrauch		Nicht explizit gefragt		Halten Sie Aufzeichnungen über wesentliche ungeplante Abweichungen vor.
	Überprüfung und Überarbeitung der Beziehung zwischen Energieverbrauch und Energiefaktoren in definierten Abständen		Nicht explizit gefragt		Überprüfen Sie die Beziehung von Energieverbrauch und Energiefaktoren in regelmäßigen Abständen.
	Vergleich der Energieindikatoren mit ähnlichen Organisationen		Nicht explizit gefragt		Vergleichen Sie Energieindikatoren mit ähnlichen Organisationen.
3.5.2	Bewertung Einhaltung von Rechtsvorschriften	4.5.2	Bewertung Einhaltung von Rechtsvorschriften		Grundsätzlich enthalten
3.5.3	Nichtkonformität, Korrektur- Vorbeugungsmaßnahmen	4.5.3	Nichtkonformität, Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen		Grundsätzlich enthalten. Wird in ISO 14001 detaillierter behandelt als in DIN EN 16001.
3.5.4	Lenkung Aufzeichnungen	4.5.4	Lenkung von Aufzeichnungen		
	Aufzeichnungen sollen Aufschluss über erreichte Leistung und Wirksamkeit des EnMS geben und notwendige Kontrollmechanismen festschreiben		Verfahren zur Identifizierung, Speicherung, Sicherung, Wiederauffindung, Zurückziehung, Vernichtung von Aufzeichnungen einführen, verwirklichen, aufrechterhalten		Keine substantiellen Änderungen notwendig. Es muss sichergestellt werden, dass alle Energieaspekte wirksam kontrolliert werden.
3.5.5	Interne Auditierung	4.5.5	Internes Audit		Enthalten. Es sollte sichergestellt werden, dass der interne Auditor Wissen über Energiemanagement und Energieeffizienz hat.
	Audit in Übereinstimmung mit Anforderungen der Norm		Auditierung, um festzustellen, ob das UMS vorgesehenen Regelungen für Umweltmanagement einschließlich Anforderungen an internationale Norm erfüllt und ordnungsgemäß aufrechterhalten wird		Grundsätzlich enthalten
	Überprüfung aller gesetzlichen Bestimmungen		Nicht explizit erwähnt, aber durch a) erfüllt		Grundsätzlich enthalten
	Prüfung der wirksamen Einführung und Aufrechterhaltung EnMS		Durch a) erfüllt		Grundsätzlich enthalten
	Erstellung Ablaufplan und Auswahl von Auditoren, die Unabhängigkeit des Audits gewährleisten		Auswahl der Auditoren und die Audit-Durchführung müssen Objektivität und Unparteilichkeit sicherstellen		Grundsätzlich enthalten

DIN EN 16001		Voraussetzungen ISO 14001				Was ist bei vorhandener ISO 14001 noch zu tun?
Kapitel		Kapitel				
	Gewährleistung, dass Maßnahmen zur Beseitigung von Nichtkonformitäten unverzüglich getroffen werden		Nicht explizit erwähnt			Stellen Sie sicher, dass Maßnahmen zur Beseitigung von Nichtkonformitäten sofort getroffen werden.
	Interne Audits werden durch Organisation selbst oder auf Anforderung durchgeführt		Erfüllt			Grundsätzlich enthalten
	Information an Top-Management		Information des Managements über Audit-Ergebnisse			Grundsätzlich enthalten
3.6	Überprüfung EnMS durch das Top-Management	4.6.	Managementbewertung			Grundsätzlich enthalten
3.6.1	Allgemeines					
	Überprüfung EnMS durch Top-Management in regelmäßigen Abständen		Regelmäßige Überprüfung duch Top-Management			Grundsätzlich enthalten
3.6.2	Eingangsparameter für Überprüfung durch Top-Management		erfüllt, aber kein expliziter Unterpunkt			Grundsätzlich enthalten, stellt aber keinen expliziten Unterpunkt dar
	Folgeaktivitäten		Folgemaßnahmen von früheren Bewertungen durch Management			Grundsätzlich enthalten
	Kontrolle von Energieaspekten und Energiepolitik		Überprüfung der Umweltleistung der Organisation			Grundsätzlich enthalten, mit besonderem Fokus auf Energieaspekte
	Übereinstimmung mit gesetzlichen Bestimmungen		Sich ändernde Rahmenbedingungen, einschließlich der rechtlichen Verpflichtungen und anderen Anforderungen			Grundsätzlich enthalten
	Ausmaß Erreichung operativer und strategischer Ziele		Erreichter Erfüllungsgrad der Zielsetzungen und Einzelziele			Grundsätzlich enthalten
	Ergebnisse Audit		Ergebnisse von internen Audits			Grundsätzlich enthalten
	Status Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen		Status von Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen			Grundsätzlich enthalten
	Energetische Gesamtleistung Organisation		Erfüllt			Grundsätzlich enthalten
	Geplanter Energieverbrauch		Zukünftige Entwicklungen werden nicht explizit erwähnt			Integrieren Sie den geplanten Energieverbrauch in Ihren Management-Review.
	Empfehlungen		Verbesserungsvorschläge			Grundsätzlich enthalten
3.6.3	Ergebnisse Management-Überprüfung		Kein expliziter Unterpunkt, aber die Ergebnisse ergeben sich aus den Eingangsparametern			Grundsätzlich enthalten. Ergänzen Sie die Ergebnisse um die Verbesserungen seit der letzten Überprüfung.

6.3 Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/kg K
F	Anteil belegte Trockenfläche	
H	Ventilhub	%
h	Spezifische Enthalpie	kJ/kg
H’	Spezifische Enthalpie der siedenden Flüssigkeit	kJ/kg
Δh_v	Spezifische Verdampfungsentalpie	kJ/kg
K_v	Durchflusskoeffizient Druckregelventil für Dampf	m³/h
m	Masse	Kg
m	Dimensionsloser Druckverlustkoeffizient nach SAMSON	---
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/h
n	Drehzahl / Anzahl pro Zeiteinheit	1/min
P	Leistung	W
p	Absoluter Druck	bar
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
R_{Luft}	Gaskonstante trockene Luft (287,058 J/kg K)	J/kg K
T	Temperatur	K
t	Temperatur	℃
$\dot{V}$	Volumenstrom	m³/h
v_{aus}	Spezifisches Volumen (v’ aus Wasserdampftafel) bei p_{aus} und T_{ein}	m³/kg
v*	Spezifisches Volumen (v’ aus Wasserdampftafel) bei $p_{ein}/2$ und T_{ein}	m³/kg
Δx	Wasseranteildifferenz	%
Z	Dimensionsloser Realgasfaktor	---

6.4 Indizes

Index	Bedeutung
aus	Austrittsparameter (nach Ventil)
D	Dampf
ein	Eintrittsparameter (nach Ventil)
i	Zählindex
P	Papier
RP	Rohpapier
verd. W	Verdampftes Wasser
ZS	Zellstoff

6.5 Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AP	Arbeitspaket
DP	Auslegungsdruck
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EMS	Energiemanagementsystem
IDM	Induktive Durchflussmessung
IR	Infrarot
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
PM	Papiermaschine
Pt	Platin
PTC	Positive Temperature Coefficient
TAD	Through Air Drying
TMP	Thermo Mechanical Pulp

6.6 Literatur

[1] Energiepolitischer Runder Tisch - Gespräch der bayerischen Papierindustrie mit dem Bayerischen Wirtschaftsministerium am 30.09.2010

[2] Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (Hrsg.); Papier 2011 - Ein Leistungsbericht, VDP, Bonn, 2011

[3] H. Jung; Werkzeuge zur Optimierung des Wärmehaushalts: Pinch-Analyse und Simulation; PTS-Seminar PM 1047 Energieeffizienz und Produktivität steigern bei Entwässerung, Presse und Trocknung; München, 08.-09.12.2010

[4] P. Norri; Paper machine air systems as tools for improving energy efficiency;COST Strategic Workshop Improving Energy Efficiency in Papermaking; Amsterdam, 09.-11. Juni 2008

[5] A. Kuhasalo, J. Niskanen, J. Paltakari, M. Karlsson; Introduction to paper drying and principles and structure of a dryer section; In: M. Karlsson (Hrsg.) Papermaking Science and technology Book 9 - Papermaking Part 2, Drying, Fapet, 2000

[6] M. Vogt, O. Blum, A. Hutter, H. Jung, B. Meyer, S. Kirschbaum, A. Schubert, J. Meyer; Leitfaden Energieeffizienz für die Papierindustrie; Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier; Ausgabe 2008; http://www.branchenenergiekonzepte.de

[7] S. Dessureault; Recycling and deinking mills; In: P.N. Williamson (Hrsg.) Energy Cost reduction in the pulp and paper industry, Pulp and Paper Research Institute of Canada; 1999

[8] PTS Datenbank

[9] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), Effiziente Energienutzung in der Papierindustrie: Nutzung von Niedertemperaturabwärme, Augsburg, 2003

[10] GWU Beratungsgesellschaft für wirtschaftliches Umweltschutzmanagement mbH im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg; Einführung eines Energie- und Stoffstrommanagementsystems bei der Firma Kappa Badenkarton in Gernsbach, Baden-Württemberg, Siegen, 2001

[11] H. Münster; Möglichkeiten der Energieeinsparung bei der Stoffaufbereitung; PTS Energiemanagementsymposium, München, 14.-15.03.2007

[12] H. Schwieger; Konzepte zur Verbrauchsoptimierung am Dampf- und Kondensatsystem; PTS Energiemanagementsymposium, München, 25.-26.05.2009

[13] A. McIvor, C. Dahl, R. Lindstrom; Paper, Board, Tissue and Pulp Machines; In: P.N. Williamson (Hrsg.) Energy Cost reduction in the pulp and paper industry, Pulp and Paper Research Institute of Canada; 1999

[14] A. Linden; Yankee-Trocknung für optimalen Energieeinsatz; PTS Tissue Symposium, München, 03.-04.03.2008

[15] R. Wittmann; Optimierungsmöglichkeiten an Trockenpartiehaube und Luftsystemen zur Energieeinsparung; PTS-Seminar PM 1047 Energieeffizienz und Produktivität steigern bei Entwässerung, Presse und Trocknung; München, 08.-09.12.2010

[16] P. Heikkilä, P. Rajala; Drying of paper coatings and drying equipment; In: E. Lehtinen (Hrsg.) Papermaking Science and technology Book 11 – Pigment Coating and Surface Sizing of paper, Fapet, 2000

[17] D. McIlroy, J. Wilczinsky; Chemical Pulp Mills; In: P.N. Williamson (Hrsg.) Energy Cost reduction in the pulp and paper industry, Pulp and Paper Research Institute of Canada; 1999

[18] C.-J. Fogelholm, J. Suutela; Heat and Power co-generation; In: J. Gullichsen, C.-J. Fogelholm (Hrsg.) Papermaking Science and technology Book 6 – Chemical Pulping, Fapet, 1999

[19] G. Cerbe; Grundlagen der Gastechnik: Gasbeschaffung- Gasverteilung- Gasverwendung; Carl Hanser Verlag, München, Wien; 7. Auflage, 2008

[20] U. Werninck (Hrsg.); Gasmessung und Gasabrechnung; Vulkan Verlag, Essen, 3. Auflage, 2005

[21] G. Strohrmann; Messtechnik im Chemiebetrieb; Oldenbourg Industrieverlag, München, 7. Auflage, 2004

[22] http://de.academic.ru/pictures/dewiki/80/Prinzip_Drehkolbengaszahler.JPG

[23] www.schmitz-partner.de

[24] M. Kahmann, R. Kramer, B. Hömberg (Hrsg.) et. al.; Messinformationstechnik für die liberalisierten Energiemärkte Elektrizität und Gas; Expert Verlag, Renningen, 2001

[25] R. Kramer, B. Mickan; Gasmessung und Gaszählerprüfung in der Praxis; In: PTB-Mitteilungen 119 (2009), Heft 1

[26] www05.abb.com

[27] http://www.de.endress.com

[28] www.systecs-controls.de

[29] Datenquelle der Pumpenkennlinie: Angebot der Firma Sulzer Pumpen Deutschland GmbH

[30] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) VDI-Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 4. Auflage, 1984

[31] M. Leskelä, S. Simula; Transport Phenomena; In: K. Niskanen, Papermaking Science and technology Book 16 - Paper Physics; Fapet, Helsinki, 1998

[32] IDEAS v4.9.0, Andritz Automation Inc., 2008

[33] M. Kanzamar, Simulation der Trocknung gestrichener Papiere; Dissertation im Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt, 2004

[34] Arbeitsgemeinschaft Referenzwerte: LTT, IUTA, EUTech, GFa (Hrsg.) Produktbezogene referenzwerte zur Bestimmung von Emissionsintensitäten und zugehörigen Kostenreduktionspotenzialen in kmU; Abschlussbericht zum AiF ZUTECH Projekt Nr. 158 Z, Teil B5 – Analyse der Papierindustrie, 2007

[35] http://www.engineeringtoolbox.com

[36] http://www.wissenschaft-technik-ethik.de

[37] http://www.schweizer-fn.de

[38] F. Brüning, Papiermaschine – Trockenpartie und Endgruppe, Proceedings PTS-Seminar Papierherstellung im Überblick, München, 17-18.02.2009

[39] Datenquelle der Ventilatorkennlinie: Angebot der Firma Konrad Reitz Ventilatoren GmbH & Co. KG

[40] Testo AG (Hrsg.); Klimamessung für Praktiker; http://www.testo.de; 2003

[41] http://www.energieundinnovation.de

[42] Mankenberg GmbH, Auslegung von Druckregelventilen; http://www.mankenberg.de

[43] Samson AG Mess- und Regeltechnik; Arbeitsblatt zur Ventilberechnung: Kv-Wert-Ventilauslegung; Arbeitsblatt AB 05; 2006; http://www.samson.de

[44] Samson AG Mess- und Regeltechnik; Arbeitsblatt zur Ventilberechnung: Berechnungsbeispiele; Arbeitsblatt AB 04; 2005; http://www.samson.de

[45] http://www.spiraxsarco.de

[46] Siemens Building Systems (Schweiz) AG Landis & Staefa Division; Welche Ventilautorität ist optimal; 1997

[47] http://www.hoentzsch.com

[48] http://www.fuehlersysteme.de

[49] http://www.elektronik-kompendium.de

[50] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontroll (BAFA) (Hrsg.); II A 1. Untermerkblatt zur Zertifizierung des Energieverbrauchs und der Energieverbrauchsminderungspotenziale; 2011

[51] www.tuv.com

[52] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.); DIN EN 16001: Energiemanagementsysteme in der Praxis; 2010

[53] P. Maczey; Aufbau und Zertifizierung von Energiemangementsystemen; Energiemanagementsysteme in der betrieblichen Praxis – Die neue DIN EN 16001; IHK Bonn/Rhein-Sieg, 30. November 2009

[54] M. König; Dampfabrechnung – ein heikles Thema; Allgemeine Papier Rundschau, 02, 2010

[55] Samson AG Mess- und Regeltechnik; Druckregler ohne Hilfsenergie Arbeitsblatt zur Ventilberechnung – Grafische Auslegung von Druckregelventilen für Dampf; Arbeitsblatt AB06; 2007; http://www.samson.de

[56] Spirax Sarco GmbH; Grundlagen der Dampf- und Kondensattechnologie; Konstanz, 2006