



# Leitfaden Energieeffizienz für die Papierindustrie

*Ausgabe 2008*

**Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier**

---





## Vorwort der Arbeitsgemeinschaft

Die deutsche Papierindustrie verzeichnete nach Angaben des Verbandes Deutscher Papierfabriken (VDP) 2007 einen Anteil von mehr als neun Prozent des Energieverbrauchs des verarbeitenden Gewerbes in der BRD. Damit gehört die Papierindustrie weiterhin zu den fünf energieintensivsten Branchen mit einem Energiekostenanteil von mittlerweile durchschnittlich 12 % des Umsatzes. Die auch zukünftig erwarteten steigenden Energiepreise werden den Kostendruck in der Papierindustrie weiter verschärfen. Um Kosteneinsparungen im Bereich Energie erzielen zu können, müssen sich daher die Verantwortlichen in den Papierfabriken mit dem sparsamen und effizienten Umgang mit Energie intensiv beschäftigen.

Der vorliegende Leitfaden soll in komprimierter und übersichtlicher Form eine Orientierungshilfe sein, um konkrete Verbesserungspotenziale und Lösungsmöglichkeiten für die eigene Papierfabrik zu erkennen und so gezielt im Bereich Energie aktiv werden zu können. Er soll dabei die Umsetzung von Maßnahmen zur Kostensenkung, Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Reduzierung anstoßen.

Die Arbeitsgemeinschaft dankt all denen, die zur Entstehung dieses Leitfadens beigetragen haben und beratend zur Seite standen.

Dem Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen sowie der Deutschen Bundesstiftung Umwelt danken wir für die finanzielle Förderung des Projektes. Gleichfalls gilt unser Dank den Mitarbeitern des Projektträgers ETN sowie der EnergieAgentur NRW für die angenehme Zusammenarbeit.

Ganz herzlich danken wir Herrn Dr. Götz von Verband Deutscher Papierfabriken (VDP) für seine Unterstützung, Anregungen und die Vermittlung wertvoller Kontakte.

Weiterhin gilt unser Dank allen Mitarbeitern der Papierfabriken, die sich in dem Projekt sehr engagiert und uns die für unsere Arbeit notwendigen Daten und Informationen zur Verfügung gestellt haben.

Duisburg, im November 2008

Für die Arbeitsgemeinschaft

*Monika Vogt*

Institut für Energie- und  
Umwelttechnik e.V., Duisburg

*Stefan Kirschbaum*

*Benjamin Meyer*

RWTH Aachen, Lehrstuhl für  
Technische Thermodynamik

*Oliver Blum*

PTS Papiertechnische Stiftung,  
München

*Dr. Jörg Meyer*

*Astrid Schubert*

EUtech Energie & Management  
GmbH, Aachen

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
2	Energiewirtschaftliche Struktur der deutschen Papierindustrie .....	5
2.1	Struktur der Branche .....	5
2.2	Energiewirtschaftliche Betrachtung der Papierindustrie .....	6
2.3	Energiewirtschaftliche Strukturzahlen .....	9
2.4	Prozessklassifikation .....	12
2.5	Betriebliche Kennzahlen.....	21
2.6	Literatur zu Kapitel 2 .....	34
3	Bewertung der Energieeffizienz und Optimierung des Energieeinsatzes .....	35
3.1	Bezugsgrößen und Bilanzgrenzen .....	35
3.2	Ausgewählte Teilbereiche der Produktion.....	36
3.3	Querschnittstechniken.....	69
3.4	Organisatorische Maßnahmen .....	100
3.5	Alternativen der Energieversorgung.....	102
3.6	Literatur zu Kapitel 3 .....	114
4	Praxisbeispiele.....	117
4.1	Hygienepapier .....	118
4.2	Wellpappenrohpapier .....	124
4.3	Altpapierhaltiges Spezialpapier .....	130
4.4	Ungestrichene grafische Papiere .....	137
4.5	Gestrichene holzfreie Papiere .....	144
4.6	Zusammenfassende Bewertung .....	150
4.7	Literatur .....	150
5	Instrumente zur Unterstützung der rationellen Energienutzung .....	151
5.1	Energiemanagement .....	151
5.2	Energieorientierte Betriebsanalyse .....	156
5.3	Literatur zu Kapitel 5 .....	159
6	Finanzierung .....	161
6.1	Kredit- und Förderprogramme .....	161
6.2	Contracting .....	163
6.3	Literatur zu Kapitel 6 .....	166
	Anhang.....	167
	Verwendete Abkürzungen.....	167
	Indizes .....	169
	Umrechnungsfaktoren.....	169
	Glossar .....	172
	Adressen .....	179

# 1 Einleitung

Die effiziente Energienutzung und der rationelle Umgang mit Ressourcen gewinnt in der Papierindustrie zunehmend an Bedeutung, auch um national und international wettbewerbsfähig zu bleiben.

Im Hinblick auf die Entwicklung der nationalen und internationalen Energiewirtschaft ist die Liberalisierung des Strom- bzw. Energieträgermarktes eine wesentliche Einflussgröße. Es ist damit zu rechnen, dass es mehr Anbieter und noch vielfältigere Tarifstrukturen geben wird. Die Energiebezugsbedingungen werden komplexer. Mittel- bis langfristig ist darüber hinaus mit einer deutlichen Verteuerung der Energieträger zu rechnen. Zum einen werden regulative Maßnahmen auf nationaler und internationaler Ebene (Energiesteuern, Emissionsabgaben etc.) erwartet, zum anderen wird langfristig auch die zunehmende Verknappung der Ressourcen eine Rolle spielen.

Die Reaktionsfähigkeit der einzelnen Papierfabriken auf äußere Einflüsse wird in dem Maße ausgeprägt sein, in dem sie sich auf die sich verändernde energiewirtschaftliche und -politische Situation eingestellt haben. Es ist somit eine wichtige Aufgabe der Politik und der Fachverbände, die Verantwortlichen frühzeitig mit relevanten Informationen zu versorgen und geeignete Instrumente zur energetischen Optimierung der Produktionsketten bekannt zu machen.

Für die Unternehmen der Papier- und Zellstoffindustrie sind daher Konzepte notwendig, welche in systematischer Form bei allen Fragestellungen zum Thema Energie unterstützen. Dies beginnt bei der Erfassung und Strukturierung der innerbetrieblichen Energiebedarfs- und Versorgungssituation. Es umfasst weiterhin die Aufdeckung möglicher Optimierungspotenziale durch detaillierte Analyse der vorhandenen Situation. Als Konsequenz ergeben sich investive und nicht investive Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz bis hin zur Systematisierung des Energiemanagements.

Hauptsächlich soll der Branchenleitfaden den Verantwortlichen und den zuständigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern praxisnahe Vorschläge zur Reduzierung des Energieverbrauchs sowie Hilfestellung zur Identifizierung dieser Möglichkeiten unterbreiten.

In **Kapitel 2** wird daher zunächst die energiewirtschaftliche Struktur der Branche anhand von Kennzahlen dargestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den umfangreichen energetischen Untersuchungen in verschiedenen Papierfabriken sowie aus der Auswertung einer bundesweiten Befragung von Papierfabriken ermöglichen die Ermittlung verlässlicher Kennzahlen für die Branche, wobei jeweils charakteristische Produktionsschwerpunkte zusammengefasst werden. Innerhalb einer Produktklasse helfen diese Energiekennzahlen bei der ersten Bewertung, ob und in welcher Höhe Energieeinsparpotenziale zu erwarten sind.

Die Vergleichbarkeit der Papierfabriken auch innerhalb einer Produktklasse ist bei näherer Betrachtung aber nicht ohne Weiteres gegeben. Großen Einfluss auf den Energiebedarf haben beispielsweise die Energieversorgung (Eigenstromerzeugung, Einsatz von Ersatzbrennstoffen, Nahwärmeversorgung), der Integrationsgrad der Papierfabrik in weitere Produktionsschritte (z.B. die Rohstoffherstellung oder die Papierverarbeitung), die spezifische Produktqualität und

Weiteres mehr. Dies macht die Entwicklung werksübergreifend gültiger Benchmarkinginstrumente schwierig. Daher können die entwickelten spezifischen Kennzahlen nur einen Hinweis geben, in welchen Produktionsschritten im Vergleich zu den Mitbewerbern Optimierungspotenziale zu erwarten sind. Ohne eine detaillierte Betrachtung der konkreten Rahmenbedingungen wie beispielsweise des Produktionsprozesses kann hieraus noch keine Bewertung der energiewirtschaftlichen Gesamtsituation einer Papierfabrik abgeleitet werden.

Konkrete Vorschläge für einzelne Bereiche der Papierherstellung enthält das **Kapitel 3**. Hier werden die typischen Produktionsbereiche bei der Papierherstellung (Stoffaufbereitung, konstanter Teil, Papiermaschine) sowie die den Querschnittstechnologien zuzuordnenden Nebenanlagen (Lüftung, Druckluftversorgung, Energieversorgung, Dampf- und Kondensatsystem, Beleuchtung, elektrische Antriebe usw.) näher betrachtet und jeweils Möglichkeiten zur Energieeinsparung aufgeführt.

Selbstverständlich können nicht alle in Kapitel 3 aufgeführten Maßnahmen in jeder Papierfabrik umgesetzt werden. In **Kapitel 4** sind daher als anschauliche Praxisbeispiele die Ergebnisse von Betriebsanalysen in repräsentativ ausgewählten Papierfabriken dargestellt.

Es wird eindrucksvoll dargestellt, welche Energieeinsparungen jeweils in den untersuchten Papierfabriken erzielt werden konnten. Die möglichen Einsparungen betragen durchschnittlich 5 bis 10 % der derzeitigen Energiekosten.

Eine konkrete Hilfestellung für die praktische Umsetzung enthält **Kapitel 5**. Hier werden die Durchführung von Energieanalysen, die Nutzung verschiedener Messverfahren sowie der Aufbau eines Energiemanagementsystems beschrieben. Der Branchenleitfaden schließt mit Informationen zu Finanzierungsmöglichkeiten und zu Förderprogrammen ab (**Kapitel 6**).

Im **Anhang** befinden sich Kontaktadressen, das Abkürzungsverzeichnis sowie ein Glossar. Darüber hinaus ist eine Übersicht wichtiger Umrechnungsfaktoren sowie einige Heizwerte und Emissionsfaktoren wichtiger Energieträger enthalten. **Literaturhinweise** stehen am Ende des jeweiligen Kapitels.

Die Branche der Papierherstellung erhält mit dem hier vorliegenden Branchenleitfaden eine umfassende Hilfestellung bei der Optimierung des Energiebedarfs und der Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Kernaussage dieses Branchenleitfadens ist es, dass sich oft bereits ohne hohen investiven Aufwand beträchtliche Einsparungen des Energiebedarfs realisieren lassen. Insbesondere sind bisher noch längst nicht alle verfügbaren Optionen zur Abwärmenutzung ausgeschöpft.

## **2           Energiewirtschaftliche Struktur der deutschen Papierindustrie**

### **2.1        Struktur der Branche**

Gemäß der neuen Klassifikation der Wirtschaftszweige von 2008 (WZ2008) wird das Papiergewerbe in den Gruppen 17.1 „Herstellung von Holz- und Zellstoff, Papier, Karton und Pappe“ sowie 17.2 „Herstellung von Waren aus Papier, Karton und Pappe“ unterteilt. In Gruppe 17.1 wird zwischen den zwei Klassen 17.11 „Herstellung von Holz- und Zellstoff“ und 17.12 „Herstellung von Papier, Karton und Pappe“ unterschieden [2-6]. Die Unternehmen der weiterverarbeitenden Industrie der Gruppe 17.2 werden im Rahmen dieses Leitfadens nicht betrachtet. Bis Ende 2007 war die Klassifikation der Wirtschaftszweige in der Fassung von 2003 gültig. Darin trug die Abteilung „Papiergewerbe“ den Code 21. Davon abgesehen gibt zwischen der ehemaligen Gruppe 21.1 „Herstellung von Holz- und Zellstoff, Papier, Karton und Pappe“ und der aktuellen Gruppe 17.1 keine Unterschiede in der Klassifikation der Wirtschaftszweige [2-7].

Die deutsche Zellstoff- und Papierindustrie erwirtschaftete im Jahr 2007 einen Umsatz von 16,5 Mrd. € Euro, bundesweit waren in 154 Betrieben 41.072 Personen beschäftigt [2-4]. Damit zählt Deutschland zum größten Erzeugerland der Europäischen Union und zum viertgrößten weltweit nach den USA, China und Japan [2-9]. In Nordrhein-Westfalen waren im Jahr 2007 36 Betriebe angesiedelt mit einer Beschäftigtenzahl von 9.102 und einem Gesamtumsatz von 3,5 Mrd. € Euro.

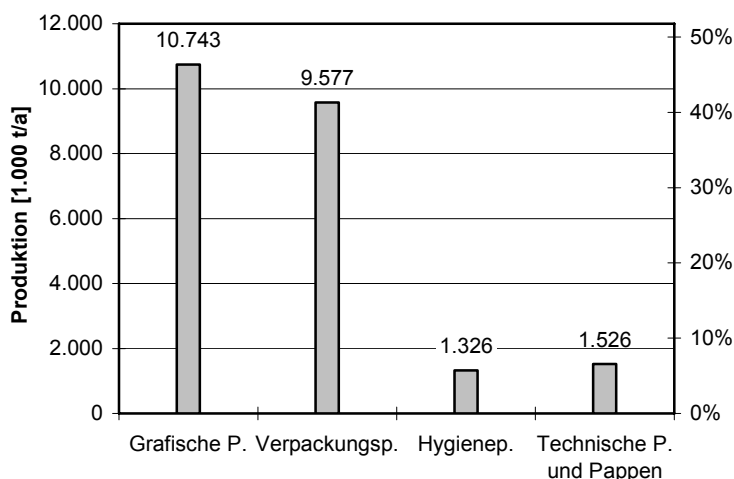
**Tabelle 2-1: Struktur der Papier- und Zellstoffindustrie bundesweit und in NRW**

		Bund	NRW
Betriebe ges.	Anzahl	154	36
Mitarbeiter ges.	Anzahl	41.072	9.102
Umsatz ges.	Mio. €	16.482	3.475
Mitarb. je Betr.	Anz. /Betr.	267	253
Umsatz je Betr.	Mio. €/Betr.	107,0	96,5
Umsatz je Mitarb.	Mio. €/Mitarb.		

Die Produktion der Papierindustrie wird üblicherweise in folgende Gruppen (sog. Hauptsorten) eingeteilt [2-8]:

- Grafische Papiere
- Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke
- Hygienepapiere
- Papier und Pappe für technische und spezielle Verwendungszwecke

Die Produktionsmengen der Hauptsorten und deren Anteil an der Gesamtproduktion in 2007 können Abbildung 2-1 entnommen werden. Grafische Papiere sowie Verpackungspapiere stellen mit 46,3 % bzw. 41,3 % die mit Abstand größten Anteile der Gesamtproduktion, es folgen Hygienepapiere und Technische Papiere mit 5,7 % bzw. 6,6 %.



**Abbildung 2-1: Produktion dt. Papierfabriken nach Hauptsorten [2-8]**

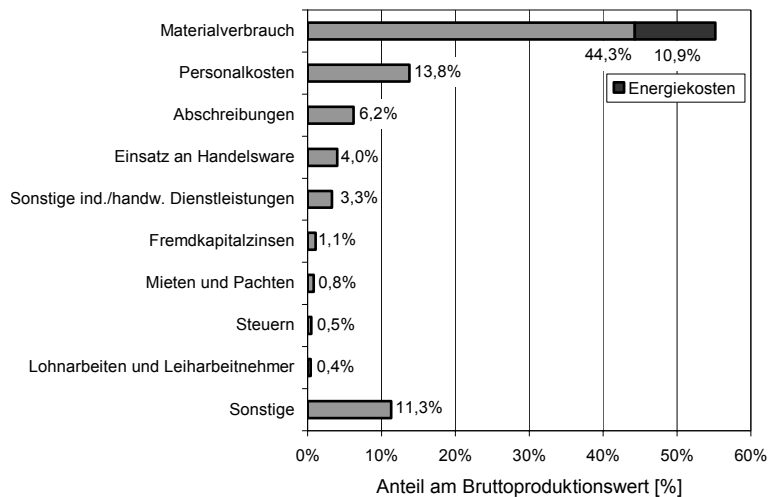
## 2.2 Energiewirtschaftliche Betrachtung der Papierindustrie

Die im Folgenden aufgeführten Daten entstammen Erhebungen des statistischen Bundesamtes, sie beziehen sich auf die gesamte deutsche Papier- und Zellstoffindustrie. Da die Daten aus den Jahren vor 2008 stammen, gilt hier die Klassifikation der Wirtschaftszweige in der Fassung von 2003 (WZ2003).

In Abbildung 2-2 ist die durchschnittliche Kostenstruktur des Papiergewerbes in 2006 dargestellt. Darin zeigt sich, dass die Kosten für den Ma-



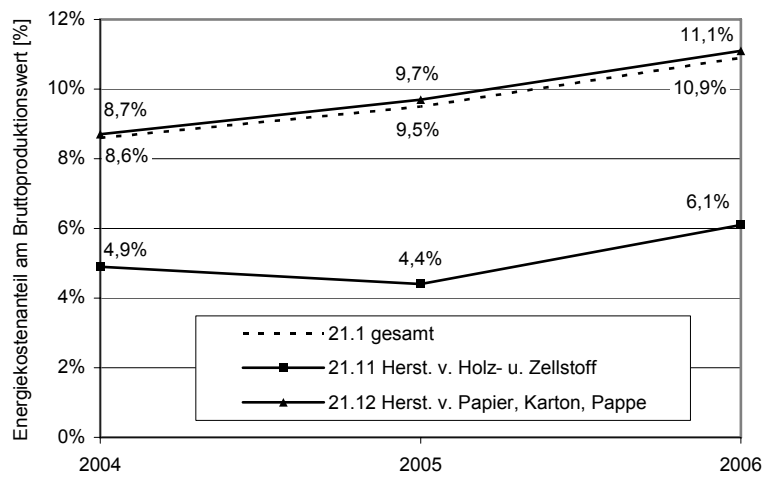
terialverbrauch mit 55,2 % des Bruttoproduktionswertes den mit Abstand bedeutendsten Kostenfaktor ausmachen. Es folgen Personalkosten mit 13,8 %, sowie Abschreibungen mit 6,2 %. Die den Materialkosten zugeordneten Aufwendungen für Energie stellen einen erheblichen Kostenfaktor dar. Sie lagen 2006 bei durchschnittlich 10,9 % des Bruttoproduktionswertes und liegen damit in der gleichen Größenordnung wie die Personalkosten [2-5].



**Abbildung 2-2: Kostenstruktur der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie (WZ 21.1) in 2006 [2-5]**

Hieran zeigt sich deutlich, dass dem Produktionsfaktor Energie in der Papier- und Zellstoffindustrie aufgrund der hohen Energieintensität des Herstellungsprozesses große Bedeutung zukommt. In weniger energieintensiven Branchen liegen die Aufwendungen für den Energiebezug in der Regel im Bereich weniger Prozent des Bruttoproduktionswertes.

Angesichts des hohen Energiekostenanteils ist die Papierindustrie in besonderem Maße von den Preissteigerungen betroffen, die in den vergangenen Jahren auf den Energiemärkten zu beobachten waren. Dies schlägt sich auch in der Kostenstruktur der Unternehmen nieder. In Abbildung 2-3 ist die Entwicklung des Anteils der Energiekosten am Bruttoproduktionswert zwischen 2004 und 2006 dargestellt. Wegen des geringeren Energiekostenanteils in den Unternehmen der Halbstoffherzeugung sind diese von der Verteuerung des Produktionsfaktors Energie weniger betroffen als die Papierproduzenten. Wegen des relativ geringen Umsatzvolumens ersteren Wirtschaftszweigs wirkt sich dies jedoch kaum auf die gesamte Branche der Papier- und Zellstoffindustrie (WZ03: 21.1) aus. Diese hatte zwischen 2004 und 2006 einen Anstieg des Energiekostenanteils von 8,6 % auf 10,9 % zu verzeichnen [2-5]. Die im Rahmen einer Umfrage der Arbeitsgemeinschaft BEK befragten Unternehmen der deutschen Papierindustrie gaben hier zum Teil höhere Werte an, siehe Kapitel 2.5.1.



**Abbildung 2-3: Energiekostenanteile in den einzelnen Gruppen der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie zwischen 2004 und 2006 [2-5]**

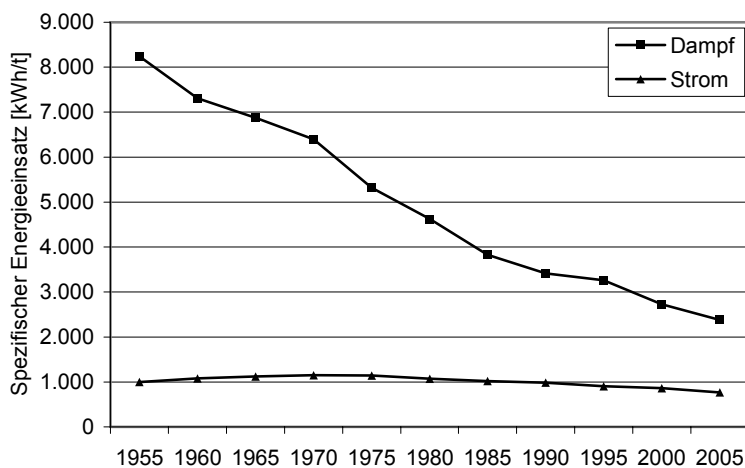
## 2.3 Energiewirtschaftliche Strukturzahlen

Auf die deutsche Papierindustrie entfällt ein Endenergieeinsatz von 51,6 TWh pro Jahr (Wert für 2002). Sie ist damit der fünftgrößte industrielle Endenergieverbraucher. Als Endenergieeinsatz wird der Primärenergieeinsatz abzüglich der Verluste im Umwandlungssektor und der Mengen an Energieträgern, die nicht zur Energiegewinnung eingesetzt werden, definiert. Für die Unternehmen entspricht dies der Menge an Strom, Erdgas und anderen Energieträgern, die sie von den Versorgungsunternehmen beziehen, abzüglich der Strom- und Wärmeabgabe an das öffentliche Netz oder standortnahe Verbraucher. Die bezogene Endenergiemenge teilt sich auf Bundesebene in 24 % Strom und 76 % Brennstoffe bzw. Fremdwärme auf [2-3].

### 2.3.1 Entwicklung des Energieeinsatzes in der Papierindustrie

Aus Kostengründen hat die Papierindustrie bereits sehr früh begonnen, den Produktionsprozess energetisch zu optimieren. Dies geschah überwiegend durch die Entwicklung und Inbetriebnahme immer größerer und schnellerer Papiermaschinen, die eine günstigere Energiesituation haben. Dadurch konnte in den vergangenen Jahrzehnten der spezifische Energieeinsatz bei der Papierherstellung im Durchschnitt deutlich reduziert werden.

In Abbildung 2-4 sind die Entwicklungen des spezifischen Dampf- sowie des spezifischen Stromeinsatzes bei der Papierherstellung zwischen 1955 und 2005 dargestellt.

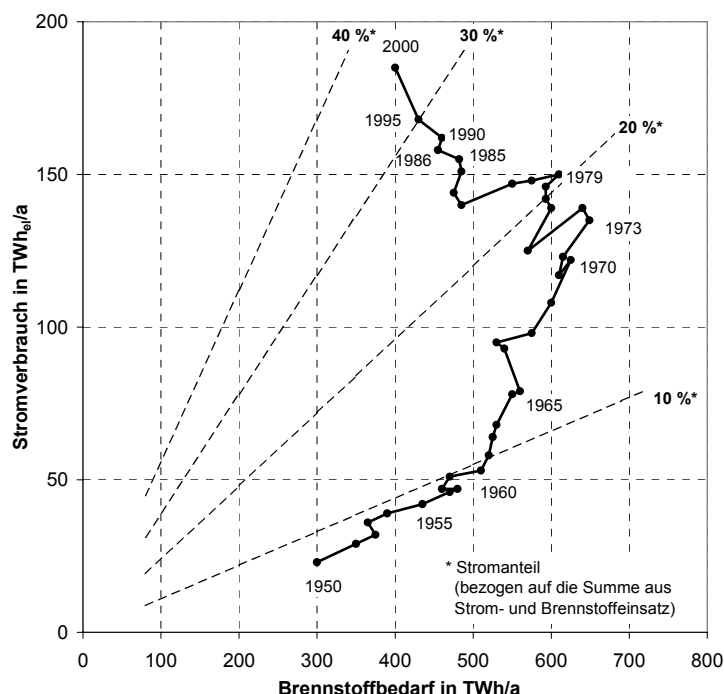


**Abbildung 2-4: Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie [2-3]**

In diesem Zeitraum wurde eine Verringerung des spezifischen Energieeinsatzes von insgesamt 8.242kWh/t auf 2.382kWh/t erreicht [2-3]. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, beruht diese Abnahme im Wesentlichen auf der Reduktion des Dampfverbrauches. In Relation dazu konnte der Stromverbrauch technisch bedingt nur geringfügig gesenkt werden. Die Höhe des absoluten Energiebedarfs ist im gleichen Zeitraum trotz der deutlichen Reduktion der spezifischen Werte gestiegen, was auf einer deutlichen Steigerung des Produktionsvolumens beruht.

Die dargestellte Entwicklung spiegelt einen in der gesamten deutschen Industrie festzustellenden Trend der vergangenen Jahrzehnte wieder: Die Struktur des Energieverbrauchs wandelt sich grundlegend, was sich in einer Zunahme des Stromverbrauchs und einer Abnahme des Brennstoffverbrauchs äußert, siehe Abbildung 2-5. Gründe für diese Entwicklung sind u.a. in zunehmender Automatisierung einerseits, sowie thermischer Optimierung und verstärkter Abwärmenutzung andererseits zu sehen.

Effizienzsteigerungen, wie sie in den vergangenen Jahrzehnten in der Papier-, wie auch in der deutschen Industrie generell zu beobachten gewesen sind, sind für die Zukunft nicht zwangsläufig in gleichem Umfang, bzw. nur durch kontinuierlich steigenden Aufwand zu erwarten. Daher kommt dem Produktionsfaktor Energie, trotz der erzielten Effizienzsteigerungen, weiterhin eine tendenziell zunehmende Bedeutung zu. Dies zeigt u.a. die zuvor dargestellte aktuelle Entwicklung der Energiekosten.



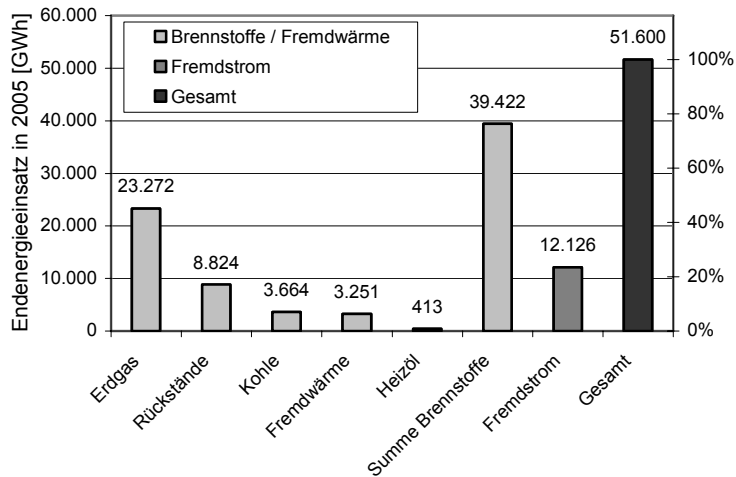
**Abbildung 2-5: Entwicklung des jährlichen Strom- und Brennstoffverbrauchs der deutschen Industrie (1950 – 2000) [2-1]**

Im Zuge der Diskussion um die anthropogene Treibhausproblematik und angesichts der aktuellen politischen Entwicklungen kommt ein weiterer Aspekt hinzu. Die Papier- und Zellstoffindustrie ist seit 2005 vom europäischen Emissionshandel betroffen. Es ist abzusehen, dass damit in der Papierproduktion Themen wie Energieeffizienz und Emissionsintensität eine zunehmende Rolle spielen werden.

### 2.3.2 Energiebedarfsstruktur

Die Energiebedarfsstruktur ist nicht nur im Hinblick auf die unmittelbaren Kosten des Energiebezugs interessant, sie betrifft auch direkt die CO<sub>2</sub>-Intensität der Energieversorgung. Abbildung 2-6 zeigt die absoluten Mengen, sowie die relative Verteilung der einzelnen Endenergieträger, welche die deutsche Papier- und Zellstoffindustrie in 2005 eingesetzt hat. Im Bereich der Brennstoffe stellt Erdgas mit 23,7 TWh bzw. 45,1 %

des gesamten Endenergieeinsatzes den wichtigsten Energieträger dar. Die wirtschaftlich wie ökologisch in der Regel sinnvolle Verwertung von Rückständen deckt 8,8 TWh bzw. 17,1 % des Endenergieeinsatzes, welche damit die zweithäufigst eingesetzten Brennstoffe sind. Der Brennstoff Kohle, in den Jahren 1955 bis 1965 noch der dominante Energieträger, nimmt aktuell eine eher untergeordnete Rolle ein. Der Fremdstrombezug macht mit 12,1 TWh 23,5 % des Endenergieeinsatzes aus [2-3].



**Abbildung 2-6: Struktur des Endenergieeinsatz der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie in 2005 [2-3]**

## 2.4 Prozessklassifikation

### 2.4.1 Prozesse der Papiererzeugung

Der Papiererzeugungsprozess lässt sich in vier Hauptbereiche aufteilen:

- Halbstofferzeugung (Zell-, Holz- oder Altpapierstoff)
- Stoffaufbereitung
- Papiermaschine
- Veredelung

Die einzelnen Hauptbereiche können unterschiedlich strukturiert sein und sowohl integriert als auch an verschiedenen Standorten angesiedelt sein. Auf den Prozess der Zellstoffherstellung wird in diesem Leitfaden nicht eingegangen. Die Erzeugung von Holzstoff und Altpapierstoff ist gewöhnlich in die Papierfabrik integriert. Abbildung 2-7 gibt einen Überblick über die wesentlichen Verfahrensschritte. Die einzelnen Prozessschritte werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

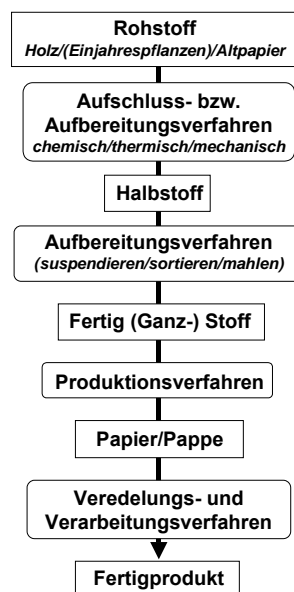


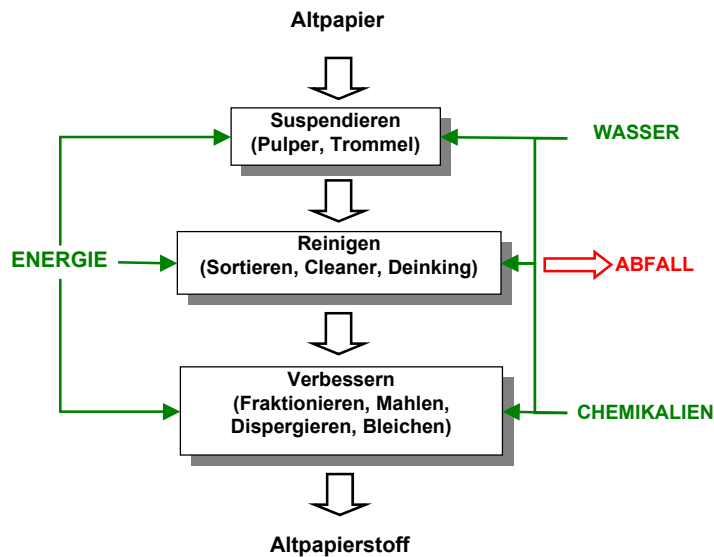
Abbildung 2-7: Verfahrensschritte der Papier,- Karton- und Pappenherstellung (PTS)

### 2.4.2 Halbstofferzeugung

Die Altpapieraufbereitung ist letztlich die Umkehrung der Papierherstellung zur Herstellung eines definierten Altpapierstoffes. Die Abbildung 2-8 zeigt die Grundprozesse der Altpapieraufbereitung.

Unter „Suspendieren“ ist dabei die Zerlegung des Fasergefüges in Einzelfasern zu verstehen. Dazu ist es erforderlich, die Bindungskräfte zwischen den Fasern soweit wie möglich zu reduzieren. Dies geschieht durch Zugabe von Wasser und gegebenenfalls durch die Zugabe von Chemikalien. Die eigentliche Vereinzelung erfolgt dann durch mechanische oder hydraulische Beanspruchung des in seiner Festigkeit reduzierten Papiers.

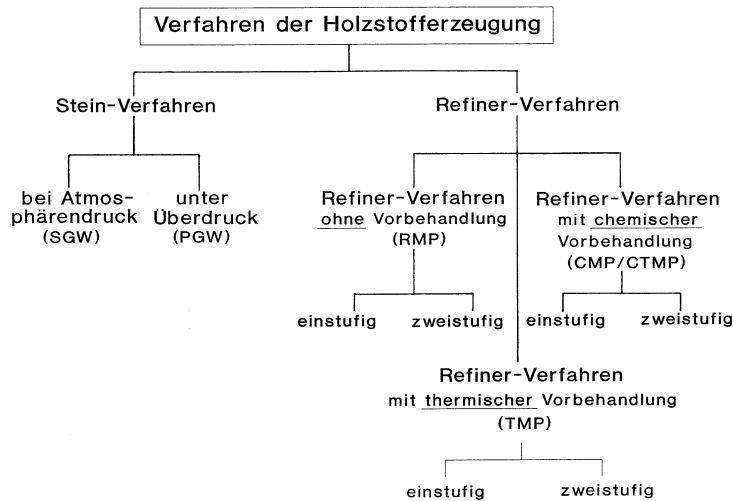
Die Reinigung erfolgt auf mechanischem Weg nach Größe, Form oder spezifischem Gewicht in Sortierern oder Cleanern, wie sie auch in anderen Bereichen der Halbstoffherzeugung eingesetzt werden. Wenn bedruckte Altpapiere als Rohstoff für die Herstellung graphischer Papiere oder Hygienepapiere, aber auch für die Herstellung heller Kartondecken eingesetzt werden sollen, müssen die Druckfarben in der Altpapieraufbereitungsanlage möglichst weitgehend entfernt werden. Für die Druckfarbenentfernung haben sich in der industriellen Praxis im Wesentlichen zwei Verfahren, die Flotation und die Wäsche, durchgesetzt.



**Abbildung 2-8: Grundprozesse der Altpapieraufbereitung (PTS)**

Unter dem Begriff „Holzstoff“ werden heute alle Faserstoffe verstanden, deren Einzelfasern auf mechanischem Weg aus dem verholzten Faserverbund gelöst worden sind. Verfahrenstechnisch gesehen ist die Holzstoffherzeugung ein Zerkleinerungsprozess, bei dem zusätzlich thermische Vorgänge auftreten.

Für die eigentliche Holzstoffherstellung – Zerkleinerung des entrindeten Holzes – gibt es zwei Maschinen: Schleifer (Stein-Verfahren) oder Refiner. Je nach Anwendung des technologischen Verfahrens spricht man von Holzschliff oder Refinerholzstoff. Die Abbildung 2-9 gibt einen Überblick über die Verfahren.

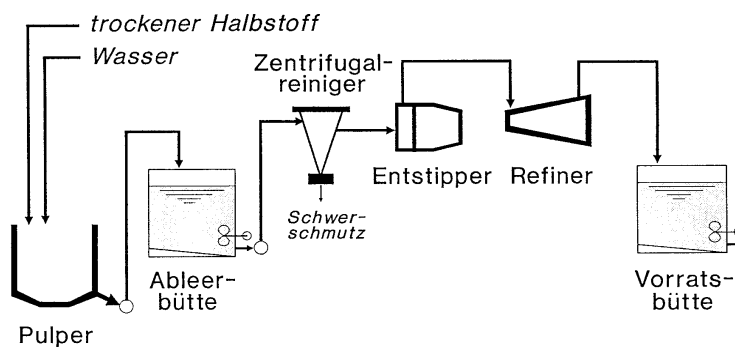


**Abbildung 2-9: Grundprozesse der Holzstofferzeugung (PTS)**

Die Zerfaserung erfolgt beim Steinschliffverfahren durch Anpressen von achsparallel zur Schleiferwelle liegenden Holzprügeln auf die Mantelfläche eines rotierenden Schleifsteins unter Zugabe von Wasser. Der anfallende Stoff muss durch mehrstufige mechanische Trennverfahren (Sortierung) von Unreinheiten wie Rinde oder Sand getrennt werden.

Beim Refiner-Holzstoffverfahren wird der Faserstoff durch mechanische Zerfaserung von Hackschnitzeln gewonnen. Ein Refiner ist eine Mahlmaschine, bei dem die Hackschnitzel auf den Stirnflächen rotierender Scheiben zerfaserter werden (Scheibenmühle, Scheibenrefiner). Beim Refinerverfahren gibt es eine Vielzahl von Verfahrensvarianten, abhängig von der Vorbehandlung der Hackschnitzel (z.B. thermisch oder chemisch) oder der Betriebsweise des Refiners (mit oder ohne Überdruck).

Unter Stoffaufbereitung versteht man das Maschinenfertigmachen des Halbstoffes, d.h. die Arbeitsgänge Suspendieren, Reinigen und Mahlen der Halbstoffe (Faserstoffe), das Mischen der verschiedenen Faserstoffarten und die Zugabe von Füll- und Hilfsstoffen. Das Ergebnis ist der sog. Fertig- oder Ganzstoff. Die Abbildung 2-10 zeigt das vereinfachte Schema der Stoffaufbereitung sowie die wesentlichen maschinentechnischen Aggregate.



**Abbildung 2-10: Schema einer Stoffaufbereitung (PTS)**



### 2.4.3 Papiermaschine

Man versteht darunter eine zusammenhängende Anlage mit bis zu 250 m Länge, die in einzelnen Partien, d.h. Funktionsgruppen verschiedener Technologien, aus dem aufbereiteten Maschinenstoff das Endprodukt „Papier“ fertigt. Im Wesentlichen wird dabei aus der hoch verdünnten Papierstoffsuspension ein Blatt gebildet und durch kontinuierliche Filtration, Pressen und thermische Trocknung zunehmend entwässert. Innerhalb der Papiermaschine können noch Einrichtungen zur Veredelung integriert sein wie Streichwerke, Leim- oder Filmpresse, Glättwerk oder Kalandrier. Am Ende wird das fertige Produkt als Rolle auf einem Tambour aufgerollt und steht der weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

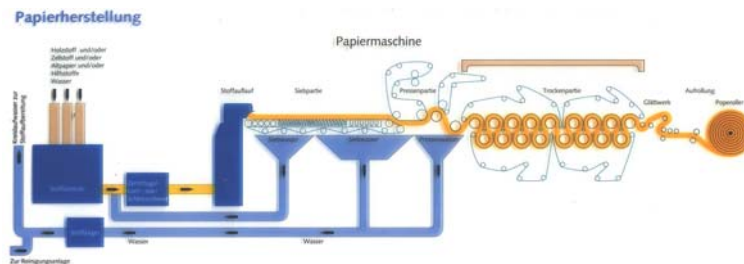


Abbildung 2-11: Schema von Stoffaufbereitung und Papiermaschine (vdp)

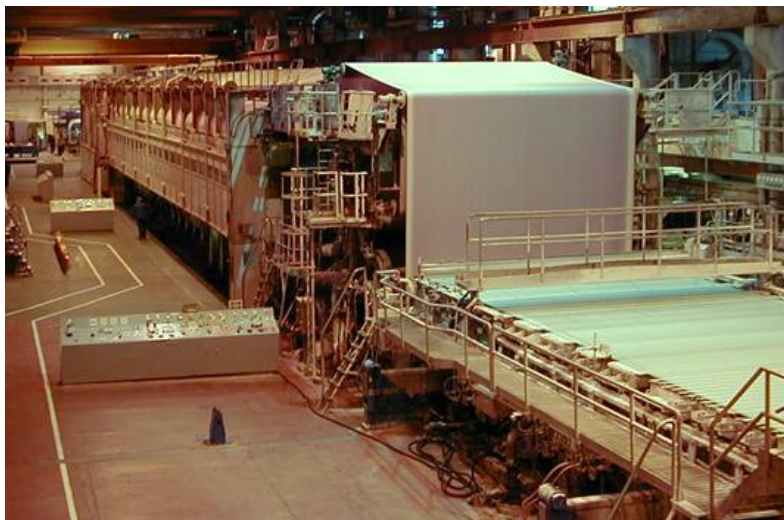
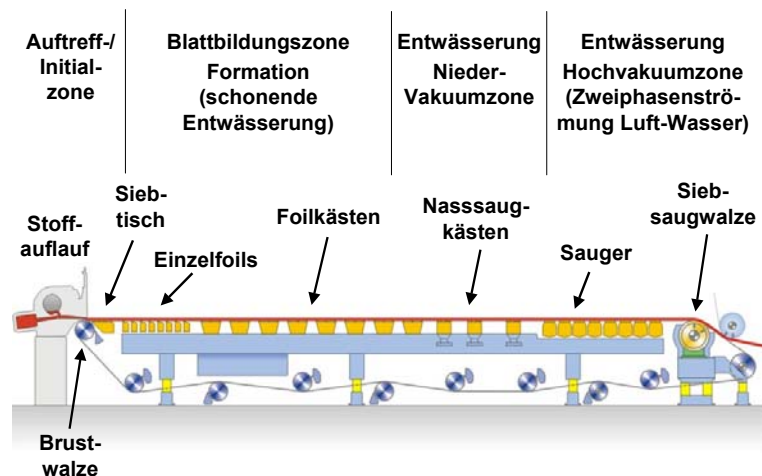


Abbildung 2-12: Papiermaschine mit Langsiebpartie (Bildquelle: Johnson)



**Abbildung 2-13: Papiermaschine mit Former (Voith Paper)**

Der Stoffauflauf hat die Aufgabe, die hoch verdünnte Fasermischung gleichmäßig auf die Breite der Papiermaschine zu verteilen. In der Siebpartie erfolgt die Formung des Netzwerkes der Papierbahn aus ihren Stoffkomponenten. Auf dem Sieb lagern sich die Fasern neben- und aufeinander ab. Das endlose Blatt wird durch einen Filtrationsvorgang gebildet, das Wasser läuft durch das Sieb hindurch bzw. wird nach unten abgesaugt. Es sind diverse Bauarten von Siebpartien auf dem Markt. Neben der verbreiteten Langsiebpartie mit Entwässerung nach einer Seite (siehe Abbildung 2-14 [2-10]) gibt es auch zahlreiche Formerkonstruktionen mit beidseitiger Entwässerung.



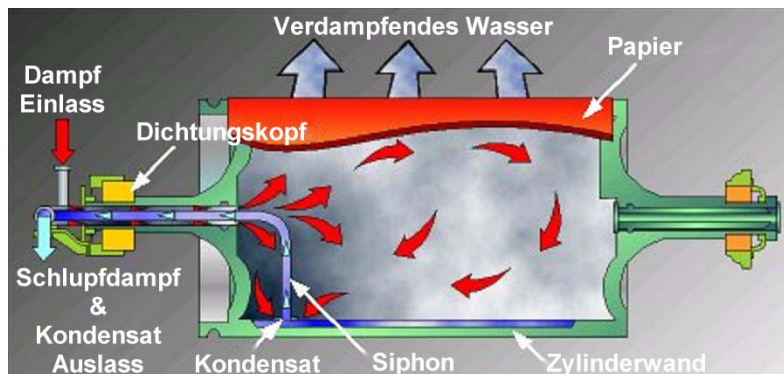
**Abbildung 2-14: Aufbau einer Langsiebpartie (Bildquelle: Metso Paper)**

Die Blattbildung ist abgeschlossen, wenn die Entwässerung soweit fortgeschritten ist, dass sich die Fasern in der Stoffsusension nicht mehr frei bewegen können. Am Ende der Siebpartie enthält die Papierbahn allerdings immer noch ca. 80 % Wasser.

Die noch wenig feste Papierbahn wird durch mechanischen Druck in der Pressenpartie weiter entwässert. Die Bahn wird auf einem saugfähigen endlosen Filztuch zwischen Walzen hindurchgeführt.

Im Anschluss an die Pressenpartie gelangt die Papierbahn in die Trockenpartie. Die Papierbahn wird über bis zu 100 dampfbeheizte Zylinder

geführt. Mittels Kontakt Trocknung wird das nach der Pressenpartie noch enthaltene Wasser der Papierbahn verdampft.



**Abbildung 2-15: Aufbau und Funktionsweise eines Trockenzylinders (Johnson)**

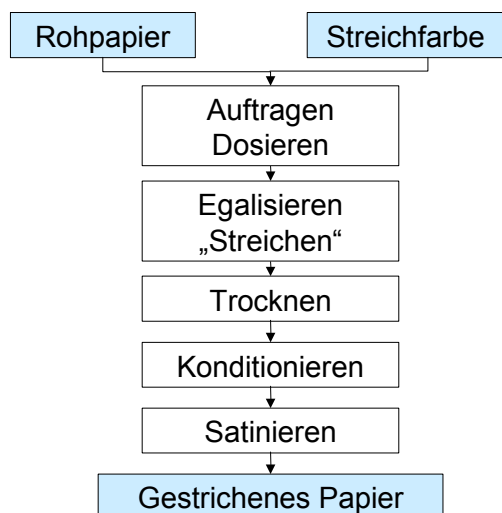
Ein Teil der Papiermaschinen besitzt im Anschluss an die Trockenpartie ein Glättwerk (bestehend aus mehreren Walzen), um die nahezu trockene Papierbahn zu verdichten und zu glätten.

Die fertige Papierbahn mit einer Restfeuchte von ca. 2-8 % wird auf einem Tambour aufgewickelt.

#### 2.4.4 Ausrüstung

Die unterschiedlichen Ansprüche, die von der weiterverarbeitenden Industrie und vom Endverbraucher an die Eigenschaften von Papier gestellt werden, erfordern teilweise eine Veredelung von Papier. Genannt seien hier das Streichen von Papier und das Satinieren von Papier.

Durch das Streichen von Papier erhält man eine geschlossene Papieroberfläche. Dabei wird eine Streichfarbe bestehend aus Pigmenten und Bindemitteln auf das Rohpapier aufgetragen. Streichmaschinen sind komplexe Anlagen, die sowohl in-line (d.h. direkt nach der Trockenpartie vor der Aufrollung) als auch off-line (d.h. als separate Anlage, getrennt von der Papiermaschine) betrieben werden. Die Abbildung 2-16 zeigt die Grundprozesse der Veredelung durch Streichen.



**Abbildung 2-16: Grundprozesse des Streichens**

Abbildung 2-17 zeigt eine moderne Streichmaschine mit einer Arbeitsbreite von 9,50 m und einer maximalen Geschwindigkeit von 1.500 m/min [2-11].



**Abbildung 2-17: Streichmaschine SM 2 der Nordland Papier Dörpen GmbH**

Eine nachträgliche Veredelung der Oberfläche lässt sich durch das Satinieren (Glätte- und Glanzsteigerung) der Papierbahn mit Hilfe eines Kalenders erzielen. Die Satinage ist ein thermomechanischer Umformungsprozess, in dem durch hohe Linienkräfte und Wärme die Unebenheiten in der Papieroberfläche minimiert werden. Abbildung 2-18 zeigt einen sogenannten Superkalender mit den typischerweise übereinander angeordneten Walzen [2-12].



**Abbildung 2-18: Superkalender**

#### **2.4.5 Prozessorientierte Klassifizierung der Papierindustrie**

Die Papierindustrie kann hinsichtlich der eingesetzten Prozesse als homogen bezeichnet werden. Das bedeutet, dass die meisten Einzelprozesse in der gesamten Papierindustrie über alle Sortenbereiche Anwendung finden, wie z.B. Suspendieren oder Trocknen. Sie unterscheiden sich allerdings in ihrer Ausführung und Betriebsweise und somit in der Energierrelevanz. Trotz der Unterschiede zwischen den Sorten hinsichtlich Einsatz und Intensität der einzelnen Prozesse lassen sich die angewandten Prozesse wie folgt einteilen:

**Tabelle 2-2: Einteilung der Prozesse der Papiererzeugung**

	<b>thermisch</b>	<b>mechanisch</b>	
Grundprozesse	Trocknung	Stofflösen	
	Kochen (Leim)	Suspendieren	
	Imprägnieren	Trennen	
	Zerfasern	Sichten	
		Filtern	
		Pressen	
		Mahlen	
		Flotieren	
		Sedimentieren	
	Spezielle Prozesse		Blattbildung
Nebenprozesse	Kühlen		
		Verdichten (Druckluft- zeugung)	

Eine Übersicht zur Anwendung und Relevanz der Teilprozesse hinsichtlich des Energieverbrauchs ist in einer Sorten-Prozess-Matrix in Abbildung 2-19 dargestellt. Dabei sind horizontal die wesentlichen Sortenbereiche dargestellt und hinsichtlich des Rohstoffeinsatzes kategorisiert, da der Rohstoffeinsatz maßgeblich ist welche Prozesse Anwendung finden.



## 2.5 Betriebliche Kennzahlen

Zur Bewertung der Energieeffizienz von Industriebetrieben werden häufig Standortkennzahlen herangezogen und miteinander verglichen. Derartige Kennzahlen werden z.B. aus den gesamtbetrieblichen Energie-, Produktions- oder Umsatzdaten gebildet. Sie dienen den Betrieben insbesondere zur kontinuierlichen Beobachtung und Kontrolle ihres Energieeinsatzes.

Der Vergleich dieser globalen Kennzahlen mit denjenigen anderer Betriebe bietet die Möglichkeit einer ersten Positionierung eines Betriebes innerhalb seiner Branche. Die Kennzahlen erlauben allerdings keine direkten Aussagen über die Produktions- oder Betriebsstrukturen und sie berücksichtigen nur bei geeigneter Klassifizierung die Produktpalette der zu vergleichenden Betriebe. Unternehmen mit sehr ähnlichen Prozessen und Prozessketten können aus der Abweichung der Kennzahlen interessante Rückschlüsse auf die Energieeffizienz ihrer Betriebe ziehen. Für Unternehmen mit sehr unterschiedlicher Stufigkeit bzw. mit unterschiedlichen Prozessketten liefert der Vergleich von Standortkennzahlen ohne Kenntnis der Produktpalette kaum belastbare Aussagen. Das häufig vorgeschlagene so genannte „Energiebenchmarking“, also der Vergleich der Energieeffizienz eines Betriebes mit dem „Besten“ der Branche, ist daher nur eingeschränkt möglich.

Im Folgenden werden – unter Berücksichtigung ihrer eingeschränkten Aussagekraft – Energiekennzahlen für ausgewählte Betriebe der Papierindustrie aufgeführt. Sie stammen aus der Analyse der Energiedaten von Betrieben der deutschen Papierindustrie. Die bundesweite Umfrage wurde 2006 von der Arbeitsgemeinschaft „BEK Papierindustrie“ durchgeführt. Die Energiedaten stammen aus dem Jahr 2005. Tabelle 2-3 gibt – sortiert nach den Hauptproduktionsschwerpunkten, die in Abschnitt 2.1 festgelegt wurden – eine Übersicht über die Betriebe, die sich an der Befragung beteiligt haben. Insgesamt haben sich 46 Betriebe aus den vier Produktionsschwerpunkten „Graphische Papiere“, „Verpackungspapiere“, „Hygiene Papiere“ und „Technische Papiere und Pappen“ an der Befragung beteiligt.

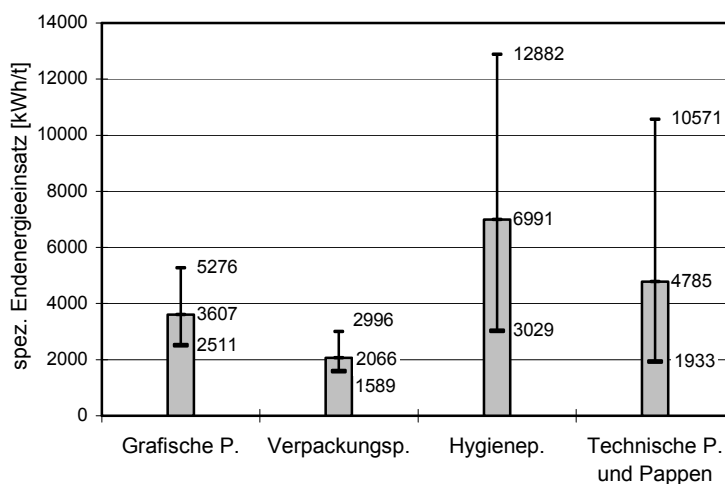
**Tabelle 2-3: Übersicht über die Beteiligung an der Befragung nach Hauptproduktionsschwerpunkten**

	Hauptproduktionsschwerpunkt (HPSP)	Anzahl der Betriebe
1	Grafische Papiere	13
2	Verpackungspapiere	12
3	Hygienepapiere	6
4	Technische Papiere und Pappen	15

### 2.5.1 Energiebedarfs- und Energiekostenstruktur der einzelnen Sortenbereiche

Eine Übersicht über den spezifischen Energieeinsatz in den einzelnen Sparten der Papierindustrie gibt Abbildung 2-20. Es ist der Endenergieeinsatz, also die Summe des Bezugs von Brennstoffen, Strom und Wärme abzüglich der in Form von Strom oder Wärme abgegebenen Energiemengen, bezogen auf die Bruttoproduktionsmenge aufgetragen. Viele der befragten Unternehmen betreiben eine Anlage zur Eigenstro-

merzeugung und decken so selbst einen Teil ihres Strombedarfs, wobei es eine deutliche Varianz des Eigenstromanteils gibt. Daher wird von einer nach den einzelnen Energieträgern aufgeschlüsselten Darstellung des Endenergieeinsatzes abgesehen, da diese keinen Aufschluss über den Einsatz der verschiedenen Energieträger in den Produktionsprozessen geben würde.



**Abbildung 2-20: Spezifischer Endenergieeinsatz der an der Umfrage beteiligten Unternehmen der Papierindustrie**

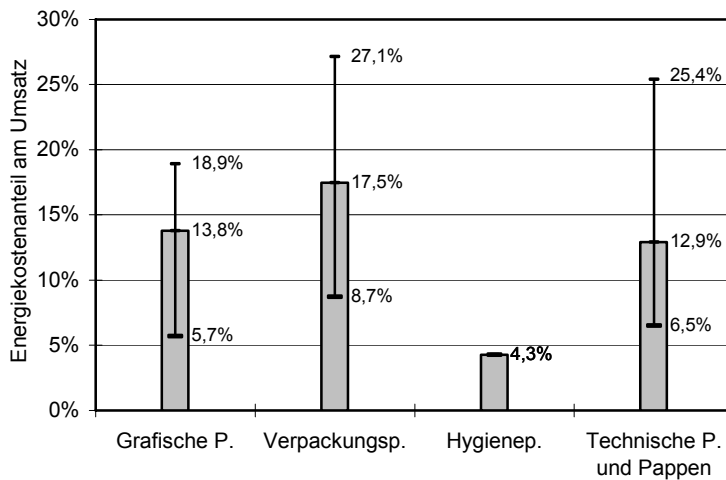
Es zeigen sich deutliche Schwankungen des spezifischen Energieeinsatzes, sowohl innerhalb als auch zwischen den verschiedenen Produktionsschwerpunkten.

Abweichungen zwischen den einzelnen Sparten sind zu erwarten, da die Sorten in ihren Eigenschaften erheblich differieren und dementsprechend auch unterschiedliche Ansprüche an den Produktionsprozess stellen. Die Produktion von Hygienepapieren erfordert mit durchschnittlich 6.991 kWh/t den höchsten spezifischen Endenergieeinsatz. Es folgen technische Papiere und Pappen mit 4.785 kWh/t, Grafische Papiere mit 3.607 kWh/t sowie Verpackungspapiere mit 2.066 kWh/t.

Jedoch auch innerhalb der einzelnen Sparten treten erhebliche Schwankungen auf, die Werte liegen bis zu einem Faktor fünf auseinander. Die Gründe hierfür können vielfältiger Natur sein. Wichtige Einflussfaktoren auf den Energiebedarf sind, neben der Betriebsgröße und der Stufigkeit der Prozesse, die eingesetzten Rohstoffe, die gewünschte Produktqualität, aber auch das Alter und der Zustand der Anlagen sowie die Effizienz der Betriebe im Umgang mit den Ressourcen. Es muss also im Detail geprüft werden, in wie weit die Prozesse optimiert werden können oder welche produktionsspezifischen Besonderheiten des einzelnen Betriebes zu einem auffällig hohen spezifischen Endenergieeinsatz führen. Die Einordnung des eigenen bzw. des betrachteten Betriebes in die hier dargestellten Werte kann also einen ersten Anhaltswert liefern, dem gegebenenfalls weitere Prüfungen folgen müssen.

Einen Überblick über die Bedeutung der Energiekosten in den an der Umfrage beteiligten Unternehmen gibt Abbildung 2-21. Es sind die Anteile der Energiekosten am Umsatz der Betriebe der einzelnen Hauptproduktionsschwerpunkte aufgetragen, jeweils als Maximal-, Minimal- und Mittelwert.



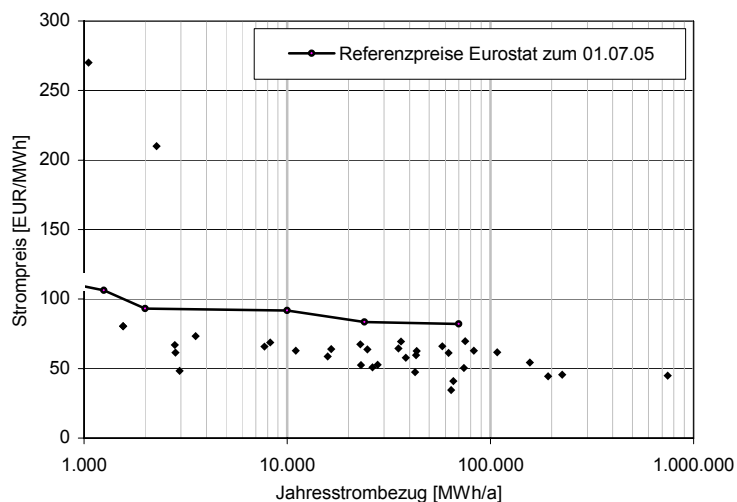


**Abbildung 2-21: Anteil der Energiekosten am Umsatz der an der Umfrage beteiligten Unternehmen der Papierindustrie**

Der Wert für die Sparte Hygienepapiere sollte nicht als repräsentativ angesehen werden, da in diesem Punkt nur ein Unternehmen auswertbare Angaben gemacht hat. Mit Mittelwerten zwischen 12,9 % und 17,5 % liegen die Werte für die übrigen Sparten über dem vom statistischen Bundesamt für 2005 angegebenen Energiekostenanteil der Papierindustrie von 9,7 %. Die Bezugsgröße im letzteren Fall, der Bruttoproduktionswert, berücksichtigt neben den am Markt abgesetzten Erzeugnissen auch die mit den Herstellkosten bewerteten Halb- und Fertigerzeugnisse im Bestand. Auf den unterschiedlichen Bezugsgrößen beruhende Abweichungen der Energiekostenanteile sind bei der vorliegenden Betrachtungsperiode von einem Jahr insgesamt jedoch nur in geringem Umfang zu erwarten.

Im Mittel weist die Sparte der Verpackungspapiere den höchsten Energiekostenanteil auf. Dies beruht womöglich darauf, dass im Bereich der Verpackungspapiere, bezogen auf das Gewicht des Papiers, tendenziell niedrigere Erlöse erzielt werden.

Abbildung 2-22 gibt die spezifischen Strombezugpreise in €/MWh über der jährlich bezogenen Strommenge in MWh/a für die an der Umfrage beteiligten Unternehmen wieder. Daneben sind Referenzpreise zum 1.07.05 angegeben.

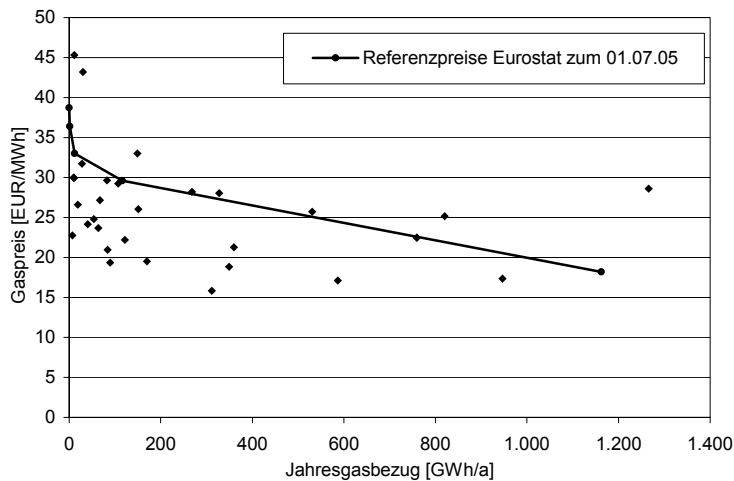


**Abbildung 2-22: Strombezugspreise der an der Umfrage beteiligten Unternehmen der Papierindustrie in 2005 [2-2]**

Es zeigt sich, dass die meisten Unternehmen relativ ähnliche Preise erzielen konnten, die in den meisten Fällen unter den Referenzpreisen liegen. Womöglich profitieren die Unternehmen an dieser Stelle von ihrer meist hohen Auslastung, welche zu verhältnismäßig gleichmäßigen Lastgängen und damit tendenziell niedrigeren Leistungspreisen führt.

Diese Abhängigkeit der Strompreise von der Anzahl der Jahresbenutzungsstunden äußert sich im umgekehrten Fall, also bei hohen Leistungen und in Relation geringen Bezugsmengen noch deutlicher. Unternehmen, welche durch Eigenstromerzeugung den größten Anteil ihres Strombedarfs selbst decken, sind in Stillstands- oder Rüstzeiten ihrer Anlage kurzfristig auf Reservestromlieferungen mit großen Leistungen angewiesen. Dies resultiert in recht hohen spezifischen Strompreisen für den Strombezug, was aber die mittleren Kosten für die Deckung des Strombedarfs aus Eigenenerzeugung und Fremdbezug nur in geringem Umfang beeinflusst.

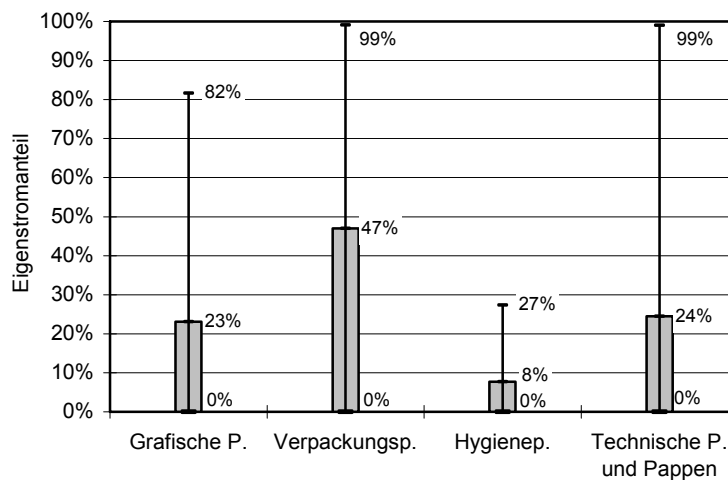
Einen Überblick über die Entwicklung der spezifischen Gaspreise über der Bezugsmenge gibt Abbildung 2-23. Wie am Verlauf der Referenzpreise zu erkennen ist, können in der Regel bei größeren Abnahmemengen Mengenrabatte ausgehandelt werden. Eine Abhängigkeit von der Anzahl der Jahresbenutzungsstunden ist beim Gasbezug zwar ebenfalls gegeben, hier haben Leistungspreisregelungen in der Regel jedoch deutlich geringeren Einfluss auf die Bezugspreise wie beim Strombezug. Die an der Umfrage beteiligten Unternehmen konnten in der Regel angemessene Preise erzielen, welche meist unterhalb der Referenzpreise liegen.



**Abbildung 2-23: Gasbezugspreise der an der Umfrage beteiligten Unternehmen der Papierindustrie in 2005 [2-2]**

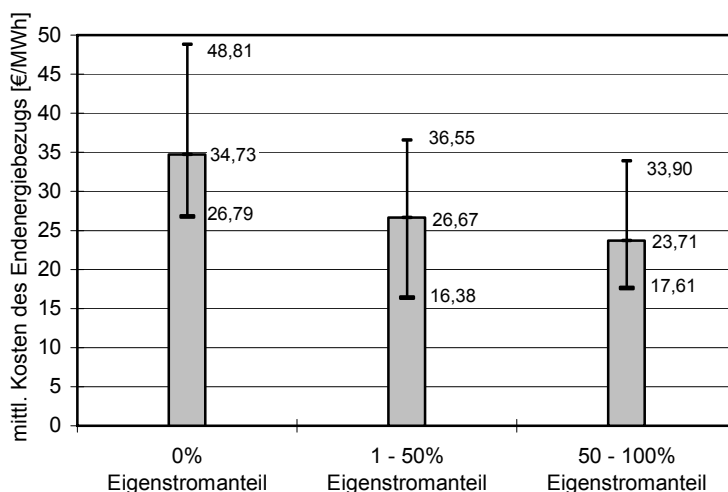
Als Möglichkeit zur Reduktion der Kosten des Energiebezugs kommt die Eigenerzeugung benötigter Energieträger in Betracht. In Unternehmen mit zeitgleichem Strom- und Wärmebedarf bietet insbesondere die Technik der Kraft-Wärme-Kopplung eine Option, durch kombinierte Erzeugung von Strom und Wärme zugleich die Ressourceneffizienz der Energieversorgung zu erhöhen und die Kosten des Energiebezugs zu senken.

Unternehmen der Papierindustrie weisen in der Regel aufgrund ihres hohen Energiebedarfs, der Struktur ihres Energieeinsatzes und ihrer hohen Jahresarbeitsstundenzahl gute Voraussetzungen zum Betrieb einer Anlage zur Eigenstromerzeugung in Kraft-Wärme Kopplung auf. Abbildung 2-24 zeigt, in welchem Umfang die an der Umfrage beteiligten Unternehmen ihren Strombedarf durch Eigenerzeugung abdecken. Den höchsten Eigenstromanteil weisen mit durchschnittlich 47 % die Unternehmen des Hauptproduktionsschwerpunkts ‚Verpackungspapiere‘ auf. Auf der anderen Seite des Spektrums, im Bereich der Hygienepapiere, deckten die befragten Unternehmen im Mittel 8 % ihres Strombedarfs durch Eigenerzeugung.



**Abbildung 2-24: Eigenstromanteil der an der Umfrage beteiligten Unternehmen der Papierindustrie**

Ob sich eine Anlage zur Eigenstromerzeugung im Einzelfall wirtschaftlich rechnet, hängt von vielen Randbedingungen ab. Beispielhaft wären die ausgehandelten Verträge mit den Energieversorgungsunternehmen, die Größe und Struktur des eigenen Bedarfs, aber auch logistische oder örtliche Begebenheiten zu nennen. Eine grobe Orientierung über die Auswirkung der Eigenstromerzeugung auf die mittleren Kosten des Energiebezugs kann Abbildung 2-25 geben. Hier sind die mittleren spezifischen Kosten des Endenergiebezugs, also der Ausgaben für alle bezogenen Endenergieträger abzüglich der ggf. erzielten Erlöse für Strom- oder Wärmeabgabe, der an der Umfrage beteiligten Unternehmen angegeben, in Abhängigkeit des Umfangs der Eigenstromerzeugung.



**Abbildung 2-25: Mittlere spezifische Kosten des Endenergiebezugs in Abhängigkeit des Eigenstromanteils der an der Umfrage beteiligten Unternehmen**

Unternehmen ohne Eigenstromerzeugung hatten mit durchschnittlich 34,73 €/MWh deutlich höhere spezifische Energiebezugskosten als Unternehmen, die ihren Strombedarf teilweise oder annähernd vollständig durch Eigenerzeugung abdeckten. Die mittleren Energiebezugskosten lagen bei Eigenstromanteilen zwischen 1 % und 50 % bei 26,67 €/MWh, und zwischen 50 % und 100 % Eigenerzeugung bei 23,71 €/MWh. Damit spielt im vorliegenden Fall der Umfang der Eigenstromerzeugung eine untergeordnete Rolle, zu signifikanten Kostenreduktionen ist eine weitgehende Eigenbedarfsdeckung nicht zwangsläufig erforderlich. Aus Sicht der Energiebezugskosten kann es also durchaus attraktiv sein, eine Anlage zur Eigenstromerzeugung zu betreiben. Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einer Eigenstromerzeugung müssen natürlich auch die sonstigen Betriebs- und insbesondere die Kapitalkosten der Anlage betrachtet werden. Darüber hinaus ist im Einzelfall eine detaillierte Prüfung der gesamten Randbedingungen erforderlich.

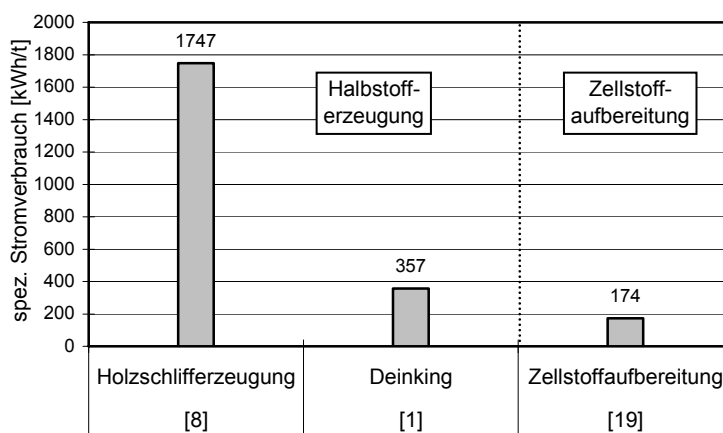
Angesichts der derzeitigen Entwicklungen der Energiepreise und der energiepolitischen Rahmenbedingungen ist jedoch eine zunehmende Relevanz der kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme in Kraft-Wärme-Kopplung zu erwarten.

## 2.5.2 Energieeinsatz in den Prozessgruppen

Im Folgenden soll auf einzelne energieintensive Prozesse bei der Papierherstellung eingegangen werden. Die zugrunde liegenden Daten entstammen auch hier der im Jahr 2006 durchgeführten Umfrage bei

deutschen Papierproduzenten. Es handelt sich also ebenfalls um betriebliche Kennzahlen, bei deren Interpretation die eingangs dieses Kapitels genannten Einschränkungen beachtet werden sollten. Die Auswertung der Umfrageergebnisse ergab insbesondere im Bereich der prozessbezogenen Kennzahlen mitunter erhebliche Streuungen. Diesen Fällen liegen vermutlich Ungenauigkeiten bei der Datenerfassung zu Grunde. Die Aussagekraft der Maximal- bzw. Minimalwerte ist somit beschränkt, weshalb ggf. auf deren Darstellung verzichtet wird. Die angegebenen, durch Mittelung entstandenen Werte sollten jedoch eine gewisse Orientierung bieten.

In Abbildung 2-26 ist der spezifische Stromverbrauch von einzelnen Prozessen zur Erzeugung von Halbstoffen und zur Zellstoffaufbereitung dargestellt.

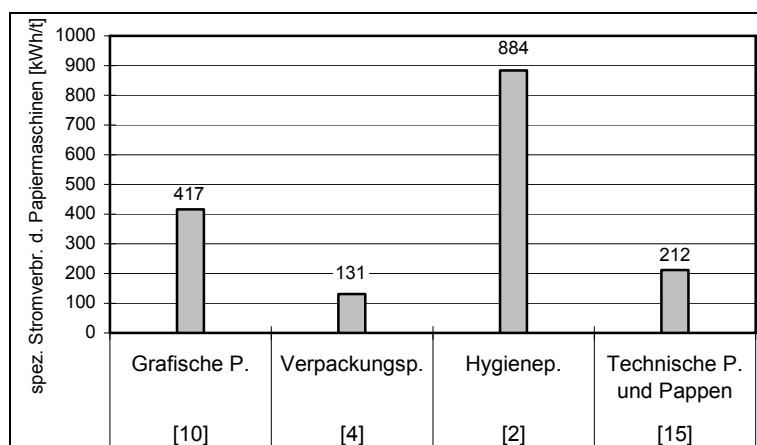


**Abbildung 2-26: Spezifischer mittlerer Stromverbrauch von Prozessen zur Halbstoffherzeugung und Zellstoffaufbereitung in den an der Umfrage beteiligten Unternehmen; [Anz. Datensätze]**

Die Datenbasis umfasst dabei im Bereich der Holzschliffherzeugung leider nur auswertbare Daten von zwei, beim Deinking von Altpapier nur von einem Unternehmen. Die Werte zeigen jedoch, dass der spezifische Strombedarf zur Holzschliffherzeugung mit 1.747 kWh/t den des Deinkings von 357 kWh/t deutlich übersteigt. Für die mechanische Zerkleinerung des Ausgangsstoffes Holz ist erheblicher Einsatz elektrischer Antriebsenergie erforderlich.

Die Aufbereitung des Zellstoffes zur Erlangung eines ‚maschinenfertigen Zustands‘ erfordert die Aufwendung von durchschnittlich 174 kWh/t elektrischer Energie.

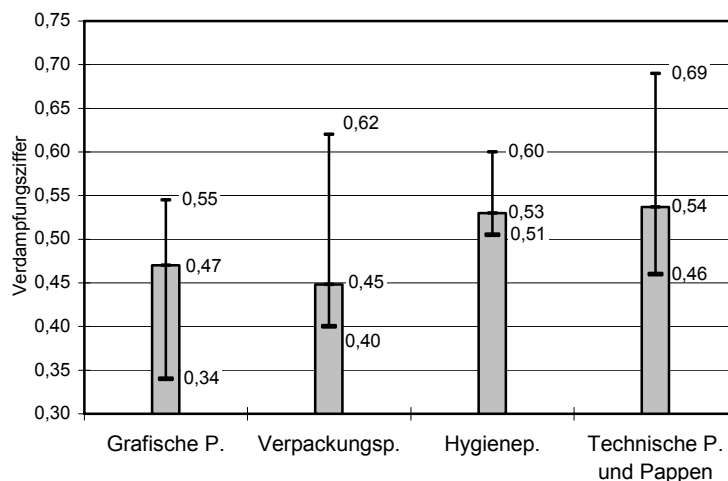
Der spezifische Stromverbrauch der Papiermaschinen zeigt sehr große Schwankungen, sowohl zwischen als auch innerhalb der einzelnen Produktionsschwerpunkte.



**Abbildung 2-27: Spezifischer mittlerer Stromverbrauch der Papiermaschinen in den an der Umfrage beteiligten Unternehmen; [Anz. Datensätze]**

Der mit Abstand höchste Verbrauch ist mit 884 kWh/t im Bereich der Hygienepapiere produzierenden Maschinen festzustellen. Dies liegt an der sehr geringen flächenbezogenen Masse, mit der Hygienepapiere produziert werden, was zu ungünstigen massenbezogenen Kennzahlen führt. Die wesentlich stärkeren Verpackungspapiere sowie die technischen Papiere und Pappen erreichen hier mit 131 kWh/t bzw. 212 kWh/t deutlich günstigere Kennzahlen, grafische Papiere liegen mit 417 kWh/t im Mittelfeld.

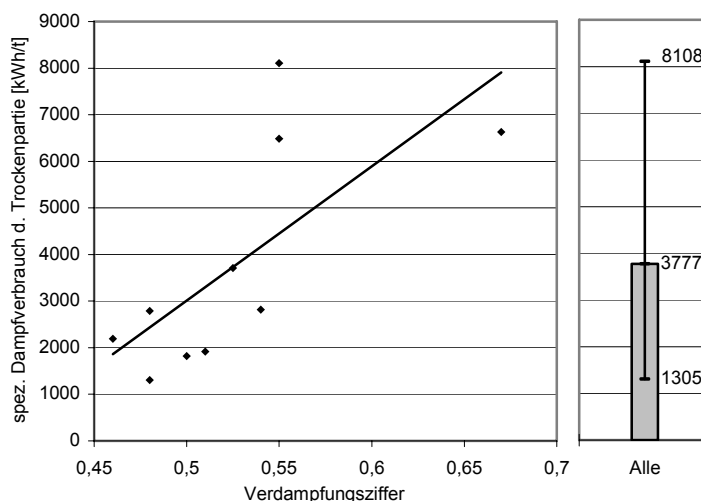
Der größte Energiebedarf bei der Papierproduktion entsteht bei der Trocknung in der Trockenpartie der Papiermaschine. Die Trocknung muss dabei durch Verdampfen des dem Papier anhaftenden bzw. im Papier gebundenen Wasser erfolgen, also durch Zufuhr thermischer Energie. Die Energiezufuhr erfolgt in der Regel durch dampfbeheizte Trockenzylinder, sowie ggfs. durch Erwärmung der in die Trockenhaube geführten Zuluft. Eine für den erforderlichen Energieeinsatz enorm wichtige Kenngröße stellt an dieser Stelle die Verdampfungsziffer dar. Diese wird als die Differenz der Feuchtegehalte des Papiers vor und hinter der Trockenpartie definiert. In Abbildung 2-28 sind die Verdampfungsziffern der Papiermaschinen der an der Umfrage beteiligten Unternehmen dargestellt.



**Abbildung 2-28: Verdampfungsziffern in den Trockenpartien der Papiermaschinen**

Am Austritt aus der Trockenpartie hat das Papier eine Restfeuchte von 2 bis 8%. Die Unterschiede zwischen den Verdampfungsziffern beruhen in erster Linie auf unterschiedlichen Feuchtegehalten des Papiers am Eintritt in die Trockenpartie (zwischen 40 bis über 50 %). Wie weit das Papier in der davor angeordneten Pressenpartie mechanisch entwässert werden kann hängt einerseits von der Beschaffenheit des Papiers, andererseits aber auch von der eingesetzten Pressentechnologie ab. Wie Abbildung 2-28 zu entnehmen ist, lassen sich in Maschinen, die Grafische Papiere und Verpackungspapiere produzieren, tendenziell niedrigere Verdampfungsziffern erreichen als in Maschinen, welche Hygienepapiere oder Technische Papiere und Pappen fertigen. Es zeigen sich aber auch innerhalb der einzelnen Sparten zum Teil erhebliche Schwankungsbreiten der Verdampfungsziffern, welche Spielräume für mögliche prozesstechnische Verbesserungen indizieren.

Welche Auswirkungen die Verdampfungsziffer auf den Energiebedarf der Trockenpartie der Papiermaschine hat, sei im Folgenden exemplarisch anhand des spezifischen Dampfverbrauchs gezeigt. Dessen Entwicklung über der Verdampfungsziffer ist für jene Papiermaschinen des Hauptproduktionsschwerpunktes ‚Technische Papiere und Pappen‘, über welche aus der Umfrage ausreichende Daten vorliegen, in Abbildung 2-29 gezeigt.

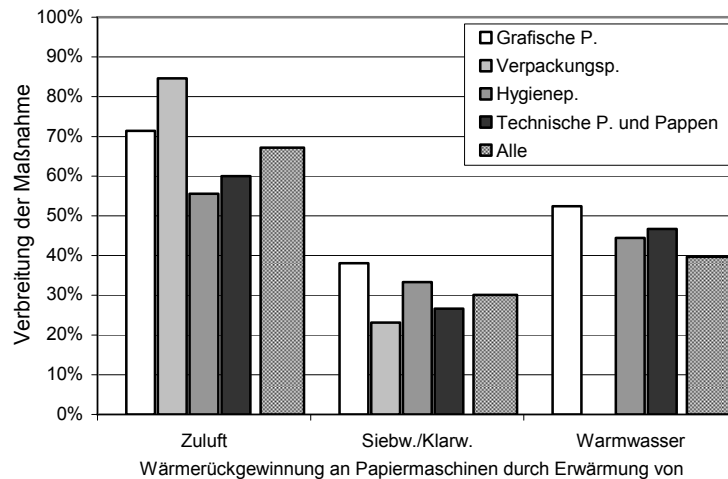


**Abbildung 2-29: Spezifischer Dampfverbrauch in der Trockenpartie in Abhängigkeit der Verdampfungsziffer (HPSP: Technische Papiere und Pappen)**

Die Ausgleichsgerade durch die einzelnen Datensätze zeigt, dass der spezifische Dampfverbrauch mit zunehmenden Verdampfungsziffern stark ansteigt. Zur Verdeutlichung: Eine Erhöhung der Verdampfungsziffer von 0,5 auf 0,75 bewirkt etwa eine Verdreifachung der zu verdampfenden Wassermenge, bezogen auf die Menge des produzierten Papiers. Hieran wird deutlich, dass etwaige prozesstechnische Spielräume zur Absenkung der Verdampfungsziffer weitestmöglich ausgeschöpft werden müssen, sowie Verbesserungen der Prozesstechnik hierauf abzielen sollten, um den Energieverbrauch in der Trockenpartie der Papiermaschinen effektiv abzusenken. Im Mittel lag der spezifische Dampfverbrauch der Papiermaschinen des Hauptproduktionsschwerpunktes, ‚Technische Papiere und Pappen‘ bei 3.777 kWh/t.

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung des Energiebedarfs der Papiermaschine bzw. des Unternehmens besteht in der Umsetzung von

Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung. So kann beispielsweise die Abwärme der heißen und feuchten Abluft der Trockenhaube dazu verwendet werden, die Haubenzuluft vorzuwärmen. Abbildung 2-30 gibt einen Überblick über die Verbreitung derartiger Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung an den Papiermaschinen der umfragebeteiligten Unternehmen.

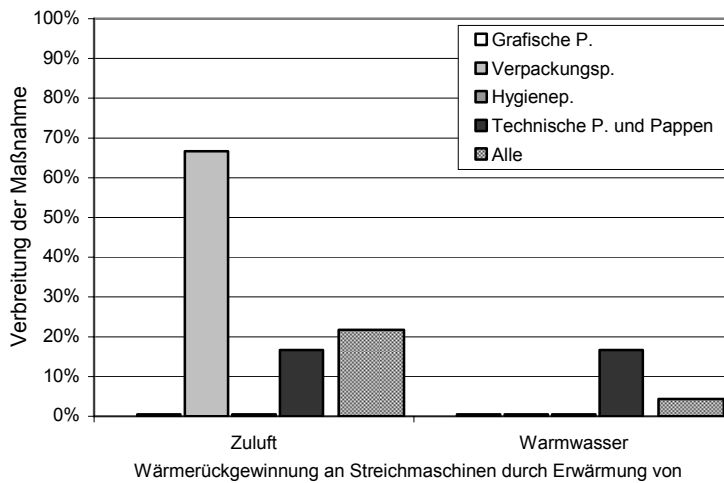


**Abbildung 2-30: Verbreitung von Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung an Papiermaschinen der umfragebeteiligten Unternehmen**

Die Zuluftvorwärmung ist mit einer Verbreitung von knapp 70 % die insgesamt am häufigsten umgesetzte Wärmerückgewinnungsmaßnahme. Sehr verbreitet ist sie an den Verpackungspapier produzierenden Papiermaschinen, weniger in den Sparten ‚Hygienepapiere‘ sowie ‚Technische Papiere und Pappen‘. Die Erwärmung von Sieb-/Klarwasser bzw. Warmwasser ist mit 30 % bzw. 40 % etwa gleich häufig vertreten. Hier sind keine signifikanten Abweichungen zwischen den Produktionsschwerpunkten festzustellen, davon abgesehen, dass an keiner der Papiermaschinen für Verpackungspapier eine Erwärmung von Warmwasser mittels Abwärme realisiert wurde.

Abbildung 2-31 gibt Aufschluss über die Verbreitung von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen an Streichmaschinen. Es zeigt sich, dass sich diese hier noch nicht so weit durchgesetzt haben wie es bei den Papiermaschinen der Fall war.





**Abbildung 2-31: Verbreitung von Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung an Streichmaschinen der umfragebeteiligten Unternehmen**

Von der Möglichkeit der Zuluftvorwärmung machen lediglich die Unternehmen der Verpackungspapierindustrie in größerem Umfang Gebrauch, deutlich nachgeordnet folgen die Produzenten von Technischen Papieren und Pappen. Die Erzeugung von Warmwasser mittels Abwärme ist noch weniger weit verbreitet, und wird nur bei ca. 5 % der betrachteten Streichmaschinen umgesetzt.

Angesichts dieser Zahlen scheint die Wirtschaftlichkeit von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen an Streichmaschinen bisher kritisch gewesen zu sein. In Anbetracht der derzeit steigenden Energiepreise könnte sich eine - ggfs. erneute - Prüfung dennoch als lohnenswert erweisen.

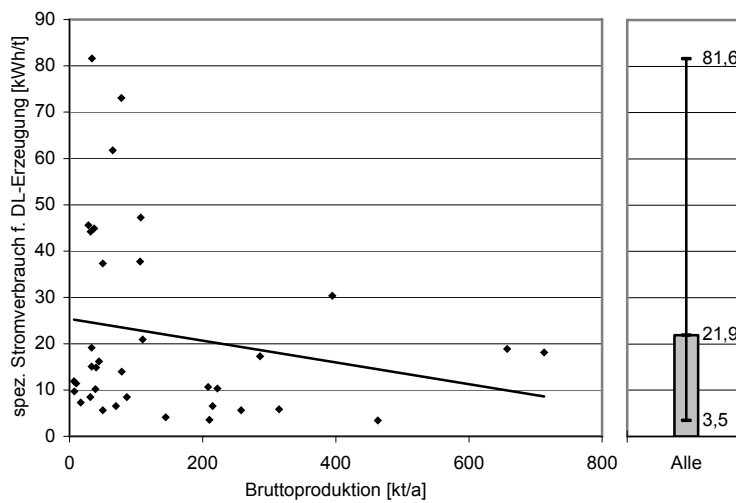
### 2.5.3 Energieeinsatz in den Querschnittstechnologien

Neben den direkten prozess- und produktbezogenen Energieverbrauchern wird für die Papiererzeugung Energie für Querschnittstechniken verbraucht. Typische spezifische Werte sind in Tabelle 2-4 aufgeführt.

**Tabelle 2-4: Typische Energieverbräuche für Nebenanlagen und Querschnittstechnologien [2-13]**

Bereich	Energieverbrauch kWh/t	Anmerkung
Abwasserreinigung (Mechanische Vorreinigung und Aerobie)	4 bis 8	Pumpen, Rührwerke, Belüftung
Abwasserreinigung (mechanische Vorreinigung, Anaerobie und Aerobie)	5 bis 10	Ohne Biogasnutzung
	-20 bis -15	Mit Biogasnutzung (AP-Sorten: 25 kWh/t)
Frischwasseraufbereitung	2 bis 5	Rohwasserpumpen und Filter
Druckluft	20 bis 30	Druckluftherzeuger und -trockner
Werksverkehr	1 - 2	Stapler, Flurförderfahrzeuge
Ausrüstung	10 bis 40	Umroller, Rollenschneider, Ausschusshandling
	30 bis 80	Mit Formatausrüstung und Versand

Druckluft wird in der Papierindustrie als Steuer- und Regelluft, sowie in der Flotation für Kreislaufwasserbehandlung eingesetzt. Außerdem wird Druckluft häufig bei Bahnabrissen eingesetzt, um die Papier- oder Streichmaschine frei zu blasen. Aufgrund der prinzipbedingt schlechten Wirkungsgrade bei der Erzeugung von Druckluft, zählt diese zu den teuersten Energieformen, die in der Papierindustrie eingesetzt werden. Die Aufwendung elektrischer Energie zur Druckluftbereitstellung ist in Abbildung 2-32 dargestellt. Dabei ist der spezifische Stromeinsatz zur Druckluftherzeugung, bezogen auf die Menge des produzierten Papiers, über der jährlichen Bruttoproduktionsmenge aufgetragen.



**Abbildung 2-32: Spezifischer Stromverbrauch zur Druckluftbereitstellung in Abhängigkeit der Bruttoproduktion**

Durch den Bezug auf die Produktionsmenge umfasst der dargestellte spezifische Stromverbrauch der Druckluftbereitstellung die gesamte Kette des Druckluftgebrauchs. Er beinhaltet sowohl die Effizienz der Drucklufterzeugung, also insbesondere den Energiebedarf der Druckluftkompressoren, als auch die Effizienz der Druckluftanwendung im Betrieb.

Die Effizienz der Drucklufterzeugung beruht in erster Linie auf der technischen Ausführung, dem Zustand und der Betriebsweise der Kompressoren. Aber selbst zwischen verhältnismäßig alten und sehr modernen Kompressorenanlagen können Unterschiede mit einer derart großen Bandbreite, wie sie in den dargestellten Daten zu beobachten ist, nicht annähernd erreicht werden. Die große Schwankungsbreite des spezifischen Stromverbrauchs zur Druckluftbereitstellung beruht daher in erster Linie auf der Druckluftanwendung. Hieraus resultiert auch die wahrnehmbare Abhängigkeit von der Produktionsmenge. Betriebe mit hoher Auslastung und gut gewartetem Verteilnetz (geringe Leckagerate) haben in der Regel geringere spezifische Verbrauchswerte. Dennoch gibt es auch bei Betrieben mit vergleichbarer Produktionsmenge erhebliche Schwankungen des spezifischen Stromeinsatzes für die Druckluftbereitstellung. Dies deckt sich mit den Erfahrungen, die im Rahmen der u.a. von der Deutschen Energie-Agentur getragenen Kampagne „Druckluft effizient“ gemacht wurden. In deren Rahmen sind bei Beispieluntersuchungen in Unternehmen zum Teil erhebliche Drucklufteinsparungspotentiale auf Anwendungsseite aufgedeckt worden.

Unternehmen, deren spezifischer Stromverbrauch zur Druckluftbereitstellung verhältnismäßig hohe Werte einnimmt, sollten es in Betracht ziehen, an dieser Stelle weitere Untersuchungen durchzuführen.

## 2.6 Literatur zu Kapitel 2

- [2-1] Dehli, M.: Energieeinsparung in Industrie und Gewerbe. Praktische Möglichkeiten des Rationellen Energieeinsatzes in Betrieben. Expert-Verlag, 1998.
- [2-2] Eurostat-Internetdatenbank: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
- [2-3] Götz, B.: Optimierung des Energieeinsatzes in der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie. ipw-Das Papier (2000), Nr. 12, T164-T169.
- [2-4] Statistisches Bundesamt: Fachserie 14, Reihe 4.1.1, Produzierendes Gewerbe Beschäftigung und Umsatz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden, Dezember 2007. Wiesbaden, 2008.
- [2-5] Statistisches Bundesamt: Fachserie 14, Reihe 4.3, Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden 2004, 2005, 2006. Wiesbaden.
- [2-6] Statistisches Bundesamt: Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ08). Wiesbaden, 2007.
- [2-7] Statistisches Bundesamt: Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2003 (WZ03). Wiesbaden, 2004.
- [2-8] Verband Deutscher Papierfabriken e.V.: Kennzahlen deutscher Zellstoff- und Papierfabriken.. Bonn, 2008
- [2-9] Verband Deutscher Papierfabriken e.V.: Papier Kompass 2008. Bonn, 2008
- [2-10] N.N. Papiermacher Taschenbuch Dr. Curt Haefner Verlag, Heidelberg 1999
- [2-11] Bildquelle: [www.papier-live.de/partner\\_ump.php4](http://www.papier-live.de/partner_ump.php4)
- [2-12] Bildquelle: Bellmer
- [2-13] Blum O., Energieeffizienzanalyse - Kosteneinsparungen beim Energieverbrauch, PTS News, 2006

### 3 Bewertung der Energieeffizienz und Optimierung des Energieeinsatzes

Ein wesentliches Ziel dieses Leitfadens ist es, konkrete Möglichkeiten aufzuzeigen, mit deren Hilfe Betriebsleiter und technisches Personal in Unternehmen der Papierindustrie den Energieeinsatz und somit auch die Energiekosten senken können. Zu den hier beschriebenen Möglichkeiten gehören sowohl Vorschläge für investive Maßnahmen im Bereich der technischen Anlagen oder der Gebäude, als auch Vorschläge für rein organisatorische Veränderungen, die auf das Nutzerverhalten abzielen.

Zuerst werden in Kapitel 3.1 Bezugsgrößen und Bilanzgrenzen erläutert. In Kapitel 3.2 werden die branchentypischen Produktionstechniken der Papierindustrie und die Optionen zur Energieeinsparung beleuchtet. Die übergreifenden Bereiche, die so genannten Querschnittstechnologien, wie Wärmeversorgung, Lüftungsanlagen oder Beleuchtung sind Themen von Kapitel 3.3. In Kapitel 3.4 folgt eine ganze Reihe von Vorschlägen, wie mit allgemeinen, organisatorischen Maßnahmen der Energiebedarf gesenkt werden kann. Abschließend wird in Kapitel 3.5 die Möglichkeit der Nutzung alternativer Energieversorgung aufgezeigt.

Die in diesem Kapitel 3 beschriebenen Empfehlungen sind selbstverständlich von jedem Verantwortlichen auf ihre Umsetzbarkeit im Einzelfall zu prüfen. Es hängt von den jeweiligen Gegebenheiten in einem Unternehmen ab, welche Maßnahmen sinnvoll und praktikabel sind.

#### 3.1 Bezugsgrößen und Bilanzgrenzen

Der Energieverbrauch in der Papierindustrie ist komplex und von fehlender Homogenität. Die Vergleichbarkeit von Energieverbrauchswerten ist insofern schwierig, als der Energieverbrauch von vielen Faktoren beeinflusst wird. So gibt es sehr viele Einzelverbraucher in einem Werk und vergleichbar wenige installierte Verbrauchsmessungen. Innerhalb eines Sortenbereichs gibt es Unterschiede bezüglich Rohstoffeinsatz, Produkteigenschaften und Anlagentechnik. Daher sind die Systemgrenzen und Bezugsgrößen des betrachteten Bereichs festzulegen und zu berücksichtigen, wenn die Energiesituation bewertet und verglichen werden soll.

---

	Bilanzgrenze	Bezugsgröße
Gesamtwerk	Gesamte Anlage mit allen Hilfs- und Nebenbetrieben	Verkaufsfähige Nettoproduktion
Produktion	Stoff- bzw. Halbaufbereitung mit Papiermaschine und Nebenanlagen	Bruttoproduktion der Papiermaschine
Prozessschritt	Aggregat mit Nebenanlage	Stoffdurchfluss in absolut trocken (atro)

---

## 3.2 Ausgewählte Teilbereiche der Produktion

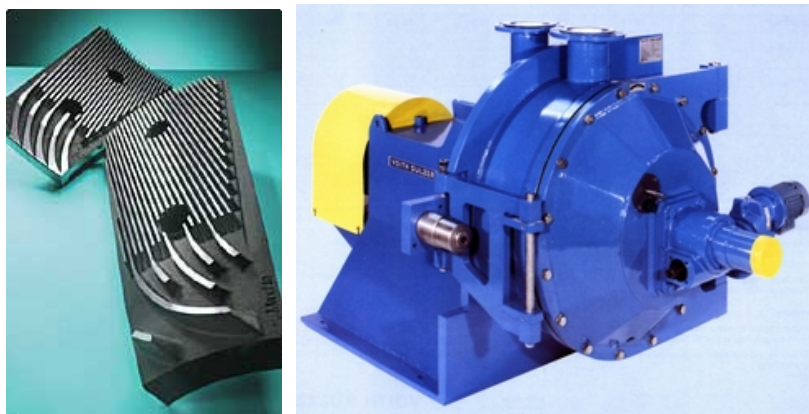
In Unternehmen der Papierindustrie existieren branchentypische Bereiche, die im Folgenden näher betrachtet werden.

### 3.2.1 Mahlung

Die Mahlung ist eine mechanische Faserformveränderung, die auf den Wechselwirkungen zwischen Mahlgarnitur, Faserstoff und Wasser beruht. Dabei werden die Fasern durch die Mahlgarnitur zwischen feststehenden (Stator) und rotierenden (Rotor) Vierkantmessern bearbeitet. Dieser Bearbeitungsprozess ist ein komplexer Vorgang, bei dem es gleichzeitig oder nebeneinander zur Quellung, Quetschung, Kürzung und Hydratisierung des Fasermaterials kommt [3-1]

Die Aufgaben der Mahlung sind Anpassung von Entwässerungs- und Festigkeitseigenschaften zur Erreichung der geforderten Produkteigenschaften wie:

- Erzielung erforderlicher Festigkeiten im Papier sowie der Schaffung einer glatten Oberfläche für eine gute Bedruckbarkeit.
- Teilweise Kürzung zu langer Fasern zugunsten einer guten Formation des Papiers.
- Entwicklung spezieller Faserstoffeigenschaften, wie Saugfähigkeit, Porosität oder optische Eigenschaften.



**Abbildung 3-1 Segment einer Garnitur (links), Doppelscheibenrefiner (rechts) (Bildquelle: Voith)**

Die Mahlung ist ein energieintensiver Prozess. Vom gesamten Stromverbrauch eines Werkes entfallen etwa 5-30%, in Sonderfällen sogar bis zu 60% auf die Stoffmahlung. Die Effizienz der Mahlung wird unterschiedlich bewertet. Wird die erzielte Festigkeitssteigerung durch Wasserstoffbrücken und kovalente Bindungen in den Fasern zugrundegelegt, beträgt der Wirkungsgrad nur wenige Prozent [3-2]

In der Praxis wird die Mahlung durch den Anteil der sogenannten Leerlaufleistung vom Gesamtverbrauch bewertet. Die Leerlaufleistung setzt sich zusammen aus Pump- und Reibungsverlust in der stoffhaltigen Suspension. Nach TAPPI wird die Leerlaufleistung mit stoffhaltiger Suspension bei geöffneten Mahlplatten bestimmt. Häufig wird die Leerlaufleistung jedoch nur mit Wasser gemessen, die Unterschiede sind mit bis zu 25% beträchtlich. Folgende Abbildung gibt einen Aufschluss über die

Unterschiede im Energiebedarf von Standardgarnituren zu Garnituren mit feiner Verrippung.

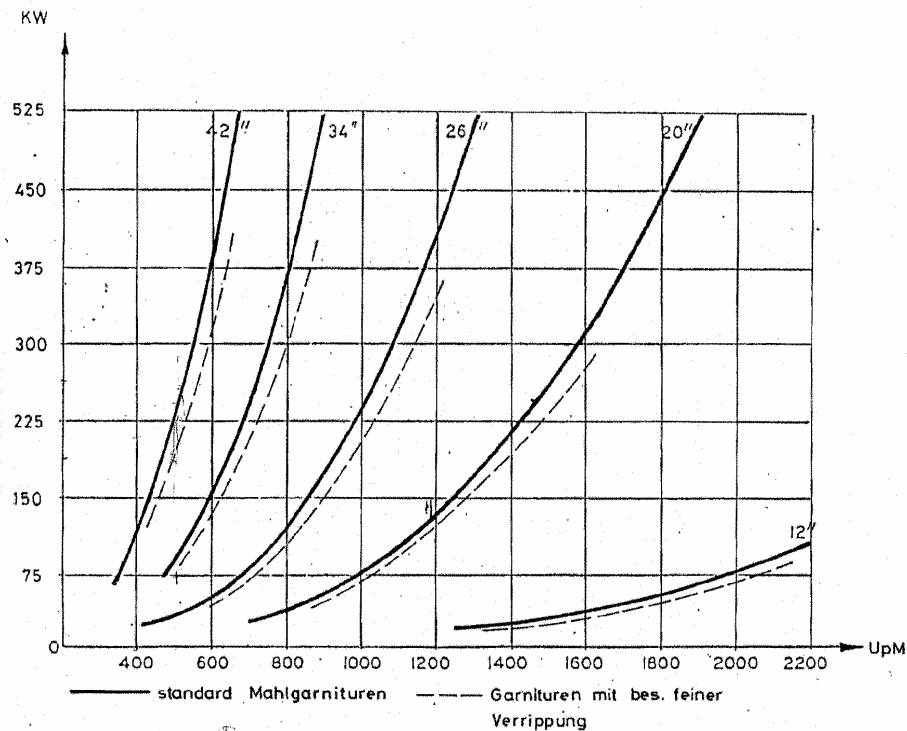


Abbildung 3-2 Leerlaufleistung von Refinern mit Standard- und fein ver-rippen Garnituren [3-3]

Für eine möglichst wirtschaftliche Mahlung sollten Refiner bei maximaler und gleichzeitig bei optimaler spezifischer Kantenbelastung betrieben werden. Teillastbetrieb wirkt sich nachteilig hinsichtlich der Energieeffizienz aus.

Günstig wirkt sich folgende Gestaltung aus:

- Getrennte Mahlung von Laub- und Nadelholz
- Feine Verrippung der Mahlsegmente, größerer Kantenwinkel (→ hohe sekundliche Kantenlänge)
- Hydraulisch günstige Einlaufzone
- Große Aggregate, mit drehzahlvariablem Antrieb

Es sind verschiedene Refinerbauarten mit unterschiedlichen Wirkungsgraden verfügbar:

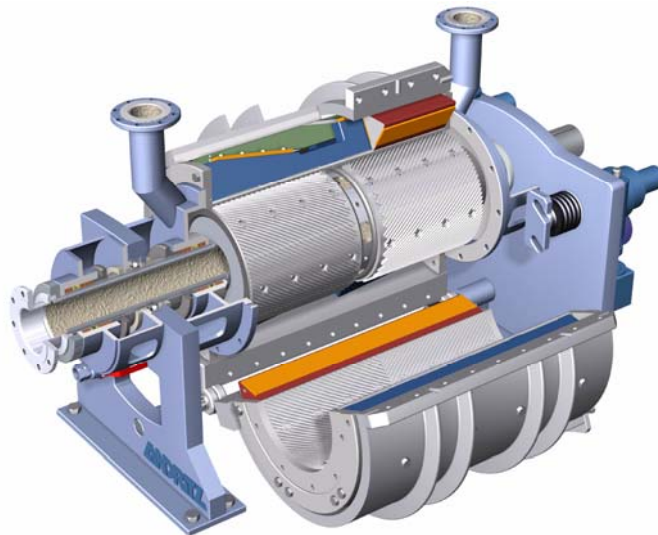
- |                         |          |
|-------------------------|----------|
| - Zylindrische Refiner  | 75 - 90% |
| - Doppelscheibenrefiner | 70 - 85% |
| - Flachkegelrefiner     | 70 - 85% |
| - Einscheibenrefiner    | 60 - 75% |
| - Steilkegelrefiner     | 55 - 70% |

Folgende Tabelle 3-1 zeigt Wirkungsgrade von Doppelscheibenrefinern mit unterschiedlichen Scheibendurchmessern [3-3]

**Tabelle 3-1: Wirkungsgrad von Scheibenrefinern [3]**

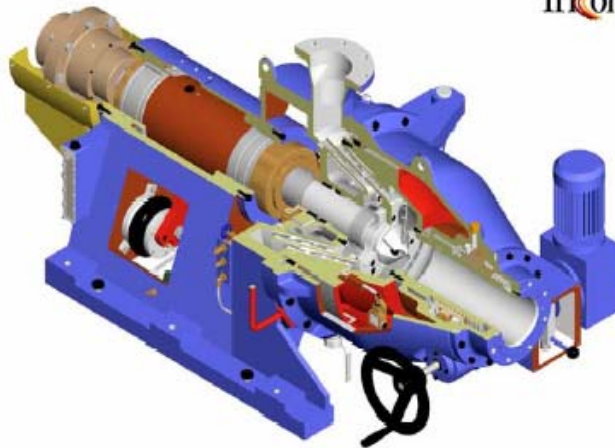
Scheibendurchmesser [Zoll]	Drehzahl [UpM]	Max. Belastung [kW]	Leerlaufleistung [kW]	Wirkungsgrad [%]
20	1000	250	65	74
26	750	400	90	78
34	600	750	140	81
42	500	1300	210	84
52	450	2400	315	87

Neuere Entwicklungen sind Doppelzylinderrefiner und Doppelkegelrefiner, mit denen gegenüber herkömmlichen Bauarten eine deutliche Reduzierung der Leerlaufleistung erzielt wird.



**Abbildung 3-3: Doppelzylinderrefiner (Bildquelle: Andritz)**

Triconic



**Abbildung 3-4: Doppelkegelrefiner (Bildquelle: Pilao)**



### 3.2.2 Altpapieraufbereitung

Bei der Altpapieraufbereitung werden mehrere unterschiedliche Prozesse angewandt, je nach Qualität des eingesetzten Altpapiers und zu erzielenden Fertigstoffeigenschaften.

Der Aufwand für eine Anlage zur Aufbereitung von Altpapieren wird bestimmt durch

- die verfügbare Altpapierqualität,
- die geforderten papiertechnologischen Eigenschaften
- aber auch dadurch,
- welche Reststoffmengen und
- welcher Abwasseranfall

im jeweiligen Fall vertretbar sind.

Am Anfang jeden Altpapieraufbereitungsprozesses (Abbildung 3-5) steht die Zerkleinerung mit dem Ziel, das Altpapier (AP) in die Einzelfasern zu zerlegen. Bei diesem Schritt sollten Verunreinigungen möglichst wenig zerkleinert werden. In Deinkinganlagen bei der Aufbereitung von graphischem Altpapier muss diese Prozessstufe auch eine gute Druckfarbenablösung sicherstellen.

Die Prozessstufen Sortierung und Cleanerung haben die Aufgabe, Verunreinigungen und Stickys möglichst vollständig abzutrennen und sind in allen AP-Aufbereitungsanlagen von zunehmender Bedeutung.

In Deinkinganlagen müssen über die Prozessstufe Flotation zusätzlich die Druckfarben entfernt werden. Neben einer Entfernung von kleinen Druckfarbenpartikeln dient eine Wäsche der Reduzierung von Asche.

Eine Dispergierung zur Zerkleinerung von Verunreinigungen ist dann von Bedeutung, wenn an die Reinheit der Altpapierstoffe hohe Anforderungen gestellt werden. In Deinkinganlagen erfolgt im Disperger eine Ablösung anhaftender Restdruckfarben, die dann in einer Nachflotation entfernt werden können. Zusätzlich werden durch die Verbesserungsstufen Dispergierung und Mahlung die Festigkeitseigenschaften erhöht.



**Abbildung 3-5: Prozessstufen der Altpapieraufbereitung [3-4]**

Entsprechend der unterschiedlichen Komplexität einer Altpapieraufbereitungsanlage variiert auch der Energieverbrauch. Für die einzelnen Grundprozesse wird etwa folgender Energieverbrauch (Daten: Erfahrungswerte von PTS).

**Tabelle 3-2: Energiebedarf von Prozessschritten bei der Altpapieraufbereitung**

Prozess	Thermische Energie / kWh/t	Elektrische Energie (kWh/t) /	Bemerkung
Auflösen		15 bis 50	Inkl. Entstipper
Sortieren		20 bis 50	
Cleanern		30 bis 50	
Eindicken		5 bis 20	
Deinkingflotation		20 bis 50	
Dispergieren	100 bis 300	100 bis 200	
Bleichen	0 bis 100	30 bis 50	

Die Unterschiede bei der Altpapieraufbereitung ergeben sich demnach, welche Prozesse appliziert und wie diese betrieben werden.

Beim Stofflösen (Pulpern) gibt es verschiedene Bauarten von Trögen, Lochblechen und Garnituren. Hochkonsistenzpulper (10 bis 20 % Stoffdichte) sind energetisch günstiger als der Niedrigkonsistenzbereich. Für große Kapazitäten sind Auflösetrommeln interessant. Neben Energieeinsparungen um etwa 5 bis 10 kWh/t haben sie technologische Vorteile, wie etwa eine schonende Zerfaserung.



**Abbildung 3-6: Hochkonsistenz-Auflösetrommel für Altpapier**  
(Bildquelle: SCA Packaging)

Für die Sortierung Möglichkeiten der Optimierung in

- Auswahl der richtigen Stoffdichte
- Rotorgeschwindigkeit
- Schaltungen der Einzelnen Sortierer
- Optimierung der Feedpumpen

Die Stoffdichte in der Altpapiersortierung soll idealerweise bei etwa 1,8 bis 2,5 % liegen. Durch eine Anhebung der Stoffdichte können die Aggregate kleiner dimensioniert werden bzw. bei einer bestehenden Anlage Kapazität geschaffen werden

Beim Sortierer selber besteht Potenzial in der Einhaltung der Rotordrehzahl beim Optimum von 16 bis 21 m/s und dem Druckverlust. Günstig ist hier ein Differenzdruck zwischen Feed und Accept von -0,2 bis 0 bar. Aggregate mit zentrifugaler Arbeitsweise, d.h. der Stoff wird von innen durch den Siebkorb nach außen unter Ausnutzung der Fliehkraft geführt, sind energieeffizienter.

Weiterhin gibt es Energiesparmöglichkeiten bei der Schaltung der Sortieranlage durch den Wegfall von Zwischenbüten und damit der Vermeidung von zusätzlichem Pumpaufwand. Ebenso können Drosselungen im Feed bzw. die parallele Drosselung von Accept und Reject zugleich durch eine richtige Pumpenauswahl und -betrieb vermieden werden.

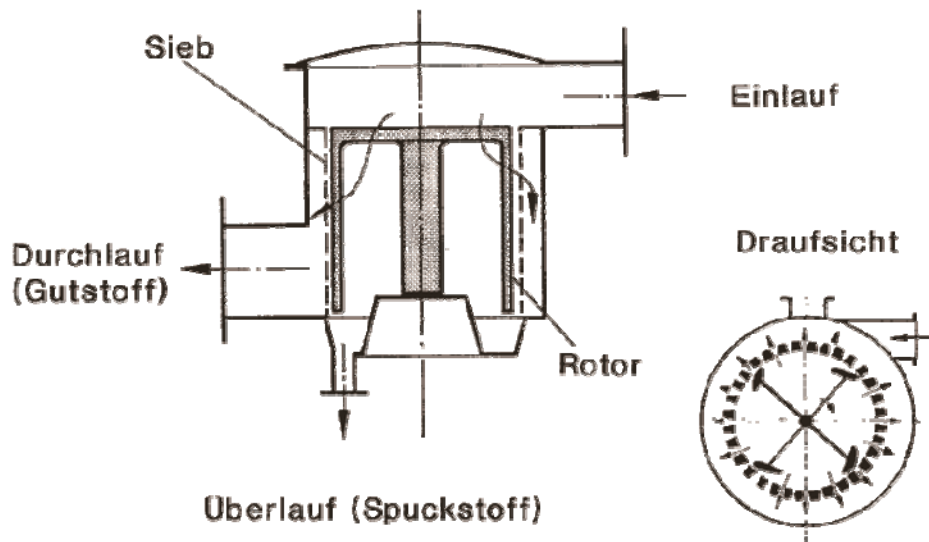


Abbildung 3-7: Funktionsweise eines Zentrifugalsortierers [3-4]

Beim Betrieb einer Cleanieranlage mit Hydrozyklonen gibt es ebenfalls mehrere Handlungsoptionen zur Optimierung:

- Anpassung der Stoffdichte und Zulaufdruck
- Materialauswahl
- Optimierung der Feedpumpen
- Betrieb bei Lastschwankungen

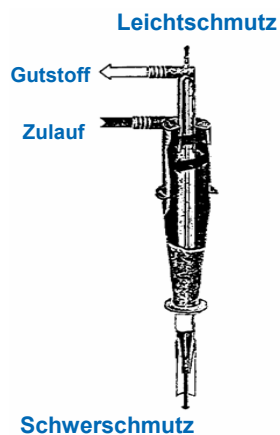
Wie für die Sortierung ist auch bei der Cleanieranlage eine Reduzierung der Stoffdichte mit einer Erhöhung der Energieeffizienz verbunden. Ein Zulaufdruck von etwa 2 bis 2,5 bar ist üblich, wobei der Druckverlust einer Stufe mit 1 bis 1,5 bar relativ hoch ist. Da hier die Stoffdichte (idealweise im Bereich von 1,0 bis 1,2 %) deutlich niedriger liegt als bei der Sortierung, ist schon mit einer kleinen Erhöhung von 0,1% mit einem Effekt in der Energieeinsparung zu rechnen. In den letzten Jahren sind be-

sondere Ausführungen mit integrierter Rejektverdünnung auf den Markt gekommen, die mit etwa 2 % im Zulauf betrieben werden können.

Ebenso bietet die Schaltung Potenziale durch Wegfall von Zwischenbehälter, Vermeidung von Drosselungen im Feed bzw. gleichzeitiger Drosselung von Accept und Reject.

Für den Betrieb bei schwankender Belastung kann ein Teillastbetrieb durch eine drehzahlgesteuerte Pumpe realisiert werden. Da die Hydraulik gleich bleiben muss (konstanter Durchfluss durch die einzelne Zyklo- ne) bei einem Teillastbetrieb einzelne Zyklo- ne der Cleanerbank abge- sperrt werden.

Bei der Ausführung der Anlage ist zu beachten, dass die Rauigkeit des Materials durch die Reibung und somit Druckverluste Einfluss auf die Energieeffizienz hat. Demnach ist Edelstahl einer Ausführung in Kunst- stoff vorzuziehen. Am günstigsten ist Keramik oder eine keramische Be- schichtung der Oberfläche. Diese haben auch eine längere Standzeit.



**Abbildung 3-8: Funktionsweise von Hydrozyklonen**

Bei der Deinkingflotation gibt es Unterschiede in der Energieeffizienz durch die Art der Luftenbringung in den Stoff. Anlagen mit Stufen- diffusoren (selbstansaugend) sind deutlich effizienter als jene, bei denen die Luft durch Kompressoren eingebracht wird. Die Möglichkeit in einer Erhöhung der Stoffdichte ist in der Regel nicht möglich, da damit eine Verschlechterung der Partikelabscheidung verbunden ist.

Weitere Potenziale sind vorhanden in der Optimierung der Feed- und Spritzwasserpumpen und bei der Wäsche in einer Erhöhung der Waschwassertemperatur durch die Optimierung der Wärmeintegration bzw. Nutzung von Abwärme. Dies ist fallweise zu prüfen, da in Deinking- anlagen häufig ein Wärmeüberschuss besteht.

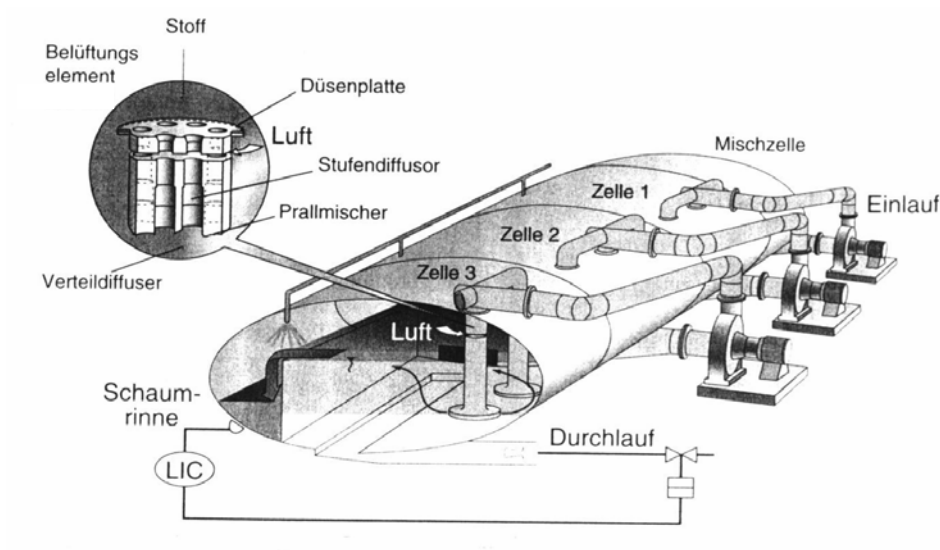


Abbildung 3-9: Deinkingzelle mit Stufendiffusoren [Bildquelle: Voith]

### 3.2.3 Stoff- und Wasserkreislauf

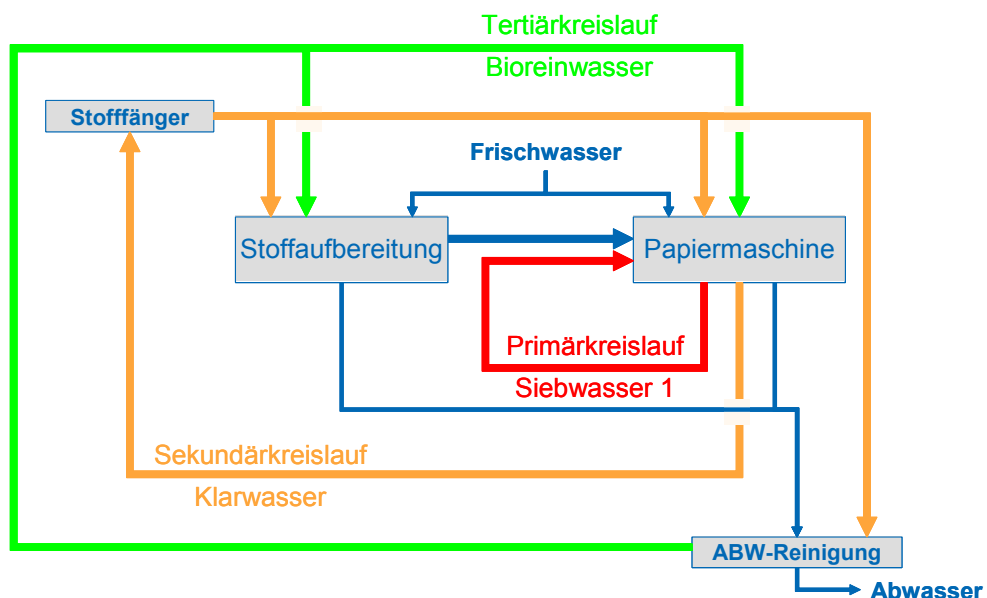
Die Aufgaben des Wassers bei der Papierherstellung sind sehr vielseitig. Wichtig ist beim Wassergebrauch, die für jeden Einsatzzweck erforderliche Qualität und Menge bereitzustellen - und zwar unter ökonomischen und ökologischen Aspekten. Dies erfordert zunächst, die Qualitätsanforderungen für die jeweiligen Einsatzzwecke des Wassers zu identifizieren und zu quantifizieren.

Neben den Funktionen der Blattbildung und der Suspendierung sowie dem Transport der Fasern und Füllstoffe erfüllt das Wasser weitere wichtige Aufgaben bei der Papiererzeugung: Es dient z. B. als Spritz- und Dichtwasser in einer Vielzahl von Aggregaten zur Reinigung etc. Zu all diesen Zwecken Frischwasser einzusetzen, würde bedeuten, pro kg Papier mehr als 100 l Wasser zu verbrauchen. Die im Prozess der Papiererzeugung eingesetzten Wässer werden daher nach ihrem Einsatz in der Regel zurückgeführt und erneut eingesetzt. Die wesentlichen Aufgaben des Wassers zeigt Abbildung 3-10 [3-5].



Abbildung 3-10: Aufgaben des Wassers bei der Papierherstellung [3-5]

Der Primärkreislauf enthält Siebwasser 1, das als Filtrat bei der Blattbildung und Entwässerung auf dem Sieb anfällt. Er ist volumenstrommäßig der größte Kreislauf. Die zirkulierende Wassermenge beträgt etwa 100 bis 200 l/kg produziertes Papier. Der spezifische Volumenstrom richtet sich nach der Retention am Sieb und der Stoffdichte am Stoffauflauf. Seine Aufgabe ist die Verdünnung des aus der Stoffaufbereitung bzw. der Stoffzentrale an die Papiermaschine übergebenen Gesamtstoffes, um die Stoffdichte auf einen für die Blattbildung erforderlichen Wert von 0,7 – 1,5 % Stoffdichte zu reduzieren (siehe Abbildung 3-11). Aus dem Überschuss des Primärkreislaufes entsteht der Sekundärkreislauf.

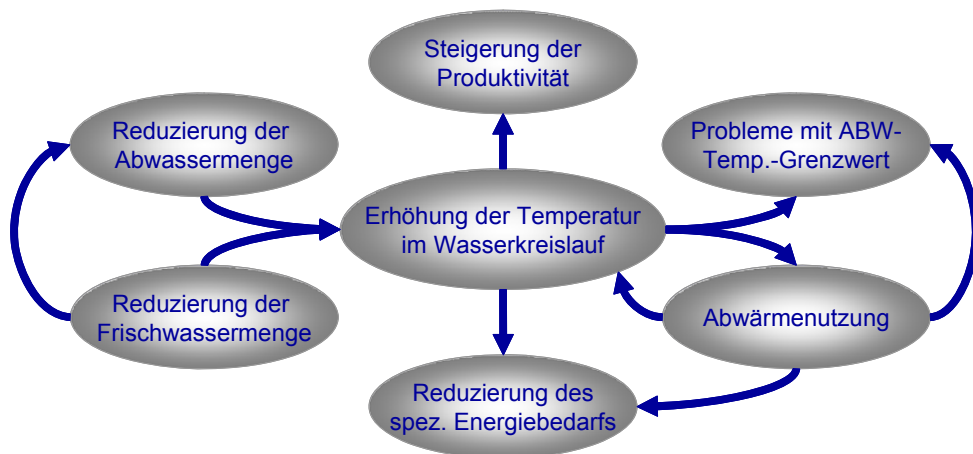


**Abbildung 3-11: Vereinfachtes Schema der Wasserführung einer Papierfabrik (Quelle: PTS)**



**Abbildung 3-12: Rohrleitungen, Flotation (Kreislaufwasserreinigung), Stapelbütte (von links nach rechts)**

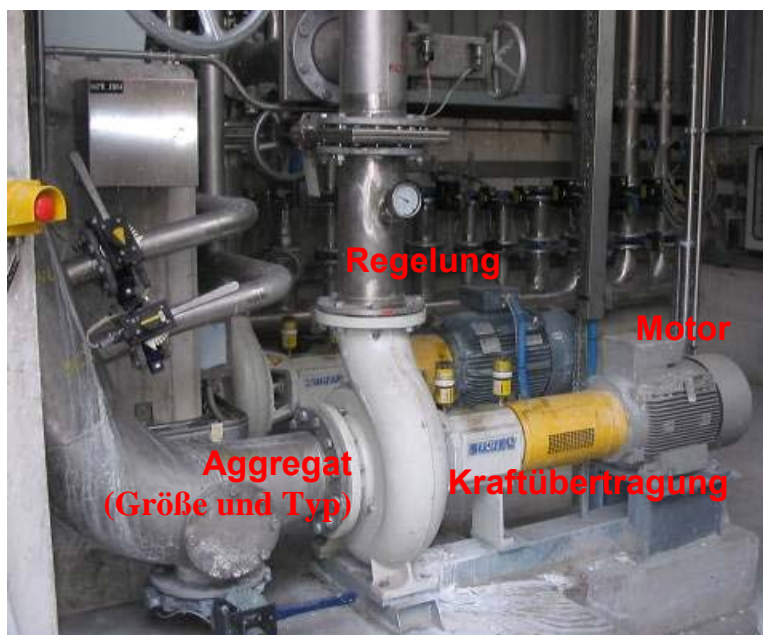
Mit den zentralen Aufgaben hat das Wasser in der Papierproduktion auch eine wichtige Funktion als Energieträger. Durch die Wasserführung und geeignete Verschaltung mit Wärmetauschern wird die Temperaturführung im Prozess gesteuert. Eine Änderung der Prozesstemperaturen kann sowohl positive als auch negative Folgen für den gesamten Prozess der Papierherstellung sowie die Abwasserreinigungsanlage bzw. die Einleitung des Abwassers haben. Ein Ursache-Wirkungsgeflecht im Wasserkreislauf von Papierfabriken zeigt nachfolgende Abbildung:



**Abbildung 3-13: Auswirkungen von Änderungen der Kreislauftemperatur [3-6]**

Für den Transport der Stoff- und Wasserströme sind eine Vielzahl von Pumpen im Einsatz, bei großen Papierfabriken über 1.000 Aggregate umfassen kann. Je nach Sortenbereich kann der Stromverbrauch für den Pumpenpark bis zu 30 % vom Gesamtstromverbrauch betragen. Weitere Stromverbraucher im Stoff- und Wasserkreislauf sind die Reinigungsaggregate (Stofffänger) wie Flotation und Filter.

Ein großes Potenzial steckt in der Optimierung des Pumpenparks, da diese einer der größten Verbrauchergruppen sind und es eine Vielzahl von Handlungsoptionen gibt. In der Papierindustrie werden ca. 30 % des elektrischen Energiebedarfs für Pumpen verbraucht [3-7]. Viele Pumpen im Prozess arbeiten aufgrund von Drossel- und Bypassregelung an energetisch ungünstigen Betriebspunkten, haben Verluste bei der Kraftübertragung zwischen Antrieb und Pumpe oder der Motor hat eine ungünstige Effizienzklasse.



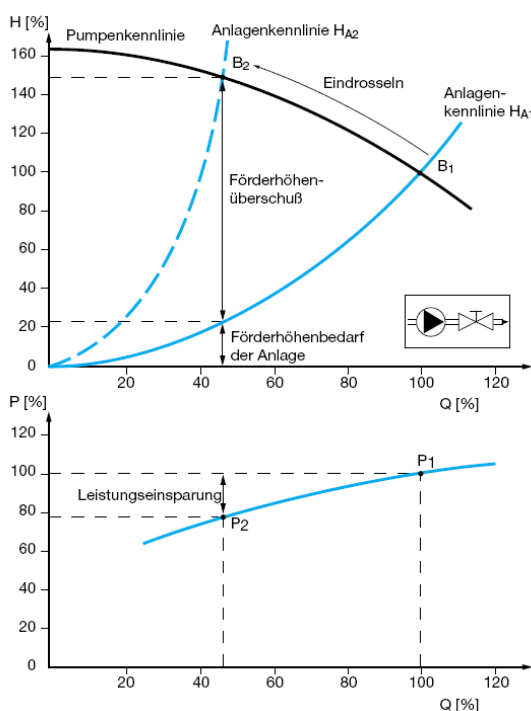
**Abbildung 3-14: Abbildung einer typischen Stoffpumpe einer Papierfabrik (Bildquelle: PTS)**

Daraus leiten sich mögliche Ansätze zur Optimierung ab. Abhängig vom Einsatzzweck können Stromeinsparungen erzielt werden durch:

- Außerbetriebnahme der Pumpe (Umstellungen im Prozess),
- Drehzahlregelung durch Frequenzumrichter,
- den Einbau kleinerer Laufräder oder
- durch kleinere Pumpen.

Die Potenziale sind dabei sehr unterschiedlich und variieren je nach Anwendungsfall zwischen 20 % bis zu 70 %. Am Beispiel einer Pumpe wird der Unterschied in der Energieeinsparung zwischen Drossel und Drehzahlregelung dargestellt.

Bei der Drosselung (Abbildung 3-15) wird der hydraulische Widerstand vergrößert und damit die Anlagenkennlinie steiler. Der Betriebspunkt verlagert sich auf der Pumpenkennlinie zu einem kleineren, gewünschten Förderstrom. Der Förderhöhenüberschuss wird im Drosselventil in Wärmeenergie umgewandelt, und mit dem Medium abtransportiert. Die Leistungseinsparung ist vergleichsweise gering im Verhältnis zum hohen Druckaufbau. Nur in kleinen Regelbereichen ist die Drosselung wirtschaftlich aufgrund der geringen Investitionen im Verhältnis zu den Energieverlusten. Im unten stehenden Beispiel ist die Energieeinsparung zwischen  $B_1$  und  $B_2$  21 %, während der Durchfluss um 55 % reduziert wird.



**Abbildung 3-15: Drosselregelung im QH-Kennfeld einer Kreiselpumpe mit Veränderung der Leistungsaufnahme [3-8]**

Die Anpassung der Fördermenge durch Drehzahlregelung ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Bei der Drehzahlregelung wird die Pumpenkennlinie verändert, die Anlagenkennlinie bleibt dabei gleich. Gemäß dem Affinitätsgesetz stehen Fördermenge  $Q$ , Förderhöhe  $H$  und Drehzahl  $n$  in folgenden Beziehungen zueinander [3-9]:



$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \quad (2)$$

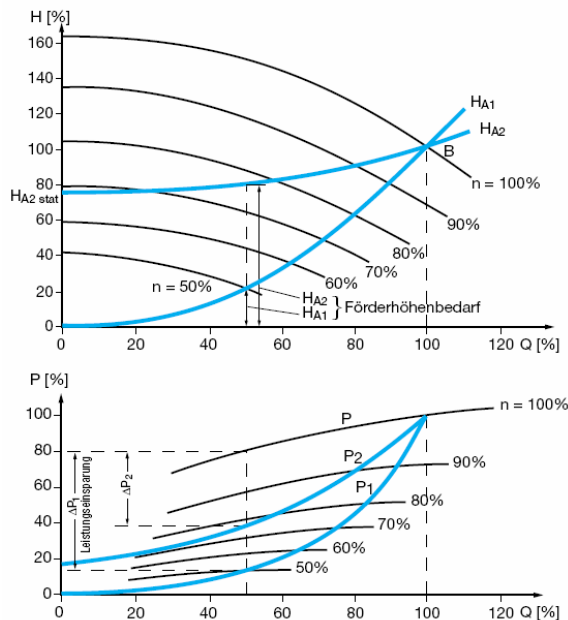
$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3 \quad (3)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{Q_2}{Q_1} \right)^3 \quad (1 \text{ in } 3)$$

Durch Absenkung der Drehzahl wandert der Betriebspunkt zu kleineren Förderströmen. Bei gleichbleibender Anlagenkennlinie reduziert sich die Leistungsaufnahme nach Formel 3 in der dritten Potenz, d.h. bei einer Halbierung der Drehzahl wie bei Anlagenlinie  $H_{A1}$  (mit statischen Druck = 0m) reduziert sich die Leistungsaufnahme auf ein Achtel. Ist der statische Anteil hoch (wie im Falle von  $H_{A2}$ ) kann die Drehzahl nur bis etwa 80 % abgesenkt werden. Die Stromaufnahme reduziert sich im Falle von  $H_{A1}$  um 85 % und im Fall von  $H_{A2}$  nach Formel 2 um 60 %. Die Energieeinsparung der Drehzahlregelung ist gegenüber der Drosselung somit

$$P_{\text{eingespart}} = \Delta P_{\text{Drossel}} (H_{A1} - H_{A2}) - \Delta P_{\text{VSD}} (H_{A1} - H_{A2}) = 64 \%$$

Die Drehzahlregelung ist gegenüber der Drosselregelung umso wirtschaftlicher, je niedriger der statische Anteil des Gesamtdruckes ist



**Abbildung 3-16: Drehzahlregelung im QH-Kennfeld einer Kreiselpumpe mit Veränderung der Leistungsaufnahme [3-8]**

Sehr unwirtschaftlich ist die Bypassregelung, die bei reduziertem Nutzvolumenstrom eine Mehrleistung der Pumpe erzeugt, da sich die Fördermenge um den Bypassstrom erhöht. Diese Art der Regelung wird nur selten praktiziert.

Bei der Optimierung von Rührwerken gibt es Potenzial in der Energieeinsparung durch

- Wahl der Behältergeometrie und Zweck der Bütte
- der Stoffdichte
- Anordnung des Rührwerks
- Gestaltung und Drehzahl des Propellers.

Stehende Büten sind deutlich energiesparender als liegende Büten. Bei der Wahl der Rührwerksanordnung sind vertikale Aggregate mit Propeller den horizontalen und vertikalen Schaufelwerken vorzuziehen. Grundsätzlich ist bei der Büten auf den Einsatzzweck zu achten: Es wird grob unterschieden zwischen Mischbüten und Stapelbüten. Aufgrund der unterschiedlichen Aufgaben sind die Anforderungen ebenso unterschiedlich. Bei der Wahl der Stoffdichte ist darauf zu achten, dass die Rührwerksgeometrie auf die Stoffdichte abgestimmt wird. Somit lassen sich bei einer Absenkung der Stoffdichte von 5,0 auf 4,0 % etwa 60 % Rührwerksenergie einsparen. Da sich damit allerdings der Gesamtmassenstrom um 25 % erhöht, ist vorher zu prüfen, ob sich hierdurch nicht die Pumpleistung übermäßig erhöht und die eingesparte Rührwerksleistung wieder aufzehrt.

Die spezifische Rührwerksleistung außerdem abhängig von der zu erzielenden Oberflächengeschwindigkeit und der Bütengröße. Für Stoffbüten ist ein spezifischer Leistungsbedarf von 0,3 bis 1,0 kW/m<sup>3</sup> typisch (Quelle: PTS Untersuchungsergebnisse). Für Wasserpufferbehälter mit Umwälzung sind nur etwa 3 W/m<sup>3</sup> Tankinhalt erforderlich.

Um optimalen Betrieb hinsichtlich Durchmischung und Energieverbrauch zu erzielen, wird die Anordnung von Rührwerk, Zu- und Ablauf einer Mischbütte wie in Abbildung 3-17 empfohlen. Um eine gute Umwälzung zu erzielen, sollte der Schaft des Rührwerks nicht zu kurz sein. Durch die Zugabe von Stoff oder Hilfsmittel direkt hinter dem Rührwerk kann eine kurze Mischzeit erzielt werden. Die Pumpe sollte nicht zu weit vom Rührwerk platziert werden, um zu vermeiden, dass schlecht durchmischter Stoff angesaugt wird. Eine Platzierung zu nah am Propeller jedoch wirkt sich ungünstig hinsichtlich Kavitation von Pumpe und Propeller aus. Ferner besteht die Gefahr eines Kurzschlusses zwischen Zu- und Ablauf.

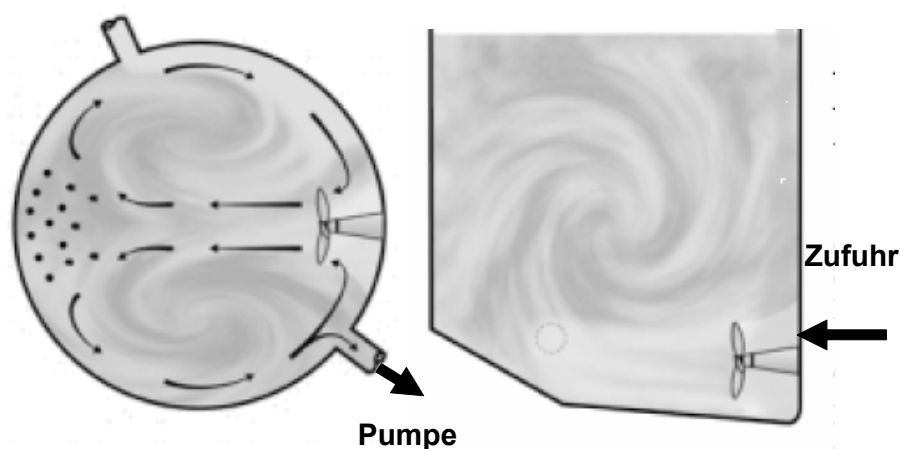


Abbildung 3-17: Effizientes Durchmischung einer Mischbütte (Quelle: PTS)

### 3.2.4 Pressen

Zur weiteren mechanischen Entwässerung des Papiervlieses nach der Siebpartie schließt sich die Nasspressenpartie an. Seit Beginn der maschinellen Papierherstellung werden zur mechanischen Entwässerung Walzenpressen eingesetzt.

Die theoretische Betrachtung der Vorgänge in einem Walzenspalt (Pressnip) geht auf grundlegende Untersuchungen von Wahlström [3-10, 3-11] zurück. Ziel des Pressens ist es, das Wasser aus der Papierbahn in den Filz zu befördern. Um diesen Wasserfluss in Gang zu setzen, muss zunächst die Luft aus der Papierbahn verdrängt werden. Das Zusammendrücken der Fasern wird durch den aufgebauten hydraulischen Druck limitiert (Inkompressibilität des Wassers). Daraus folgt auch, dass übermäßiger Druck zu einer Strukturdeformation der Papierbahn führt. Bei dem im nassen bzw. feuchten Faservlies enthaltenen Wasser handelt es sich um:

- Wasser zwischen den Fasern und an den Faseroberflächen,
- Wasser in den Kapillaren und Lumen der Fasern und
- Wasser in den kristallinen und amorphen Strukturen der Fasern [3-12].

Bei der mechanischen Entwässerung wird hauptsächlich der sich in den Faserzwischenräumen und an den Faseroberflächen befindlicher Wasseranteil verringert

In diesem Stadium wird die Festigkeit der Papierbahn hauptsächlich durch relativ schwache Bindungen (Kapillarkräfte) und eine mechanische Verfilzung der Fasern untereinander bewirkt. Wirken in diesem Stadium der Papierherstellung äußere Kräfte auf die Papierbahn ein, so reagiert sie schnell mit Deformation bzw. Abriss. Aus diesem Grund benötigt die Papierbahn eine mechanische Unterstützung. Textile Materialien sind wegen ihrer mechanischen Festigkeit und der Möglichkeit, Wasser aufzunehmen, dafür gut geeignet. Dieses aufgenommene Wasser wird dem Filz durch Rohrsauger wieder abgesaugt, damit die Wasseraufnahmekapazität erhalten bleibt. Um die den Filz sauber und durchgängig zu erhalten, muss er permanent mit Hochdruck- und Niederdruckspritzrohren gereinigt werden (Filzkonditionierung). Dieses eingebrachte Wasser wird ebenfalls durch Rohrsauger entfernt.

Es sind unterschiedliche Bauarten verfügbar. Durch Innovationen in der Filzindustrie und im Maschinenbau wurden in den vergangenen Jahren immer höhere Entwässerungsleistungen in der Pressenpartie und in der Folge höhere Maschinengeschwindigkeiten erzielt. Tabelle 3-3 gibt einen Überblick der gängigen Bauarten.

**Tabelle 3-3: Verschiedene Bauarten von Nasspressen**

---

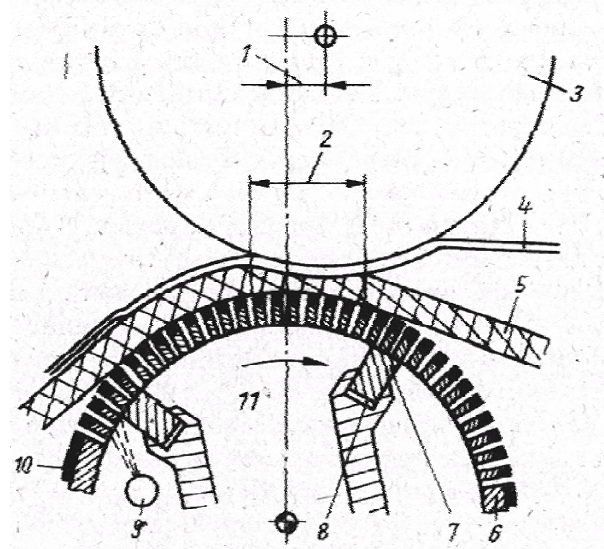
Vollmantelpresse	Schwerkraftentwässerung nur nach unten, offene Bahnführung 400 m/min, ca. 28 % TG
Saugpresse	Entwässerung richtungsunabhängig, kompakte Bauweise geschlossene Bahnführung (ggf. Lochschattenmarkierungen) >1200 m/min, 45 – 48 % TG
Schuhpresse	Nipverweilzeit drastisch erhöht, 300 mm Nipbreite, > 50 % TG

---

Die **Vollmantelpresse** oder auch Legepresse ist die älteste Bauform. Sie besteht aus einer oben liegende Presswalze aus Granit und einer unteren aus Stahl (harter Nip) oder aus gummiertem Stahl (weicher Nip). Vollmantelpressen sind bei höheren Geschwindigkeiten ungeeignet, weil das gegen die Laufrichtung der Walze ablaufende Wasser dann in die Presse zurück transportiert werden kann. Sie finden daher hauptsächlich in älteren Papiermaschinen oder im Spezialpapierbereich Anwendung.

Das Hauptmerkmal der Transversalflusspresse oder **Saugpresse** ist, dass, die Entwässerung nicht nur durch die Schwerkraft bestimmt wird. Die in der dargestellte Abbildung 3-18 Saugpresse besteht aus einer Stein- oder Steinersatz-Oberwalze (3). Der Pressnip ist mit (2) bezeichnet, der Filz mit (5) und die Papierbahn mit (4). Die Unterwalze besteht aus einem gebohrten Bronze- oder Edelstahl-Mantel (6) mit Gummiüberzug (10), der ein starres Joch umläuft. Die Vakuumkammer (11) wird durch Dichtleisten (7), die hydraulisch oder pneumatisch (8) an die Mantelinnenseite gedrückt werden, abgedichtet. Im Innern angebrachte Spritzrohre (9) halten die Bohrungen sauber und erzeugen einen schmierenden Wasserfilm.

Das Beaufschlagen der Vakuumkammer mit Unterdruck führt vor dem Nip zu einem Wasserfluss durch die Bohrungen, nach dem Nip hält das Vakuum das Wasser entgegen der Zentrifugalkraft in den Bohrungen und reduziert so die Rückbefeuchtung. Die offene Fläche der Saugwalzen beträgt ca. 25 bis 30 %.

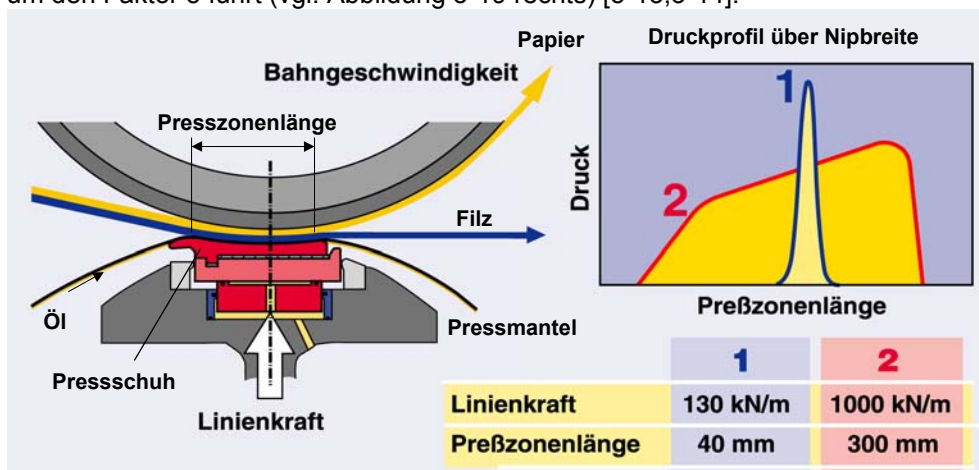


**Abbildung 3-18: Querschnittsansicht einer Saugpresse [3-17]**

Anders als bei konventionellen Walzenpressen kann bei Gleitflächen- oder sog. Schuhpressen das Druckprofil über dem stark verbreiterten Pressnip durch angepasste Gestaltung des Druckschuhs beeinflusst werden. Dies ist von wesentlicher Bedeutung, da das Druckprofil einen erheblichen Einfluss auf die Entwässerungsleistung und die Produktqualität hat. Da der Pressdruck wegen der strukturellen Qualitätsbeeinträchtigung des Papiers nicht beliebig gesteigert werden kann, kommt der Verlängerung der Nipverweilzeit eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund der Variabilität des Druckprofils können solche Pressensysteme prinzipiell für alle Papiersorten und an verschiedenen Positionen in der Pressenpartie eingesetzt werden. Durch geringere Druckanstiegsgradienten und moderate Druckmaxima werden bezüglich der Papierqualität

beispielsweise das spezifische Volumen und die Biegesteifigkeit weniger stark verringert als beim Einsatz konventioneller Walzenpressen mit großen Druckanstiegsgradienten im Pressnip. Der rapide Druckabfall am Nipende begrenzt Rückfeuchtungsvorgänge. Mit Hilfe von Schuhpressen werden auch bei hohen Maschinengeschwindigkeiten höchste Trockengehalte erzielt, die z.T. über 50 % liegen.

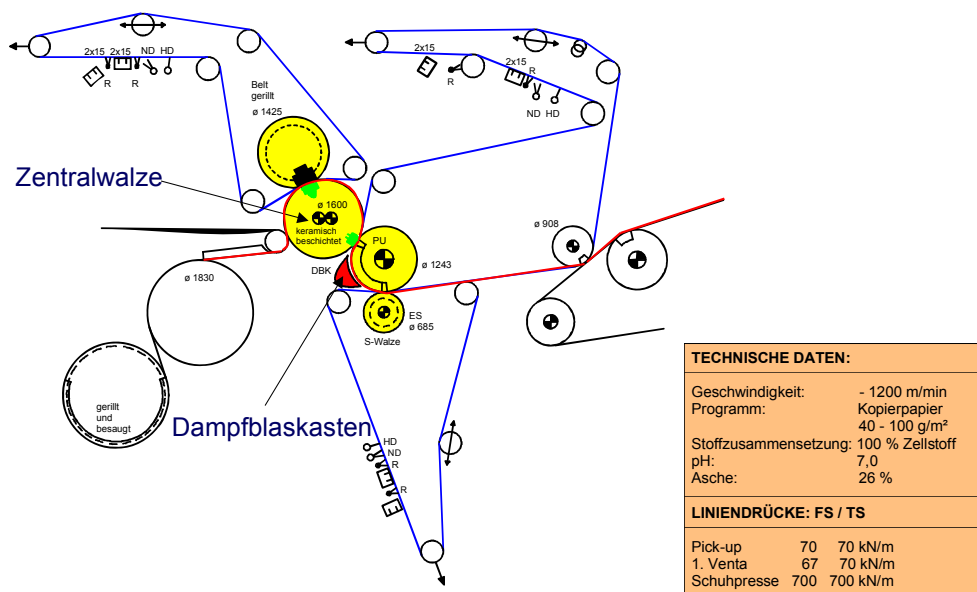
Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 3-19 links dargestellt. Bei Schuhpressen tritt an die Stelle des Walzenkörpers ein Pressschuh, der sich an die Kontur der Gegenwalze anschmiegt. Die Gegenwalze ist eine durchbiegungskompensierte Stahlwalze mit keramischer Beschichtung. Die Übertragung der Anpresskraft auf Filz und Papier erfolgt durch einen umlaufenden Pressmantel (Belt), der aus einem mit Polyurethan beschichteten Gewebe besteht. Die Kraftübertragung auf den Pressmantel erfolgt durch strömendes Öl. Die Anpresskraft wird durch den Pressschuh generiert, der sich unter dem Pressmantel befindet. Bei den bisher behandelten Walzenpressen liegt die Länge des Nips unter Belastung bei etwa 10 bis 80 mm. Mit den Gleitflächenpressen vergrößert sich die Nipbreite bis zu 300 mm, was zu einer Verlängerung der Verweilzeit der Papierbahn im Nip um den Faktor 5 führt (vgl. Abbildung 3-19 rechts) [3-13,3-14].



**Abbildung 3-19: Prinzipdarstellung der Schuhpresse und Vergleich der Druckprofile von Walzen- (1) und Schuhpresse (2) (Quelle: Voith [3-15])**

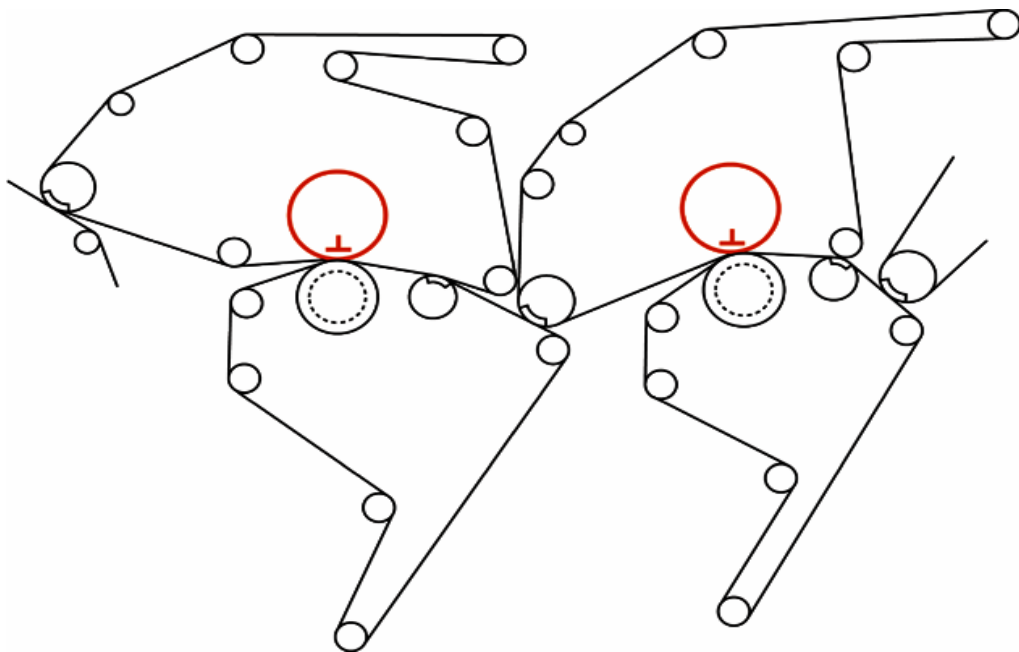
Eine Pressenpartie besteht aus einer Kombination mehrerer Einzelpressen bzw. Pressnips. Die Art, wie eine Pressenpartie aufgebaut ist, hängt von der Papier-/ Kartonsorte, dem gewünschten Trockengehalt und der Produktionsgeschwindigkeit ab. Da die Strömungsrichtung des ausgepressten Wassers und die geometrische Anordnung der Walzen heute in relativ großen Grenzen frei bestimmt werden können, konnte die Optimierung der Bahnführung, also der möglichst zug- und dehnungsfreie Transport der Bahn zwischen den Pressen in den Vordergrund treten. Es wird unterschieden zwischen offene (älteste Bauart, s. Abbildung 3-19), halboffene und geschlossene (Abbildung 3-20) Pressenpartien. Bei der geschlossenen Anordnung wird die Papierbahn auf dem gesamten Weg vom Sieb (Pick-up-Walze) bis zum Ende des letzten Pressnips mit Hilfe der Filze oder Transportbelts zugfrei gefördert. Dies ermöglicht auch für Papiere, die am Ende der Siebpartei eine geringe Festigkeit aufweisen, höhere Maschinengeschwindigkeiten. Mit diesem Konzept wird eine weitgehend störungsfreie Bahnführung gewährleistet, d.h. der auf die

Bahn ausgeübte Zug / Dehnung bzw. ein Bahnflattern und dadurch verursachte Bahnabrisse werden insgesamt reduziert.



**Abbildung 3-20: Pressenpartie einer Papiermaschine für Kopierpapier mit geschlossener Bahnführung in kompakter Bauart mit Zentralwalze (Bildquelle: Geschmay)**

Da mit einer Schuhpresse wesentlich höhere Trockengehalte zu erreichen sind als mit herkömmlichen Pressen, ergeben sich andere Möglichkeiten der Pressenkonfiguration. In den neuesten Konstruktionen entfallen die Saugpresswalze und die Zentralwalze, so dass der kritische Zug zum Abziehen der Papierbahn von der Zentralwalze entfällt. Saugwalzen dienen hierbei nur noch zur Überführung der Papierbahn und gewährleisten die zugfreie, geschlossene Bahnführung auch in diesem Fall. Die Abbildung 3-21 zeigt die Situation in einer solchen Pressenpartie. Erste und zweite Presse sind doppelt befilzt. Der Pressschuh liegt oben, die Gegenwalze ist gerillt. In einigen Papiermaschinen ist der zweite untere Pressfilz durch ein sogenanntes Transferbelt ersetzt, das in erster Linie nicht zur Entwässerung, sondern zur Überführung der Papierbahn von der ersten zur zweiten Schuhpresse dient.



**Abbildung 3-21: Aufbau einer Pressenpartie mit zwei Schuhpressen (Tandem) und geschlossener Bahnführung (Lauf der Papierbahn von links nach rechts)**

Die Leistung der Pressenpartie ist von enormer wirtschaftlicher Bedeutung. Diese liegt darin, dass eine Steigerung des Trockengehaltes durch mechanische Entwässerung um 1 % absolut eine Energieeinsparung an thermischer Energie in der Trockenpartie von ca. 5 % zulässt [3-16]. Oft kann durch eine Erhöhung der Entwässerungsleistung der Presse die Papiermaschinengeschwindigkeit und somit die Produktionsleistung der Papiermaschine gesteigert werden.

Die Abbildung 3-22 demonstriert, dass die entfernte Wassermenge in der Siebpartie am größten ist, aber mit zunehmender Baulänge der Maschine exponentiell abnimmt. Die Abbildung 3-23 zeigt die Relativwerte der spezifischen Entwässerungskosten (Summe aus Investitions- und Energiekosten) und die Entwässerungsleistung bezogen auf die gleich 1 gesetzte Blattbildungseinheit. Die Energiekosten für die Wasserentfernung nehmen vom Stoffauflauf bis zum Ende der Papiermaschine progressiv steigend zu bei gleichzeitig verringerter relativer Wasserentfernung.

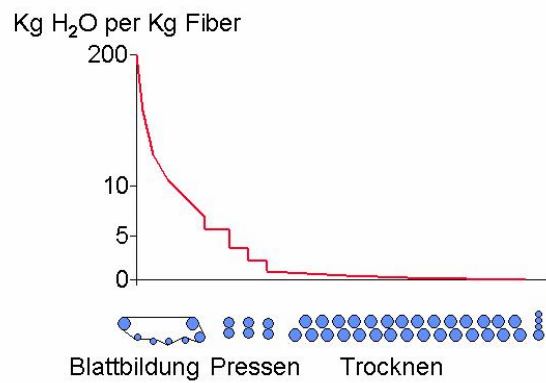


Abbildung 3-22: Wassergehalt der Papierbahn über der Papiermaschinenlänge [3-16]

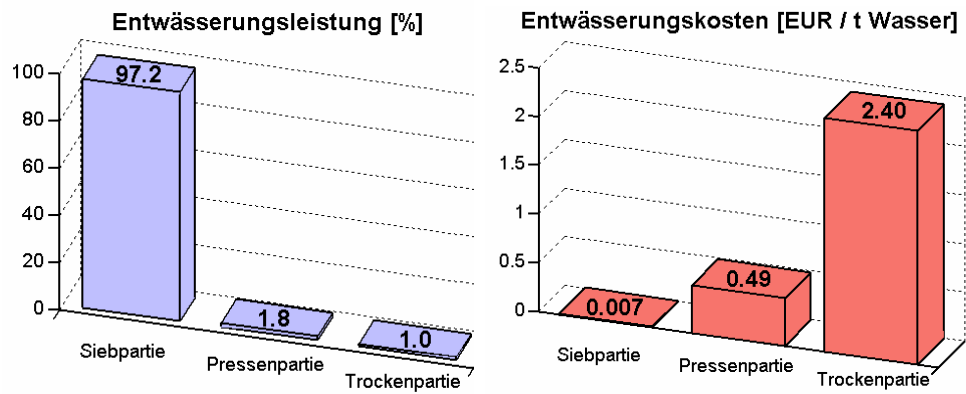


Abbildung 3-23: Leistung und Kosten der Entwässerung [3-17]

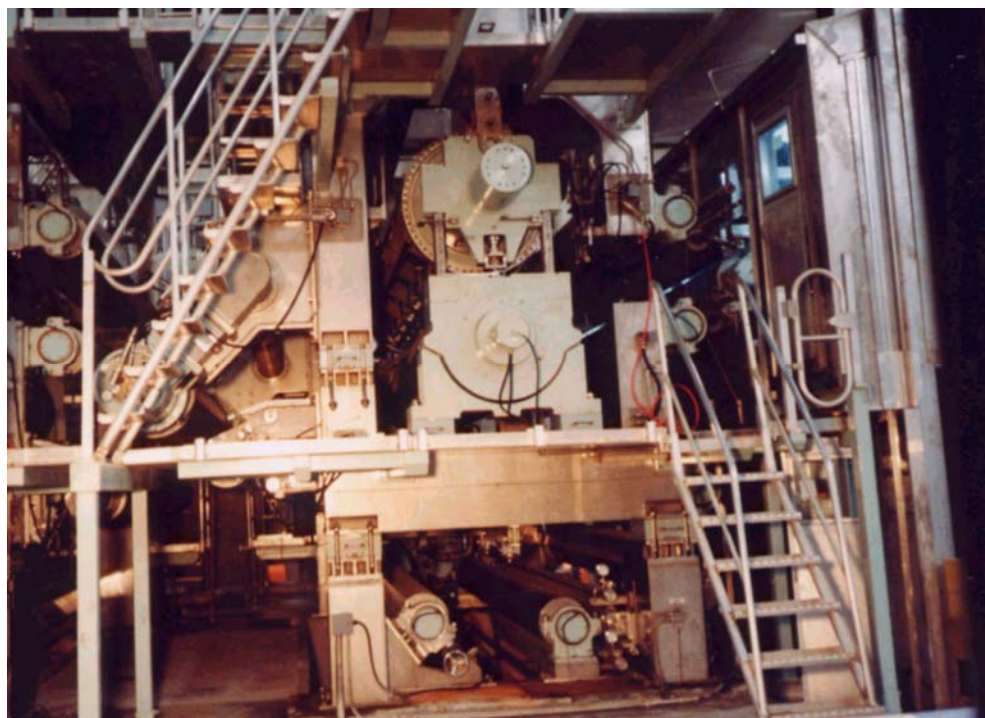


Abbildung 3-24: Nasspresse in einer Papiermaschine [3-17]



Wie bereits beschrieben, liegt die Optimierung der Pressenpartie aus energetischer Sicht neben einer Effizienzsteigerung der Antriebe in einer Steigerung des Trockengehaltes (siehe Abbildung 3-25). Die Optionen durch größeren Druck und Breite des Pressnips wurden durch die Schuhpresse bereits beschrieben.

Daneben besteht die Möglichkeit, die Entwässerbarkeit des Papiervlieses zu verbessern. Dies kann durch eine Erhöhung der Temperatur der Papierbahn erzielt werden. Das darin enthaltene Wasser lässt sich durch die niedrigere Viskosität besser aus dem Faserverbund auspressen. Als Faustformel kann von einer Trockengehaltssteigerung von 1% bei einem Temperaturanstieg von 10°C ausgegangen werden.

Dabei spielen Dampfblaskästen eine besondere Rolle, die zur Temperaturerhöhung der nassen Papierbahn genutzt werden. Bei höherer Temperatur hat Wasser eine niedrigere Viskosität und lässt sich demzufolge leichter aus der Papierbahn entfernen. So bringt eine Temperaturerhöhung um 10°C etwa 1% mehr Trockengehalt im Pressnip. Dabei spielen Dampfblaskästen eine besondere Rolle, da moderne Dampfblaskästen sich zonenweise steuern lassen. Somit kann ein definierter Streifen der Papierbahn erwärmt und besser entwässert werden. Dieses Verfahren dient zur Korrektur des Feuchteprofils der Papierbahn.

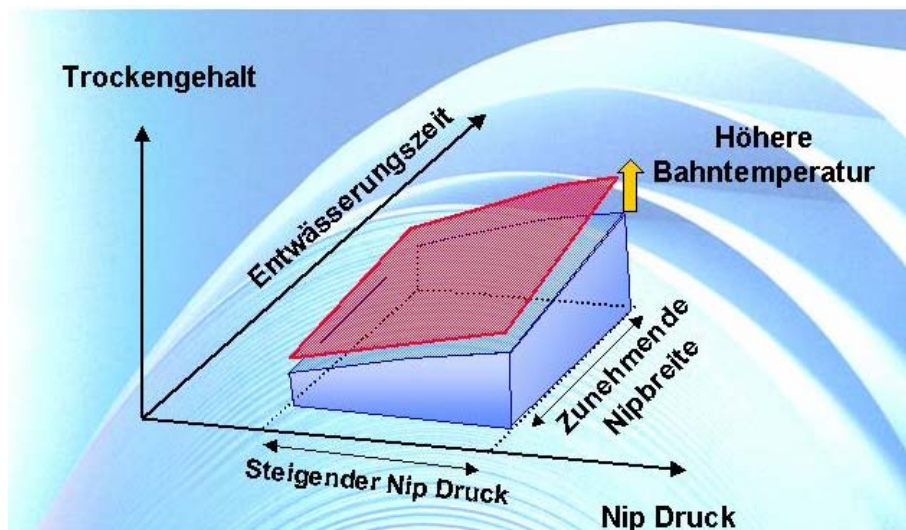


Abbildung 3-25: Schematische Darstellung der Möglichkeiten zur Steigerung des Trockengehalts

### 3.2.5 Vakuumherzeugung

Unter Vakuum wird der Zustand eines Fluids bei einem Druck verstanden, der deutlich unter der Atmosphäre liegt. Physikalisch werden die technisch erzeugbaren Vakua in fünf Klassen eingeteilt (Grob-, Fein-, Hoch-, Ultrahoch-, und extrem hohes Vakuum). Für die Papierindustrie werden Vakuumniveaus von bis 0,3 bar absolut benötigt, die gemäß Definition niedriger als dem Grobvakuum (von 0,3 bis 0,001 bar absolut) entsprechen

In der Papierindustrie wird Vakuum in der Sieb und Pressenpartie benötigt für überwiegend folgende Anwendungen:

- Entlüftung/ Entgasung der Papierstoffsuspension
- Stabilisierung der Papierbahne und der Nasssieb und -filze
- Entwässerung der Papierbahn

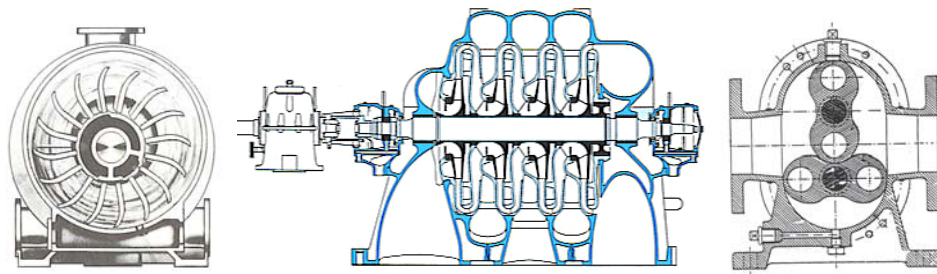
- Entwässerung/ Absaugung der Pressfilze
- Transfer/ Überführung der Papierbahn (Pick up)

Obwohl Vakuum eine Hilfsenergie ist, ist durch die der von Produktqualität durch das Vakuumregime am Sieb. Durch die enge Berührung mit dem Hauptprozess vorhanden ist die Vakuumerzeugung somit für die Papierindustrie keine Querschnittstechnik.

In der Papierindustrie sind überwiegend folgende drei Typen von Vakuumerzeugern im Einsatz:

- Wasserringpumpen
- Zentrifugalgebläsen
- Drehkolbenpumpen

Am Häufigsten werden Wasserringpumpen eingesetzt, gefolgt von mehrstufigen Zentrifugalgebläsen überwiegend bei größeren Papiermaschinen. Seltener kommen Drehkolbenpumpen zum Einsatz.



**Abbildung 3-26: Wasserringpumpe, mehrstufiges Gebläse, Drehkolbengebläse (von links nach rechts)**

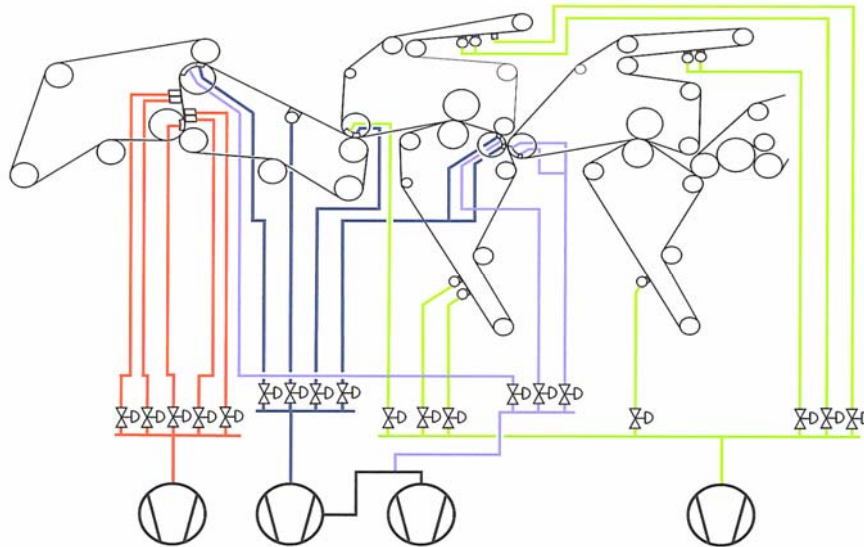
Sie lassen sich folgenderweise kategorisieren:

**Tabelle 3-4: Eigenschaften verschiedener Vakuumerzeuger**

Typ	Vakuumniveau (kPa absolut)	Stromverbrauch (kW/(m <sup>3</sup> /min))	Vor- und Nachteile
Gebläse (einstufig)	95 - 80		Geringe investitions- und Betriebskosten, - niedriges Vakuum
Gebläse (mehrstufig)	75 - 40	0,9 – 1,1	Hoher Invest, mehrere Vakuumniveaus erzeugbar, Abluft thermisch nutzbar
Wasserringpumpen	80 - 10	0,4 – 1,7	+ Robust - hoher Wasser- und Stromverbrauch
Drehkolbenpumpen	80-50		- Empfindlich gegenüber Wassertropfen - hohe Betriebskosten

**Abbildung 3-27** zeigt das Prinzipschema einer modernen Papiermaschine [3-18]. Es sind hier die unterschiedlichen Saugstellen abgebildet.

Dabei haben diese unterschiedliche Anforderungen an das Vakuumniveau und den Volumenstrom. Neben der Auswahl des Vakuumerzeugers ist auch die Schaltung und Fahrweise des Gesamtsystems von Bedeutung im Hinblick auf die Energieeffizienz.

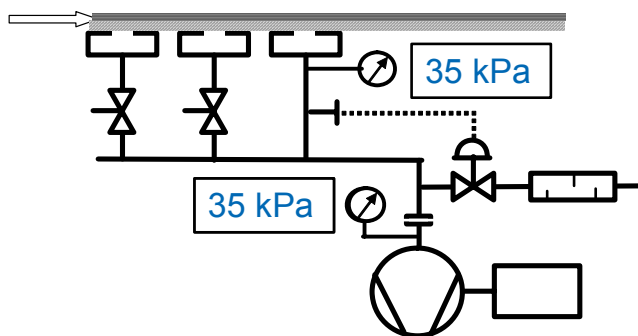


**Abbildung 3-27: Vakuumschema**

Unterschiedliche Flächengewichte, Mahlgrade und Filzzustände sind der Grund dafür, dass sich der Luftwiderstand an den Saugstellen verändert und ein Betrieb der Vakuumanlage am Auslegungspunkt nicht ausreicht, um eine Vakuumanlage effizient zu betreiben.

### Falschluffregelung

An Flachsugern wird der gewünschte Vakuumanstieg mit Drosselorganen eingestellt oder geregelt. Sinnvoll ist bei volumetrischen Pumpen das maximal geforderte Vakuum am letzten Sauger über Falschluff zu regeln:



**Abbildung 3-28: Regelung von parallel betriebenen Verbrauchern [3-18]**

Die Einstellung der Motordrehzahl durch Frequenzumrichter ist die energetisch günstigste Art der Regelung.

## Drosselregelung

Verbreitet ist aber auch die Drosselregelung, bei der eine Kapazitätsanpassung der Vakuumerzeugung mittels Drosselung der Volumenströme erfolgt. Dies ist energetisch sehr ungünstig, da bei Verdrängerpumpen wie Wasserringpumpen durch diese Art der Regelung ein Energiemehrverbrauch gegenüber dem ungedrosselten Betrieb notwendig wird.

Es gibt Handlungsoptionen auf der Erzeuger- als auch Verbraucherseite. Eine Optimierung im Vakuumsystem kann sowohl hinsichtlich der Überprüfung und Optimierung der Luftmengen und Vakuumniveaus der angeschlossenen Verbraucher erfolgen, als auch die Effizienzsteigerung bei den Vakuumpumpen und Gebläsen. Tabelle 3-5 gibt eine Einordnung der einzelnen Saugstellen (Vakuumverbraucher) hinsichtlich der geforderten Vakua und Volumenströme. Die tatsächlich benötigten Werte können je nach Anlagentechnik und Beschaffenheit der Filze abweichen.

**Tabelle 3-5: Anforderungen der Vakuumverbraucher an Druck und Saugvolumen [3-19]**

Saugstelle	Vakuummhöhe	Spez. Saugvol.	Vakuump. Ventilator, Vorabscheider
Vakuumsiebtisch	ca. 0,4 m bis 1,5 m	1 bis 6 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Ventilator, + Vorabsch.
Vakuum foil	ca. 0,7 m	1 bis 1,5 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Ventilator, + Vorabsch.
Formierwalze (Duoformer)	ca. 1,0 m ca. 1,7 m	12 bis 20 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl. 25 bis 30 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Ventilator, + Vorabsch.
Vakuumsütztisch	ca. 2,5 m	5 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfläche	Vakuump., + Vorabsch.
Siebsaugkästen	ca. 3,0 m	3 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfläche	Vakuump., + Vorabsch
Siebsaugwalze 1.Zone	ca. 2,5 m bis 4,0 m	20 bis 180 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Vakuump., + Vorabsch
Siebsaugwalze 2.Zone	ca. 7,0 m	250 bis 450 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Vakuump., + Vorabsch
Pick-up	ca. 6,5 m	250 bis 350 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Vakuump., + Vorabsch
Vakuumpresse	ca. 6,0 m bis 7,0 m	250 bis 350 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Vakuump., + Vorabsch
Presshaltezone	ca. 3,5 m	30 bis 50 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Vakuump., + Vorabsch
Rohrsauger	ca. 2,5 m bis 6,5 m veränderlich je nach Filzzustand	650 bis 850 m <sup>3</sup> /min je m <sup>2</sup> Saugfl.	Vakuump., + Vorabsch

Bei der Optimierung der Vakuumerzeugung ist die Auswahl und Dimensionierung des Vakuumerzeugers entscheidend. Gebläse sind beim Auslegungspunkt am wirtschaftlichsten, Wasserringpumpen bei der niedrigsten Drehzahl.

Die Querschnitte im Vakuumsystem sollen ausreichend bemessen sein, lokale Engpässe durch Blenden oder abgedrosselte Schieber sind zu vermeiden.

Separierung des Vakuumsystems mit unterschiedlichen Vakuumniveaus ist dem Betrieb mit einer gemeinsamen Leitung vorzuziehen. Die Verbraucher ähnlicher Vakuumniveaus sollten möglichst von einem Vakuumerzeuger versorgt werden, unter Trennung von Sieb- und Pressenpartie, da sich die Vakua mit der Lebenszeit von Sieben und Filzen verändern.

Eine Drehzahlregelung ist einer Falschluff- oder gar Drosselregelung vorzuziehen. Oft kann durch eine Änderung der Übersetzung die Vakuumkapazität angepasst werden.

Bei Wasserringpumpen ist außerdem auf die Dichtwassertemperatur zu achten. Ideal sind 20 bis 30 °C. Abhängig vom Vakuumniveau kann eine Reduzierung der Dichtwassertemperatur eine Reduzierung des Leistungsbedarfs um bis zu 5 % erwirken [3-20].

### 3.2.6 Trocknung

In Abbildung 3-29 ist der charakteristische Verlauf bei der Trocknung hygroskopischer Güter dargestellt. Die Verdampfungs- bzw. Trocknungsgeschwindigkeit ist über dem Trockengehalt des Papiers bei konstanter Wärmezufuhr aufgetragen. Papier ist hygroskopische, d.h. es neigt dazu, Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen.

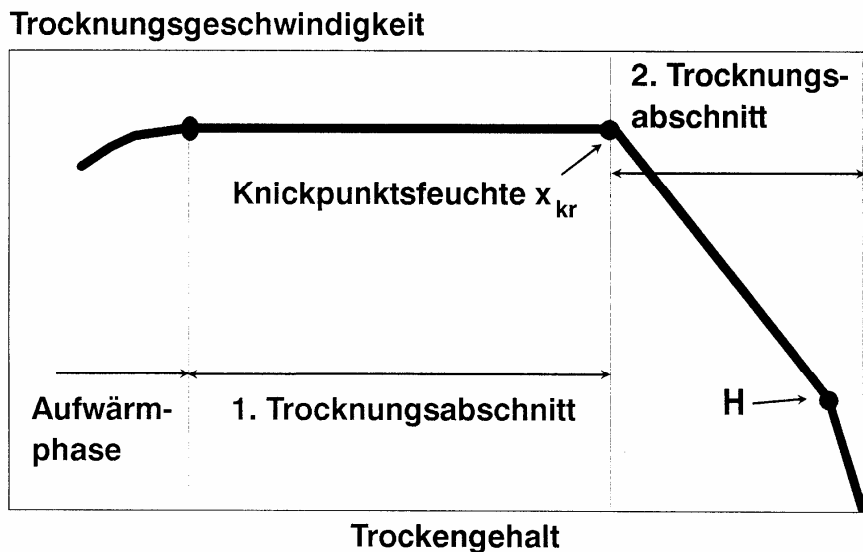


Abbildung 3-29: Verdampfungs- bzw. Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Papier-Trockengehalt

Die Trocknung beginnt mit dem Aufwärmen der Papierbahn. Dabei wird die eingebrachte Wärme hauptsächlich zur Aufheizung des feuchten Gutes verbraucht. Es schließt sich dann ein längerer Abschnitt mit konstanter Verdampfungsgeschwindigkeit an. Dabei verringert sich die Gutfeuchte linear mit der Zeit. Das hängt damit zusammen, dass zunächst alle Kapillaren des Blattes bis zur Oberfläche mit Wasser gefüllt sind, so dass die Oberflächenverdunstung den Trocknungsverlauf bestimmt.

Nach Überschreiten des kritischen Trockengehaltes bzw. Unterschreiten des kritischen Feuchtigkeitsgehaltes  $x_{kr}$ , auch Knickpunktsfeuchte genannt, wird der Trocknungsverlauf auch durch die Wärme- und Stofftransportvorgänge, wie z.B. Wärme- und Feuchteleitfähigkeit oder Dampfdurchlässigkeit im Inneren des Papiergefüges bestimmt. Bei einem hygroskopischen Gut wie Papier lässt sich theoretisch nur der Gleichgewichtstrockengehalt bis zur relativen Sättigung der Trocknungsluft am Ende der Trockenpartie erreichen. Gemäß Abbildung 3-29 wird die Trocknungsgeschwindigkeit nach dem Punkt "H" immer kleiner und strebt dem Wert "0" zu. Der Bereich nach dem Punkt "H" wird auch als 3. Trocknungsabschnitt bezeichnet [3-21].

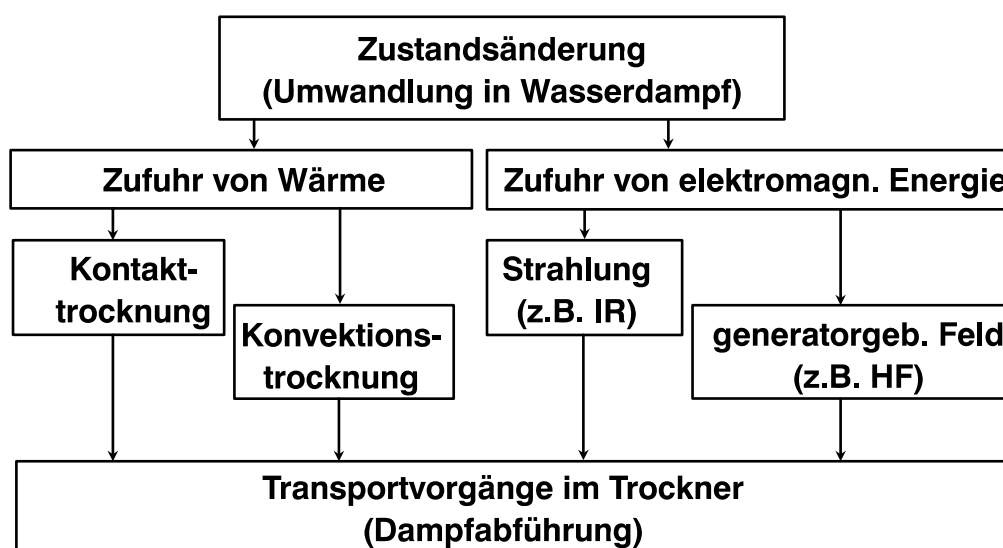
Die Entwässerung unter Einsatz thermischer Energie beinhaltet das Verdunsten bzw. Verdampfen des Wassers, die Abtrennung des Wasserdampfes vom Trockengut und den Abtransport durch die Trocknerluft. Dieser Prozess besteht aus vier simultan ablaufenden Teilschritten, die

in **Tabelle 3-6** zusammengestellt und nachfolgend näher beschrieben sind [3-22].

**Tabelle 3-6: Physikalische Vorgänge bei der Trocknung**

Schritt	Vorgang
A Verdunsten und Verdampfen	Zustandsänderungen
B Wärme- und Stofftransport im Papiervolumen	Transportvorgänge
C Wärme- und Stofftransport an der Papieroberfläche	Transportvorgänge
D Wärme- und Stofftransport durch die Trocknerluft	Transportvorgänge

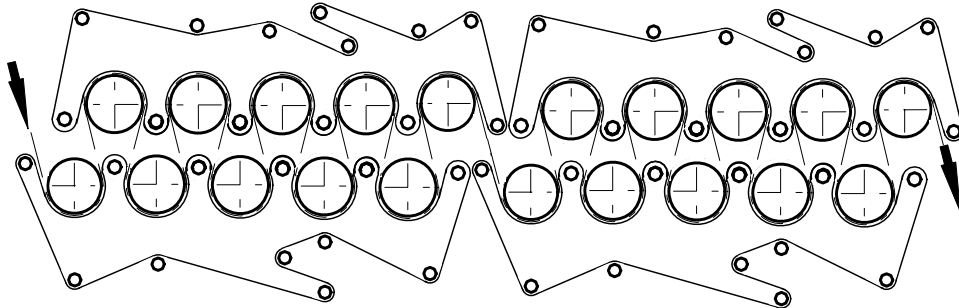
Das mit Abstand am häufigsten anzutreffende Trocknungsverfahren ist die Kontakt-trocknung, also der Wärmeübergang von einer beheizten Fläche auf die berührende Papierfläche durch Wärmeleitung. Damit wird das Papier einerseits sehr schonend getrocknet, die Papierbahn geführt und über die Einstellung der Züge eine gezielte Qualitätsbeeinflussung durchgeführt. Neben der Kontakt-trocknung kann die Konvektionstrocknung (z.B. Schwebetrockner) eingesetzt werden. Die Trocknung ist auch durch die Zufuhr von Energie mittels elektromagnetischer Strahlung möglich. Hierzu gehören die Infrarot (IR)-Strahlungstrockner und die Hochfrequenz (HF)-Trockner (siehe Abbildung 3-30).



**Abbildung 3-30: Eingesetzte Trocknungsverfahren**

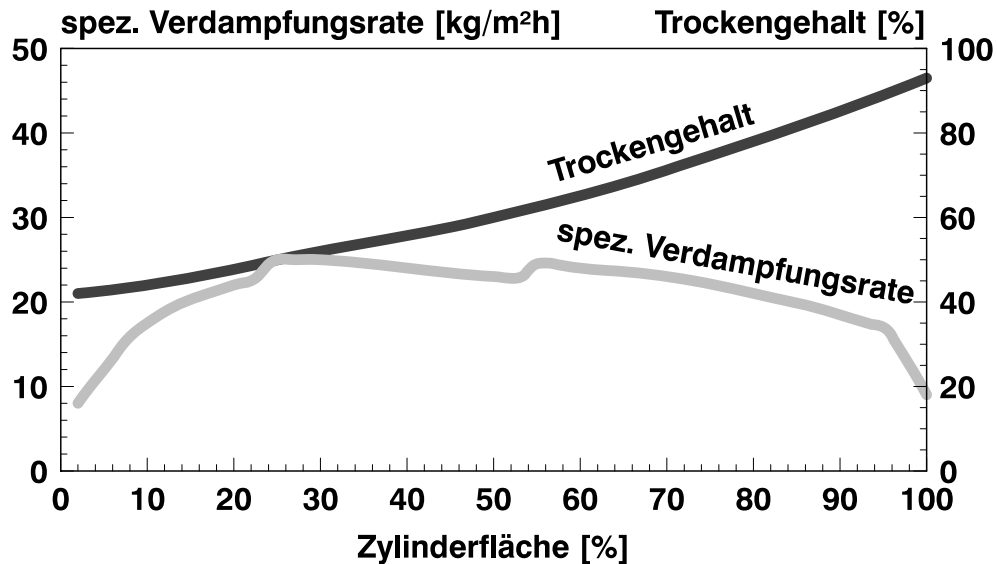
Die Realisierung der Kontakt-trocknung in Form der Zylindertrockner wurde vor etwa 170 Jahren entwickelt und ist seither ohne wesentliche Veränderungen geblieben. Abbildung 3-31 zeigt zwei Antriebsgruppen einer konventionellen doppelreihigen Trockenpartie mit ihren Zylinderanordnungen und Trockenfilzfürungen. Die während des Trocknungsvorgangs eintretende Schrumpfung des Papiers macht die Unterteilung in einzelne Trockengruppen erforderlich, von denen jede separat angetrieben wird. Die Papierbahn (gestrichelte Linie) wird dabei slalomartig mit einem Filz abwechselnd um die unteren und oberen Zylinder geführt. Dabei kommt stets eine Papierseite mit der Zylinderoberfläche in Kontakt. Die sich bildende Form von Zylinderoberfläche und den freien Zü-

gen zwischen oberer und unterer Zylinderbahn wird „Tasche“ genannt. Die Taschenbelüftung mit Hilfe von Heißluftblaswalzen bewirkt zum einen eine Vergleichmäßigung des Feuchteprofils im Papier und damit eine höhere Trocknungsleistung und zum anderen eine Filzkonditionierung.



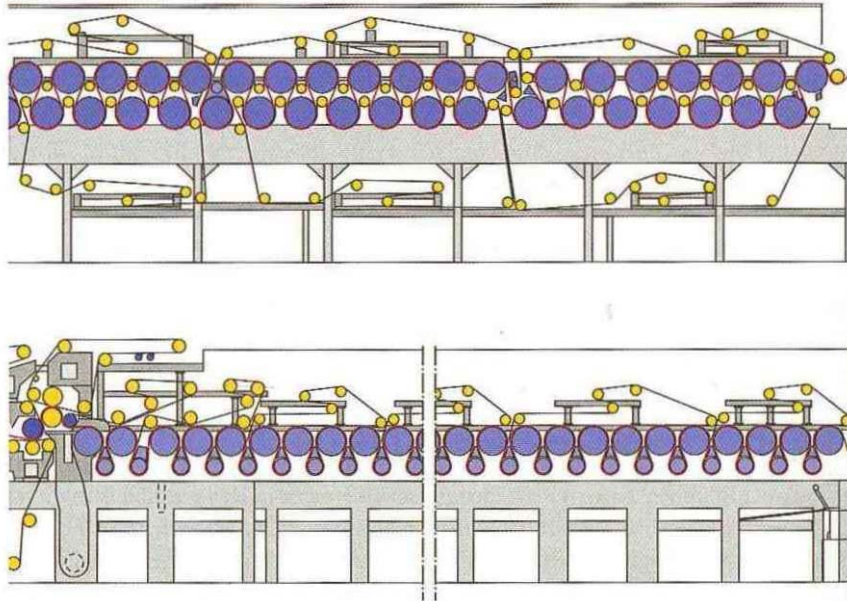
**Abbildung 3-31: Zwei Antriebsgruppen einer doppelreihigen Trockenpartie [3-23]**

Die Wärme wird durch dampfbeheizte Zylinder auf die anliegende Papierbahn übertragen. Dabei wird die Papierbahn aufgeheizt, das Wasser verdampft und durch Zuluft aufgenommen und abtransportiert. Um die Qualitätsanforderungen und eine gute Verdampfung zu gewährleisten, muss beim Betrieb ein Temperaturregime (Aufheizkurve) beachtet werden. Ein zu schnelles Aufheizen kann zu Blasenbildung und damit zu Löchern führen. Abbildung 3-32 zeigt typische Kurven von mittlerer spezifischer Verdampfungsrate und Papiertrockengehalt im Verlauf der Trocknung eines Papiers [3-24].



**Abbildung 3-32: Spezifische Verdampfungsrate und Papiertrockengehalt als Funktion der Trockenfläche**

Je nach Papier- bzw. Kartonsorte und betrieblichen Gegebenheiten sind unterschiedliche Dampf- und Kondensatschaltungen im Einsatz. Die mit zunehmender Produktionsgeschwindigkeit kritische Bahnführung der konventionellen Doppelfilzführung wurde verbessert durch die Entwicklung der sog. Einfilz- bzw. Kontaktilzführung und die einreihige Trockenpartie [3-26], siehe Abbildung 3-33.



**Abbildung 3-33: Zweireihige (oben) und einreihige (unten) Trockenpartie**  
(Quelle: Voith)

Neben der Zylindertrocknung wird auch die konvektive Trocknung durch Heißlufttrockenhauben, eingesetzt. Hierbei wird die zur Trocknung erforderliche Wärme mit der Luft auf die Papierbahn durch erzwungene Konvektion übertragen, um die physikalischen Trocknungsvorgänge zu erwirken (Prallströmtrocknung). Das verdampfte Wasser wird mit der Luft wieder abgeführt.

Dieser Ausführung wird für die Erzeugung v.a. von Hygiene- und Filterpapieren eingesetzt. Dabei wird die Papierbahn um einen einzigen, dampfbeheizten Zylinder gefahren, der neben Aufwärmung und Trocknung der Bahn auch die Aufgaben der Pressgegenwalze, des Transportes durch die Lufthaube und am Ende für die Kreppung durch geeignete Schaber übernimmt.

Die Luft in der Heißlufthaube wird zum Teil im Kreis mit der Zuluft gefahren. Das Temperaturregime in der Luft ist mit bis zu 700 °C deutlich höher als bei der Kontakttrocknung, die Beheizung erfolgt meist mit Gas. Die den Lochplatten austretende Luft erreicht eine Geschwindigkeit von bis zu 160 m/s. Die Wärme zur Prallströmtrocknung wird durch Konvektion und Strahlung übertragen (siehe Abbildung 3-34).



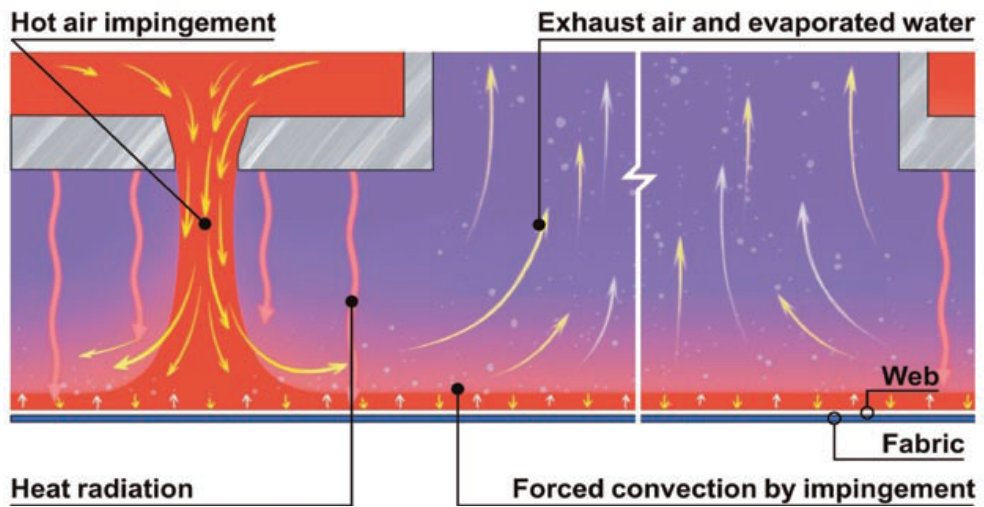


Abbildung 3-34: Wärmeübertragung und Verdampfung bei der Prallström-trocknung [3-25]

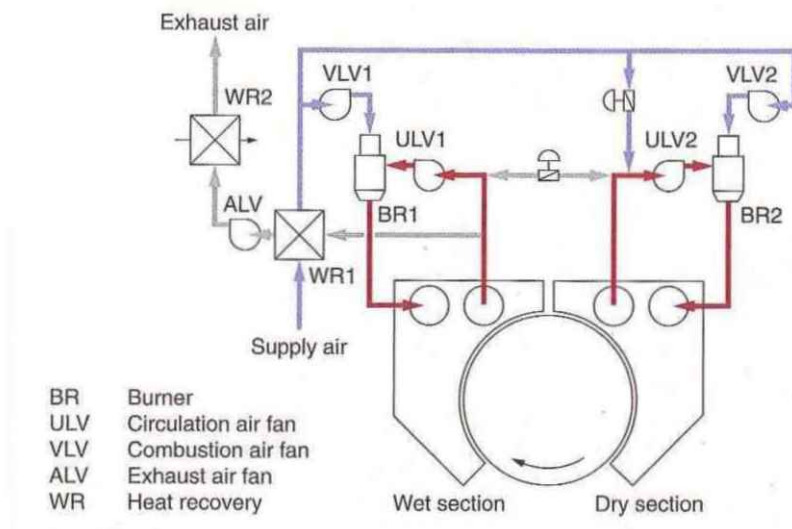
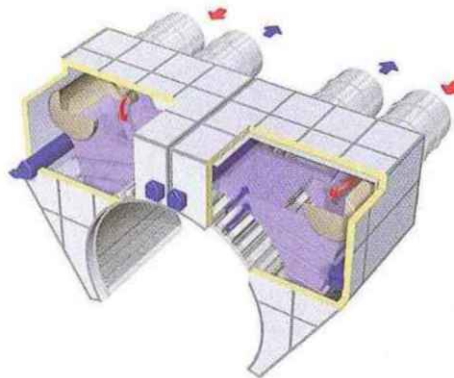
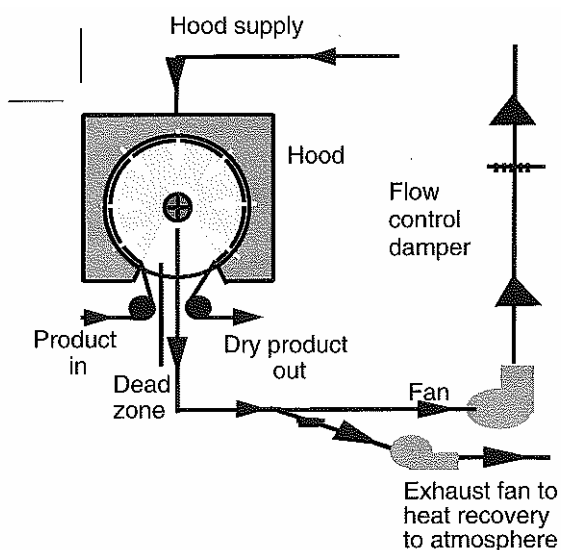


Abbildung 3-35: Luftsystem eines konventionellen Yankeeystems [3-26]

Ein weiteres Trocknungsverfahren für Hygienepapiere und andere luft-durchlässige Papiere ist die Durchström-trocknung oder auch TAD („Through air drying“). Dabei wird im Gegensatz zur konventionellen Yankee Trocknung auf einen dampf-beheizten Zylinder verzichtet und die

Papierbahn über einen geöffneten Zylinder geführt. Heiße Luft durchströmt das Papier in eine Richtung und transportiert die Feuchte ab (siehe Abbildung 3-36).

Der Vorteil von TAD liegt in verbesserten Produkteigenschaften wie Weichheit, Volumen und Saugfähigkeit. Der wesentliche Nachteil allerdings im enormen Energieverbrauch, da auf eine Nasspresse verzichtet wird und das Papier mit einem Trockengehalt von 25 % bis zur Endfeuchte des Fertigproduktes thermisch entwässert wird. Gegenüber konventioneller Tissueproduktion ist damit die zu verdampfende Wassermenge mit 3 l/kg doppelt so groß [3-27]. Dadurch ist der Wärmebedarf etwa 2,5 mal so hoch, der Strombedarf aufgrund des großen Vakuumsystems und der groß dimensionierten Lufttechnik etwa doppelt so hoch.



**Abbildung 3-36: Schema eines TAD systems [3-27]**

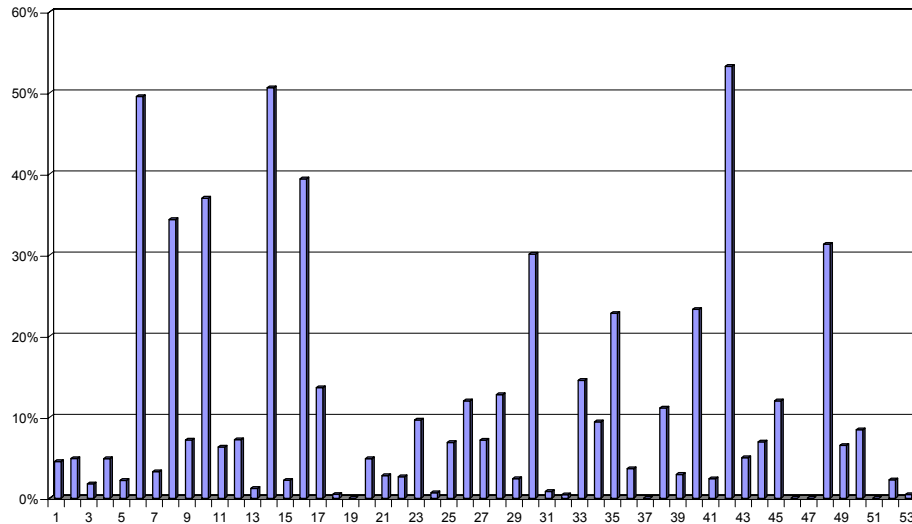
Die Wärmeübertragung durch elektromagnetische Strahlung (Infrarot) wird überwiegend zur Strichrocknung in Streichmaschinen angewendet, seltener zur Feuchteprofilregelung am Ende der Trockengruppe oder zur Erweiterung der Trocknungskapazität. Üblicherweise wird Gas eingesetzt, das ein Metallnetz auf etwa 1.100 °C aufheizt. Für elektrisch betriebene IR Strahler können Temperaturen von etwa 700 °C erreicht werden. Vorteile sind die große Wärmeübertragerleistung bei geringer Baugröße sowie eine gute Regelbarkeit. Nachteilig ist die schlechte Energieeffizienz. Der Wirkungsgrad beträgt bei gasbetriebenen Aggregaten 25 – 35%, mit Strom: 20 - 35 %.

Impulstrocknung ist eine kombinierte Entwässerung aus Pressen und Trocknen. Die technische Ausführung entspricht der einer Walzenpresse. Die Walze auf der Papierbahnseite ist beheizt, die andere Seite filzbedeckt. Das feuchte Faservlies wird komprimiert und mechanisch entwässert. Der sich aus dem ausgepressten Wasser bildende Dampf drückt Wasser aus dem Vlies durch die komprimierten Kapillaren zum Filz, wodurch der Dampf schließlich frei hindurchströmen kann. Diese Technologie ist noch in der Entwicklung.

Handlungsoptionen bei der Optimierung einer Trockenpartie ergeben sich in folgenden Punkten:

- Reduzierung der Verluste am Hilfskondensator (Hiko)
- Strom- und Wärmeeinsparung durch Optimierung der Lüftungstechnik

- Reduzierung der Wärmeverluste durch Verbesserung der Isolierung und
- Reduzierung der Leckluftströme



**Abbildung 3-37: Verluste von Hilfskondensatoren von Papiermaschinen in % des gesamten Dampfbedarfs [PTS Untersuchungsergebnisse]**

Der Brüdenkondensator am Dampf- und Kondensatsystem der Papiermaschine hat die Aufgabe, an der ersten Trockengruppe (= letzte Trockengruppe der D&K-Kaskade) einen Unterdruck zu erzeugen, damit der notwendige Differenzdruck zwischen Dampfein- und austritt den Dampf durch die Zylinder fördert. Als Ziel zur Reduzierung der Verluste am Hilfskondensator sollten als Obergrenzen 2 % Kondensatorleistung bezogen auf den Dampfverbrauch eingehalten werden. Die Verluste korrelieren dabei unmittelbar mit dem erforderlichen Differenzdruck zwischen Dampfein- und austritt in die Kaskade.

Der Differenzdruck kann reduziert werden durch

- Einbau stehender Siphons in die Zylinder anstatt rotierender, da diese bei einem niedrigeren Differenzdruck arbeiten
- Änderung der Aufheizkurve mit Verlagerung der Heiz- und Trockenleistung in die hinteren Trockengruppen (vordere Trockengruppen der Dampf & Kondensat-Kaskade). Diese Maßnahme nimmt jedoch Einfluss auf die Papierqualität.
- Verwertung der Brüden am Separator durch Thermokompressoren. Der Flashdampf wird durch einen Treibdampf mit höherem Druck wieder zu Arbeitsdampf hochgespannt und kann wieder zur Trocknung ins System gefahren werden.

Für die Trocknung in Papiermaschinen sind sehr große Luftmengen erforderlich. Dies ist sowohl bei der Prallström- und konvektiven Trocknung als auch bei der Zylinderkontakttrocknung der Fall, da das verdampfte Wasser mit der Luft aus der Haube abgeführt werden muss. Als Erfahrungswert kann für die Zylindertrocknung (Kontakttrocknung) eine Abluftmenge von 10 kg trockner Luft pro kg verdampftes Wasser angenommen werden. Da die Zuluftmenge die erwärmt werden muss, um die Wasseraufnahmekapazität zu erhöhen, und die abgeführte Abluft somit eine hohe Enthalpie haben, werden mit den Luftströmen auch sehr große Energieströme bewegt (siehe Abbildung 3-38). Die optimale Anpass-

sung der Lüftungstechnik ist somit entscheidend für den energieeffizienten Betrieb der Trockenpartie. Ein Beispiel für das Trocknungsregime bei einer Kontakt Trocknung hinsichtlich Temperaturen, Taupunkttemperaturen und Wassergehalt ist in Abbildung 3-39 dargestellt.

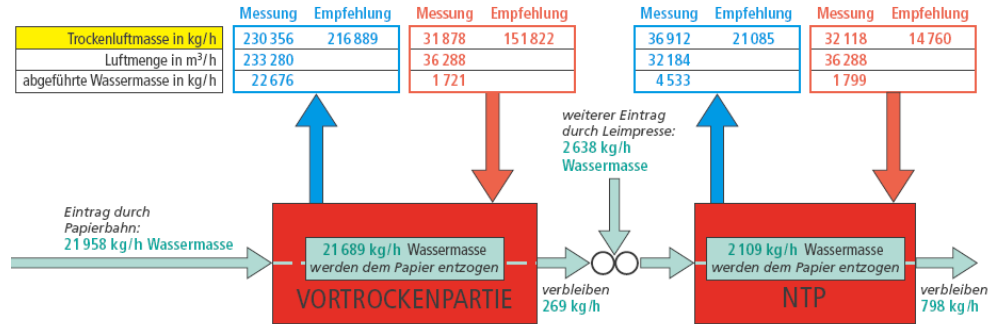


Abbildung 3-38: Typische Luft- und Wassermassenströme bei der Trocknung [3-28]

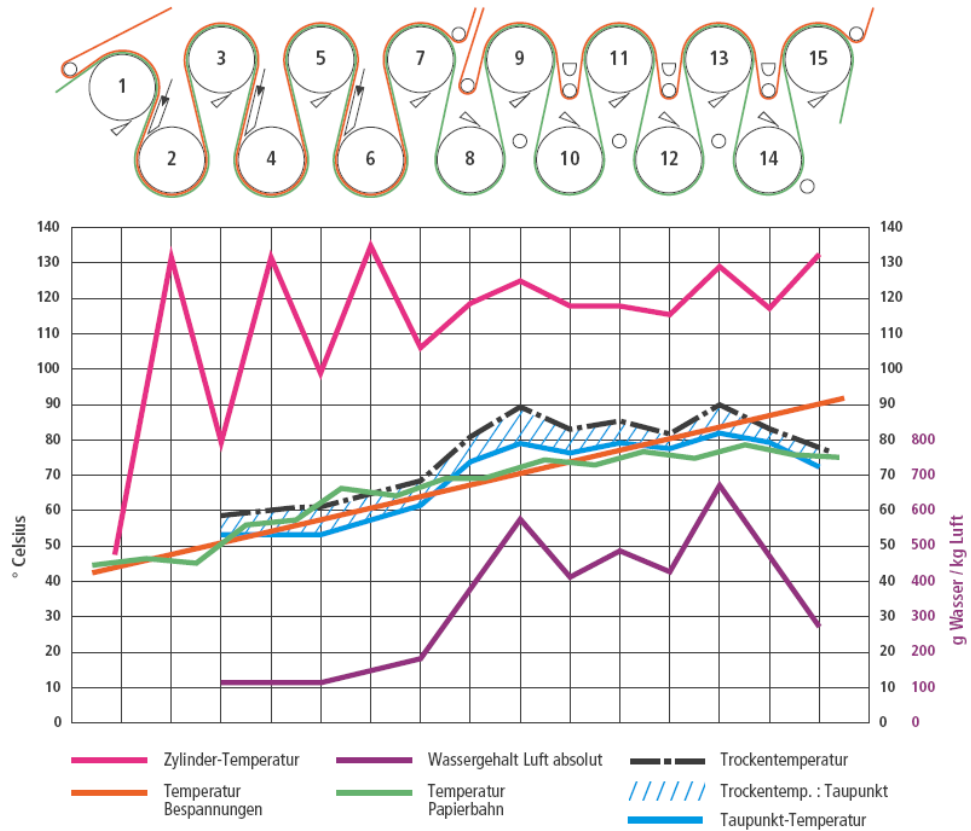


Abbildung 3-39 Temperaturen und Feuchten einer Trockenpartie [3-28]

Die Potenziale einer Optimierung der Lüftungstechnik erschließen durch folgende Handlungsoptionen:

- Wärmerückgewinnung
- Anpassung der Luftmengen unter Berücksichtigung der Taupunkttemperatur
- Isolierung und
- Reduzierung des Leckluftanteils.

Durch eine optimale Nutzung und Fahrweise der Wärmerückgewinnung aus der Abluft soll die Zuluft auf 60 bis 65 °C aufgeheizt werden. Die weitere Aufheizung kann durch Nutzung von Brühdampf und Kondensat auf ca. 80 bis 85 C erfolgen. Erst in der letzten Stufe sollte Frischdampf zur Zulufterwärmung auf etwa 110 C. bis 120 C verwendet werden. Höhere Zulufttemperaturen sind bei der Kontakttrocknung (Zylindertrocknung) zu vermeiden, da das Wasseraufnahmevermögen oberhalb von 120 °C nicht mehr entscheidend steigt. Eine Ausnahme stellen allerdings die Trocknungsprinzipien TAD sowie Yankee-Trocknung dar, bei denen die Zuluft auch die Energieübertragung übernimmt.

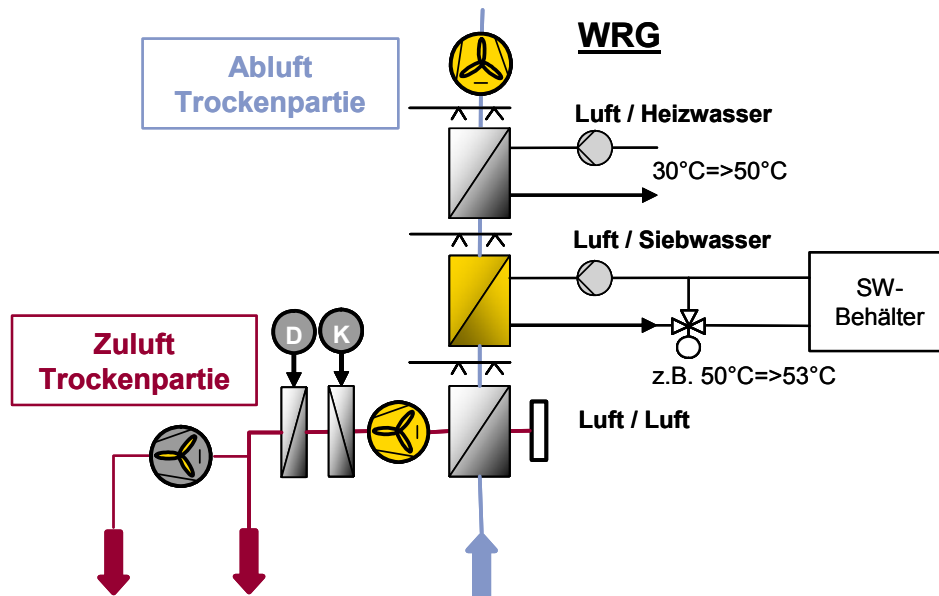
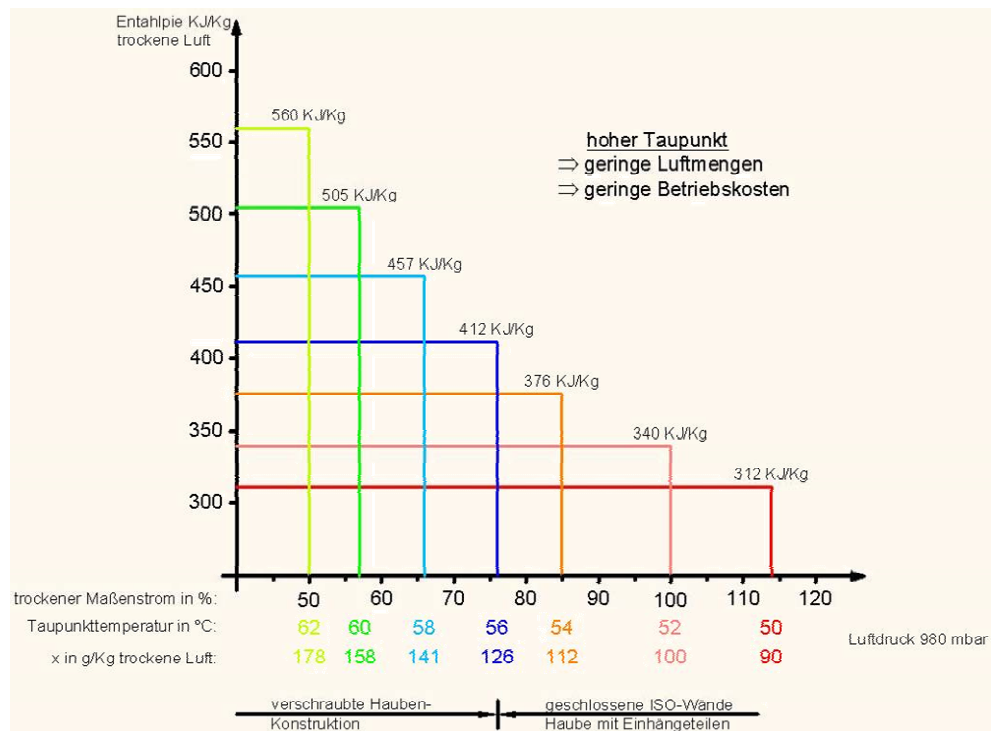


Abbildung 3-40 Beispiel für ein Wärmerückgewinnungssystem durch optimale Ausnutzung der Energie der Abluft [Quelle: Voith Air]

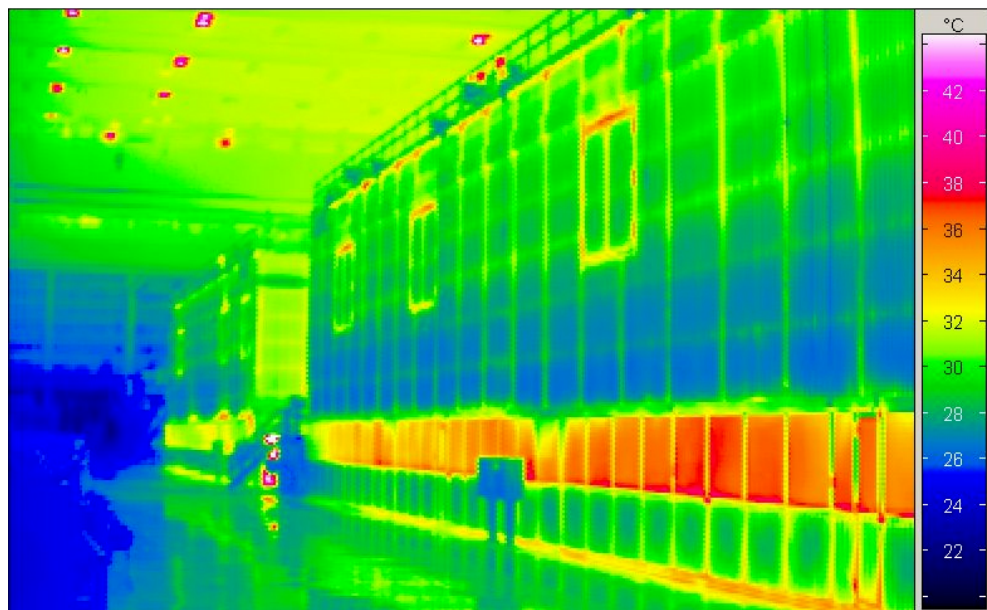
Ein weiteres Potenzial ist eine Reduzierung der Luftmengen und die Anhebung der Taupunkttemperatur. Die Taupunkttemperatur sollte möglichst hoch sein, es müssen jedoch Konstruktion und Zustand der Haube berücksichtigt werden, um Kondensation zu vermeiden. Mit einer modernen Trockenhaube sollte ein Taupunkt von mindestens 60 °C erreicht werden. Eine Erhöhung der Taupunkttemperatur wird durch eine Reduzierung der Zu- und Abluftmassenströme erreicht, da damit die Wasserdampfkonzentration steigt. Eine optimal bilanzierte Haube sollte ein Massenstromverhältnis von Zu- zu Abluft von mindestens 0,7 haben. Mit einer Reduzierung der Zuluftmengen kann eine deutliche Stromeinsparung bei den Antrieben der Ventilatoren erzielt werden. Um bei unterschiedlichen Papiersorten Zu- und Abluftmengen der Trockenhaube anzupassen, sollte eine Taupunktregelung mit frequenzgesteuerten Lüfterantrieben installiert sein.

Abbildung 3-41 zeigt den Zusammenhang zwischen Taupunkt, Luftmengen und Enthalpie. Durch die Reduzierung des Massenstroms der trockenen Abluft um 30 % resultiert eine Anhebung des Taupunktes um 4 °C. Durch die höhere Wasserbeladung der Abluft ergibt sich eine Steigerung der Abluftenthalpie um 22 %. Insgesamt führt diese Maßnahme jedoch zu einer Reduzierung des Wärmebedarfs um 8 %. Zusätzlicher Nutzen ergibt sich durch die reduzierte Antriebsleistung der Abluftventilatoren.



**Abbildung 3-41: Einfluss des Taupunktes auf die Enthalpie der Luft [3-29]**

Um eine hohe Taupunkttemperatur zu realisieren, ist eine vollständig isolierte Haube mit dicker Dämmung erforderlich, um Kondensation oder auch lokale Kondensation (an Wärmebrücken, wie z.B. Scharniere) zu vermeiden. Auch ist auf eine dichte Haubenkonstruktion zu achten, um das Einströmen von kalter Leckluft zu vermeiden. Ein weiterer Nutzen einer gut isolierten Haube ist natürlich auch ein geringer Wärmeverlust durch Abstrahlung und Konvektion in die Produktionshalle. Abbildung 3-42 zeigt eine IR Aufnahme einer modernen Trockenhaube. Trotz guter Dämmung sind jedoch Wärmebrücken zu erkennen, wie die Fenster in den Toren und die Türöffnungen im oberen Bereich der Haube.



**Abbildung 3-42: Thermografieaufnahme einer gut isolierten Trockenhaube (Bildquelle: Palm, Wörth)**

### 3.3 Querschnittstechniken

Unter Querschnittstechniken werden alle Energieumwandlungsanlagen zusammengefasst, die für die Versorgung eines Betriebes mit Dampf, Druckluft, Strom, Heizmedien, Beleuchtung und Frischluft eingesetzt werden. In der Papierindustrie haben diese Anlagen einen maßgeblichen Anteil am Energieeinsatz und bieten ein beträchtliches Optimierungspotenzial. Im Folgenden wird detailliert auf die Bereiche

- Dampf- und Warmwasserversorgung
- Kälteversorgung
- Lüftung und Klimatisierung
- Druckluftversorgung
- Beleuchtung und
- elektrische Antriebe

eingegangen.

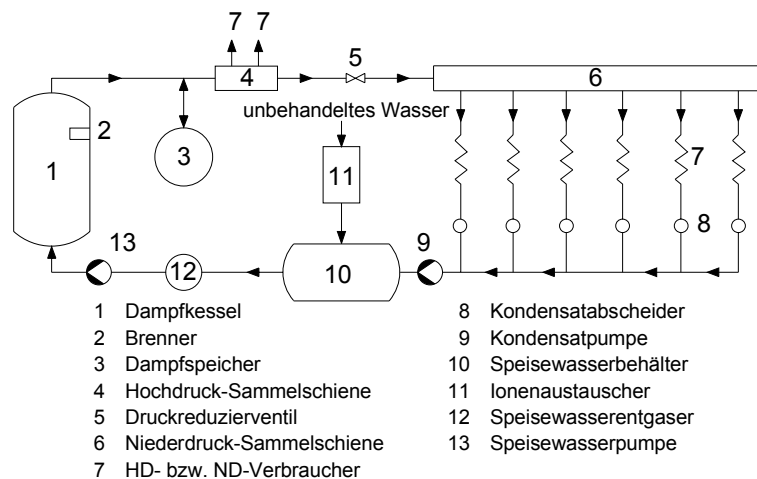
Die in der Papierindustrie eingesetzten Querschnittstechniken finden grundsätzlich auch in anderen Branchen Verwendung, wenn auch im Folgenden auf die speziellen Erfordernisse bei der Papierherstellung und -verarbeitung eingegangen wird.

#### 3.3.1 Dampf- und Warmwasserversorgung

Viele Bearbeitungsstufen in der Papierindustrie benötigen thermische Energie. Aufgrund des guten Wärmeübergangs bei der Dampfkondensation werden diese Wärmemengen häufig über Dampf bereitgestellt. Selbst Heißwasser wird oftmals sekundär mittels Dampf erhitzt. In der Regel wird der benötigte Dampf zentral in einem oder auch mehreren parallel arbeitenden Dampfkesseln erzeugt und über ein Rohrleitungssystem zu den verschiedenen Verbrauchern geführt. Das Kondensat wird, soweit möglich, zurückgeleitet, in einem Sammelbehälter aufgefangen und dem Kesselsystem wieder zugeführt. **Abbildung 3-43** zeigt das Schema eines typischen Dampfsystems für Betriebe der Papierindustrie.

Für den Betrieb von Produktionsanlagen sind Dampfdrücke von 3 bis 8 bar üblich. Dies entspricht Sattdampftemperaturen zwischen 140 und 165 °C. Nur in wenigen Betrieben sind höhere Dampfdrücke erforderlich. Die Kesselwirkungsgrade liegen meist zwischen 80 und 92 %. Die Wärmeverluste im Rohrleitungssystem betragen bis zu 15 %, so dass letztlich nur 65 bis 77 % der eingesetzten Brennstoffenergie für die Produktion genutzt wird.

Eine Befragung von Unternehmen ergab, dass das Durchschnittsalter der Kessel in der Papierindustrie etwa 16 Jahre beträgt. Die ältesten Anlagen waren über 40 Jahre alt. Entsprechende Einsparpotenziale sind somit vorhanden. Im Folgenden wird auf unterschiedliche Möglichkeiten zur Steigerung des Umwandlungswirkungsgrades von Dampfsystemen eingegangen.



**Abbildung 3-43** Typisches Dampfsystem eines Industriebetriebes

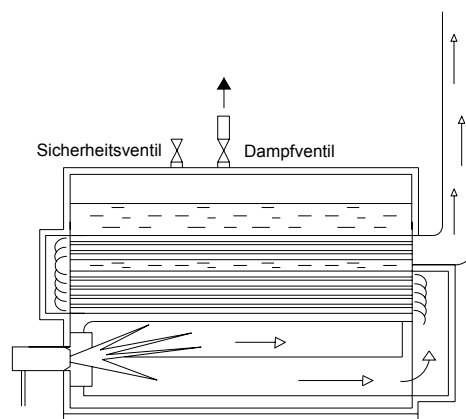
### Kesseltypen

Für die Dampferzeugung werden drei verschiedene Kesseltypen eingesetzt:

- Rauchröhrenkessel (Abbildung 3-44)
- Flammrohrkessel (Abbildung 3-45)
- Steilrohrkessel oder Schnelldampferzeuger (Abbildung 3-46)

Welcher Typ verwendet wird, ist von der Bedarfsdynamik (Menge, zeitliches Bedarfsprofil) und der Dampfqualität (Feuchtigkeit, Druck und Temperatur) abhängig [3-47, 3-48].

Rauchröhrenkessel (siehe Abbildung 3-44) sind in kleineren Betrieben häufig anzutreffen und werden überwiegend für niedrigere Drücke und vergleichsweise geringe Dampfmenngen eingesetzt.

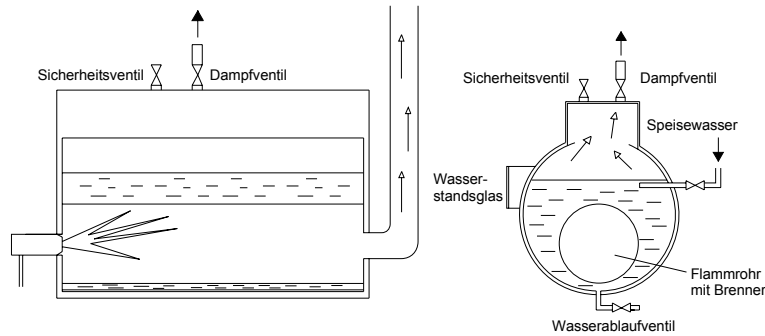


**Abbildung 3-44:** Aufbau eines Rauchröhrenkessels

Der Flammrohrkessel als klassischer Großwasserraumkessel hat den einfachsten Aufbau und findet in größeren Betrieben mit entsprechend höherem Dampfbedarf Anwendung. Ein Vorteil liegt in der vergleichsweise großen Speicherefähigkeit von Dampf, so dass bei Bedarfschwankungen die Schaltvorgänge des Brenners auf ein Minimum reduziert werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der hohen Dampfqualität (trocken gesättigter Dampf mit konstantem Druck). Während in älteren Betrieben noch – wie in Abbildung 3-45 dargestellt – einzügige Flammrohrkessel mit Wirkungsgraden von nur 50 bis 60 % angetroffen werden, fin-

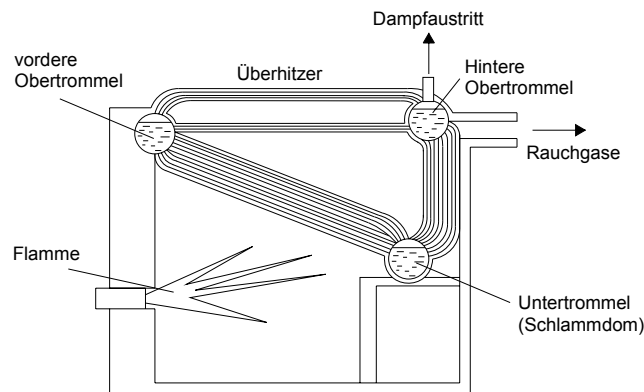


den sich in moderner ausgerüsteten Betrieben vorwiegend dreizügige Flammrohrkessel, die durch ihre erheblich größere Wärmeübertragungsfläche Wirkungsgrade von 85 bis 90 % erreichen. Flammrohrkessel werden in Betrieben mit einem konstant hohen Dampfbedarf eingesetzt.



**Abbildung 3-45: Aufbau eines einzügigen Flammrohrkessels**

Das Prinzip des Steilrohrkessels (siehe Abbildung 3-46) besteht darin, dass sich das Kesselspeisewasser in Röhren im oberen Bereich des Flammraumes befindet und über große Flächen schnell erhitzt und verdampft werden kann. Zusätzlich enthält ein Steilrohrkessel meist zwei Obertrommeln und eine oder auch zwei Untertrommeln (Dome), zwischen denen die Wasserrohre schräg oder steil angeordnet sind. Das Wasser steigt in dem vorderen, stark beheizten Rohrbündel nach oben zur vorderen Obertrommel. Der enthaltene Dampf wird abgegeben, das Wasser strömt in die hintere Obertrommel hinüber und fällt durch das senkrechte, schwächer beheizte Rohrbündel in die Untertrommel zurück. Es entsteht ein natürlicher Umlauf mit hoher Wärmeübertragung und effizienter Dampferzeugung.



**Abbildung 3-46: Aufbau eines Steilrohrkessels**

Nachteilig ist bei diesem Kesseltyp die in der Regel höhere Dampf-feuchte sowie die geringere Druckkonstanz. Ein bei speziellen Bautypen oberhalb der Obertrommeln zusätzlich angeordnetes Rohrbündel ermöglicht die leichte Überhitzung des Dampfes, so dass trotz der Wärmeverluste in den Rohrleitungen am Einsatzort noch Sattedampfzustände vorliegen, die Dampfqualität also gesteigert wird.

Kleinere Steilrohrkessel sind für Dampfmen gen bis etwa 1 t/h als so genannte Schnelldampferzeuger auf dem Markt und je nach Größe und Druck zwischen 25 und 40 % günstiger in der Anschaffung als Flammrohrkessel gleicher Leistung. Größere Bauformen werden für große Dampfmen gen bei höheren Drücken eingesetzt, sind jedoch dann auf-

grund ihres komplizierteren Aufbaus kostenintensiver in der Anschaffung.

Der Dampfbedarf eines Betriebes ist, wie die übrige Energieversorgung auch, stark von der jeweiligen Struktur und dem Produktionsprofil geprägt. Eine genaue Mengemessung der einzelnen Verbraucher ist die wesentliche Grundlage für die Optimierung des Dampfverbrauchs. Neben der Erfassung der insgesamt erzeugten Dampfmenge ist die Überwachung und Aufzeichnung des Dampfbedarfs einzelner Anlagen in den Betrieben der Papierindustrie eher die Ausnahme, sollte in Zukunft aber stärker Beachtung finden. Hierfür bieten sich klassische und kostengünstige Messverfahren mit Blenden- oder Staudrucksonden an.

Überaus wichtig ist die richtige Dimensionierung des Kessels und vor allem die Anpassung des Betriebsdrucks an die tatsächlichen betrieblichen Erfordernisse. Höhere Dampfdrücke als erforderlich verursachen aufgrund der höheren Temperaturen entsprechend größere Verluste in den Dampfleitungen. Gegebenenfalls sollten entsprechende Abstufungen vorgesehen werden.

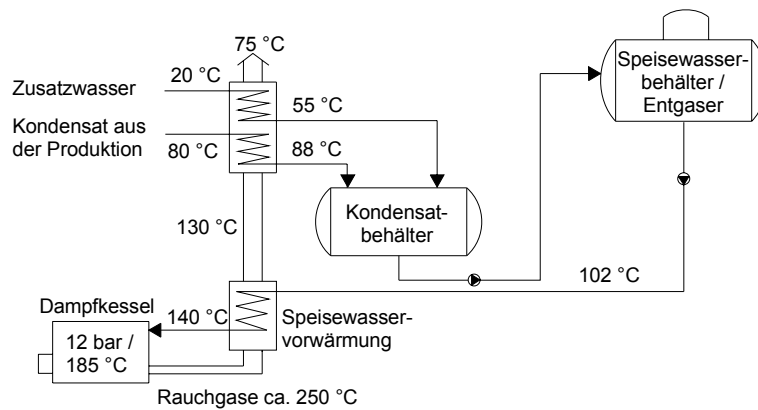
Häufig werden bei bestehenden Systemen Dampfdruck und -temperatur bewusst über einen gezielten Wärmeverlust in unisolierten Teilen des Leitungssystems reduziert. Zum Teil wird die gewünschte Abkühlung sogar durch äußere Berieselung der heißen Rohre mit Wasser erzielt. Dies alles sollte aus energetischer Sicht vermieden werden. Stattdessen sollte wie üblich eine Reduzierung auf die gewünschten Dampftemperatur durch Kondensateinspritzung erfolgen.

### **Speisewasservorwärmung**

Eine Maßnahme zur Verbesserung der Brennstoffausnutzung bei Dampfkesselanlagen ist der Einbau einer Vorrichtung zur Speisewasservorwärmung im Abgasstrang (Economizer) [3-47, 3-48].

Das auf Kesseldruck gepumpte Speisewasser wird hierbei durch einen außen berippten Rohrbündel-Wärmeübertrager zwischen Kessel und Kamin geleitet und von z.B. 100 °C auf bis zu 140 °C aufgeheizt. Das Abgas kühlt sich dadurch von etwa 180 °C auf z.B. 130 °C ab und der Kesselwirkungsgrad steigt um fünf bis sechs Prozentpunkte an. Bei Einsatz von Heizöl ist diese Maßnahme mit stark erhöhtem technischem und finanziellem Aufwand verbunden, da der im Heizöl enthaltene Schwefel zur Bildung von Schwefelsäure führt. Dementsprechend müssen Kamin und Anlagenteile säurefest ausgelegt werden.

In Betrieben mit direktem Dampfeinsatz ist die weitere Wärmeausnutzung des Abgases zur Vorwärmung von kaltem zuströmendem Kesselspeisewasser – bis hin zur Brennwerttechnik – auch bei Großkesselanlagen durchaus denkbar. **Abbildung 3-47** zeigt die mögliche, in Stufen durchgeführte Wärmeausnutzung der Rauchgase.



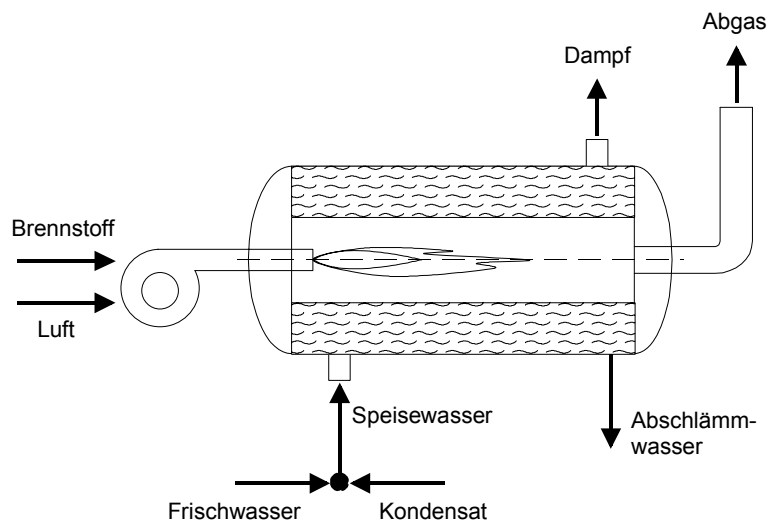
**Abbildung 3-47: Abwärmenutzung aus Rauchgasen**

Die bekannten Schwierigkeiten des reduzierten Kaminzugs und der sicheren Abführung anfallender Kondensatmengen durch entsprechend ausgekleidete Abgasanlagen müssen auch hier beachtet werden. Der wachsende Einsatz von Erdgas bei der Dampferzeugung begünstigt den Einsatz der Brennwertechnik. Eine Abkühlung des Abgases auf bis zu 50 °C mit der daraus resultierenden hohen Wärmeausnutzung, wie sie bei Hausfeuerungsanlagen seit einiger Zeit schon erreicht wird, sind bei guter Kesseldimensionierung auch in Betrieben der Papierindustrie zu erzielen. Dies ist dann sinnvoll, wenn die Niedertemperaturwärme zur Erwärmung von Prozess- oder Spülwasser oder von Kesselzusatzwasser genutzt werden kann. Aufgrund der hohen Kosten für Wärmeübertrager und Kaminauskleidungen beträgt die Amortisationszeit 3 bis 7 Jahre.

### Bilanzierung von Dampferzeugungssystemen

Die Dampferzeugung verursacht häufig einen hohen Anteil der Energiekosten eines Betriebes. Neben den Kosten für den Brennstoffeinsatz fallen weitere Kosten zur Aufbereitung des Speisewassers an. Dabei machen die Brennstoffkosten 80 bis 85 % und die Aufbereitungskosten etwa 15 bis 20 % der Dampfkosten aus. Indirekt enthalten sind darin auch die Kosten für Abschlämzung, Kondensatverluste, Abwasser und Isolationsverluste. Insbesondere bei älteren Kesselsystemen kann eine sorgfältige Bilanzierung der Energieströme zur Aufdeckung von Verbesserungspotenzialen führen. Die Kenntnis über die zu veranschlagenden Kosten für die Dampferzeugung ist von großer Bedeutung.

**Abbildung 3-48** zeigt eine schematische Darstellung eines Kesselsystems mit sämtlichen relevanten Energieströmen. Die Bewertung der Effizienz eines Dampferzeugungssystems geschieht über den thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  [3-47, 3-48]



**Abbildung 3-48: Bilanzierung eines Dampferzeugungssystems**

Der Wirkungsgrad  $\eta_{th}$ , der, im Gegensatz zum Nutzungsgrad, nur bei einem bestimmten Lastpunkt als Verhältnis von nutzbarer thermischer Dampfleistung zu zugeführter Brennstoffleistung definiert ist, lässt sich durch folgende Gleichung bestimmen:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{Dampf} \cdot h''_{Dampf}(p_{Dampf}) - \dot{m}_{SpW} \cdot h_{SpW}(t_{SpW})}{\dot{m}_{Brst.} \cdot H_U}$$

mit	$\dot{m}_{Dampf}$	Dampfmassenstrom in $t_{Dampf}/h$
	$h''_{Dampf}$	Energiegehalt des Sattedampfes in $kWh/t_{Dampf}$
	$\dot{m}_{SpW}$	Speisewassermassenstrom in $t_{SpW}/h$
	$h_{SpW}$	Energiegehalt des Speisewassers in $kWh/t_{SpW}$
	$\dot{m}_{Brst.}$	Brennstoffmassenstrom bzw. Brennstoffvolumenstrom in $kg/s$ bzw. $m^3_N/s$ (ggf. aus Jahreswerten zu berechnen)
	$H_U$	Heizwert des Brennstoffes (s. <i>Anhang Heizwerte und Emissionsfaktoren</i> )

Der Energiegehalt von Dampf und Wasser ist in **Abbildung 3-49** dargestellt. Darin ist der Wert für Sattedampf und siedendes Wasser als Funktion des Druckes über die linke und die untere Achse abzulesen. Der Wert von flüssigem Wasser kann als nahezu reine Temperaturfunktion über die rechte und obere Achse abgelesen werden.

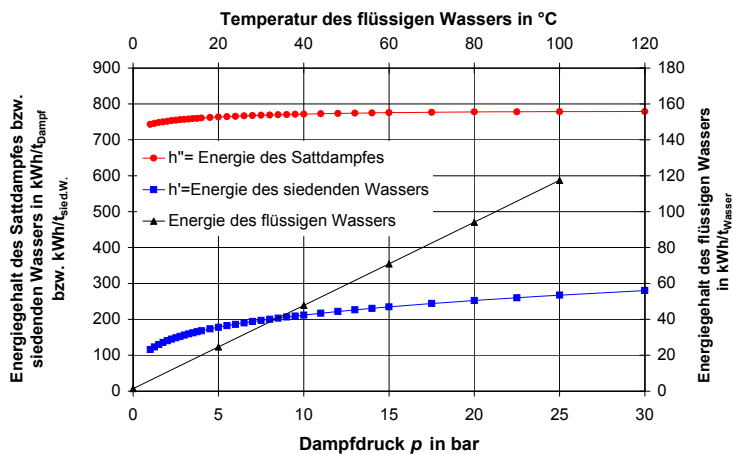


Abbildung 3-49: Energiegehalt von Dampf und Wasser

Entscheidend für die Kosten eines Dampfsystems ist i.d.R. der Nutzungsgrad, bei dem als Unterschied zum Wirkungsgrad sämtliche Lastzustände, also auch die Teillastzustände mit niedrigeren Wirkungsgraden, über den Bilanzierungszeitraum betrachtet werden. Die Bestimmung erfolgt anhand derselben Gleichung wie zur Bestimmung des Wirkungsgrades. Zur Bilanzierung werden anstatt der Leistungswerte die Jahresverbrauchswerte für Dampf, Speisewasser und Brennstoff herangezogen. Moderne Kesselsysteme erreichen Nutzungsgrade von 85 bis 90 %.

Bei den in der Papierindustrie eingesetzten Kesselsystemen, die laut einer durchgeführten bundesweiten Befragung von Papierunternehmen durchschnittlich ein Alter von etwa 16 Jahren aufweisen, ist mit Nutzungsgraden von etwa 75 bis 80 % zu rechnen. In der Praxis wird oft davon ausgegangen, dass ab einem Alter von etwa 15 Jahren die Betriebskosten um etwa 10 % höher liegen als die von neuen Kesselanlagen.

Der feuerungstechnische Wirkungsgrad  $\eta_F$  eines Kessels ist ein Maß für die Qualität des Wärmeübergangs zwischen der im Kessel zur Umwandlung von Speisewasser in Dampf aufgenommenen und der durch den Brenner erzeugten Wärme. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad berücksichtigt demnach die Abgasverluste, die Wärmeverluste durch Strahlung und Konvektion über die Kesseloberfläche sowie andere Verlustquellen.

$$\eta_F = \frac{\dot{m}_{\text{Dampf}} \cdot h''_{\text{Dampf}} + \dot{m}_{\text{Abschl.}} \cdot h_{\text{Abschl.}} - \dot{m}_{\text{SpW.}} \cdot h_{\text{SpW}}}{\dot{m}_{\text{Brst.}} \cdot H_u + \dot{m}_L \cdot c_{pL} \cdot (t_L - 25^\circ\text{C}) - \dot{m}_{\text{Abg.}} \cdot \bar{c}_{p\text{ Abg.}} \cdot (t_{\text{Abg.}} - 25^\circ\text{C})}$$

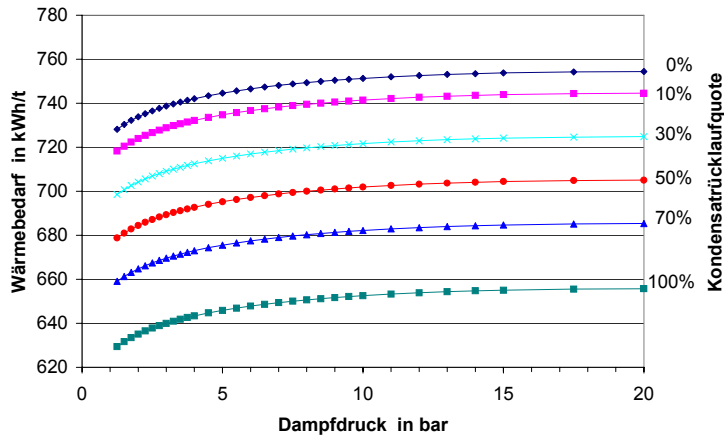
mit	$\dot{m}_{\text{Dampf}}$	Dampfmassenstrom in $t_{\text{Dampf}}/h$
	$h''_{\text{Dampf}}$	Energiegehalt des Sattdampfes in $\text{kWh}/t_{\text{Dampf}}$
	$\dot{m}_{\text{Abschl.}}$	Menge Abschlammwasser in $t_{\text{Abschl.}}/h$
	$h_{\text{Abschl.}}$	Energiegehalt des Abschlammwassers
	$\dot{m}_{\text{SpW}}$	Speisewassermassenstrom in $t_{\text{SpW}}/h$
	$h_{\text{SpW}}$	Energiegehalt des Speisewassers in $\text{kWh}/t_{\text{SpW}}$
	$\dot{m}_{\text{Brst.}}$	Brennstoffmassenstrom (Heizöl) bzw. Brennstoffvolumenstrom (Erdgas)
	$H_u$	Heizwert des Brennstoffes in $\text{kWh}/\text{kg}$ bzw. $\text{kWh}/\text{m}^3_N$ (s. Anhang <i>Emissionsfaktoren</i> )
	$\dot{m}_L$	Verbrennungsluftmassenstrom in $t_L/h$
	$c_{pL}$	mittlere spez. Wärmekapazität der Verbrennungsluft. Liegt im betrachteten Temperaturbereich bei etwa $1,04 \text{ kJ}/\text{kgK}$ .
	$\dot{m}_{\text{Abg}}$	Abgasmassenstrom in $\text{kg}/h$ , über Messungen des Volumenstroms mit temperaturabhängiger Dichte zu berechnen
	$\bar{c}_{p \text{ Abg.}}$	mittlere spez. Wärmekapazität des Abgases, abhängig von Temperatur und Zusammensetzung (Brennstoff, Luftverhältnis) des Abgases
	$t_L$	Temperatur der Zuluft in $^{\circ}\text{C}$
	$t_{\text{Abg.}}$	Temperatur der Abgase in $^{\circ}\text{C}$

Die Speisewassermenge kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\dot{m}_{\text{SpW}} = \dot{m}_{\text{Kond.}} + \dot{m}_{\text{FW}}$$

Sie setzt sich zusammen aus dem Rücklauf aus dem Kondensatnetz, welcher i.d.R. bei Atmosphärendruck und etwa  $90^{\circ}\text{C}$  vorliegt, und der zuzugebenden Frischwassermenge, die in der Wasseraufbereitungsanlage vorbehandelt werden muss und eine Temperatur von etwa  $15$  bis  $20^{\circ}\text{C}$  hat. Eine Steigerung der Kondensatrücklaufquote bedeutet, dass eine größere Menge des eingesetzten Dampfes als Kondensat zum Dampferzeuger zurückgelangt. Die Kosten für den Brennstoff, der zum Aufheizen des Zusatzwassers auf Kesseleintrittstemperatur benötigt wird, können somit deutlich reduziert werden. Ebenso sinken die nicht zu vernachlässigenden Kosten für die Kesselspeisewasseraufbereitung bei einer höheren Rücklaufquote.

Abbildung 3-50 zeigt unter Annahme eines idealen Dampferzeugers ( $\eta_{\text{th}}=1$ ) die Berechnung des Wärmebedarfs zur Dampferzeugung des benötigten Dampfes bei unterschiedlichen Kondensatrücklaufquoten und Dampfdrücken.



**Abbildung 3-50: Thermischer Energiebedarf für die Dampferzeugung in Abhängigkeit von Dampfdruck und Kondensatrücklaufquote (idealer Dampferzeuger mit  $\eta_{th}=1$ )**

Im Vergleich zu einer vollständigen Rückführung des Kondensates (100 %) liegt der Wärmebedarf bzw. Brennstoffeinsatz bei einem Dampfsystem ohne Kondensatrückführung (0 %) um etwa 15 % höher. Da das nicht zurückgewonnene Kondensat i.d.R. als Abwasser abgeführt wird, fallen zusätzlich Kosten in Form der Abwassergebühren an, die regional sehr unterschiedlich sind und durchaus 3 € pro Kubikmeter Abwasser und mehr betragen können. Es sollte demnach eine möglichst große Menge an Kondensat zurückgewonnen werden. Eine Rücklaufquote oberhalb von 60 % sollte in Betrieben der Papierindustrie auch bei direktem Dampfinsatz zu erreichen sein.

Als Problem bei der Bilanzierung des Dampfsystems stellt sich oftmals heraus, dass aufgrund fehlender Zähler nicht alle Größen (z.B. der eingesetzte Dampfmassenstrom) erfasst werden. Sie lassen sich häufig jedoch über Querbilanzen herleiten. So ist z.B. der relativ aufwändig zu messende Dampfmassenstrom i.d.R. als Differenz aus dem Kessel Speisewasser und der sich aus den Aufzeichnungen des Kesselhausbuches ergebenden Abschlämmmenge darzustellen:

$$\dot{m}_{\text{Dampf}} = \dot{m}_{\text{SpW}} - \dot{m}_{\text{Abschl.}}$$

Für die messtechnisch einfach zu ermittelnden Wasserströme sollte eine umfangreiche Zählerstruktur in jedem Fall vorhanden sein, die eine Bilanzierung des Dampfsystems mit einem geringen Aufwand erlaubt.

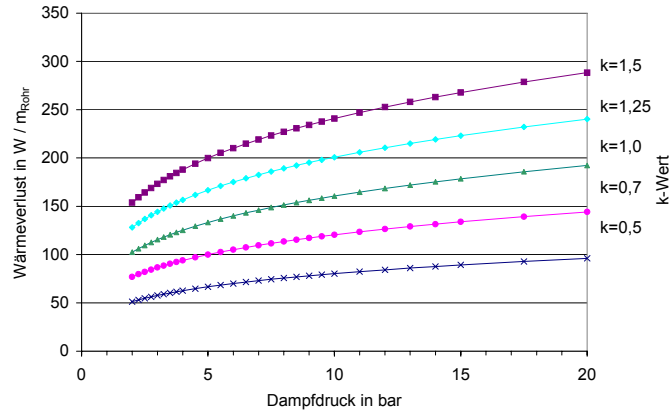
Bei der Verteilung des Dampfes kommt es zu Wärmeverlusten im Dampfnetz. Diese Verluste sind von mehreren Faktoren abhängig: von den Abmaßen der Leitungen und Isolierungen, von der Art der Isolierungen sowie von den Temperaturen von Dampf und Umgebungsluft. Mit diesen Faktoren kann der Wärmeverlust anhand folgender Formel näherungsweise berechnet werden, wobei  $k$  der Wärmedurchgangskoeffizient ist:

$$\dot{Q}_V = k \cdot 2\pi \cdot r_{\text{Rohr}} \cdot l_{\text{Rohr}} \cdot (T_{\text{Dampf}} - T_U)$$

Der  $k$ -Wert ist von den Wärmeübergangsbedingungen außerhalb und innerhalb der Leitungen, von den Rohr- und Isolierungsmaterialien sowie von den geometrischen Dimensionen der Leitungen abhängig.

In Abbildung 3-51 sind die längenspezifischen Wärmeverluste der Dampfleitung ( $W/m_{\text{Rohr}}$ ) bei Dampfdrücken bis 20 bar für verschiedene  $k$ -

Werte dargestellt. Für ein mittleres Unternehmen ( $p_{\text{Dampf}} = 8 \text{ bar}$ ,  $k = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $l_{\text{ges}} = 5000 \text{ m}$ ) lässt sich beispielweise eine Verlustleistung von etwa 750 kW über die Dampfleitungen berechnen, was etwa einer Dampfleistung von 1,2 Tonnen Dampf pro Stunde entspricht.



**Abbildung 3-51: Wärmeverluste in den Rohrleitungen in Abhängigkeit von k-Wert und Dampfdruck**

### Brenner und Brennerregelung

Der für die Verbrennung erforderliche Sauerstoff wird durch Luftzuführung aus der Umgebung gedeckt. Der in der Luft enthaltene Stickstoff (etwa 79 %) wird dabei zwangsweise mit aufgeheizt. Die mittels Gebläse kontrollierte Luftzufuhr ist daher auf ein Minimum an Luftüberschuss einzuschränken, wodurch auch schädliche Abgasemissionen minimiert werden.

Insbesondere bei ölbefeuerten Kesseln führt eine schlechte Brennerauslegung oder -wartung zu Rußablagerungen an den Wärmeübertragungsflächen im Kessel. Eine Rußschicht von 0,1 mm senkt dabei den Kesselwirkungsgrad bereits um einen Prozentpunkt.

Neben der Abgastemperatur ist der  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Abgas ein Überwachungsindikator für einen guten Kesselbetrieb.

Aus wirtschaftlicher Sicht bietet sich aufgrund unterschiedlicher Preise für z.B. Erdgas und Heizöl der Einsatz von Zwei- oder Mehrstoffbrennern an. So kann, abhängig vom Marktpreis, entweder Erdgas oder Heizöl eingesetzt werden. Dabei empfiehlt sich der Abschluss eines Gasversorgungsvertrages mit Abschaltklausel. Durch derartige Verträge lassen sich in der Regel sehr viel günstigere Bezugskonditionen für Erdgas aushandeln. Ein solcher Vertrag erlaubt dem Energieversorger, eine von ihm zeitlich festgelegte und mit dem Kunden abgestimmte Abschaltung vorzunehmen (z.B. im Winter bei sehr hohem regionalem Gasverbrauch). In dieser Zeit muss der Kessel dann mit Heizöl betrieben werden. Unter Berücksichtigung der  $\text{CO}_2$ - und Schadstoffemissionen ist der Einsatz von Erdgas jedoch generell dem von Heizöl vorzuziehen. Da Mehrstoffbrenner grundsätzlich auch für alternative Brenngase wie Biogas und Klärgas einsetzbar sind, ist durch Mitverbrennung solcher gegebenenfalls autark am Werksstandort produzierter Brenngase eine gewisse Abkopplung von der Preisentwicklung für Primärenergien zu erreichen.



Besonders in Betrieben mit nur einem Kessel und schwankendem Dampfbedarf sollte die Möglichkeit der Brennerregelung beachtet werden. Bei kleineren Anlagen können zweistufige Brenner (Regelbereich bis auf etwa 50 % Teillast) oder dreistufige Brenner (Regelbereich bis auf etwa 35 % Teillast) eingesetzt werden. Bei Dampfkesseln größerer Leistung empfehlen sich stufenlos modulierende Brenner. In jedem Fall sollten die Brennerkennlinie und die jeweils angestrebten Betriebspunkte aneinander angepasst sein.

In der Regel erfolgt die Rückführung des Kondensats unter Entspannung auf Atmosphärendruck in einen offenen Kondensatbehälter, wodurch es zu einer Nachverdampfung kommt. Entweichen diese sogenannten Brüden ungenutzt, führt dies zu einem zusätzlichen Wärmeverlust bei der Dampf-erzeugung in Höhe von 6 bis 16 % je nach Druckniveau. In der Regel ist es möglich, die Brüden z.B. zur Vorwärmung von Kesselspeise- oder Reinigungswasser zu nutzen. Auch für die Heizwärmeversorgung und Vorheizung von Trockenluft kann Brüdendampf verwendet werden.

Die geringsten Wärmeverluste treten auf, wenn das Kondensat in einem geschlossenen Kreis unter Druck dem Kessel wieder zugeführt wird. Für die Investition in solche Druck-Kondensatsysteme werden allerdings Amortisationszeiten von mindestens 3 Jahren angesetzt.

Durch die Salze im Zusatzwasser (Frischwasser) reichert sich das Kesselwasser mit Salz an. Eine zu hohe Salzkonzentration führt zum Schäumen des Kesselwassers, woraus sich die Notwendigkeit einer regelmäßigen Absalzung ergibt. Die Absalzmenge ist von der Kesselbauart abhängig und liegt bei Großkesseln zwischen 2,5 und 10 % bezogen auf die Speisewassermenge und bei Wasserrohrkesseln bei 1 %. Mit jeder Absalzung sind aufgrund des Wärmegehalts der Absalzmenge Verluste verbunden, die möglichst gering gehalten werden sollten. Hierzu ist der Einsatz automatischer Absalzregelungen zu empfehlen, die über die Leitfähigkeit des Kesselwassers gesteuert werden und mit einer Absperung bei Regelabschaltung der Feuerung ausgestattet sind. Die Kosteneinsparung für diese Maßnahme liegt bei bis zu 5 %. Darüber hinaus sollte die Wärme des Absalzwassers über entsprechende Wärmeübertrager zurückgewonnen und zur Aufheizung des Kesselspeisezusatzwassers genutzt werden.

Bei Prozessen mit Warmwasserbedarf auf niedrigerem Temperaturniveau kann die dezentrale Warmwassererzeugung über kleine Warmwasserkessel wirtschaftlicher als die Warmwassererzeugung mit Dampf aus einem zentralen Heizkessel sein. Die dezentrale Lösung vermeidet die Wärmeverluste aufgrund langer Transportwege und hoher Temperaturen. Des Weiteren können in Zeiten mit niedrigem Wärmebedarf (z.B. im Sommer) einzelne zentral aufgestellte Kessel abgeschaltet und die anfallenden Bereitschaftsverluste gesenkt werden. Anlagen- und Betriebskosten sollten auch hier im Einzelnen gegenübergestellt werden.

### **3.3.2 Kälteversorgung**

In der Papierindustrie besteht vor allem zur Klimatisierung von Schaltschränken oder Messwarten Kältebedarf, der derzeit hauptsächlich über kompakte Kompressionskältemaschinen gedeckt wird.

## **Kompressionskältemaschinen**

Kompressionskältemaschinen nutzen den physikalischen Effekt der Verdampfungswärme beim Wechsel des Aggregatzustandes von flüssig zu gasförmig.

Ein Kältemittel (z.B. Ammoniak, Tetrafluorethan, Propan oder CO<sub>2</sub>) wird in einem geschlossenen Kreislauf bewegt und erfährt nacheinander verschiedene Änderungen des Aggregatzustandes. Das zunächst gasförmige Kältemittel wird komprimiert und in einen Wärmeübertrager geleitet. Dort gibt das Kältemittel Wärme ab und kondensiert dabei. Das flüssige Kältemittel wird anschließend entspannt und in einem weiteren Wärmeübertrager verdampft das Kältemittel unter Wärmeaufnahme. Diese Wärme wird aus der zu kühlenden Umgebung entnommen und führt daher zur Kühlung. Bei dieser Siedekühlung bleibt die Temperatur konstant auf niedrigem Niveau. Der Kreislauf kann nun von vorne beginnen. Der Energiebedarf einer Kompressionskältemaschine ergibt sich aus dem Bedarf elektrischer Energie zum Antrieb des Kompressors für den Kältemitteldampf.

Kaltdampfkompansions-Kälteanlagen bis zu einer Kälteleistung von mehreren hundert kW werden überwiegend durch Kolbenverdichtern angetrieben. Die sogenannten Scrollverdichter schließen sich im kleinen Leistungsspektrum an, arbeiten laufruhiger und haben einen höheren Wirkungsgrad. Anlagen mit Schraubenverdichtern (bis zu 14 MW Kälteleistung) und Turboverdichtern (bis zu 30 MW Kälteleistung) bilden die Spitze der serienmäßig verfügbaren Kälteleistung und haben auch die höchsten Wirkungsgrade.

Die Abwärme von Kompressionskältemaschinen kann anderen Prozessen zugeführt werden und verbessert die Energiebilanz der Anlage.

Das aus dem Verdichter austretende Kältemittel kann je nach Auslegung der Anlagenkomponenten hohe Temperaturen ausweisen. Dieses Temperaturniveau liegt je nach Verdichtertyp zwischen 70 und 120°C und ist zur Warmwassererzeugung gut geeignet. Des Weiteren kann zusätzlich noch die Abwärme des Ölkühlers moderner Schraubenverdichter genutzt werden. Hierbei muss allerdings auf eine ausreichende Kühlung z.B. über eine ergänzende Frischwasserkühlung für den Fall geachtet werden, dass keine Wärmeabnahme erfolgt. [3-30,3-31]

Als Alternative zur ungenutzten Abgabe der Kondensationswärme an die Umgebung kann auch die Einkopplung zur Vorerwärmung von Produktionswasser erfolgen.

## **Absorptionskältemaschinen**

Absorptionskältemaschinen werden nicht mechanisch, sondern thermisch angetrieben und sind in Leistungsbereichen von 10 kW bis 6 MW verfügbar.

Im Gegensatz zur Kompressionskältemaschine erfolgt die Verdichtung durch die Lösung eines Kältemittels (z.B. Ammoniak oder Wasser) in einem Lösungsmittel (z.B. Wasser oder LiBr). Die Löslichkeit des Kältemittels ist dabei temperaturabhängig. Dies wird auch als thermische Verdichtung bezeichnet. Das Kältemittel wird in einem Lösungsmittelkreislauf bei geringer Temperatur absorbiert und nach Temperaturerhöhung wieder desorbiert. Bei dem Prozess wird die Temperaturabhängigkeit der physikalischen Löslichkeit zweier Stoffe genutzt. Voraussetzung für den Prozess ist es, dass die beiden Stoffe in dem verwendeten Temperaturintervall in jedem Verhältnis ineinander löslich sind.

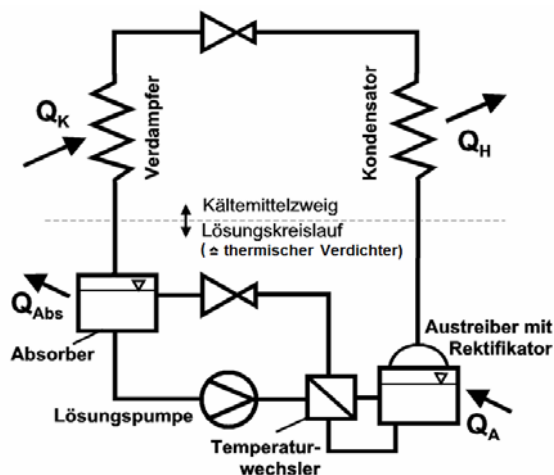


Abbildung 3-52: Schema einer Absorptionskältemaschine [3-30]

Die typische Arbeitstemperatur beginnt bei  $90^{\circ}\text{C}$  bis  $120^{\circ}\text{C}$ , die entweder durch Abwärmenutzung oder durch eine Direktbefuerung erreicht werden kann. Die Temperaturniveaus der üblichen Abwärmequellen liegen in der Regel deutlich unterhalb dieser Arbeitstemperatur, so dass zum Betrieb gegebenenfalls zusätzlich Wärme aus dem Dampfnetz eingekoppelt werden muss. Interessant wird der Betrieb einer Absorptionskältemaschine wenn größere, konstante Abwärmequellen mit Temperaturen oberhalb von  $120^{\circ}\text{C}$  zur Verfügung stehen, wie es z.B. in Verbindung mit einer Kraft-Wärme-Kopplung realisiert werden kann. Eine weitere Möglichkeit bietet die Kopplung und Aufwertung von Abwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau durch den Einsatz einer Wärmepumpe.

Absorptionskältemaschinen sind geräusch- und wartungsarm (nur wenige mechanische Teil) und besitzen ein gutes Teillastverhalten. Die großen Abmessungen und das hohe Gewicht sollten in den Entscheidungsprozess auf jeden Fall mit einfließen.

Der Wirkungsgrad einer Absorptionskältemaschine ist deutlich schlechter als der einer Kompressionskältemaschine. Da zum Betrieb der Absorptionskältemaschine aber Abwärme aus thermischen Prozessen direkt genutzt werden kann, ist der Einsatz gegebenenfalls äußerst attraktiv [3-30,3-31].

### 3.3.3 Lüftung und Klimatisierung

In der Papierindustrie kommt der Vermeidung von Kondensation in den Produktionshallen große Bedeutung zu. Die eingesetzten Produktionsverfahren z.B. in der Stoffaufbereitung und bei der Papierherstellung führen zu einer hoher Wasserfracht in der Hallenluft. Gleichzeitig geben die installierten Anlagen wie z.B. die Trockenpartie oft beträchtliche Wärme ab. Hinzu kommt vor allem in der Tissueindustrie eine hohe Staubbelastung, die entsprechende Absaugungen erforderlich macht.

Für die Lüftung stehen grundsätzlich die freie (passive) oder mechanische (aktive) Lüftung mit und ohne Wärmerückgewinnung zur Auswahl.

Bei der freien Lüftung wird der thermische Auftrieb der warmen Hallenluft ausgenutzt. Dazu müssen im Dachbereich der Halle witterungsgeschützte Luftaustrittsöffnungen und entsprechende Öffnungen für die Nachströmung vorhanden sein. In der Regel befinden sich diese im unteren

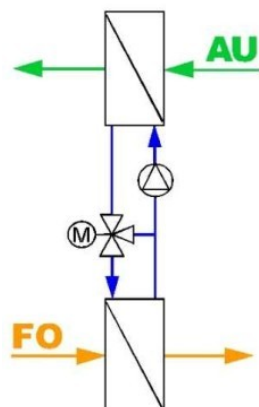
Bereich der Außenwände. Die Lüftungsart ist nur für Bereiche geeignet, in denen sehr hohe innere Wärmelasten auftreten. Eine Wärmerückgewinnung (WRG) ist nicht möglich.

Für Hallen mit geringer Bauhöhe kann eine freie Lüftung durch eine Querlüftung realisiert werden. Das setzt allerdings voraus, dass in der Halle an den gegenüberliegenden Seiten Fenster bzw. Öffnungen vorhanden sind. Eine Regelung der Lüftung wäre dann nur über entsprechendes Öffnen und Schließen der Fenster, eventuell über eine zentrale Steuerung, möglich. Diese Form der Lüftung ist noch häufig in der Papierindustrie anzutreffen, wobei sie im Zuge von Modernisierungen in der Regel durch eine mechanische Be- bzw. Entlüftung ergänzt wurde.

Mechanische Entlüftungsanlagen saugen die Luft mittels eines Ventilators aus einem Raum und führen sie ins Freie, während Luft durch Öffnungen aus den benachbarten Räumen oder aus dem Freien nachströmt. Da diese Anlagen in den zu entlüftenden Räumen einen Unterdruck erzeugen, sind sie besonders geeignet, die Ausbreitung belasteter Luft zu verhindern. Wird dafür gesorgt, dass die Luft auf geeigneten Wegen nachströmen kann, ohne Zug zu erzeugen, so sind diese Entlüftungsanlagen das einfachste und wirksamste Mittel zur Luftverbesserung. Die Verwendung ist meist jedoch auf kleine Räume beschränkt. Eine Wärmerückgewinnung ist durch den Einsatz von Wärmepumpen im Abluftsystem zur Brauchwassererwärmung möglich.

Besonders bei großen Räumen ist es zweckmäßig, gekoppelte Be- und Entlüftungsanlagen zu verwenden. Durch geeignete Bemessung der Volumenströme für Außen- und Fortluft kann dabei je nach Bedarf in den Räumen ein geringer Über- oder Unterdruck erzeugt werden. Die gekoppelte Be- und Entlüftung findet besonders Verwendung bei allen größeren Räumen, so auch in den Produktionshallen der Papierindustrie. Bei einer weitgehenden Zu- und Ablufführung über Luftkanäle ist eine Wärmerückgewinnung möglich.

Bei älteren Be- und Entlüftungssystemen wird die Zu- und Abluft oft über separate, räumlich getrennte Anlagen zu bzw. abgeführt. Bei diesen Anlagen ist die Nachrüstung einer Wärmerückgewinnung in Form eines Kreislaufverbundes in der Regel möglich.



**Abbildung 3-53: Schema eines Kreislaufverbundsystems (AU = Außenluft, FO= Fortluft) (Bildquelle: BauNetzOnline-Dienst GmbH & Co. KG [www.baunetz.de](http://www.baunetz.de) )**

Bei Kreislaufverbundanlagen wird die in der Abluft enthaltene Wärme über Wärmeübertrager verschiedener Bauarten entzogen und der Zuluft wieder zugeführt. Der Wärmetransport erfolgt dabei über ein Übertragungsmedium, das meistens aus einem Gemisch von Wasser und Glykol besteht, gelegentlich kommen aber auch Thermoöle zum Einsatz. Bei schwankendem Wärmebedarf ist eine Drehzahlregelung der Förderpumpen für das Transfermedium sinnvoll.

Generell sind nur Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) zu empfehlen. Auf dem Markt werden verschiedene Systeme angeboten, die unterschiedliche Wirkungsgrade hinsichtlich der Wärmerückgewinnung aufweisen:

Rotationswärmetauscher	65 – 80 %
Rekuperator z.B. mit Platten-Wärmetauscher	45 – 60 %
Rekuperator mit Reihenschaltung von zwei (Platten) Wärmetauschern	< 85 %
Kreislaufverbund-Wärmetauscher	40 – 70 %
Wärmerohr-Wärmetauscher	35 – 70 %

Bei größeren Hallen oder Räumen kann es sinnvoll sein, die Be- und Entlüftung über ein zentrales Lüftungsgerät und ein Kanalsystem zur Luftverteilung zu realisieren. Treten in einzelnen Produktionsbereichen besonders hohe Luftbelastungen auf (z.B. Staub an Poperoller bzw. Duoformer in der Tissueindustrie), so kann die Abluft durch ein Kanalsystem gezielt aufgenommen und abgeleitet werden.

In aktiven Be- und Entlüftungssystemen erfolgt die Luftführung in weiten Teilen durch ein Kanalnetz. Die Dimensionierung des Kanalnetzes, insbesondere die lichte Weite, hat einen beträchtlichen Einfluss auf den Druckverlust und damit auf den Energiebedarf der Zu- und Abluftventilatoren. Da der Druckverlust im Kanalnetz dem Quadrat einer Geschwindigkeitsänderung proportional ist

$$\Delta p \approx (\Delta \bar{v})^2$$

und die Kontinuumsgleichung

$$\dot{V} = \bar{v} \cdot A = \text{const.}$$

gilt, wirkt sich eine Veränderung des Kanalquerschnittes unmittelbar auf die Strömungsgeschwindigkeiten sowie den resultierenden Druckverlust aus. Bei einer Verdopplung des Kanalquerschnitts für den Transport einer bestimmten Luftmenge halbiert sich die Strömungsgeschwindigkeit und der Druckverlust reduziert sich auf ein Viertel. Entsprechend dem Zusammenhang

$$\sqrt{\frac{p}{p + \Delta p}} = \frac{n}{n + \Delta n} \text{ mit } n \sim \bar{v}$$

mit  $\Delta n$  als der durch den Druckverlust  $\Delta p$  verursachten Erhöhung der der Ventilator Drehzahl, hat dies unmittelbar auch Einfluss auf die zu leistende Verdichterarbeit und damit den Bedarf an elektrischer Energie

Der Druckverlust kann auch durch geeignete Auswahl von Kanalkomponenten optimiert werden. Der Reibungsverlust von runden Kanälen ist beispielsweise wesentlich geringer als der von rechteckigen.

Aber nicht nur das Kanalnetz, sondern auch der Antrieb und der Wartungszustand der Ventilatoren beeinflussen den Energiebedarf.

Die Ventilatoren in Lüftungsanlagen werden entweder direkt oder indirekt mittels Keil- oder Flachriemen angetrieben.

Bei direkt angetriebenen Ventilatoren sind diese auf einer Welle mit dem Antriebsmotor angeordnet und daher äußerst kompakt. Übertragungsverluste durch Transmission fallen nicht an.

Ihre Investitionskosten sind um 40% höher als bei vergleichbaren Ventilatoren mit Keil- oder Flachriemenantrieben, ermöglichen aber durch eine angepasste Drehzahlregelung über Frequenzumrichter Energie- und Kosteneinsparungen von 10 bis 25%. Ferner sind die Wartungskosten durch die geringe Anzahl beweglicher Bauteile niedrig.

Keil- oder Flachriemenantriebe bringen konstruktionsbedingt Transmissionsverluste von 5 bis 15 % mit sich und sind weniger kompakt als der Direktantrieb.

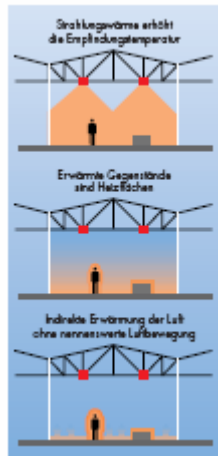
Die Höhe der erforderlichen Luftmenge richtet sich nach den branchentypischen Belastungen. Für die Papierindustrie ist in erster Linie mit einer hohen Wasserbeladung der Luft zu rechnen, so dass die wesentliche Aufgabe in der Einhaltung einer Mindesttemperatur in der Halle oberhalb der Taupunkttemperatur besteht. Dies kann erreicht werden, in dem entweder die Hallentemperatur signifikant erhöht wird oder die feuchte Luft kontinuierlich abgeführt wird. Aus energetischer Sicht ist es in der Regel ungünstig und meist auch nicht erforderlich, die Hallentemperatur auf ein Niveau oberhalb von 20 °C zu bringen. Durch einen weitgehenden Umluftbetrieb lassen sich darüber hinaus der Außenluftanteil und damit der Energiebedarf zur Erwärmung der vor allem in der Heizperiode kalten Außenluft oft deutlich reduzieren. Notwendig ist allerdings eine lokale Kontrolle der Taupunkttemperatur in exponierten Bereichen der Produktionshalle. Auch durch eine optimierte Strömungsführung mit lokal regelbaren Lüftungsanlagen kann Kondensation verhindert werden.

Lediglich eine Orientierung kann die sogenannte Luftwechselrate geben. Die Luftwechselrate gibt an, wie häufig der Luftinhalt einer Produktionshalle stündlich ausgewechselt werden sollte. Aufgrund des großen Spektrums an Produktionsverfahren in der Papierindustrie bewegen sich die Angaben für die erforderliche stündliche Luftwechselrate mit 6 bis 15 fach in einer sehr großen Spanne. Eine Optimierungsoption besteht in der variablen Volumenstromregelung. Dabei wird der notwendige Luftvolumenstrom nach der Temperatur bzw. Feuchte geregelt. Für die Beheizung großer Produktionshallen ist die Beheizung mittels Warmluftströmen meist nicht effektiv, insbesondere, da kaum Einfluss darauf genommen werden kann, welche Hallenareale geheizt werden [3-31].

Eine der wirksamsten Maßnahmen zur Optimierung des Energieverbrauchs für den Lufttransport ist die Entkopplung von thermischer Konditionierung (Heizen, Kühlen) und der Lufterneuerung. Dies wird realisiert, in dem mit statischen Systemen geheizt bzw. gekühlt wird. Einsetzbar sind hierfür Radiatoren, Heiz- oder Kühldecken sowie Strahlungsheizungen. Die Temperierung der Produktionshalle erfolgt nicht über den bewegten Luftstrom, wodurch sich der erforderliche Luftvolumenstrom ausschließlich an den Erfordernissen der Lufthygiene und der Betriebssicherheit bei der Papierproduktion orientiert und damit deutlich gesenkt werden kann.

Durch den Einsatz von Strahlungsheizungen kann Wärme gezielt dorthin gelenkt werden, wo sie benötigt wird. Eine an den Bedarf angepasste Beheizung unterschiedlicher Raumzonen ist somit möglich.

Das Prinzip einer Strahlungsheizung beruht darauf, dass nur unmittelbar von der IR-Strahlung getroffene Gegenstände diese absorbieren und in Wärme umwandeln. Dies gilt natürlich auch für sich im Strahlungsbereich aufhaltende Personen. Das System arbeitet zugluftfrei, da die Hallenluft so gut wie gar nicht erwärmt wird [3-32].



**Abbildung 3-54: Prinzip der IR-Strahlungsheizung [3-32]**

Durch die sehr kurzen Aufwärm- und Abkühlphasen kann das Heizsystem schnell an den momentanen Bedarf angepasst werden.

Auf dem Markt sind zwei Systeme verbreitet, die sich im Wesentlichen durch die Brennertechnik unterscheiden. Das eine System, der Hellstrahler, verbrennt das Gas deutlich sichtbar bei Temperaturen um die  $900^{\circ}\text{C}$  und kommt ohne Gebläse aus. Frischluftzufuhr und Abgasabfuhr erfolgen über die Hallenluft.

Das zweite System, der Dunkelstrahler, arbeitet meist mit einem Saugzuggebläse, um den Abgasstrom zu lenken. Die Arbeitstemperatur von ca.  $650^{\circ}\text{C}$  ist deutlich niedriger als die des Hellstrahlers und erzeugt kein sichtbares Glühen. Die Strahlungsintensität ist ebenfalls geringer. Der Einsatzbereich liegt daher im Bereich niedrigerer Hallen, dafür aber in der Beheizung größerer Flächen.

Da beide Systeme auf einem Verbrennungsprozess beruhen, müssen die Abgase berücksichtigt werden. Während der Hellstrahler seine Abgase bei einem ausreichend hohen Luftwechsel unmittelbar über die Hallenluft abführt, muss der Dunkelstrahler an ein Abgassystem angeschlossen werden.

Die zum Teil erhebliche Stauwärme, die sich insbesondere unter Flachdächern ansammelt, kann einen Beitrag zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs leisten.

Mit Hilfe von Gebläsen kann die durch die Sonneneinstrahlung erwärmte Luft ab- und einer Wärmepumpe zugeführt werden, welche diese Wärme auf ein höheres Temperaturniveau fördert und so für Heizzwecke nutzbar macht.

Am Besten funktioniert dieses System bei Dächern mit Metalleindeckung. Durch einen schwarzen Anstrich lässt sich die Rückstrahlung verringern und die Energieausbeute erhöhen.

Als Energiespeicher, der Strahlungsschwankungen ausgleichen soll, dient das Dach durch seine Wärmekapazität selbst [3-33].

Inwiefern sich ein solches Verfahren in das Heizkonzept einer Papierfabrik eingliedern lässt, muss im Einzelfall geklärt werden.

Da ältere Papierfabriken häufig mit beheizten Zwischendecken zur Vermeidung von Kondensation oberhalb der Papiermaschine ausgestattet sind, wäre der bauliche Aufwand bis auf den eventuellen Ersatz der Dacheindeckung gering. Natürlich ist die Installation einer Wärmepumpe und deren Installation in den Heizkreislauf vorzusehen.

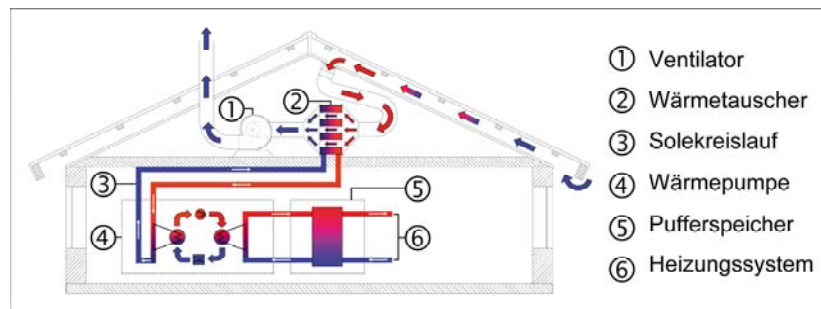


Abbildung 3-55: Prinzipskizze Solar-Luft-Kollektor (Bildquelle: M. Baum, Uni Göttingen)

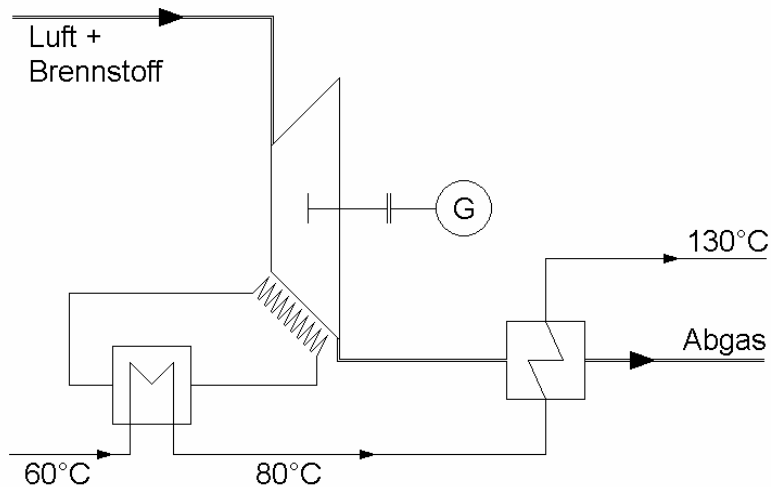
### 3.3.4 Kraft-Wärme-Kopplung

Unter Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird die gleichzeitige Bereitstellung von elektrischer Energie und Wärme verstanden. Sie wird zur zentralen Energieversorgung von Industrieunternehmen eingesetzt und ist aufgrund des hohen Prozesswärmebedarfs der Papierindustrie dort weit verbreitet. Im Gegensatz zur separaten Stromerzeugung in (externen) Dampfkraftwerken sowie von Prozess- bzw. Heizwärme in direkt befeuerten Kesselanlagen weisen Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung eine deutlich günstigere Ausnutzung der eingesetzten Primärenergie auf [3-50]. Im Folgenden werden Blockheizkraftwerke sowie die KWK unter Verwendung einer Gasturbine vorgestellt. Ergänzend werden die Einsatzmöglichkeiten von Stirlingmotoren sowie einstufigen Gegendruckdampfturbinen präsentiert.

#### Blockheizkraftwerke

Blockheizkraftwerke (BHKW) erreichen neben der Stromerzeugung in einem Verbrennungsmotor bzw. einer Gasturbine eine nahezu vollständige Nutzung der Abwärme zur Wärmeversorgung. Damit sind Gesamtwirkungsgrade von bis zu 90% möglich.





**Abbildung 3-56: Prinzipskizze Blockheizkraftwerk**

Als Brennstoffe finden Erdgas und Heizöl, aber auch Klärgas aus der betriebseigenen Abwasseraufbereitung und Biogas Verwendung.

Wasser zu Heizzwecken kann dem BHKW mit bis zu 105°C entnommen werden und zur Sicherstellung der Wärmegrundlast verwendet werden. Die Kombination mit Spitzenlastheizkesseln sowie Wärmespeichern ist ebenfalls möglich.

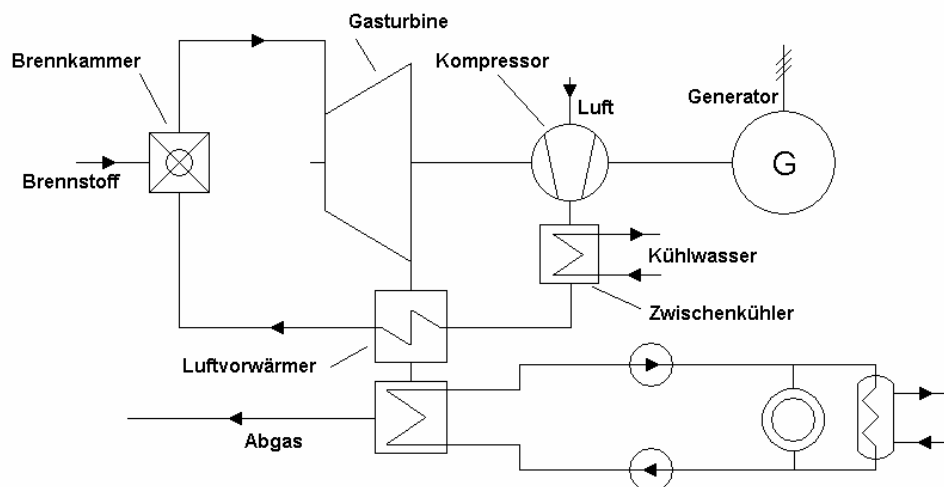
Der wirtschaftliche Betrieb von BHKW ist von der Auslastung abhängig. Eine jährliche Vollbenutzungsdauer von etwa 4.500 h/a ist empfehlenswert.

Ist der Wärmebedarf für die Betriebsführung des BHKW ausschlaggebend, ist der erzielbare Strompreis bei Stromabnahme durch den örtlichen Energieversorger bestimmend für die Wirtschaftlichkeit des BHKW.

Bei einem Strom orientierten Betrieb muss die anfallende Wärme von Speichern aufgefangen werden, wobei der Abgaswärmehaube bei fehlender Wärmeabnahme auch umfahren werden kann. In diesem Fall wird die Abwärme an die Umwelt abgegeben.

### **KWK-Anlagen mit Gasturbinen**

Im Unterschied zu den oben dargestellten BHKW wird in einem Gas- und Dampfprozess (GuD-Prozess) die Abwärme der Verbrennungsgase im Abhitzeessel verwendet, um hochgespannten Dampf zu erzeugen. Dieser Dampf treibt eine Gegendruckdampfturbine an und erhöht damit die Stromausbeute. Je nach Gegendruck kann der im Kreislauf geführte Dampf unmittelbar als Prozessdampf z.B. für die Kontakttrocknung eingesetzt werden oder die Kondensationswärme wird an einen Heizkreislauf abgegeben. Über diesen ebenfalls geschlossenen Heizkreislauf können dezentrale Wärmeverbraucher versorgt werden.



**Abbildung 3-57: KWK-Anlage mit Gasturbine**

Durch eine Zusatzfeuerung im Abhitzekeessel kann der Dampfdruck deutlich erhöht werden, wodurch eine Verbesserung der Dampfparameter und eine Steigerung der Dampfqualität erzielt wird. Der Gesamtwirkungsgrad liegt beim GuD-System bei ca. 85 %.

Ein Einsatz von Gasturbinenanlagen sollte stets dort erfolgen, wo zeitgleich Strom und Wärme benötigt werden. Ein kurzfristig höherer Wärmebedarf kann durch den Einsatz von Speichern gedeckt werden.

Die Wirtschaftlichkeit einer Gasturbinenanlage hängt neben anderen Parametern stark von den Brennstoffkosten ab. Weit verbreitet ist der Einsatz von Erdgas, vereinzelt wird aber auch Heizöl verwendet.

Insbesondere schwankende Brennstoffpreise erschweren eine Prognose der Wirtschaftlichkeit, selbst wenn eine konstante Abnahme von Strom und Wärmeenergie für nicht weniger als 5.000 h/a vorausgesetzt werden kann. [3-30,3-31]

### Stirling-Motoren

Der Stirlingmotor ist eine Wärmekraftmaschine, in der ein abgeschlossenes Arbeitsgas wie Luft oder Helium von außen an zwei verschiedenen Bereichen abwechselnd erhitzt und gekühlt wird, um mechanische Energie zu erzeugen. Der Stirlingmotor arbeitet nach dem Prinzip eines geschlossenen Kreisprozesses und ist ein Beispiel für die Energieumwandlung von einer schlecht nutzbaren Energieform (thermische Energie) in die besser einsetzbare Energieform mechanischer Energie. Der Stirlingmotor kann mit einer beliebigen externen Wärmequelle betrieben werden [3-30].

Die Vorteile eines Stirlingmotors liegen in der Flexibilität des Brennstoffeinsatzes. Auch die Nutzung von Niedertemperaturwärme ist möglich, führt allerdings zu niedrigen Wirkungsgraden. Da die Wärmezufuhr von außen erfolgt, unterliegen Stirlingmotoren einem geringen Verschleiß und weisen somit hohe Zuverlässigkeit und Standzeiten auf. Allerdings sind die erreichbaren Wirkungsgrade aufgrund der niedrigen Arbeitstemperaturen gering. Für Wärmekraftmaschinen kennzeichnet der Carnot Wirkungsgrad

$$\eta_c = \frac{T}{T - T_u}$$

den maximal erreichbaren Wirkungsgrad. Aufgrund der verfügbaren Werkstoffe werden derzeit nur Arbeitstemperaturen von 800 K erreicht, woraus sich ein Carnot-Wirkungsgrad von 66 % herleitet. Der effektive Wirkungsgrad eines Stirlingmotors beträgt jedoch nur 33 % und liegt damit deutlich unterhalb dem von anderen Wärmekraftmaschinen, die in BHKW eingesetzt werden (z.B. Dieselmotoren 40 bis 50 %).

Der Stirlingmotor kann auch als Kältemaschine oder als Wärmepumpe eingesetzt werden. Dabei wird der Stirlingmotor mechanisch angetrieben und transformiert Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus.

## Dampfturbinen

Prozessdampf wird häufig auf einem Druckniveau (z.B. 3 bar) benötigt, das weit unterhalb des Dampfdruckes in den Kesselanlagen (z.B. 17 bar) liegt. Um das Enthalpiegefälle des gespannten Dampfes auf das typische Druckniveau z.B. in der Stoffaufbereitung sowie in den Trockenzylindern (Kontakt Trocknung) der Papiermaschine zu nutzen, bietet sich bei bestehenden Dampfkreisläufen gegebenenfalls die Nachrüstung von einer einstufigen Gegendruck-Dampfturbine an. Diese Gegendruckturbinen werden in einem Leistungsbereich von unter 100 bis 2000 kW angeboten (Spilling, Dresser-Rand, Stork).

### 3.3.5 Druckluftversorgung

Ein erhebliches Energieeinsparpotenzial liegt in den Druckluftnetzen vieler Unternehmen. Druckluft zählt zu den teuersten Energieformen und birgt oft große Einsparpotenziale vor allem aus folgenden Gründen:

- Leckagen bleiben unbemerkt oder unbeachtet
- die Abwärme der Kompressoren bleibt ungenutzt
- fehlende Kompressorsteuerung sowie
- zu hohes Druckniveau, daher hohe Druckverluste.

Druckluft wird in der Papierindustrie vor allem als Mess-, Steuer- und Regelluft verwendet, aber auch zum Transfer der Papierbahn oder in der Stoffaufbereitung (Flotation) eingesetzt. Darüber hinaus dient Druckluft nach Bahnrisen häufig zum Entfernen von Produktresten aus der Trockenpartie einer Papiermaschine.

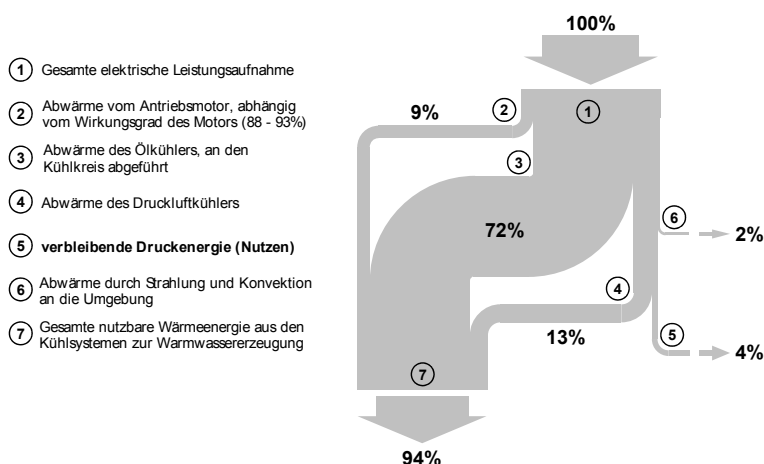
Zur Druckluftherzeugung werden vorwiegend Kolben-, Schrauben- oder Turbokompressoren eingesetzt. Weit verbreitet ist in der Papierindustrie der Einsatz von Schraubenkompressoren.

Der Umwandlungswirkungsgrad ist bei der Druckluftherzeugung äußerst gering. **Abbildung 3-58:** zeigt, dass letztlich nur etwa 4 % der eingesetzten elektrischen Energie in Form von Druckenergie zur Verfügung steht. Der Rest wird in Wärme umgewandelt, die jedoch mit geeigneten Wärmeübertragern zum großen Teil z.B. zur Hallenbeheizung oder Warmwasserbereitung genutzt werden kann.

Werden z.B. Schraubenkompressoren mit Öleinspritzung verwendet, so führt das Öl ca. 72% der zugeführten Energie als Wärme ab. Diese Energie kann zurückgewonnen werden, indem das Öl über einen Wärmetauscher geführt und Heizungswasser auf bis zu 70°C erwärmt wird.

Für eine wirtschaftliche Druckluftherzeugung ist die Anpassung des Netzdrucks und der Kompressorfördermengen an die jeweiligen betrieblichen

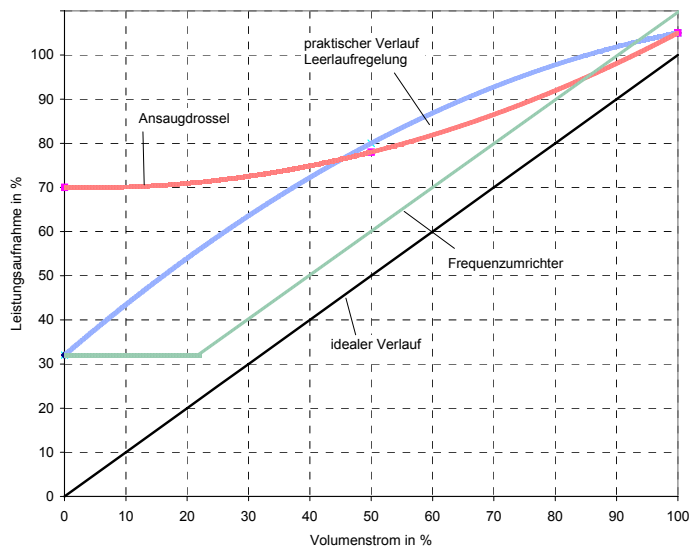
Erfordernisse notwendig. Eine Absenkung des Betriebsdruckes von 8 bar auf 7 bar verringert z.B. den elektrischen Energiebedarf um etwa 6 %. Bei deutlicher voneinander abweichenden Betriebsdrücken einzelner Anlagen kann die Aufstellung mehrerer dezentraler Kompressoren mit kleineren Netzen auf unterschiedlichen Druckniveaus wirtschaftlich sinnvoll sein.



**Abbildung 3-58: Energieflussdiagramm bei der Druckluftherzeugung**

Der Betrieb großer Produktionsanlagen verursacht oft stoßartig schwankende Abnahmemengen aus dem Druckluftnetz. Dies ist in der Papierindustrie beispielsweise bei einem Riss der Papierbahn der Fall, der mehrmals arbeitstäglich vorkommen kann. Die Folge sind häufige An- und Abschaltvorgänge bzw. ein ständiger Wechsel zwischen Last- und Leerlaufbetrieb der Kompressoren. Beides sollte im Sinne einer effizienten Druckluftherzeugung vermieden werden. Die Installation ausreichend dimensionierter Speicherbehälter bzw. großzügig ausgelegter Druckluftleitungen hat eine Vergleichmäßigung des Kompressorbetriebs zur Folge. Oft ist der kombinierte Einsatz von zwei bis drei kleineren Kompressoren dem eines großen Kompressors vorzuziehen. Eine Alternative hierzu bieten moderne drehzahlgeregelte Kompressoren, deren Förderleistung automatisch dem tatsächlichen Druckluftbedarf angepasst wird. Die Entscheidung, wie die Druckluftherzeugung im Einzelfall zu gestalten ist, bedarf einer sorgfältigen Prüfung.

**Abbildung 3-59:** zeigt die Leistungsaufnahme von Schraubenverdichtern mit unterschiedlichen Regelprinzipien. Zu erkennen ist, dass unterhalb eines Kompressorlastungsgrades von etwa 85 % des Fördervolumenstroms die Drehzahlregelung durch einen Frequenzumrichter die energetisch günstigste Variante ist. Bei darüber liegenden Auslastungswerten ist der Einsatz einer Ansaugdrosselung zu empfehlen. Mit modernen drehzahlgeregelten Kompressoren können Energieeinsparungen von bis zu 35 % gegenüber herkömmlichen taktenden Kompressoren erreicht werden.



**Abbildung 3-59: Leistungsaufnahme bei verschiedenen Schraubenverdichterregelungen**

### Konditionierung Druckluft

Die Verdichtung von Luft ist mit einer Temperaturerhöhung verbunden. Die Kondensationstemperatur (Taupunkt) der Druckluft – d.h. die Temperatur, bei der die relative Luftfeuchtigkeit 100 % beträgt – ist abhängig vom Druck und wird durch die Verdichtung angehoben. Bei der Abkühlung der Druckluft im Leitungsnetz kann diese Temperatur unterschritten werden und die enthaltene Luftfeuchtigkeit beginnt zu kondensieren. Dies kann Korrosion in den Rohren und ggf. Funktionsstörungen der angeschlossenen Verbraucher verursachen. Daher sollte im Anschluss an die Kompression eine Drucklufttrocknung durchgeführt werden. Hierfür stehen verschiedene Methoden zur Verfügung:

Die Druckluft wird oft mit einer Kälteanlage gekühlt, wodurch bei Unterschreitung des Taupunktes die Feuchtigkeit auskondensiert und abgeschieden werden kann. Der erreichbare Drucktaupunkt von etwa 3 °C ist in der Regel ausreichend.

Die Feuchtigkeit wird der Druckluft bei der Adsorptionstrocknung aufgrund von Oberflächenadsorption durch ein Trockenmittel entzogen, welches regelmäßig (warm oder kalt) regeneriert wird. Je nach Verfahren sind Drucktaupunkte von -30 bis -80 °C erreichbar.

Bei der Absorptionstrocknung wird die Feuchtigkeit durch eine chemische Reaktion vom Absorptionsmittel aufgenommen. Je nach eingesetztem Mittel ist eine externe Regeneration möglich. Es können sehr niedrige Restfeuchten erreicht werden.

Unter Berücksichtigung der Betriebskosten sind warmregenerierte Adsorptionstrockner mit Wärmerückgewinnung die kostengünstigste Variante, gefolgt von den Kältetrocknern.

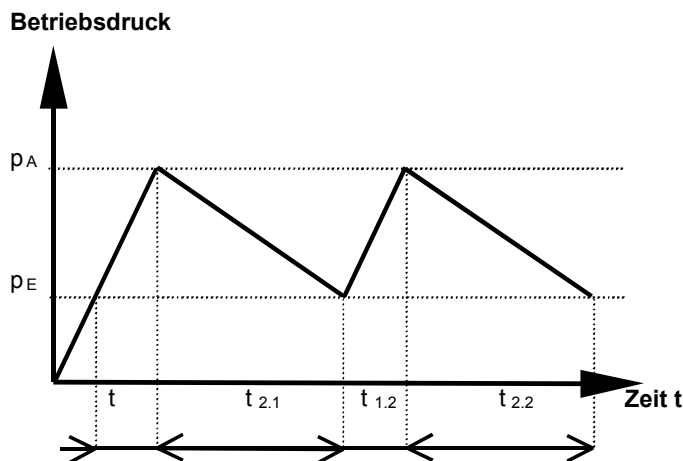
Je kühler die vom Verdichter angesaugte Außenluft ist, um so höher ist die Luftdichte und um so geringer der Energieaufwand zur Erzeugung des gewünschten Betriebsdrucks. Die vom Kompressor angesaugte Luft sollte daher so kühl wie möglich sein. In der kalten Jahreszeit bietet sich Außenluft an, im Sommer dagegen sollte die Luft eher aus kühlen Keller-

räumen o.ä. angesaugt werden. Dementsprechend sind umschaltbare Ansaugkanäle aus energetischer Sicht empfehlenswert.

### Wartung

Druckluftnetze sollten regelmäßig gewartet werden. Flexible Schläuche und die verschiedenen Verbindungsstellen der Netzkomponenten altern und neigen im Laufe der Zeit zu Undichtigkeiten, die sich jedoch bei Betriebsstillstand akustisch leicht orten und beheben lassen.

Die Durchführung eines Aufpumpversuches bei abgeschalteten Druckluftverbrauchern kann Aufschluss über das Maß der Netzleakagen liefern. Dazu wird ein Kompressor mit bekannter Fördermenge gestartet. Bei Erreichen des eingestellten maximalen Netzdruckes ( $p_A$ ) schaltet er in den Leerlauf. Infolge der Undichtigkeiten fällt der Druck im Netz allmählich ab, bis der Kompressor bei Erreichen des Einschaltdruckes ( $p_E$ ) wieder auf Lastbetrieb schaltet und erneut zu fördern beginnt. Die Be- und Entlastungszeiten ( $t_1$  und  $t_2$ ) werden mehrmals gemessen und gemittelt. Der Zusammenhang von Netzdruck und Zeit ergibt dann ein charakteristisches Sägezahnprofil, aus dem sich, wie in **Abbildung 3-60**: dargestellt, die mittlere zeitliche Leckagemenge bestimmen lässt.



**Abbildung 3-60: Bestimmung der Leckagemenge durch einen Aufpumpversuch**

In **Tabelle 3-7** sind die Kosten, die durch Leckageverluste im Druckluftnetz entstehen können, exemplarisch aufgeführt. Selbst in einem gut gewarteten Druckluftnetz ist mit Leckageverlusten von 5 bis 10 % zu rechnen. In der Praxis können die Leckageverluste durchaus 30 % und mehr betragen.

**Tabelle 3-7: Kosten aufgrund von Undichtigkeiten im Druckluftnetz bei 7 bar Netzdruck, einem Strompreis von 7,5 ct/kWh und 8.000 h/a Netzbetrieb**

Lochdurchmesser mm	Luftverlust (7 bar Netzdruck) m <sup>3</sup> /h	Kompressorleistung kW	Resultierende Stromkosten €/a
1	4,5	0,3	180,-
3	40,1	3,1	1.860,-
5	111,4	8,3	4.980,-
10	445,7	33,0	19.800,-

Der maximale Druckabfall in der Leitung zwischen Kompressor und Anschlüssen sollte auch bei größeren Netzen nicht mehr als 0,1 bar und an den angeschlossenen Armaturen bzw. dem sonstigen Anschlusszubehör nicht mehr als 0,9 bar betragen

Während des Betriebes sollte darauf geachtet werden, alle Absperrventile vollständig zu öffnen, um Druckverluste in den Ventilen zu minimieren. Querschnittsverengungen bei Leitungsverbindungen und Knicke in flexiblen Gewebesläuchen sind ebenfalls zu vermeiden. Bereits bei der Planung von Druckluftleitungen bzw. -netzen sollte daher auf ausreichende Leitungsquerschnitte – auch im Hinblick auf einen zukünftigen Anstieg des Druckluftbedarfs im Betrieb – geachtet werden. Die Rohrdimensionierung kann auf der Basis von Näherungsformeln, Tabellen, Nomogrammen oder speziellen Rechenschiebern erfolgen. Hersteller von Druckluftanlagen und Rohrarmaturen sowie unabhängige Planungsbüros führen häufig kostengünstige Analysen der Leitungssysteme durch.

Eine gute und übersichtliche Zusammenfassung der physikalischen und thermodynamischen Grundlagen der Druckluftherzeugung sowie Informationen zum rationellen Umgang mit Druckluft sind auf der Homepage der Kampagne „Druckluft effizient“ (<http://www.druckluft-effizient.de>) zu finden.

Eine weitere gute Möglichkeit, die Druckluftkosten auf einem niedrigen Niveau zu halten, ist der Abschluss eines Contractingvertrages. Vergleichbar dem Contracting für andere Energiequellen wird die Druckluftversorgung an einen externen Betreiber übergeben, der auch für die erforderlichen Wartungsarbeiten sorgt. Auch notwendige Anschaffungen für eine effiziente Druckluftversorgung werden durch den Lieferanten finanziert. Durch den festen, volumenbezogenen Bezugspreis pro m<sup>3</sup> Druckluftbezug erhält der Betreiber der Papierfabrik eine belastbare Planungsgrundlage und es liegt im Interesse des DL-Versorgers, den Energieaufwand zu minimieren.

### 3.3.6 Beleuchtung

Die Energiekosten für Beleuchtung betragen in der Industrie oftmals 10 bis 20% des Gesamtstromverbrauchs. Zum Teil lassen sich diese Kosten nach Bedarfsanalyse unter Einsatz geeigneter Technologien um bis zu 80% reduzieren. Der Markt bietet hierfür unterschiedliche Beleuchtungskonzepte an, die eine Anpassung auf den jeweiligen Anwendungsfall ermöglichen [3-47, 3-49].

Bekannt sind vor allem konventionelle Glühlampen und Halogenlampen. Konventionelle Glühlampen haben mit ca. 1.000 Stunden die kürzeste Lebensdauer aller Leuchtmittel und wandeln nur rund 5% der eingesetz-

ten Energie in Licht um, der Rest geht in Form von Wärme verloren. Halogenlampen weisen mit ca. 3.000h eine etwa dreimal so lange Lebensdauer auf wie Glühlampen, ihre Effizienz ist um ca. 10% bis 30% größer als die von Glühlampen. Dennoch sollte ihr Einsatz auf Dekorations- und Ausstellungszwecke beschränkt bleiben.

### **Kompaktleuchtstofflampen**

Kompaktleuchtstofflampen (sog. Energiesparlampen) sind verkleinerte, in der Konstruktion angepasste Leuchtstofflampen mit Leistungen zwischen 4 und 55 W.

Durch ihre Bauart mit Schraubsockel sind sie prädestiniert, herkömmliche Glühlampen zu ersetzen, da sie bei gleicher Lichtleistung eine Energieersparnis von bis zu 80% ermöglichen. Mit 8.000 – 10.000 h Lebensdauer sind sie darüber hinaus für den Dauerbetrieb ausgelegt.

Ob nun Kompaktleuchtstofflampen mit integriertem oder separatem elektronischem Vorschaltgerät (EVG) eingesetzt werden, hängt stark vom Einsatzfall und der anvisierten Lebensdauer ab, da die Lebensdauer von EVG für den industriellen Einsatz jene der Lampen überschreitet. [3-30,3-31]

### **Leuchtstofflampen**

Die röhrenförmigen Leuchtstofflampen bieten im Vergleich zu Kompaktleuchtstofflampen eine weitere Steigerung der Energieeffizienz. Die Lebensdauer liegt in Verbindung mit einem EVG bei ca. 12.000 h.

Die neueren und dünneren T5-Leuchtstoffröhren nehmen gegenüber den älteren und dickeren T8-Röhren etwa 7 W elektrische Leistung weniger auf. Erhältlich sind auch Adapterlösungen, welche den Einbau der kürzeren T5-Röhren in eine T8-Fassung ermöglichen.

In Kombination mit elektronischen Vorschaltgeräten wird das unerwünschte Flackern der Leuchtstofflampen verhindert und die Lebensdauer auf bis zu 24.000 h angehoben.

Falls der Austausch einer auf T8-Röhren basierenden Beleuchtungsanlage durch T5-Leuchtstofflampen nicht möglich ist, sollte der Einsatz von T8-Dreibandleuchtstoffröhren mit elektronischem Vorschaltgerät erwogen werden. Die Kombination ermöglicht eine Energieersparnis von 20 – 25% gegenüber der Standardversion. [3-30,3-31]

### **Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen**

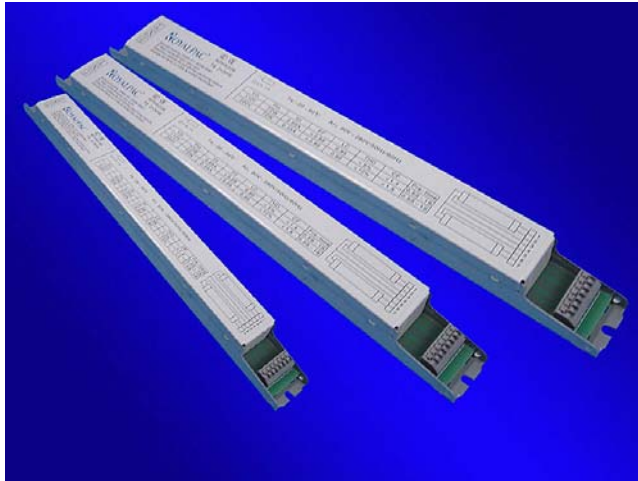
Der Betrieb von Leuchtstofflampen ist nur mit Vorschaltgeräten möglich.

Elektronische Vorschaltgeräte weisen im Vergleich zu den sogenannten konventionellen Vorschaltgeräten geringere Eigenverluste auf und sollten daher bevorzugt eingesetzt werden.

Die Energieersparnis ist erheblich und um bis zu 20% pro Lampe geringer als beim Einsatz von konventionellen Vorschaltgeräten, vorausgesetzt, die jährliche Betriebszeit beträgt mehr als 1.000 h.

Ein weiterer Vorteil von elektronischen Vorschaltgeräten ist die Dimmbarkeit und die Reduzierung des Stroboskopeffektes, der gerade bei rotierenden Bauteilen eine ernstzunehmende Gefahr darstellen kann. [3-30, 3-31]





**Abbildung 3-61: elektronische Vorschaltgeräte (Bildquelle: Royalpac)**

### **Hochdruck-Entladungslampen**

Die effizientesten Bauarten der Hochdruck-Entladungslampen sind die Halogen-Metall dampflampen und die Natriumdampf-Hochdrucklampen.

Für den Betrieb von Natriumdampf- (50 – 1.000 W) und Halogen-Hochdrucklampen (bis ca. 2.000 W) sind induktive oder elektronische Vorschaltgeräte erforderlich.

Hochdruck-Entladungslampen benötigen eine Hochfahrphase (bis zu 5 min) zwischen dem Zünden und dem Erreichen des maximalen Lichtstroms.

Der Einsatz neuer Vorschaltgeräte ermöglicht auch das Wiedorzünden einer gerade ausgeschalteten Lampe („hot restrike“), ohne, wie bei älteren Vorschaltgeräten der Fall, auf eine Abkühlung des Brenners warten zu müssen. Die nicht „hot restrike“ fähigen Lampen sollten daher in sicherheitsrelevanten Bereichen nicht eingesetzt werden.

Halogen-Metall dampflampen oder Natriumdampf-Hochdruck-lampen mit Leistungen von 250 W bis 400 W ermöglichen gegenüber den Hochdruck-Quecksilberdampflampen Einsparungen zwischen 15 und 40 % und haben eine um etwa 25 % höhere Lebensdauer (8.000 gegenüber 6.000.h).

Hochdrucklampen behalten ihre Effektivität vor allem dann, wenn eine regelmäßige Reinigung der Reflektoren erfolgt.

Hochdruck-Metallhalogendampflampen sind eine Weiterentwicklung der Hochdruck-Quecksilberdampflampe und haben eine hohe Lichtausbeute.

Sie benötigen für die gleiche Lichtleistung etwa 20% der Energie einer Halogenlampe.

Der Nachteil von Hochdruck-Metallhalogendampflampen ist die verhältnismäßig lange Hochfahrphase von bis zu 15 min.

Auch bei diesem Lampentyp finden hot restrike fähige Vorschaltgeräte Verwendung, die eine sofortige Wiedorzündung ohne Abkühlphase nach einem Ausschaltvorgang ermöglichen.

Hochdruck-Metallhalogendampflampen gibt es in verschiedenen Leistungsklassen von 75 bis 10.000 W. Sie lassen sich äußerst vielseitig einsetzen [3-30,3-31].

### **Beleuchtungssteuerung und -konzeption**

Der Einsatz hocheffektiver Beleuchtungssysteme ist nur in Kombination mit einer bedarfsgerechten Beleuchtungssteuerung sinnvoll.

Jahreszeitenabhängig können unter Einbeziehung des Angebotes von Tageslicht Einsparungen von 40% (Winterhalbjahr) bis zu 75% (Sommerhalbjahr) realisiert werden.

Mit entsprechenden Systemen (Schalter, optische und Infrarotsensoren, tageslichtabhängige Steuerungen von Lichtbändern, Zeitschaltuhren etc.) ist es möglich, das vorhandene Tageslicht mit künstlichem Licht zu ergänzen.

Dies ermöglicht eine Einsparung in Tagungsräumen von bis zu 60%, an Verkehrsflächen bis zu 50%.

Selbst in Räumen, in denen permanent Menschen anwesend sind, lässt sich bis zu 30% Beleuchtungsenergie sparen.

Das weitere Augenmerk sollte auf die Leuchten selbst gerichtet sein. Eine frei aufgehängte Lampe bewirkt, dass nur ein Teil des Lichtes auf die zu erhellenden Flächen trifft. Der Einsatz nachrüstbarer, aufsteckbarer Reflektoren kann hier zu einer erheblichen Verbesserung führen. Das Licht wird gezielt in die Bedarfsbereiche gelenkt und ermöglicht insbesondere bei doppelflämigen Leuchten eine Halbierung der Lampenzahl. Einbauleuchten mit opaler Abdeckung haben Wirkungsgrade, die bei nur 50% liegen. Der Ersatz durch Parabol-Spiegelraster-Leuchten führt zu einer Steigerung des Wirkungsgrades (Lichtausbeute) auf gut 70%. Auch eine regelmäßige Reinigung der Reflektoren wirkt sich erhaltend auf die Lichteffizienz aus. [3-30,3-31]



**Abbildung 3-62: Energiespar-Aufsteckreflektor Cosino<sup>3</sup> für T8-Leuchtstofflampe (Bildquelle: Negawatt GmbH)**

### 3.3.7 Elektrische Antriebe

In Europa werden Drehstrommotoren im Leistungsbereich zwischen 1,1 und 90 kW (ausschließlich 2- und 4-polige Motoren) in drei sogenannte Effizienzklassen („eff-Klassen“ eff = efficiency) eingeteilt. Dabei entspricht „eff1“ der höchsten Effizienzkategorie. Viele heute auf dem Markt befindliche Standard-Antriebe entsprechen mit „eff3“ der ineffizientesten Klasse. Nachfolgende Abbildung 3-63 zeigt die Wirkungsgradunterschiede vor allem im unteren Leistungsbereich.

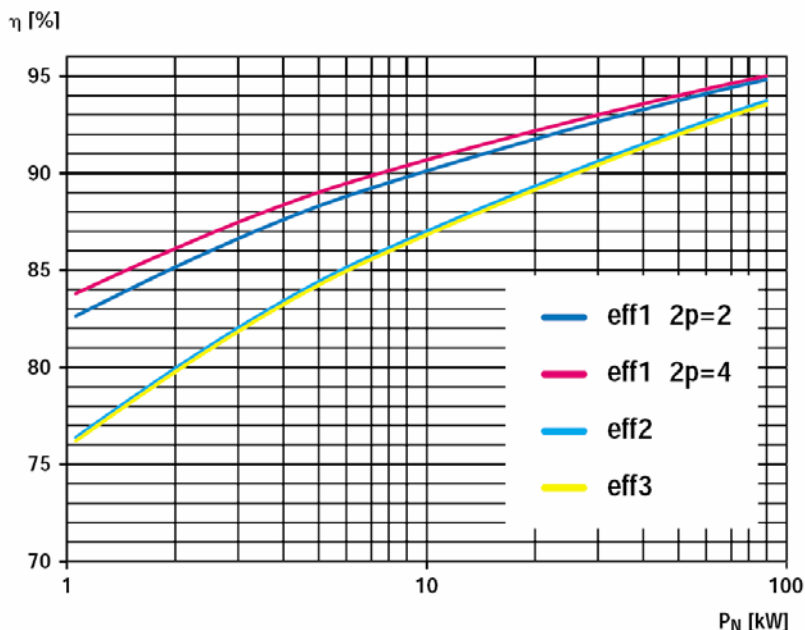


Abbildung 3-63: Wirkungsgrad Drehstrommotoren nach Effizienzklassen [3-34]

Es wird empfohlen, bei Neuanschaffungen Motoren der höchsten Effizienzkategorie zu beschaffen. Rechenbeispiele zeigen, dass in der Regel bereits ab jährlichen Betriebszeiten von mehr als 3.000 h Paybackzeiten von weniger als zwei Jahren für die Mehrkosten von Hocheffizienzmotoren erreicht werden. Die Investitionen für energieeffiziente Antriebe liegen um 15 bis 30% oberhalb von denen von Standardantrieben. Da langfristig mit steigenden Energiekosten zu rechnen ist und die übliche Motorlebensdauer bei 12 – 15 Jahren liegt, sind die Investitionsvolumina zunehmend von untergeordneter Bedeutung.

Eine verlustintensive Kraftübertragung oder eine veraltete oder gar nicht vorhandene Drehzahlregelung machen allerdings eine möglicherweise hohe Motor-Effizienz schnell zunichte und erhöhen dadurch die Energiekosten erheblich.

Bei Antriebsleistungen unter 10 kW und nur kurzem Antriebsbedarf werden die weniger effektiven Gleich- und Wechselstrommotoren gerne eingesetzt, weil sich der Einsatz von hocheffizienten Drehstrom-Asynchron- oder Synchronmotoren erst ab höheren Leistungen und längeren Betriebsdauern lohnt.

Elektrische Antriebsenergie kann überall dort eingespart werden, wo der aktuell notwendige Bedarf von den Auslegungswerten abweicht. Zu groß dimensionierte Motoren arbeiten in einem Bereich mit schlechtem Wirkungsgrad und niedrigem Leistungsfaktor. Daher ist bei der Anschaffung

von Motoren stets auf eine Dimensionierung zu achten, die auf die tatsächlichen Bedürfnisse abgestimmt ist. Wenn absehbar ist, dass die Leistungsanforderungen auf Dauer geringer sind, sollten überdimensionierte Antrieb gegen Modelle einer kleineren Leistungsklasse ausgetauscht werden. Da auch überdimensionierte Elektroantriebe im Allgemeinen eine hohe Lebensdauer aufweisen und dementsprechend lange im falschen Lastbereich betrieben werden können, ist der energiewirtschaftliche Schaden entsprechend hoch.

Liegt der Leistungsbedarf unter 1/3 der Nennleistung, kann der Wirkungsgrad in einigen Fällen durch einfaches Umklemmen der Motorwicklungen verbessert werden. Bei dieser Umschaltung von Dreieck- zu Sternschaltung gehen das Drehmoment und die Nennleistung des Motors auf 1/3 zurück, so dass der Antrieb wieder mit günstigem Wirkungsgrad arbeitet. Allerdings ist zu prüfen, ob der Motor noch das geforderte Anlaufmoment erbringen kann.

Viele Anlagen im Produktionsprozess laufen nicht kontinuierlich mit konstanter Leistung, sondern müssen in Abhängigkeit vom Produktionsprozess betrieben werden. In vielen Fällen können die Antriebsmotoren zur Energieeinsparung zeitweilig mit geringerer Leistung betrieben werden, ohne die Produktion zu beeinträchtigen.

Mit einem drehzahlgeregelten Motor kann diese Energie eingespart werden. Vor allem beim Antrieb von Arbeitsmaschinen, deren Produktions- oder Förderleistung über die Antriebsdrehzahl des Motors geregelt werden kann, bietet sich die Drehzahländerung zur Einsparung elektrischer Energie an.

Weil insbesondere Pumpen und Ventilatoren bei der Auslegung häufig überdimensioniert werden, sollten gerade deren Antriebe überprüft werden. Mit einem drehzahlgeregelten Motor kann hier oft viel Energie eingespart werden. Die Leistungsaufnahme  $P$  von Pumpen und Ventilatoren hängt unmittelbar über die Beziehung

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

mit der Drehzahl  $n$  und damit dem Fördervolumen zusammen. Daraus ergibt sich, dass schon kleinere Drehzahlanpassungen zu erheblichen Einsparungen führen können.

Arbeitsmaschinen, die mit variabler Drehzahl betrieben werden müssen, können entweder von einem Motor mit konstanter Drehzahl über eine Kupplung (z.B. Wirbelstromkupplung) oder direkt von einem drehzahlgeregelten Motor angetrieben werden.

Der Antrieb über eine Kupplung ist dabei mit hohen Energieverlusten verbunden. Bei niedrigen Drehzahlen wird die von der Antriebsmaschine nicht benötigte Energie in der Kupplung in Abwärme umgewandelt. Auf solche auf Kupplungssysteme zur Drehzahlregulierung (Wirbelstromkupplungen) sollte verzichtet werden.

Polumschaltbare Motoren erlauben eine Drehzahländerung in zwei oder mehr Stufen. Üblich sind Drehzahlverhältnisse von 1 zu 1,5 oder 1 zu 2 wie zum Beispiel bei einem Motor mit den zwei Drehzahlstufen 1.500 und 1.000 U/min.

Mit dieser Abstufung kann z.B. der Volumenstrom einer Pumpe auf 66 % und gleichzeitig der Energiebedarf auf 30 % vom Volllastbetrieb gesenkt werden.

Allerdings muss hierbei bedacht werden, dass der Wirkungsgrad von polumschaltbaren Motoren im Vergleich zu einstufigen Motoren mit gleicher Leistung etwa 6 %-Punkte niedriger liegt, so dass der Einsatz von polumschaltbaren Motoren nur lohnenswert ist, wenn die Benutzungsdauer bei geringer Drehzahl genügend groß ist.

Ein verlustarmes Verfahren zur stufenlosen Drehzahlverstellung bietet die Speisung des Motors mit variabler Frequenz. Dazu wird ein Frequenzumrichter zwischen Motor und dem elektrischen Netz geschaltet, der den Motor mit einer variablen Frequenz versorgt. Die Drehzahl des Motors ändert sich in Abhängigkeit von dieser Frequenz.

Die durch diesen Umrichter zusätzlich verursachten Verluste sind gering, die Wirkungsgradverschlechterung beträgt in der Regel weniger als 5 % und kann damit gegenüber den erzielbaren Einsparungen meist vernachlässigt werden. Außerdem können diese Verluste durch den Einsatz von Sondermotoren für den Umrichterbetrieb reduziert werden [3-35, 3-43].

## **3.4 Organisatorische Maßnahmen**

In den meisten Betrieben besteht grundsätzlich die Möglichkeit, den Energiebedarf durch organisatorische und gering-investive Maßnahmen zu senken. Im Folgenden sind einige Maßnahmen aufgeführt, die zum Teil sogar keinerlei Investitionen erfordern.

### **3.4.1 Planung und Auslegung von Anlagen**

Bei der Planung und Auslegung können bereits zu einem frühen Zeitpunkt und mit relativ geringem Aufwand die Voraussetzungen für niedrige Betriebskosten geschaffen werden. Oft werden jedoch Maßnahmen wie frequenzgesteuerte Motoren, Überwachungssensoren oder Wärmerückgewinnung zugunsten niedrigerer Investitionen nicht berücksichtigt. Ein weiteres Hemmnis ist die oft größere Komplexität der Planungsaufgabe, die sich durch die Berücksichtigung von Zusatzanlagen ergibt.

### **3.4.2 Wärme/Heizung**

Bei der Produktionsplanung sollte eine gute Auslastung der Anlagen vorausgesetzt werden. Eine hohe Auslastung und auf den Bedarf angepasste Dimensionierung der Versorgungsanlagen senkt bei thermischen Prozessen die Bereitschaftsverluste.

Die regelmäßige Wartung und Überprüfung der Einstellung von Brennern etc. sowie die regelmäßige Reinigung von Heizkörpern, Lüftungsgittern, Filtern usw. gewährleisten einen optimalen und sparsamen Betrieb.

Zur Senkung des Heizwärmebedarfs sollten Produktionshallen etc. (insbesondere im Winter) kontrolliert be- und entlüftet werden. Durch eine gezielte Wärmerückgewinnung können bis zu 75 % des Wärmebedarfs ersetzt werden. Ebenso tragen Doppeltore oder automatisch schließende Hallentore, intakte (und geschlossene) Fenster sowie eine dichte Gebäudehülle zur Energieeinsparung bei.

Bei den meisten elektrisch angetriebenen Anlagen fällt Abwärme in nennenswertem Umfang an. Hier sind aufgrund ihrer häufig hohen Laufzeiten beispielsweise Kompressoren zu nennen. Die abzuführende Wärme kann z.B. zu Heizzwecken in Luftheizungen bzw. konventionellen Wasserheizungen oder allgemein zur Vorwärmung von Prozess- oder Waschwasser eingesetzt werden.

### **3.4.3 Klimatisierung**

Klimatisierte Bereiche sollten ebenso wie beheizte Bereiche soweit wie möglich geschlossen sein. Zugluft sollte z.B. durch selbsttätig schließende Türen, Streifen-Vorhänge o.ä. vermieden werden. Eine Reduzierung des Krankenstandes kann somit gleichzeitig erzielt werden. Für den Erfolg der Maßnahmen ist der bewusste Umgang mit Kunststoffvorhängen und Rolltoren etc. durch die Belegschaft erforderlich. Oft sind automatische Steuerungen (Lichtschranken, Fernbedienung durch Gabelstaplerfahrer) sinnvoll, speziell bei häufiger Nutzung durch Fahrzeuge.

### **3.4.4 Senkung des Strombedarfs**

Überwiegend außerhalb der Produktionszeiten sollten nicht benötigte Anlagen und Beleuchtung abgeschaltet werden. Dies kann manuell,

besser jedoch automatisch über die Gebäudeleittechnik oder über einfache Zeitschaltuhren bzw. Dämmerungsschalter erfolgen.

Nachgeschaltete Anlagen bzw. Sekundäranlagen (z.B. Trocknergebläse etc.) sollten bei Stillstand der jeweiligen Produktionsanlagen ebenfalls automatisch abgeschaltet werden.

Durch organisatorische oder steuerungstechnische Maßnahmen sollte sichergestellt werden, dass Leerlaufzeiten von Motoren und Anlagen minimiert werden, z.B. zu Schichtbeginn oder Schichtwechsel.

Die regelmäßige Wartung und Kontrolle der technischen Anlagen (Kompressoren, Lüftungs- und Absauganlagen etc.) sowie die regelmäßige Reinigung der Beleuchtungseinrichtungen (Reflektoren) gewährleisten einen optimalen und sparsamen Betrieb.

Die elektrische Beheizung von Prozessen (z.B. Kalandern, Warmwassererzeugung) sollte nach Möglichkeit vermieden werden. Es ist wenig sinnvoll, zunächst in einem Kraftwerk mit einem verhältnismäßig niedrigen Wirkungsgrad aus Wärme Strom zu erzeugen, und diesen anschließend mit weiteren Verlusten wieder in Wärme umzuwandeln. Zudem ist die Strom teurer als Gas oder Heizöl.

Elektrische Beheizung ist nur dann energetisch sinnvoll, wenn beim Einsatz von konventionellen Heizanlagen hohe Stillstands-, Bereitschafts- oder Transportverluste zu erwarten sind. Dies ist z.B. bei Anlagen in entlegenen Betriebsbereichen oder diskontinuierlichen und selten betriebenen Prozessen der Fall.

Viele ältere Motoren und Antriebe sind überdimensioniert. Im Rahmen von Ersatzinvestitionen sollte darauf geachtet werden, dass richtig dimensionierte Motoren eingesetzt werden. In vielen Fällen eignen sich auch drehzahlgeregelte oder mehrstufige Motoren, Gebläse, Ventilatoren etc.

Die Optimierung des Lastprofils eines Betriebes bewirkt zwar keine Energieeinsparung, führt aber je nach Strom- oder Gasliefervertrag unmittelbar zur Kostensenkung. Bei Strom kann neben der Verlagerung von Teilprozessen in die Niedertarifzeit insbesondere ein Lastmanagementsystem zur Senkung der Lastspitzen beitragen. Möglichkeiten hierzu bieten

- die Vermeidung der Überlagerung von Lastspitzen bei diskontinuierlichen Prozessen (oft über die vorhandene SPS steuerbar),
- die Leistungsreduzierung größerer Maschinen oder
- lastabhängige Einschaltsperrungen für ausgewählte Anlagen und Maschinen (z.B. Refiner).

In vielen Betrieben sind die Lastspitzen Grundlage für die Berechnung des Leistungspreises. Durch Beachtung und Umsetzung der genannten Möglichkeiten können die Kosten für die Leistung in vielen Betrieben bedeutend gesenkt werden.

### **3.4.5 Sonstiges**

Die regelmäßige Erfassung und Auswertung der Energiedaten (z.B. Ablesung der Strom-, Gas-, Wasserzähler, der Heizölstandsanzeigen oder der Betriebsstundenzähler an Kompressoren etc.) ermöglicht das schnelle und frühzeitige Erkennen von Unregelmäßigkeiten und ungewöhnlichen Verbrauchszunahmen. Die Ursache für den Verbrauchsanstieg kann auf Grundlage der erfassten Daten leicht gefunden und anschließend beseitigt werden.

Ein Unternehmen lebt von der Motivation seiner Mitarbeiter. Das Verhalten der Mitarbeiter hat einen spürbaren Einfluss auf den Erfolg von Energiesparmaßnahmen. Daher ist es sehr zu empfehlen, das Bewusstsein jedes Einzelnen für die Bedeutung der Senkung des Energieverbrauchs innerhalb des Betriebes durch Informationsveranstaltungen und Schulungen zu entwickeln.

## **3.5 Alternativen der Energieversorgung**

### **3.5.1 Sonnenenergie**

Solarenergie steht im Prinzip im Überfluss zur Verfügung, lässt sich jedoch gerade in unseren Breitengraden nur bedingt nutzen.

Solkraftwerkskonzepte wie Parabol-Rinnen- und Turmkraftwerke mit Heliostatenfeldern sowie andere Konzentratortechnologien sind nur im Sonnengürtel der Erde wirtschaftlich einsetzbar und werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

In Frage kommen jedoch Flachkollektoren, welche die Sonneneinstrahlung zur Erzeugung von Warmwasser nutzen.

Je nach Konstruktion und der bei der Auslegung zu berechnenden durchschnittlichen jährlichen Strahlungsintensität am Standort lassen sich Warmwassertemperaturen von bis zu 90°C erreichen.

Dabei ist jedoch die Aufstellung der Flachkollektoren mit Sorgfalt zu betrachten. Je flacher die Sonnenstrahlung auf die Kollektoren trifft, umso geringer ist die Nutzleistung. Die Montage der Kollektoren auf einem Flachdach, wie es in der Papierindustrie typisch ist, erfordert eventuell eine Aufständigung der Kollektoren und verlangt eine Berücksichtigung statischer Gesichtspunkte sowie die Beurteilung der Kollektoren als Windangriffsfläche. Um Streu- und Diffusionsverluste zu minimieren, müssen die Kollektorflächen regelmäßig auf Verunreinigungen hin überprüft werden.

Solarflachkollektoren machen in unseren Breiten nur in Kombination mit einem Wärmespeicher oder in Kombination mit anderen Wärmequellen Sinn, denn aufgrund der fehlenden zeitlichen Konstanz der Sonneneinstrahlung steht die Wärmeenergie nicht immer zur Verfügung, wenn eine Abnahme erfolgen soll.

Photovoltaikanlagen erlauben die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Die bereitstellbare Energie ist direkt von der Einstrahlungsintensität abhängig und steht somit nicht konstant zur Verfügung.

Der Betrieb einer Photovoltaikanlage ist also nur in Kombination mit einem Energiespeicher (Akkumulatoren) als Puffer sinnvoll, wenn eine unterbrechungsfreie Energieversorgung gewünscht wird. Die Pufferbatterien haben eine Lebensdauer von ca. 5 Jahren.

Generell ist die technische Peripherie einer Photovoltaikanlage nicht zu unterschätzen. Da die Solarzellen nur eine Gleichspannung liefern, muss in jedem Fall nach den Pufferbatterien ein Wechselrichter nachgeschaltet werden, der aus der Gleichspannung eine netztypische Wechselspannung mit passender Frequenz generiert. Damit die Sonneneinstrahlung möglichst direkt auf die licht-sensitive Fläche fällt, ist ein Aufbau einer Photovoltaikanlage nur in aufgeständerter Form mit zur Sonne geneigten Solarzellenflächen sinnvoll. Statische Gesichtspunkte bezüglich



der Gebäudestabilität und der Windlasten müssen berücksichtigt werden.

Der in der Literatur angegebene maximale Wirkungsgrad von 11 - 12% wird nur erreicht, wenn sich die Solarzellen azimuthal (in zwei Achsen) oder parallaktisch (in einer Achse) dem Sonnenstand nachführen lassen. Zudem müssen die Solarzellen regelmäßig gereinigt werden, um Streu- und Diffusionsverluste zu minimieren.

Aufgrund des geringen Wirkungsgrades der Solarzellen ist eine genaue Untersuchung hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von größter Bedeutung [3-46,3-30,3-31].

### **3.5.2 Windenergie**

Der stetige Ausbau von Windenergie in Deutschland bringt eine permanente Weiterentwicklung und Verbesserung der Technologie mit sich.

Die Ausfallraten der Anlagen sind äußerst niedrig und die Prognosen für Windströmungen in begrenzten Regionen sind deutlich genauer geworden.

Windenergie ist jedoch nur ab einer Mindestwindgeschwindigkeiten und einem Mindest-Jahreswindangebot wirtschaftlich attraktiv. Diese Parameter müssen im Vorfeld untersucht werden.

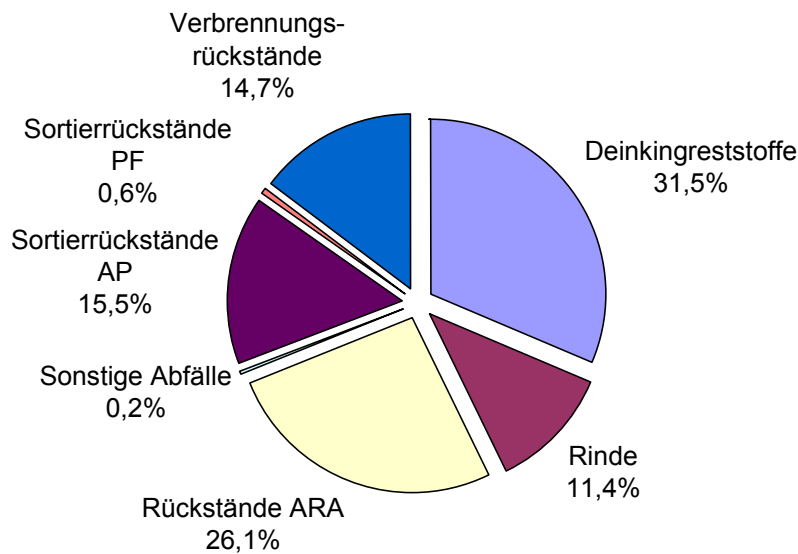
Nur, wenn die Papierfabrik in einer Region steht, in der ein zeitlich planbares Windangebot vorhanden ist, kann unter Umständen Windenergie als zusätzliche, kostengünstige Energiequelle in Betracht gezogen werden. Windenergie kann also bestenfalls eine unterstützende Form der Energieversorgung sein, welche durch andere Energieversorgungssysteme ergänzt werden muss.[3-46,3-30]

### **3.5.3 Nutzung von Biomasse**

Die energetische Verwertung von organischen Reststoffen (Biomasse) in der Papierindustrie hat folgende Vorteile:

- Reduzierung der Energiekosten für Fremdbezug und wesentlicher Beitrag zur Energieversorgung
- Reduzierung der beim Emissionshandel zu berücksichtigenden Kohlendioxidemissionen bei der thermischen Verwertung nachwachsender organischer Rohstoffe und
- Reduzierung der Entsorgungskosten für Reststoffe.

Bei der Papiererzeugung fallen Reststoffe mit überwiegend organischem Anteil an. Insgesamt beträgt der Anfall 3,8 Mio. Tonnen im Jahr [3-36]:



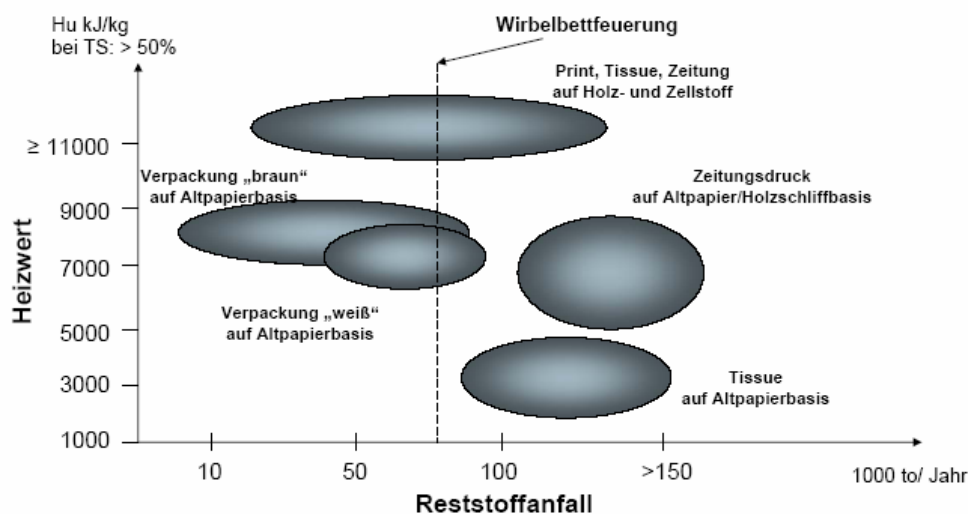
**Abbildung 3-64: Reststoffaufkommen der deutschen Papierindustrie [3-36]**

### **Schwarzlauge-Verbrennung (Zellstofferzeugung)**

Die bei der Zellstofferzeugung entstehende Schwarzlauge (Ablauge) enthält neben den Aufschlusschemikalien gelöste organische Inhaltsstoffe. Nach dem Kochprozess fällt die Ablauge mit etwa 14 bis 18 % Feststoffgehalt an und wird in einer mehrstufigen Eindampfungsanlage auf etwa 55 - 58 % (Sulfitzellstoff) bzw. 65 - 75 % (Sulfatzellstoff) eingedickt. In einem Laugenkessel wird die eingedampfte Ablauge verbrannt und Hochdruckdampf erzeugt. Mit einem KWK Prozess werden Strom und Prozessdampf für die Zellstoffherstellung bzw. eine integrierte Papierfabrik bereitgestellt. Der Brennwert der Ablauge ist hoch genug, um eine Zellstofferzeugung energetisch autark betreiben zu können. Neben Energie können aus der Ablauge des Zellstoffprozesses noch Terpentin und Tallöl gewonnen werden. Die Zellstofferzeugung ist ein komplexer, von der Papiererzeugung abgegrenzter Prozess, so dass in diesem Rahmen nicht näher darauf eingegangen werden kann.

### **Rückstände aus der Produktion**

Aus dem Prozess der Papierherstellung fallen organische Rückstände wie faserhaltige Schlämme aus der Vorreinigung und Rinden (bei integrierter Holzstofferzeugung) an. Diese werden unterteilt in feste Bioenergieträger (Rinde und Holzabfälle) und Ersatzbrennstoffe (aufbereitete Klärschlämme) [3-37]. energetische Verwertung von Produktionsrückständen ist nicht nur aus Kostengründen interessant, sondern auch aus abfallrechtlicher Sicht notwendig. Der Vollzug der Europäischen Deponierichtlinie durch die Novelle der TA Siedlungsabfall hat zur Folge, dass seit dem Jahr 2005 eine Deponierung von unbehandelten organischen Abfällen nicht mehr zulässig ist. Die Verbrennung von Produktionsrückständen erfolgt idealerweise in einem Wirbelschichtkessel oder bei kleineren Mengen in einem Etagenofen. Der Heizwert der Rückstände variiert je nach Sortenbereich und Anfallstelle.



**Abbildung 3-65: Anfallmengen und Heizwerte von Produktionsrückständen [3-38]**

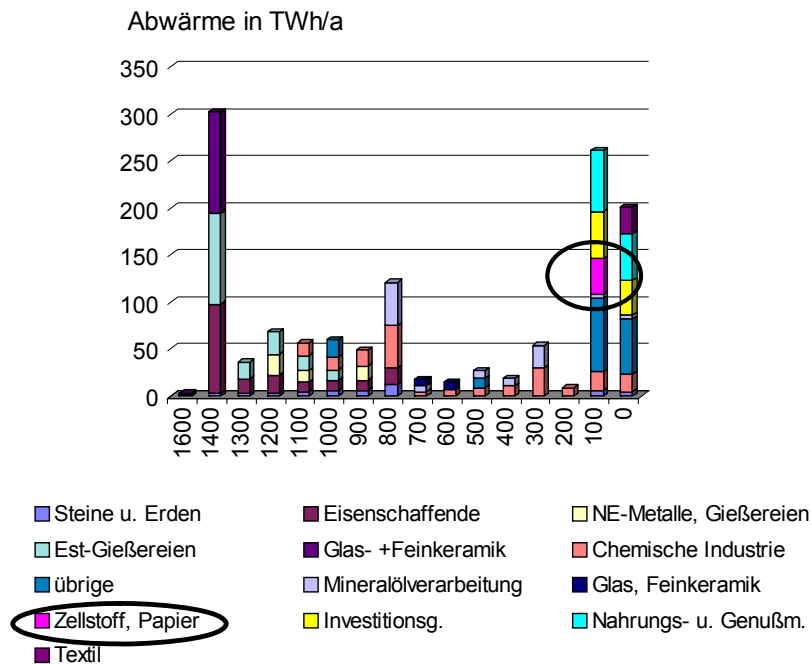
## Biogas

Bei der anaeroben Reinigung von Abwässern aus der Papierproduktion wird ein methanhaltiges Gas frei. Dieses entsteht als Stoffwechselprodukt bei der Umsetzung von Substanzen aus dem Abwasser durch in den Reaktoren enthaltene Bakterien mit dem Ziel, den CSB-Gehalt der Abwässer zu reduzieren. Eine anaerobe Abwassereinigung ist grundsätzlich bei hoch belasteten Abwässern oder hoch belasteten Teilströmen möglich, was vor allem bei Werken mit hohem Altpapiereinsatz oder integrierter Holzstofferzeugung der Fall ist. Dabei entstehen ca.  $0,35 \text{ Nm}^3$  Gas pro kg abgebautem CSB. Das Gas besteht aus ca. 70 – 80 % Methan und 20-30 % Kohlendioxid [3-39] sowie geringeren Anteilen von Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) von < 5 %. Aufgrund des  $\text{H}_2\text{S}$ -Anteils entstehen bei der Verbrennung schweflige Säure und Schwefelsäure, die Korrosionsschäden an Anlagenteilen verursachen können. Je nach Anwendungsfall, z.B. bei einer Verbrennung in einem Gasmotor, muss das Biogas entschwefelt werden. Dies erfolgt durch das konventionelle Ausstripfen mit NaOH und biologische Verfahren. Der Heizwert von Biogas liegt bei 7 bis 8 kWh/ $\text{Nm}^3$ . Durch eine effektive Nutzung des Biogases konnten beispielsweise bei einer Verpackungspapierfabrik etwa 3 bis 5 % des Energiebedarfes gedeckt werden [3-40]

Trotz des höheren Investitionsaufwandes ist eine Verstromung in einem Gasmotor der reinen thermischen Nutzung vorzuziehen. Grund sind die hohen Erlöse aufgrund der Einspeiseregulierung für Strom aus erneuerbaren Energieträgern.

### 3.5.4 Nutzung von Niedertemperaturabwärme

Niedertemperaturabwärme fällt in der Papierindustrie - wie in vielen Prozessindustrien - in großen Mengen an. Da die Temperaturen der Produktionsprozesse in der Papiererzeugung im Vergleich zu anderen industriellen Prozessen relativ niedrig sind, entsteht auch Abwärme auf einem vergleichbar niedrigen Temperaturniveau (siehe Abbildung 3-66).



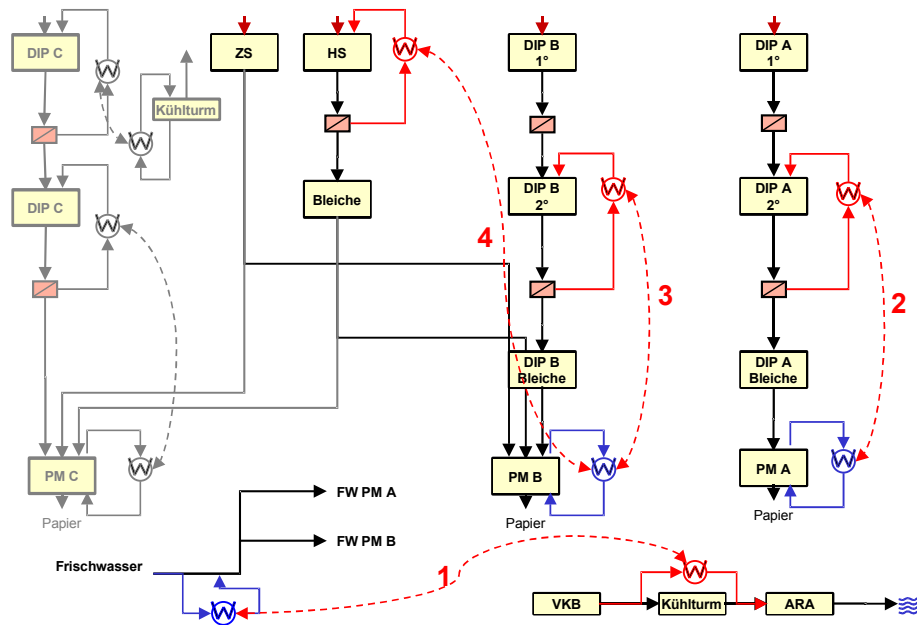
**Abbildung 3-66: Temperaturniveaus und Mengen industrieller Abwärme in Deutschland (1997) [3-41]**

Eine wirtschaftliche Nutzung bedarf einer sorgfältigen Analyse, um eine optimale Ausbeute zu gewährleisten. Die folgende Aufstellung gibt einen Überblick über die typischen Abwärmequellen und deren Temperaturniveaus.

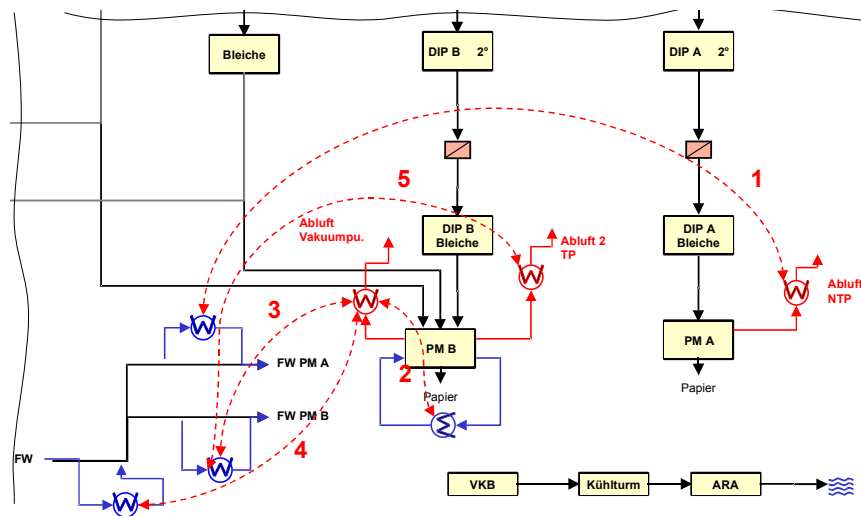
**Tabelle 3-8: Temperaturniveaus von typischen Abwärmeströmen aus der Papierproduktion [3-42]**

Abwärmestrom	Medium	Temperaturbereich
Abwasser Papiermaschine	Wasser	20 - 40 °C
Abwasser Stoffaufbereitung mit DI	Wasser	40 - 60 °C
Abwasser Stoffaufbereitung ohne DI	Wasser	30 - 50 °C
Abwasser Schleiferei / TMP Anlage	Wasser	60 - 70 °C
Abluft Produktionshalle	Luft	30 - 40 °C
Abluft Vakuumpumpen	Luft	40 - 50 °C
Abluft Vakuumbelüftung	Luft	130 - 160 °C
Abluft Trockenpartie PM	Luft	60 - 80 °C
Abluft Trockenpartie SM	Luft	100 - 140 °C

Die Nutzung von Prozesswärme und Abwärme (Wärmeintegrationsmaßnahmen) ermöglichen eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs. Dies kann durch direkte Energieeinsparungen, wie zum Beispiel durch Eliminierung von dampfbetriebenen Heizungen und durch indirekte Einsparungen wie Dampfeinsparungen in der Trockenpartie aufgrund höherer Prozesstemperaturen erreicht werden. Scheinbar widersprüchliche Zielstellungen, wie die Erhöhung der Prozesstemperatur bei gleichzeitiger Senkung der Abwassertemperatur können durch eine Optimierung des Wärmehaushaltes erreicht werden. Ein wichtiges Werkzeug zur Identifizierung von Potenzialen und Optimierung des Wärmemanagements ist die Pinchanalyse (siehe Kapitel 5.2). Ein Beispiel für die Möglichkeiten zur Verschaltung von Wärmeströmen zeigen **Abbildung 3-67** und **Abbildung 3-68**.



**Abbildung 3-67: Integrierte Wärmerückgewinnung zwischen Prozess- bzw. Wasserströmen einer Papierfabrik [3-45]**



**Abbildung 3-68: Integrierte Wärmerückgewinnung zwischen Abluft- und Wasserströmen einer Papierfabrik [3-45]**

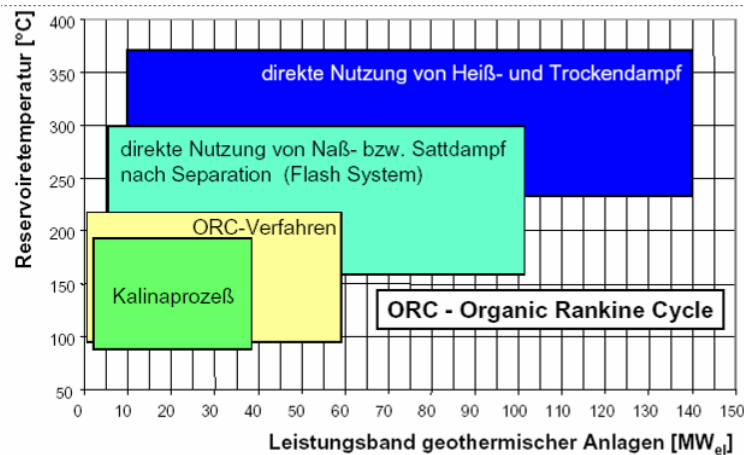
Eine interessante Nutzungsvariante ist grundsätzlich die Stromerzeugung aus Abwärme, auch wenn es bislang noch keine großtechnischen Anlagen in der Papierindustrie gibt. Grundsätzlich in Frage kommen Anlagen auf Grundlage des Organic Rankine Cycle (ORC) sowie der Kalinaprozess. Hierbei handelt es sich um Anlagen, die nach dem Prinzip des Clausius-Rankine Prozesses arbeiten, der auch als klassischer Dampfkraftprozess (Dampfturbinenprozess) bekannt ist. Statt Wasser wird jedoch ein Arbeitsmedium mit deutlich niedrigerem Siedepunkt verwendet und somit schon bei relativ niedriger Temperatur der für Dampfturbinen benötigte Arbeitsdruck erzeugt.

Ein auf Ammoniak basierender ORC kann bereits mit Temperaturen um die 100°C betrieben werden und ist damit für die Abwärmenutzung interessant. Von größter Wichtigkeit ist die Auswahl des Arbeitsmittels und dessen Anpassung an die vorherrschenden Temperaturgefälle. Zur Zeit

finden hier Pentane und Silikonöle Verwendung. Neue Entwicklungen basieren auf dem Einsatz synthetischer Arbeitsmittel. Dies ermöglicht eine Erhöhung des thermodynamischen Wirkungsgrades und damit eine verbesserte Nutzung der vorhandenen Wärmeenergie. Je nach Temperaturgefälle sind auf dem Markt Anlagen mit 1,5 MW elektrischer Ausgangsleistung erhältlich. [3-44,3-46]

Der Kalina-Prozess ermöglicht die Nutzung noch geringerer Abwärmertemperaturen (90°C) und verwendet anstatt eines reinen Arbeitsmittels Gemische (z.B. Ammoniak-Wasser), deren thermodynamische Eigenschaften sich stark von Reinstoffen unterscheiden.

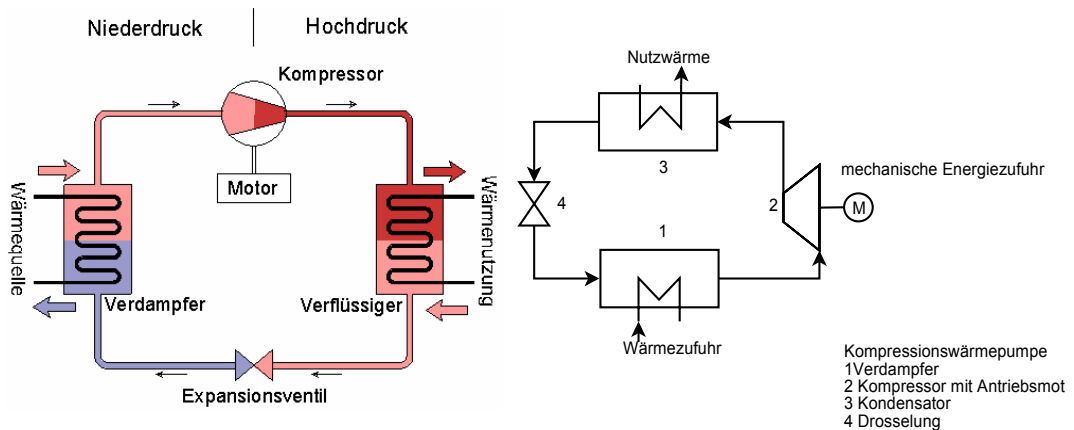
Für den Kalinaprozesses werden in der Literatur Wirkungsgrade genannt, die um 10 bis 60 % höher liegen als jene des ORC-Prozesses. Diese weit auseinanderliegenden Werte lassen sich mit dem immer noch frühen Entwicklungsstadium dieser Technologie erklären. Problematisch sind einerseits die Zersetzung von Ammoniak und andererseits die großen Wärmeübertragerflächen, die erforderlich sind. Der Kalina-Prozess wird vornehmlich im Bereich der Geothermie eingesetzt und hat bisher nur geringe Verbreitung gefunden [3-30, 3-44, 3-46].



**Abbildung 3-69: Leistungsbereiche und Temperaturniveaus zur Stromerzeugung aus Abwärme [3-44]**

Eine Wärmepumpe überträgt Wärme von einer Wärmequelle auf niedrigem Temperaturniveau auf ein niedrig siedendes Arbeitsmedium. Unterschieden werden dabei im Wesentlichen die Kompressions- und die Absorptionswärmepumpe.

Grundsätzlich interessant ist der Einsatz einer Wärmepumpe zur Gebäudeheizung unter Nutzung von Abwärme aus dem Abwasser. Es kann allerdings auch Niedertemperaturabwärme wieder als Prozesswärme verfügbar gemacht werden.



**Abbildung 3-70: Der Kreisprozess der Kompressionswärmepumpe [3-45]**

Die wichtigste Kenngröße einer Wärmepumpenanlage ist die Leistungszahl Coefficient of performance (COP):

$$\text{COP} = \frac{\text{Heizleistung}}{\text{Antriebsleistung}}$$

Die Leistungszahl COP gibt die abgegebene Heizleistung im Verhältnis zur aufgewendeten Antriebsleistung an. Eine Leistungszahl von 4 bedeutet daher, dass das Vierfache der eingesetzten elektrischen Leistung in nutzbare Wärmeleistung umgewandelt wird.

Die Referenz für einen idealen Wärmepumpenprozess ist der linkslaufende Carnot-Prozess (Kraftwärmemaschine). Für diesen Prozess ergibt sich der theoretische Wirkungsgrad  $\eta_c$ . Damit kann die maximale Leistungszahl eines Wärmepumpenprozesses auch über die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle (Verdampfer) und Wärmenutzungsanlage (Kondensator) berechnet werden:

$$\eta_c = T / (T - T_u) = T / \Delta T$$

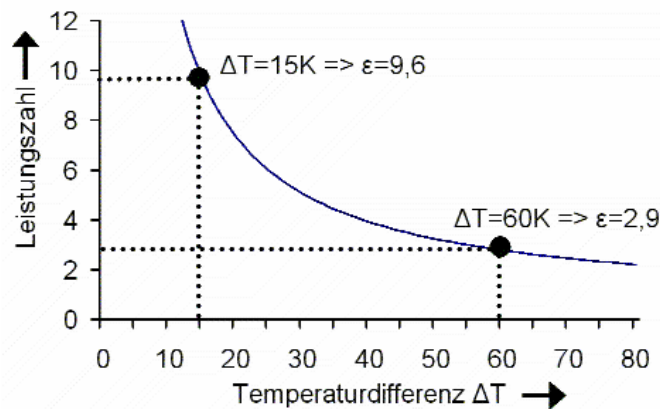
$\eta_c$  = Leistungszahl nach Carnot

$T_u$  = Temperatur der Umgebung, aus der die Wärme aufgenommen wird

$T$  = Temperatur der Umgebung, an die die Wärme abgegeben wird

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Seite

Für  $T_u = 30^\circ\text{C}$  (303 K),  $T = 50^\circ\text{C}$  (323 K) ergibt sich beispielsweise eine theoretische Leistungszahl von  $\eta_c = 16,15$ . Die Leistungszahl für einen realen Wärmepumpenprozess unter Berücksichtigung von thermischen, mechanischen und elektrischen Verlusten sowie dem Energiebedarf der Hilfsantriebe liegt deutlich darunter. Für Überschlagsrechnungen kann  $\eta$  gleich  $0,5 \times \eta_c$  gesetzt werden. In jedem Fall ist die reale Leistungszahl von der Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und der Wärmeverteilung abhängig. Je geringer dieser "Temperaturhub" ausfällt, umso wirtschaftlicher arbeitet eine Wärmepumpe.



**Abbildung 3-71: Die Leistungszahl in Abhängigkeit vom Temperaturunterschied (Temperaturhub) [3-45]**

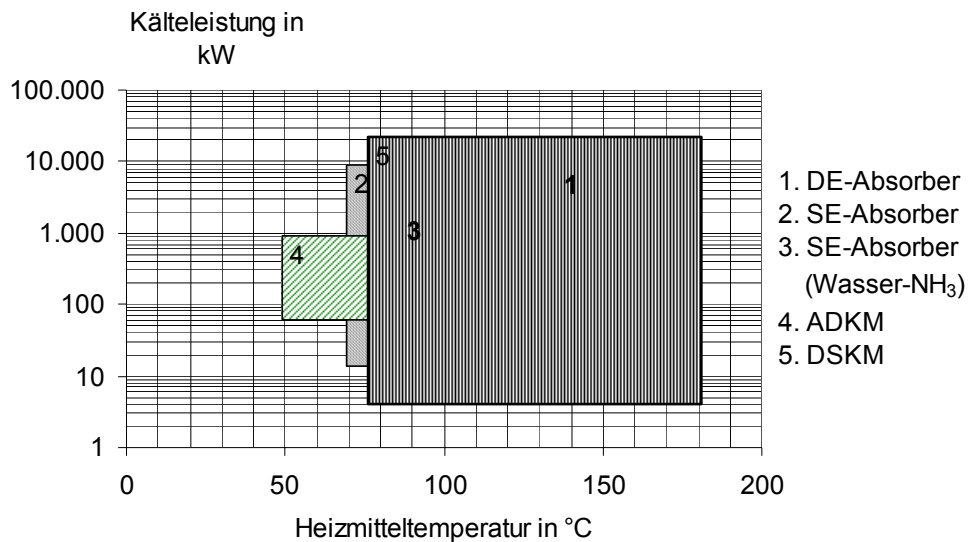
Ein wichtiger Wärmepumpentyp ist die Absorptionswärmepumpe. Als Wärmequelle kommt hier in erster Linie Abwärme in Frage, aber auch natürliche Wärmequellen wie Aussenluft, Wasservorkommen und natürliche Erdwärme können genutzt werden. In der Industrie sind Geräte bis zu einer Leistung von ca. 20 MW gängig. Die nutzbare Wärme (z.B. Heizwärme) kann bei Temperaturen bis zu 90°C entnommen werden. Da Absorptionswärmepumpen kaum bewegliche Teile enthalten, sind sie äußerst wartungsarm.

Als Nachteile sind das hohe Gewicht, der erhebliche Bauraum und die relativ hohen Investitionskosten aufzufassen, die sich aber bei einer dauerhaften Verfügbarkeit von Wärme auf gleichbleibendem Niveau relativieren.

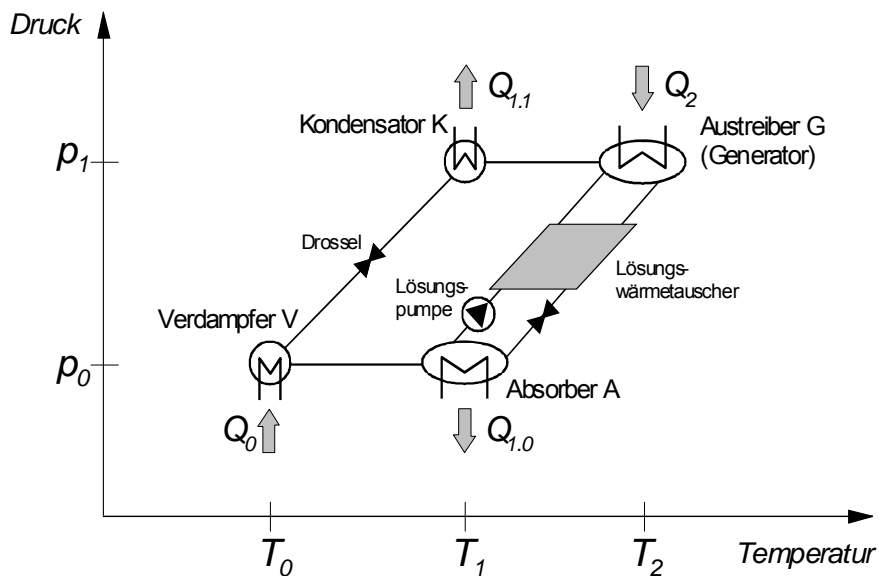
Eine weitere interessante, wenn auch noch wenig verbreitete Möglichkeit nur Nutzung insbesondere von Niedertemperaturabwärme ist der Stirlingmotor. Da die Wärmezuführung für den Arbeitsraum nicht in diesem selbst, sondern von außen erfolgt, unterliegen Stirlingmotoren einem weitaus geringeren Verschleiß und weisen somit eine hohe Zuverlässigkeit und hohe Standzeiten auf. Da Verbrennungs- und Explosionsgeräusche fehlen, arbeiten die Motoren sehr leise. Die hohen Wirkungsgrade von über 40% sind der Hauptgrund für eine mögliche Energie- und Kosteneinsparung.

Grundsätzlich geeignet ist das Temperaturniveau der Abwärmeströme von Papierfabriken für den Einsatz von Kältemaschinen wie z.B. der Adsorptionskältemaschine (ADKM). (Abbildung 3-72). Allerdings ist der Bedarf an Prozess- und Klimakälte in der Papierindustrie in der Regel relativ gering.





**Abbildung 3-72: Leistungsbereiche und Temperaturniveaus verschiedene Prozesse zur Erzeugung von Kälte aus Abwärme (Quelle: Fraunhofer Umsicht)**



**Abbildung 3-73: Funktionsprinzip von Adsorptionskältemaschinen**

Eine hohe Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme ist gegeben, wenn Wärmequellen und -senken möglichst lokal gekoppelt werden. Wird aufgrund der Entfernung der Wärmequellen und -senken ein hoher Bedarf an Rohrleitungen, Pumpen etc. notwendig, leidet die Wirtschaftlichkeit. Hier kann es standortabhängig erhebliche Unterschiede geben.

Aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus in der Papierindustrie ist in erster Linie eine optimale Wärmeintegration im Prozess anzustreben. Die Nutzung zur Stromerzeugung aus Abwärme ist aus heutiger Sicht nur selten möglich.

Die Nutzung von Niedertemperaturabwärme zur Erzeugung von Kälte ist fallweise zu prüfen, da der Prozess normalerweise keine geführte Kälte benötigt und die erforderliche Kälteleistung zur Kühlung von Schalträumen und Messwarten vergleichsweise gering ist.

Eine externe Nutzung von Niedertemperaturabwärme ist grundsätzlich möglich. Die Wirtschaftlichkeit ist aber stark von den vorhandenen Abnehmern (z.B. Hallen- oder Freibäder, Gärtereien etc.) und den logistischen Randbedingungen abhängig. In den wenigsten Fällen befinden sich mögliche Abnehmer mit konstantem Bedarf in unmittelbarer Nähe zur Papierfabrik, so dass lange Rohrnetze zum Abnehmer in Kauf genommen werden müssen. Muss z.B. ein Fernwärmenetz erst aufgebaut werden, ist mit hohen Investitionskosten zu rechnen und die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme ist in Frage gestellt.

Konzeptvarianten - Matrix -			Zu kühlende Ströme				
			Wasser			Luft	
			Wärme Abwasser	Wärme Kreislauf DIP	Wärme Filtrat Schleiferei	Wärme Trocken- partie	Wärme Pressenpartie
Aufzuwärmende Ströme	Wasser	Aufwärmung Frischwasser					
		Aufheizung Siebwasser					
	intern	Kühlung Warte, EDV, etc.					
		Heizung Büro-/ Lagerräume					
	extern	Heizung Schwimmbad					
		Fernwärme					

**Abbildung 3-74: Möglichkeit der Nutzung von Niedertemperaturabwärme unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Wärmemenge (unteres Dreieck) und der Wirtschaftlichkeit (oberes Dreieck): schwarz=hoch; grau=mittel; weiß=gering [3-45]**

Sind Angebot und Bedarf von Niedertemperaturabwärme zeitlich nicht deckungsgleich, bieten sich Wärmespeicher an. Der Verlauf von Wärmeabgabe, Wärmebedarf und die zu erwartenden Speichertemperaturen müssen im Vorfeld abgeschätzt werden.

Am Häufigsten kommen kapazitive oder Latent-Wärmespeicher zum Einsatz.

Der kapazitive Speicher (zwischen 100 und 800°C Speichertemperatur) nutzt die Wärmekapazität eines Speichermediums, um anfallende Wärme aufzunehmen und bei Bedarf wieder abzugeben.

Im Temperaturbereich unter 100°C kommt häufig Wasser als kostengünstiges Speichermedium zum Einsatz. Die entsprechende Technik ist ausgereift und ermöglicht eine Energiespeicherdichte von ca. 60 kWh/m<sup>3</sup>.

Bei Temperaturen darüber kommen häufig mineralische Speichermedien (z.B. Gesteinsarten) zum Einsatz, welche dann den Wärmespeicher sehr schwer werden lassen.

Latent-Wärmespeicher nutzen Wärmeunterschiede bei Phasenübergängen des Speichermediums und besitzen eine größere Speicherkapazität als der kapazitive Speicher.

Werden Salzhydrate als Speichermedium verwendet, so sind Arbeitstemperaturen von 30 – 80°C möglich, bei Befüllung mit Paraffinen immer noch 30 – 60°C.

Der Latentwärmespeicher ist somit auch für die Speicherung von Niedertemperaturabwärme geeignet. Seine Energiespeicherdichte von ca. 120 kWh/m<sup>3</sup> ist etwa doppelt so wie die des kapazitiven Speichers.

Eine gänzlich andere und verhältnismäßig neue Bauweise ist der thermochemische Speicher. Energiespeicherdichte von ca. 200 – 500 kWh/m<sup>3</sup> sind hier möglich. Durch korrekte Wahl des Speichermaterials kann der Wärmespeicher an die Abwärmemperaturen angepasst werden. Silikagele reichen von 40 – 100 °C, Zeolithe von 100 – 300 °C und Metallhydride von 280 – 500 °C. Somit besitzt der thermochemische Speicher die größte Flexibilität bezüglich der Arbeitstemperatur. [3-46]

Eine noch wenig verbreitete Methode der Warm- und auch Kaltwasserspeicherung ist der sogenannten Aquiferspeicher.

Hierbei werden vorhandene Grundwasserschichten (sog. Aquifere) genutzt, die zwischen wasserundurchlässigen Gesteins- bzw. Sedimentschichten liegen. Nach geologischen Untersuchungen werden eine Reihe von Bohrungen in Tiefen von 20 – 300 m, z.T. auch 1.200 – 1.300 m abgetäuft, durch welche der Aquiferspeicher be- bzw. entladen wird. Etwa 70 – 90 % der eingebrachten Wärmeenergie lassen sich wiedergewinnen. Lohnenswert sind Aquiferspeicher auf hohem Temperaturniveau ab einem Speichervolumen von 100.000 m<sup>3</sup>.

Bei der Planung von Wärmespeichersystem berücksichtigt werden müssen auch die Kosten der Peripherie (Pumpen, Ventile, Leitungen, Isolierung der Armaturen) und natürlich ein flexibles, nach Möglichkeit digitales Regelsystem [3-46].

### 3.6 Literatur zu Kapitel 3

- [3-1] Zerler et. Al., Lehrbuch der Papier- und Kartonerzeugung, Fachbuchverlag Leipzig 1984
- [3-2] Nissan, A.H. Lectures on Fibre Science in Paper, ed. by W.C. Walker, Pulp and Paper Technology Series, Joint Textbook Committee of the Paper Industry, No 4, p.27, 1977
- [3-3] Münster H, Möglichkeiten der Energieeinsparung bei der Stoffaufbereitung, Vortragsband zum PTS Energiemanagementsystemposium, München 2007
- [3-4] Hanecker E., Überblick über die Verfahrenstechnik zur Herstellung von Altpapierstoffen, Vortragsband zum PTS Seminar Einführung in die Papiererzeugung, München 2007
- [3-5] Jung, H., Wasserkreislauf und Wasserqualität in der Papiererzeugung, Vortragsband zum PTS Wasserkreislaufseminar, München 2006
- [3-6] Jung H., Oeller H-J., Entwicklungslinien für die Wärmeintegration in Papierfabriken, PTS-Forschungsberichte, München 2008
- [3-7] Blum O., Actions to be taken for optimising the energy efficiency in paper mills, Proceedings for IPE energy management seminar, Igualada 2008
- [3-8] KSB Aktiengesellschaft, Auslegung von Kreiselpumpen, Frankenthal, 1999
- [3-9] Bohl W.: Technische Strömungslehre, 9. Auflage, Würzburg, 1991
- [3-10] Wahlström, B.: A long term study of water removal and moisture distribution on a newsprint machine press section, Pulp Paper Can. 61 (1960) T379-401, T418-451.
- [3-11] Wahlström, B.: Our present understanding of fundamentals of pressing, Pulp Paper Can. 70 (1969) T349-369.
- [3-12] Schanz, D.: Geschwindigkeitssteigerungen einer Papiermaschine – Auswirkungen in der Pressenpartie, Wochenblatt für Papierfabrikation 113 (1985) 121-138
- [3-13] Lange, D.V., Shoe presses and their application to recycled fibers, 1991 Engineering Conference, TAPPI Proceedings, 1991, S. 51-54
- [3-14] Lange, D.V., Extended nip pressing of paper grades, Technical Section, CPPA, 82nd Annual Meeting, 1996, S. B97-B100, Shoe pressing of paper grades, 1996 Papermakers Conference, TAPPI Proceedings, 1996, S. 435-438
- [3-15] Voith-Firmenschrift
- [3-16] Schanz, D.: Die Bedeutung des Naßpressens für Produkt und Produktivität, Wochenblatt für Papierfabrikation 117 (1989) 89-90.
- [3-17] Brüning, F., Mechanische Entwässerung in der Nasspressenpartie, Vortragsband zum PTS Einführungsseminar „Papierherstellung im Überblick“, München 2007
- [3-18] Laux, R.R. Energieeffizienter Einsatz und Betrieb von Vakuumanlagen, Vortragsband zum PTS Energiemanagementsystemposium, München 2007
- [3-19] Göller, G., Energiesparmöglichkeiten bei Vakuumsystemen, Gardner Denver Nash Deutschland GmbH, 2008

- [3-20] Untersuchungsergebnisse und eigene Berechnungen, PTS Papiertechnische Stiftung, München 2007
- [3-21] Mersmann A.B. Thermische Verfahrenstechnik Springer-Verlag, Berlin, 1980
- [3-22] Volk W. Grundlagen der Papiertrocknung, Wochenblatt für Papierfabrikation 102, 13-24, (1974) Nr.1
- [3-23] Autorenkollektiv, Papiermacherhandbuch, Dr. Curt Haefner Verlag, Heidelberg, 5. Auflage 1989
- [3-24] Hauser L. Analyse von Laufproblemen in der Papiermaschine und moderne Konzeptionen der Papiertrocknung, Wochenblatt für Papierfabrikation 119, 433-441 (1991) Nr.11/12
- [3-25] Kekko P. und Müller M., Solving a Curl Control Problem by using Impingement Drying Technology, IPW 06/2007
- [3-26] Hilok H., Handbook of paper and board, Weinheim, 2006
- [3-27] Karlsson, M., Papermaking Part 2, drying, TAPPI press, Helsinki 2000
- [3-28] Bock T., Durniok I., Kernpunkte einer Trockenpartieanalyse sowie einer Haubenbilanzierung, apr- Allgemeine Papierrundschau, 2007
- [3-29] Gebhardt, A., Energieoptimierungspotenziale der Trockenhaube, vorgetragen auf PTS Energiemanagementsymposium, München, 2007
- [3-30] Wikipedia Onlinelexikon 2008, [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)
- [3-31] Energieagentur NRW, <http://www.energieagentur.nrw.de>
- [3-32] ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.; Die Erdgas- Strahlungsheizung: Wirtschaftliche Wärmeversorgung für Hallen und andere Großräume, Verlag Rationeller Energieeinsatz, o. J.
- [3-33] Deutsche Bundesstiftung Umwelt; Solar-Luft-Kollektor mit Metall-eindeckung, Projektdatenbank , Internetdarstellung auf [www.dbu.de](http://www.dbu.de) vom 6. August 2008
- [3-34] Schmid, C.; Energieeffizienz bei elektrischen Antrieben - Maßnahmen und Praxisbeispiele; LIVE-Auftaktveranstaltung „Energie und Kosten sparen im Betrieb“, Stuttgart, 12. Mai 2004
- [3-35] European Copper Institut, PDF-Dokument "Sparsame elektrische Antriebe", 2004
- [3-36] Jung H., Demel I., Götz B.: Aufkommen und Verbleib der Rückstände aus der deutschen Papierindustrie – Ergebnisse der Rückstandsumfrage 2004; Wochenblatt für Papierfabrikation 9 - 2006
- [3-37] Quaschnig, V., Regenerative Energiesysteme, Hanser Verlag, 5. Auflage, 2007
- [3-38] Schwarz H., Siemens AG; Vortrag auf der ZELLCHEMING-Hauptversammlung 2007
- [3-39] Möbius C., Abwasser der Papier- und Zellstoffindustrie, 3. Auflage, Augsburg 2006
- [3-40] Evers J., Modernes Energiekonzept für eine Papierfabrik, Vortrag auf IMPS (Internationales Münchner Papiersymposium), 2008
- [3-41] Strukturen des Wärmebedarfs in Industrie und Gewerbe, H. Schaefer, W. Mauch, VDI-Berichte 1296, VDI Verlag 1997, Wirtschaftliche Wärmenutzung in Industrie und Gewerbe

- [3-42] PTS Untersuchungsergebnisse; Energieoptimierung in Europäischen Papierfabriken, München, 2004 bis 2008 (nicht veröffentlicht)
- [3-43] Fa. Turboden, <http://www.turboden.it>
- [3-44] U. Lenk; Umwandlung geothermischer Energie in Strom mit dem Kalina Cycle; Erlangen, 2004
- [3-45] Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.), Klimaschutz durch effiziente Energienutzung in der Papierindustrie – Nutzung von Niedertemperaturabwärme“ Augsburg, 2003
- [3-46] BINE Informationsdienst [www.bine.info](http://www.bine.info)
- [3-47] Kruska, Meyer, Elsasser, Trautmann, Weber und Mac: Rationelle Energienutzung in der Textilindustrie; Leitfaden für die betriebliche Praxis Fried. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 2001.
- [3-48] Recknagel, Sprenger und Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. R. Oldenburg Verlag München, 2005.
- [3-49] Fördergemeinschaft Gutes Licht: Internetauftritt: [www.licht.de](http://www.licht.de), 2006.
- [3-50] Arbeitsgemeinschaft für Wärme und Heizkraftwirtschaft: Internetseite [www.agfw.de](http://www.agfw.de).

## 4 Praxisbeispiele

In Kapitel 3 sind zahlreiche Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Reduzierung der Energiekosten beschrieben. Für verschiedene Bereiche und Anlagen wurde in diesem Kapitel systematisch aufgezeigt, welche Maßnahmen möglich sind. Sicher können nicht alle Maßnahmen in jedem Unternehmen der Papierindustrie umgesetzt werden. Daher wurden im Rahmen des Projektes verschiedene Unternehmen der Papierindustrie in Nordrhein-Westfalen detailliert untersucht um aufzuzeigen, welche Erfolge im Einzelnen erzielt werden konnten.

Die Praxisbeispiele beginnen mit einer kurzen Beschreibung der untersuchten Betriebe. Anschließend werden die wichtigsten vorgefundenen Verbesserungspotenziale erläutert und die erzielbaren Einsparungen soweit wie möglich quantifiziert. Die aufgeführten Energieeinsparungen in Megawattstunden pro Jahr (MWh/a) beziehen sich dabei auf den jeweiligen Endenergieeinsatz an elektrischer Energie, Wärme in Form von Dampf bzw. an Brennstoffenergie (meist Erdgas).

Bei der Bewertung des Energieeinsparpotenzials wird üblicherweise auf den Primärenergieeinsatz bezogen, so dass auch die Wirkungsgrade bei der Umwandlung von Brennstoffenergie in die Endenergieformen elektrische Energie und Dampf berücksichtigt werden. Da nicht bei allen untersuchten Betrieben Informationen über die Wirkungsgrade bei der Erzeugung der Endenergie vorlagen und aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit werden daher pauschale Erzeugungswirkungsgrade verwendet. Bei der Berechnung des Primärenergieeinsatzes wird entsprechend ein Erzeugungswirkungsgrad von 37% bei elektrischer Energie bzw. von 85% bei Wärme berücksichtigt.

Bei der Bewertung wurde neben der praktischen Umsetzbarkeit auch die statische Amortisationszeit berücksichtigt, die sich als Quotient aus Aufwand (Kosten in Euro) und Einsparung (€/a) ergibt.

Besonderer Dank gilt an dieser Stelle noch einmal den Mitarbeitern der analysierten Betriebe, die durch ihr Engagement zu diesen Beispielen aus der Praxis beigetragen haben.

## 4.1 Hygienepapier

Die Gruppe der Hygienepapiere umfasst Tissue und Krepp-Papiere. Sie werden zur Herstellung von Toilettenpapier und anderen Hygieneprodukten eingesetzt.

Tissue ist ein Hygienepapier aus Zellstoff bzw. Altpapierstoff mit Beimischungen von Holzstoff, das bei einem Trockengehalt von über 90 % leicht gekreppt wird. Es ist so dünn, dass es üblicherweise nur mehrlagig zum Einsatz kommt. Das trockene Kreppen und das niedrige Flächengewicht bedingen die hohe Weichheit von Tissue. Die Weichheit und Bauschigkeit lassen sich beim through air dried tissue (TAD-Tissue) noch steigern.

Krepphygienepapier wird hingegen im feuchten Zustand gekreppt. Durch anschließende Trocknung wird die Kreppung fixiert. Einsatzgebiete sind einlagige Toilettenpapiere, Küchentücher und Papierhandtücher.

### 4.1.1 Produktionsdaten und Struktur der Anlage

Die untersuchte Anlage stellt jährlich 44.000 t Hygienepapiere mit einer typischen Grammaturn von 14 g/m<sup>2</sup> auf einer konventionellen Tissuemaschine mit dampfbeheiztem Yankeezyylinder und mit gasbeheizter Hochtemperaturhaube her. Betrachtet wurde der Bereich der Papiererzeugung bis zum Umroller. Im Jahresdurchschnitt werden ca. 50 % des Strombedarfs durch Fremdstrom und ebenfalls 50 % des Wärmebedarfs über die Dampfschiene gedeckt.

Bezogen auf die Nettoproduktion hat die Papierproduktion dieses Werkes folgende spezifische Wärme- und Stromverbräuche im Jahresmittel (Referenzzeitraum 2005):

<b>Spezifischer Verbrauch<sup>1</sup></b>	<b>3.200</b>	<b>kWh/t</b>
Strom	1.000	kWh/t Papier
Dampf und Gas	2.200	kWh/t Papier

Mit einem spezifischen Energieeinsatz von 3.200 kWh/t liegt die Tissuemaschine in der Schwankungsbreite von konventionellen Tissuemaschinen von 3.000 – 3.400 kWh/t in Abhängigkeit der produzierten Tissuequalität (Flächengewicht, Fasereinsatz, Tissue-Festigkeiten).

Besonders bei den Hygienepapieren gibt es je nach Fertigungstechnologie große Unterschiede in der Maschinenkonfiguration, um verschiedene Produktqualitäten wie z. B. trocken oder nass gekreppte Papiere zu erzeugen. Dies führt zu Unterschieden im spezifischen Energieverbrauch. Besonders auffällig hinsichtlich des Energieverbrauchs ist die TAD (Through Air Drying) Technologie, mit der eine deutlich andere Produktqualität erzeugt wird, als mit konventionellen Maschinen. Hier verursacht der Produktionsprozess einen besonders hohen spezifischen Energie-

---

<sup>1</sup> Mittelwert mit einer durchschnittlichen jährlichen Verfügbarkeit der Tissuemaschine von 87%. Mit der Verfügbarkeit werden prozessbedingte Stillstandszeiten für Maschinenreinigung, Schaberwechsel, Tambourwechsel, Besspannungswechsel und Instandhaltungstätigkeiten berücksichtigt.



verbrauch im Bereich von 8.100 – 8.200 kWh/t. Bedingt durch eine geringe mechanische Entwässerung des Faservlieses durch die fehlende Nasspresse und damit einem stärkeren Anteil der thermischen Trocknung müssen im Vergleich zur herkömmlichen Tissueproduktion wesentlich größere Gasmengen bereitgestellt werden. Der höhere Stromverbrauch ist u. a. auf die hohen installierten Leistungen in der Lüftungsanlage sowie die hohe installierte Vakuumeistung zurückzuführen. Darauf ist bei dem Vergleich mit anderen Anlagen zu achten. Die Übertragbarkeit der nachfolgend vorgestellten Ergebnisse auf Anlagen mit anderer Maschinenkonfiguration ist daher nur bedingt möglich.

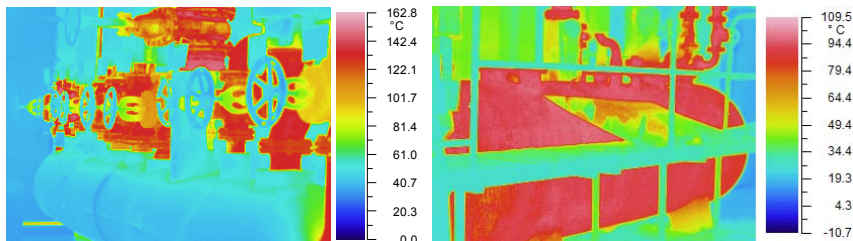
#### 4.1.2 Dampfverbrauch

Die Dampfversorgung der Tissuemaschine erfolgt durch das betriebseigene Kraftwerk (nicht Gegenstand der Untersuchung) über zwei Dampfschienen mit 14 bzw. 5 bar. Aus der 14-bar Schiene wird der Treibdampf für die Thermokompressionsanlage entnommen.

Das Kondensat könnte zu Heizzwecken für die Nebenanlagen (Raumheizung Walzenhalle, Warmwasser, Büros, etc.) verwendet werden, womit sich der Frischdampfeinsatz senken ließe.

Durch Absenkung der Kondensatrücklauftemperatur auf 90 °C ließen sich 450 MWh/a Dampf einsparen. Hierfür wäre die Installation eines Wärmetauschers erforderlich, so dass sich Paybackzeiten von 2,6 Jahren erzielen ließen. Der Aufwand für die Kondensataufheizung im Kraftwerk muss dem Nutzen gegenübergestellt werden.

Insgesamt ist der Zustand der Isolierungen gut. An verschiedenen Stellen an der Tissuemaschine fehlen jedoch Isolierungen, insbesondere an Armaturen. Weiterhin sind Kondensatsammelbehälter nicht sowie einige Rohrleitungen im Außenbereich schlecht isoliert.



**Abbildung 4.1-1 Wärmebildaufnahmen von Dampfverteiler (links) und Kondensatsammelbehälter (rechts)**

Die betroffenen Rohrleitungen, Armaturen bzw. Behälter sollten konsequent isoliert werden. Hierdurch ließen sich bei einem Payback von im Mittel unter einem Jahr 170 MWh/a einsparen.

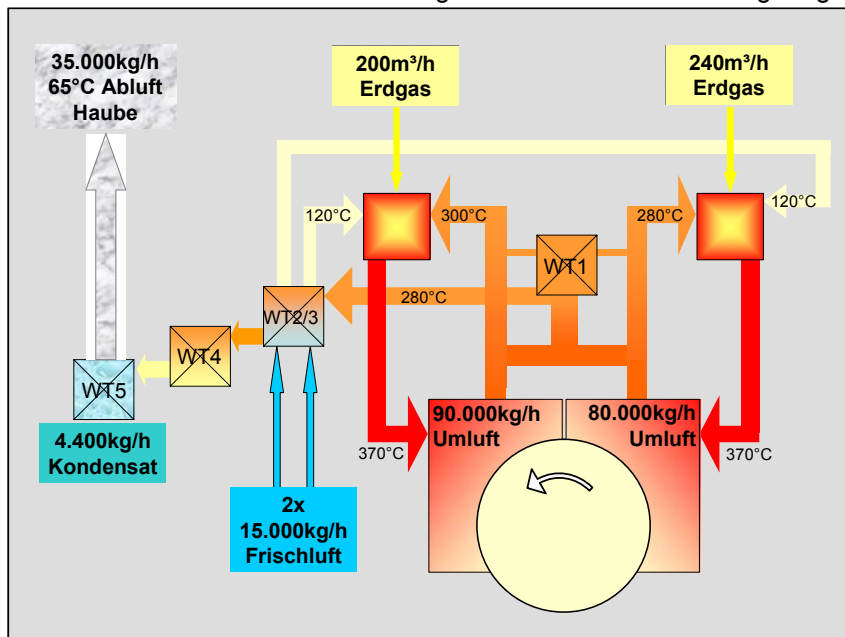
#### 4.1.3 Erdgasverbrauch

Die thermische Trocknung der Tissuebahn erfolgt sowohl durch den mit Dampf beheizten Yankee-Zylinder, als auch durch die Haubenluft. Die Haubenluft wird der Bahn mit an das Produkt angepasster Strömungsgeschwindigkeit in zwei Segmenten zugeführt. Die Haubenluft wird im parallelen Umluftbetrieb geführt, Abluft wird aus beiden Kreisläufen abgezogen. Die Wärmeversorgung erfolgt über zwei Erdgasbrenner. Die Haubenlufttemperatur stellt dabei die Führungsgröße zum Erreichen der gewünschten Produktfeuchte am Poperoller dar. Die Haubenabluft wird zur Heizwärmeversorgung sowie zur Aufwärmung von Klarfiltrat verwendet.

Zur Erhöhung der Betriebssicherheit der gegenwärtig installierten Wärmetauscher sollte ein Taupunktfühler im Abluftkanal installiert werden. Bei Erreichen der Taupunkttemperatur muss die Wärmeauskopplung im Wärmetauscher zur Heizwärmeversorgung gesenkt und die gegebenenfalls erforderliche Heizwärme anderweitig verfügbar gemacht werden.

**Abbildung 4.1-2 Luftschemata der Hochtemperaturhaube**

Durch eine höhere Wasserbeladung der Haubenluft werden geringere



Zu- und Abluftmengen benötigt, wodurch sich Einsparungen an Gas und Strom realisieren lassen.

Die Wasserbeladung der Haubenluft kann durch einen entsprechende Reduzierung der Zu- und Abluftmengen an den Sollwert von 440 g/kg herangeführt werden. Durch die geringeren Luft-Massenströme lassen sich die Abwärmeverluste und die Ventilatorleistungen senken. Bei einem Abluftmassenstrom 30.000 kg/h (trocken) betragen die Abwärmeverluste (Bezugstemperatur 10 °C) 5.850 MWh/a. Bei einem reduzierten Abluftmassenstrom von 24.400 kg/h (trocken) reduzieren sich die Abwärmeverluste auf 4.760 MWh/a. Gleichzeitig sinkt der Erdgasbedarf um 1.090 MWh/a und der Strombedarf für die Lufttechnik sinkt entsprechend dem niedrigeren zu fördernden Luftmassenstrom um 90 MWh/a.

Die Höhe der Haubenlufttemperatur richtet sich einerseits nach dem erreichten Trockengrad am Poperoller, andererseits wird aber über den notwendigen Wärmeeintrag hinaus berücksichtigt, dass bei höherer Temperatur eine geringere Luftmenge durch die Umluftventilatoren bewegt werden muss und damit der Stromverbrauch signifikant sinkt. Durch den hohen Grad der Wärmeintegration der Haubenabluft zur Verbrennungsluftvorwärmung, Hallenheizung sowie Erwärmung des Klarfiltrats ist zu prüfen, welchen Energieinhalt die Haubenabluft aufweisen muss, damit die Anlage störungsfrei betrieben werden kann. Dabei erfolgt auch eine Abwägung, inwieweit eine höhere Haubenlufttemperatur wegen der erzielbaren Stromeinsparungen der Umluftventilatoren gegebenenfalls wirtschaftlich ist.

Da sowohl die Erhöhung der Wasserbeladung der Haubenabluft, als auch die Senkung der Haubenlufttemperatur grundlegend in den Trocknungsprozess in der Trockenhaube eingreifen, sind vor der Umsetzung der beschriebenen Maßnahmen weitere Untersuchungen notwendig.

Weitere Potenziale bieten sich durch die Nutzung der Abwärme eines mehrstufigen Radialgebläses. Die Gebläseabluft führt mit 18.000 kg/h bei ca. 100°C und 60 g H<sub>2</sub>O/kg Luft Wasserbeladung jährlich Wärme in der Größenordnung von 4.350 MWh an die Umgebung ab. Diese Energie kann zur Verbrennungsluftvorwärmung der Haubenzuluft oder unmittelbar als Verbrennungsluft eingesetzt werden. Im letztgenannten Fall ist jedoch die zusätzliche Wasserfracht, die in die Haube eingebracht wird, zu berücksichtigen. Das Potenzial ist nutzbar, wenn Abwärme aus der Haubenabluft nicht zur Luftvorwärmung ausreicht.

Die Hallenbelüftung erfolgt über die zwei Zuluftzentralen mit 225.000 m<sup>3</sup>/h. Das Raumvolumen ab Maschinenebene beträgt 15.210 m<sup>3</sup>. Basierend auf diesen Daten ergibt sich eine Luftwechselrate von 14,8 h<sup>-1</sup>.

Die Beheizung der Halle erfolgt über eine geschlossene kreislaufgebundene Wärmerückgewinnung (Kompakt-Wärmetauscher) aus der Haubenabluft. Als Kreislaufmedium dient ein Wasser-Glykol-Gemisch.

In den Zuluftzentralen herrscht starker Unterdruck, was auf Verschmutzungen der Filter, Ansauggitter, Luftherhitzer oder Zuluftkanäle zurückzuführen ist. Eine Wartung der Lufttechnik wird empfohlen.

Das Temperaturniveau in der Halle könnte ohne die Gefahr von Taupunktunterschreitungen von derzeit 26 °C auf 20 °C begrenzt werden. Aus der Haubenabluft können dadurch 4.320 MWh/a Heizwärme anderweitig genutzt werden, wenn Abnehmer zur Verfügung stehen. Die Maßnahme kann auch dann sinnvoll sein, wenn durch Änderungen bei Haubentemperatur, Umluft- und Abluftmengen weniger Abwärme aus der Haube zur Verfügung steht oder wenn die Wärmerückgewinnung nicht im Bereich der Kondensation betrieben wird.

Die Luftwechselrate lässt sich deutlich reduzieren, insbesondere bei einer optimierten Luftführung. Empfehlenswert ist die Einleitung der (warmen) Zuluft auf Maschinenebene. Auf diese Weise wird vermieden, dass die natürliche Thermik durch von oben oder der Seite einströmende Zuluft gestört wird.

Durch die Reduzierung des Luftwechsels auf 8 h<sup>-1</sup> lässt sich der Heizenergiebedarf um 2.750 MWh/a reduzieren. Entsprechend dem niedrigeren Volumenstrom, der durch die Zuluftventilatoren der Halle zugeführt werden muss, reduziert sich auch die Leistungsaufnahme der Ventilatoren um 310 MWh/a Strom.

Gegebenenfalls lässt sich die Luftwechselrate in der Heizperiode weiter auf die für Produktionshallen erreichbaren Werte von 4 bis 6 h<sup>-1</sup> senken. Zur Kontrolle der Taupunkttemperatur und Regelung der Hallenbelüftung bzw. -heizung sollen in der Halle mehrere Feuchte- und Temperaturfühler installiert und in das PLS integriert werden.

Die erforderlichen Investitionen in Feuchte- und Temperaturfühler sowie Regler für die Zuluftventilatoren haben einen Payback von weniger als einem Jahr, wenn die Heizwärme anderweitig genutzt werden kann. Für die Einleitung der warmen Zuluft auf Maschinenebene sind Zuluftkanäle zu installieren; insgesamt ist aber auch hier das Payback innerhalb eines Jahres gewährleistet.

#### **4.1.3 Stromverbrauch**

An der Tissuemaschine wird der Langfaserstoff mit zwei in Reihe geschalteten Doppelscheibenrefinern gemahlen. Die Mahlleistung wird entsprechend der Papierqualität nachgeführt. Die Refiner arbeiten im Teil-

lastbereich mit 76 bis 78 % Auslastung. Der Anteil der Leerlaufleistung vom Stromverbrauch ist mit ca. 30 % erhöht. Ein höherer Durchsatz (Volllastbetrieb) hätte eine Absenkung des Anteils der Leerlaufleistung zur Folge. Der Stromverbrauch ließe sich durch einen diskontinuierlichen Betrieb der Mahlstraße (Chargenbetrieb) um 1190 MWh/a reduzieren.

An der Tissuemaschine werden im Sieb- und Pressenbereich drei Wasserring-Vakuumpumpen und ein einstufiges Radialgebläse zur Vakuumerzeugung eingesetzt.

Die spezifische Leistungsaufnahme des Vakuumsystems ist mit 176 kWh/t für die Tissueproduktion hoch gegenüber anderen Sortenbereichen (70 – 180 kWh/t). Die Wasserring-Vakuumpumpen arbeiten unter Vollast.

Der Vergleich von aktueller Leistungsaufnahme und Leistungsbedarf nach Pumpenkurve ergibt eine niedrige Effizienz der Wasserring-Vakuumpumpen. Die vorhandene Anlagenkonfiguration und Fahrweise geben keinen Hinweis auf den erhöhten Verbrauch. Neben dem niedrigen Flächengewicht, das höhere spezifische Verbrauchswerte ergibt, sind auch Ursachen wie z. B. Beläge, Korrosion, Kavitationsschäden oder auch ein zu hoher Dichtwasserfluss [4-2] möglich. Weiterhin spielt das Alter der Vakuumpumpen eine Rolle. Regelmäßige Wartung sichert einen effizienten Betrieb.

Ein weiteres Einsparpotenzial ergibt sich beim Antrieb. So können durch Wechsel der Transmission Einsparungen von bis zu 15 % erzielt werden [4-2].

Die vorgeschlagenen Maßnahmen betreffen sechs z. T. erheblich gedrosselte Pumpen. Durch die Ausrüstung der Motoren mit Frequenzumrichtern bzw. den Ersatz durch kleinere Pumpen lassen sich insgesamt 960 MWh/a mit einem Payback unter einem Jahr einsparen.

Insgesamt ist das Druckluftnetz in einem guten Wartungszustand und zeichnet sich durch einen relativ niedrigen Energieverbrauch aus. Der Netzdruck ist mit 6 bar in einem günstigen Bereich. Die Dokumentation über angeschlossene Druckluftverbraucher (Druckluft- und Stromverbrauch) kann noch weiter verbessert werden.

Für die Tissuemaschine wurde ein spezifischer Druckluftverbrauch von 22,5 Bm<sup>3</sup>/t Papier ermittelt. Damit liegt der spezifische Druckluftverbrauch der Tissuemaschine im Branchendurchschnitt. Die spezifische Leistungsaufnahme der Druckluftkompressoren ergibt sich zu 6,96 kW/(m<sup>3</sup>/min). Dieser Wert liegt bei 6 bar Netzdruck bereits im energetisch ungünstigen Bereich, was auf Optimierungspotenzial hindeutet.

Einsparmöglichkeiten ergeben sich durch eine mögliche Optimierung der Kompressorschaltung, so dass unter Einbeziehung der übergeordneten Steuerung jeder Kompressor entsprechend dem Momentanverbrauch sowie einer möglichst niedrigen Netzbelastung geschaltet wird. Die Leerlaufverluste tragen bislang wesentlich zum Strombezug für Druckluft bei. In die Kalkulation fließen die Leerlaufanteile der Kompressoren mit 20 % der Nennleistung ein und könnten durch einen (zeitverzögerten) Aussetzbetrieb oder eine Teillaststeuerung der Kompressoren reduziert werden. Gegebenenfalls kann ein Kompressor außer Betrieb genommen werden. Damit ließe sich ein Einsparpotenzial von 405 MWh/a realisieren.

Zunächst muss der Verbrauch der maßgeblichen Druckluftverbraucher über einen typischen Betriebszyklus ermittelt werden.

Eine Blindleistungskompensation wird nicht direkt an der Tissuemaschine vorgenommen, der Leistungsfaktor beträgt  $\cos \varphi = 0,65$  bis  $0,70$ . Die Kompensation erfolgt ausschließlich auf Kraftwerkseite durch zwei Synchrongeneratoren ( $\cos \varphi = 0,9$ ). Durch eine statische Blindleistungskompensation an der Tissuemaschine, die parallel zur zu kompensierenden Last bzw. dem Netzabschnitt angeordnet ist, ließe sich einerseits dynamisch auf Lastschwankungen an der Tissuemaschine reagieren. Andererseits ließen sich durch eine Steigerung des Blindleistungsfaktors  $\cos \varphi$  von derzeit  $0,70$  auf mindestens  $0,90$  die Netzentgelte für Blindarbeit beim Fremdstrombezug vermeiden. Auch die Verluste im eigenen Netz ließen sich um bis zu  $0,5\%$  des gesamten Strombezugs reduzieren [4-3].

Die Einsparpotenziale an Endenergie der vorgeschlagenen Maßnahmen sind in Tabelle 4.1-1 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4.1-1 Zusammenfassung der möglichen Einsparpotenziale

Bereich	Maßnahmen	Energieträger	Einsparung MWh/a	Payback [Jahre]
Dampf- & Kondensat	Nutzung der Kondensatabwärme zur Gebäudebeheizung	Dampf	450	3 Jahre
	Vervollständigung der Isolierung an Armaturen	Dampf	170	< 1 Jahr
Trocken- haube	Reduzierung der Abluftmenge	Erdgas	1.090	< 1 Jahr
		Strom	90	< 1 Jahr
	Nutzung der Abwärme aus einem mehrstufigen Radialgebläse	Erdgas	4.350	2 Jahre
Hallenbelüftung	Absenkung der Raumtemperatur	Erdgas	4.320	< 1 Jahr
	Reduzierung der Luftwechselzahl	Strom	310	< 1 Jahr
Mahlung	Diskontinuierlicher Betrieb der Mahlstraße	Strom	1.190	< 1 Jahr
Vakuumanlage	Überholung der Wasserringpumpen	Strom	k.A.	
Pumpen	Drehzahlregelung bzw. Wechsel der Laufräder	Strom	960	1 Jahr
Druckluft	Optimierung der Steuerung DL- Erzeuger	Strom	405	< 1 Jahr

## 4.2 Wellpappenrohpapier

Unter Wellpappe wird mehrlagige Pappe verstanden, die durch mehrere Lagen miteinander verleimter, glatter oder gewellter Papierbahnen besteht. Dazu wird das so genannte Wellpappenrohpapier zwischen zwei Riffelwalzen unter Einwirkung von Druck und Temperatur in Wellenform gepresst. Das hierfür eingesetzte Wellpappenrohpapier weist Flächen-gewichte von üblicherweise  $90 \text{ g/m}^2$  auf. Das gewellte Papier wird anschließend ein- oder beidseitig mit einer glatten Papierbahn beklebt.

### 4.2.1 Produktionsdaten und Struktur der Anlage

Diese Papierfabrik stellt jährlich ca. 80.000 t Wellpappenroh-papiere (Liner und Fluting) als Teil einer integrierten Wellpappenfabrik her. Betrachtet wird hier nur die Rohpapiererzeugung mit Ausrüstung, nicht aber die Verarbeitung.

Bezogen auf die Nettoproduktion hat die Papierproduktion dieses Werkes folgende spezifische Dampf- und Stromverbräuche im Jahresmittel (Referenzzeitraum 2006).

---

<b>Spezifischer Verbrauch</b>	<b>2.160 kWh/t Papier</b>
Strom	360 kWh/t Papier
Dampf	1.800 kWh/t Papier

---

Der Stromverbrauch ist niedrig, der Dampfverbrauch relativ hoch im Vergleich mit anderen Anlagen zur Erzeugung von Wellpappenrohpapier.

Die Energieversorgung erfolgt in einem betriebseigenen Kraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung. Die drei Gasturbinen mit Abhitze-kessel decken den Eigenbedarf des Werkes an Strom und liefern darüber hinaus Strom an den örtlichen Energieversorger. Ein Teil der Abwärme des Kraftwerks wird zur Fernwärmeversorgung kommunaler Einrichtungen verwendet. Insgesamt wird hierfür eine Wärmeleistung von 400 kW im Mittel ausgekoppelt. Das bei der Abwasserbehandlung anfallende Biogas kann nach Entschwefelung optional als Brennstoff verwendet werden.

### 4.2.2 Dampfverbrauch

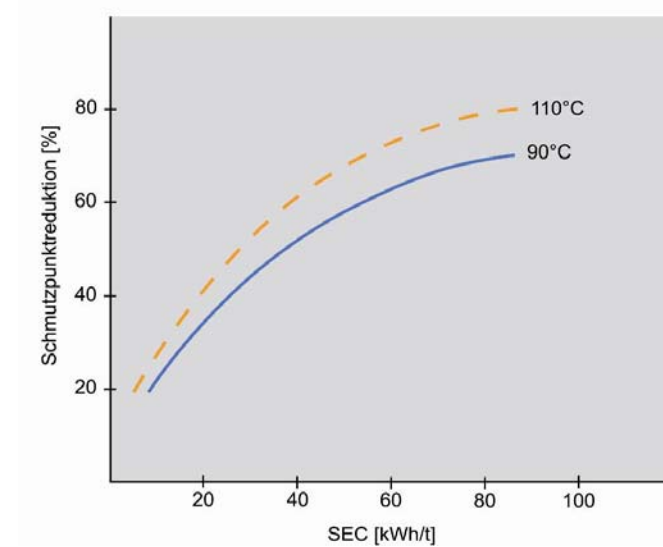
Durch die Optimierung des Dampf- und Kondensatsystems hat sich der Dampfverbrauch in der Papierfabrik gegenüber dem Zustand vor einem kürzlich erfolgten Umbau bereits deutlich gegenüber dem Referenzzeitraum reduziert. Die Kondensatrücklaufquote beträgt selbst bei Betrieb des Dispersers (kondensatverlustig) 90 %.

Durch Verbesserung der Isolierung und Beseitigung von Leckagen lassen sich weitere Verluste reduzieren. Pro Prozentpunkt Erhöhung der Kondensatrücklaufquote können jährlich ca. 200 MWh Dampf eingespart werden. Zusätzliches Einsparpotenzial in Höhe von 135 MWh/a ergibt sich durch Instandsetzung der Isolierung von Armaturen und Rohrverzweigungen. Die erforderlichen Maßnahmen sind der Instandhaltung zuzuordnen und verursachen relativ geringe Kosten.

Der Energiebedarf für die Dispergierung schwankte im Untersuchungszeitraum aufgrund unterschiedlicher Stoffdichten nach der vorgeschalte-

ten Eindickung stark. Die Stoffdichte nach der Schneckenpresse lag im Mittel bei 16,8%. Im optimalen Zustand sollten mit der installierten Technologie Stoffdichten von bis zu 30 % erzielt werden. Die Dampfzufuhr wurde über ein Ventil manuell ohne Temperaturregelung eingestellt. Aufgrund der schwankenden Stoffdichte kommt es somit zu erheblichen Temperaturschwankungen der Dispergierung zwischen 65 und 85 °C.

Eine Erhöhung der Stoffdichte führt bei konstanter Dampfmenge zu einer Erhöhung der Temperatur am Disperger, da weniger Wasser aufgeheizt werden muss. Eine höhere Temperatur ermöglicht gleichzeitig eine bessere Schmutzpunktreduktion bzw. eine Reduzierung des Strombedarfs bei konstanter Schmutzpunktreduktion. Andererseits ermöglicht eine höhere Stoffdichte bei funktionierender Temperaturregelung eine Reduzierung des Dampfverbrauchs.

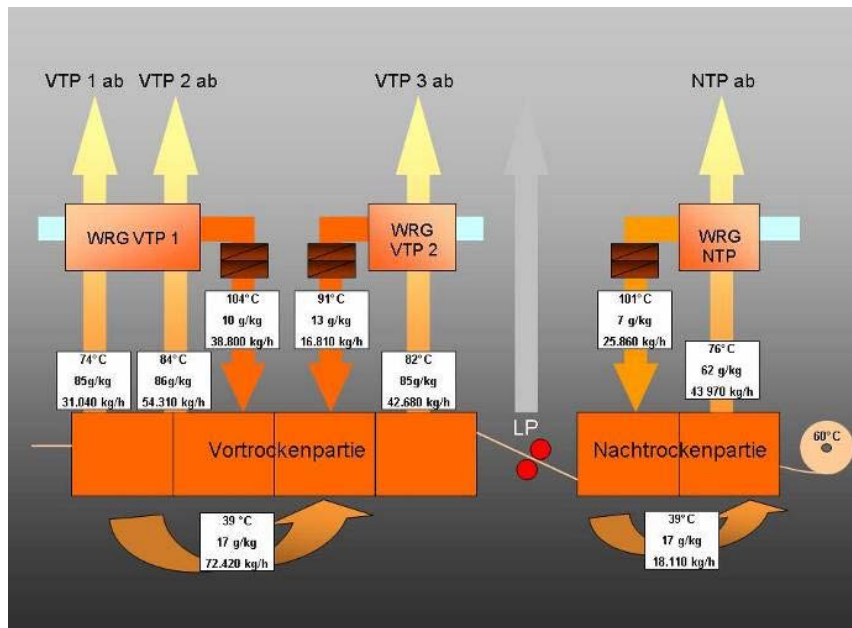


**Abbildung 4.2-1 Abhängigkeit der Schmutzpunktreduktion von der Stofftemperatur und spezifischen Energieeintrag [4-4]**

Basierend auf einer Erhöhung der Stoffdichte von derzeit 16,8 % auf 30 % ergibt sich ein Einsparpotenzial an Dampf in Höhe von 2.250 MWh/a.

Die Messungen in der Lufttechnik während der Vor Ort Untersuchung ergab für die Vortrockenpartie (VTP) ein Verhältnis von Zu- zu Abluftmassenströmen von 0,4. Dies bedeutet gegenüber dem Sollverhältnis von 0,7 eine deutlich überhöhte Abluftmenge. Daraus resultiert eine deutlichen Anhebung der Nulllinie und der Leckluftanteil in der VTP ist gegenüber dem Auslegungszustand deutlich erhöht.

Das Massenstromverhältnis von Zu-/Abluft in der Nachtrockenpartie (NTP) entspricht mit 0,6 weitgehend der Auslegung.



**Abbildung 4.2-3 Luftbilanz der Trockenhaube**

Die Trocknungskapazität der Haubenluft vor allem in der VTP, aber auch in der NTP ist bei Weitem nicht ausgeschöpft. Bei einer Ablufttemperatur von 85 °C sollte die Taupunkttemperatur 60 °C nicht unterschritten werden, so dass eine Wasserbeladung von 120 g/kg der Haubenabluft angestrebt werden sollte. Dies lässt sich in der VTP erreichen durch eine Reduzierung der Abluftmenge, die bei konstanter Zuluftmenge mit einem niedrigeren Leckluftanteil korrespondiert. Damit wird auch eine Korrektur der Nulllinie erreicht, und das Verhältnis von Zu- und Abluft liegt dann in der VTP mit 0,6 in einem günstigeren Bereich.

Die Erhöhung der Wasserbeladung der Abluft von 85 auf 120 g/kg entspricht einer Reduzierung der Haubenabluftmenge auf 70 % des Ausgangswertes. Proportional kann die Drehzahl der Ventilatoren reduziert werden, was zu einer Reduzierung der Leistungsaufnahme der Ventilatoren auf ca. 35 % der ursprünglichen Leistungsaufnahme führt. Dadurch lassen sich jährliche Stromeinsparungen von 560 MWh realisieren.

Zusätzliche Stromeinsparungen sind bei einer Erhöhung der Wasserbeladung der Abluft aus der NTP zu erwarten. Zur Kontrolle des Taupunktes sollten sowohl in der VTP als auch der NTP Fühler für die Taupunkttemperatur installiert und in das Prozessleitsystem (PLS) integriert werden.

Durch den Anschluss der Zuluft Bahnstabilisatoren an die WRG erhöht sich die Temperatur der Zuluft und die Trocknungskapazität in der ersten Vortrockengruppe wird gesteigert. Dies reduziert die Gefahr von lokalen Taupunktüberschreitungen und erhöht damit die Betriebssicherheit. Ferner wird die Ablufttemperatur in der VTP auf das Niveau der anderen Abluftströme gebracht.

Die Belüftung der Halle erfolgt im Wesentlichen über mechanische Belüftung mit Außenluft. Ein Teilstrom der Zuluft wird über die WRG der Trockenpartie erwärmt. Zusätzlich sind Heizregister installiert, die unter Nutzung der Brüden und des Kondensats aus dem Dampf- und Kondensatsystem die Beheizung der Produktionshalle sicherstellen. Es ergibt sich eine Luftwechselrate von 5 h<sup>-1</sup>.



Die Luftversorgung der Trockenhauben ist integraler Bestandteil der Lufttechnik in der Produktionshalle. Dies ist daran zu erkennen, dass einerseits die Beheizung der Hallenzuluft im Wesentlichen durch Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Haubenabluft erfolgt, andererseits zur Schließung der Luftbilanz in den Trockenhauben Luft aus der Halle angesaugt (Leckluft) wird. Durch die nicht ausgeglichene Haubenbilanz vor allem in der VTP wird ein hoher Leckluftanteil aus der Halle entnommen und erschwert die Entlüftung der Halle. Daraus resultieren lokal erhöhte Temperaturen und Feuchten.

Nach Reduzierung des Leckluftanteils der VTP wird sich ein ausgeglichenes Hallenklima einstellen. Ergänzend können die existierenden Entlüftungen in der Nasspartie und an der Leimpresse in Betrieb genommen werden. Unterstützend sollten an relevanten Stellen Fühler zur Kontrolle der Taupunkttemperatur installiert und in das PLS integriert werden. Wirtschaftlich wäre die Ansteuerung von bereits vorhandenen Abluftventilatoren, um lokale Kondensationsprobleme zu vermeiden.

Durch die Absenkung der Solltemperatur für die Zuluft von 24 auf 20 °C kann der Heizwärmebedarf um 840 MWh/a reduziert werden. In diesem Zusammenhang ist auf die Notwendigkeit der bereits oben erwähnten Installation von Taupunktfühlern in der Halle sowie ihre Integration in das PLS hinzuweisen.

Die Produktionshalle ist mit einer Zwischendecke ausgestattet, die mit einem Teilstrom der Zuluft für die Blasanlage der Vortrockenpartie nach Wärmetausch mit der Haubenabluft beheizt wird. Die Oberflächentemperatur der Zwischendecke wird dabei zur Vermeidung von Kondensation auf Temperaturen oberhalb des Taupunktes gehalten.

Nach Überprüfung und Wartung der Ventilatoren und Luftkanäle einschließlich der Heizregister und Klappensteuerung zur Beheizung der Zwischendecke mit warmer Luft sollten Strömungsmessungen in der Zwischendecke bzw. an den herab geführten Luftkanälen durchgeführt werden. Die Zwischendecke wird auf über 45 °C aufgeheizt. Diese Temperatur erscheint zu hoch und könnte durch Reduzierung der Luftmenge (gleichmäßige Luftverteilung in der Doppeldecke vorausgesetzt) gesenkt werden.

### **4.2.3 Stromverbrauch**

Wesentliche Stromverbraucher sind die im Langfaserstrang installierten Refiner und Disperger sowie das Vakuumsystem.

Der eingesetzte Refiner ist im Mittel nur zu 73 % ausgelastet, wobei die Stoffdichte stark zwischen 1,2 und 4,4 % schwankte. Typische Werte liegen bei 4-5 %. Die spezifische Mahlenergie ist stark abhängig von der Stoffdichte der Faserstoffsuspension.

Durch Erhöhung der Stoffdichte auf etwa 4,5 % können die spezifische Mahlenergie und damit der Energieverbrauch reduziert werden. Durch Anpassung der Stoffdichteregelung nach der Dispergierung ist ein Einsparpotenzial von 1.040 MWh/a realisierbar.

Zur Vakuumherzeugung werden Radialventilatoren und Wasserringpumpen eingesetzt. Die Regelung des Vakuumsystems erfolgt über Drossel- und Falschluffklappen.

Das Betriebswasser der Vakuumpumpen wird im Kreislauf über einen Kühlturm geführt. Die Frischwasserergänzung erfolgte mit Warmwasser. Die Temperatur des Dichtwassers betrug während des Untersuchungszeitraumes 33°C, die spezifische Leistungsaufnahme des Vakuumsystems

tems lag bei 58 kWh/t. Vergleichbare Anlagen haben eine spez. Leistungsaufnahme zwischen 42 und 60 kWh/t.

Durch Senkung der Dichtwassertemperatur werden eine Erhöhung des Ansaugvolumenstromes und eine Reduzierung des spezifischen Leistungsbedarfs ermöglicht. Damit wird die Reduzierung der Drehzahl bis hin zum Abschalten einer Pumpe realisierbar. Durch Optimierung des bestehenden Kühlkreislaufs und Nutzung von Kaltwasser als Ergänzungswasser lässt sich die Dichtwassertemperatur deutlich senken, so dass sich der Stromverbrauch um 250 MWh/a reduziert.

An der Saugpresswalze sind sowohl die Hoch- (Saugzone) als auch die Niedrigvakuumzone (Haltezone) an das Hochvakuumssystem angeschlossen. Durch Umschluss der Haltezone an das Niedrigvakuumssystem kann der Energiebedarf für die Vakuumerzeugung an der Saugpresswalze gesenkt werden.

Besonders sinnvoll ist die drehzahlgeregelte Leistungsanpassung für Vakuumerzeuger von Filz-Rohr-saugern, da sich mit zunehmender Filzlaufzeit Luft- und Vakuumbedarf durch Filzverstopfung und Filzkomprimierung ändern. Zu berücksichtigen ist, dass unterschiedliche Saugstellen an den betreffenden Vakuumpumpen angeschlossen sind.

Einzelne Pumpen im Prozess arbeiten aufgrund von Drossel- und Bypassregelung in energetisch ungünstigen Betriebspunkten. Abhängig vom Einsatzzweck der Pumpe können Einsparungen durch den Einsatz von FUs, den Einbau kleinerer Laufräder oder durch kleinere Pumpen in Höhe von 150 MWh/a erzielt werden.

Ein Großteil der Rührwerke wird durch Keilriemenantrieb angetrieben. Durch einen Wechsel von Keilriemenantrieb zu Getrieben lassen sich Effizienzsteigerungen von 5-10%, entsprechend Stromeinsparungen von 100 MWh/a realisieren.

Die Druckluftversorgung des Werkes erfolgt über eine Ringleitung mit einem Netzdruck von 8 bar. Empfohlen wird eine schrittweise Absenkung des Netzdruckes auf 7 bar. Dadurch ließen sich jährlich 190 MWh Strom einsparen.

Im Untersuchungszeitraum wurden die Kompressoren zu 95 % im Lastlauf betrieben. Die Druckluftherzeugung hat damit die Leistungsgrenze erreicht und sollte durch weitere Kompressoren ergänzt werden. Im Winter wird die Kompressorenabwärme für Heizzwecke genutzt.

Die Potenziale der vorgeschlagenen Maßnahmen sind in Tabelle 4.2-1 nochmals zusammengefasst.

**Tabelle 4.2-1 Zusammenfassung der möglichen Einsparpotenziale**

<b>Bereich</b>	<b>Maßnahmen</b>	<b>Energie-träger</b>	<b>Einsparung MWh/a</b>	<b>Payback</b>
Dampf- und Kondensatsystem	Instandsetzung von der Isolierung	Dampf	100	1 -2 Jahre
Dispergierung	Erhöhung der Stoffdichte durch gleichmäßigere Beaufschlagung des Eindickers	Dampf	2.250	Ca. 1 Jahr
Trockenhaube	Reduzierung der Abluftmenge der VTP	Strom	560	< 1 Jahr
Hallenklimatisierung	Reduzierung der Solltemperatur von 24 auf 20 °C	Dampf	840	< 1 Jahr
Mahlung	Vermeidung von Stoffdichteschwankungen	Strom	1.040	< 1 Jahr
Vakuumsystem	Reduzierung der Temperatur im Dichtwasserkreislauf	Strom	250	<< 1 Jahr
Pumpen	Drehzahlregelung bzw. kleinere Laufräder	Strom	150	3 Jahre
Rührwerke	Wechsel des Keilriemenantriebs zu Getriebe	Strom	100	4 Jahre
Druckluft	Schrittweise Absenkung des Netzdruckes	Strom	190	<< 1 Jahr

### 4.3 Altpapierhaltiges Spezialpapier

Der betrachtete Betrieb stellt altpapierhaltiges Tapetenrohpaper her. Dieses Sortiment lässt sich der Produktkategorie Technische und Spezialpapiere zuordnen, in der sowohl hinsichtlich der Produktionsverfahren, als auch der Produkte eine große Variationsbreite herrscht. Die Produktqualität wird dabei oft auch durch die Rohstoffzusammensetzung charakterisiert. Nachfolgende Liste gibt einen Überblick über die Bandbreite dieser Produktkategorie:

- Zigarettenpapier
- Filterpapier
- Transparentpapier
- fettdichtes Papier / Pergamentpapier
- Banknotenpapier
- Dekorpapier
- Elektroisolierpapier
- Fotopapier
- Synthesefaserpapiere

Aufgrund der großen Unterschiede sowohl hinsichtlich der Produktionsverfahren als auch der Produkteigenschaften ist eine Übertragung folgender Untersuchungsergebnisse auf andere Betriebe mit Produkten aus dem Segment technische und Spezialpapiere nur eingeschränkt möglich.

#### 4.3.1 Produktionsdaten und Struktur der Anlage

Der untersuchte Betrieb stellt jährlich ca. 34.000 t altpapierhaltiges Spezialpapier auf drei Papiermaschinen A, B und C her. Der Energiebedarf für die Papierproduktion liegt verglichen mit anderen überwiegend Altpapier verarbeitenden Betrieben auf normalem Niveau. Allerdings ist aufgrund der angeschlossenen Verarbeitung der Bedarf für die Gebäudeheizung des gesamten Werks relativ hoch. Bei der Gebäudeheizung wird das größte Einsparpotenzial identifiziert. Durch die relativ niedrige jährliche Betriebszeit von etwa 4.000 h/a sind die Amortisationszeiten für Investitionen zur Reduzierung des Energieverbrauchs deutlich länger als bei anderen Werken.

Bezogen auf die Nettoproduktion hat die Papierproduktion dieses Werkes folgende spezifische Dampf- und Stromverbräuche im Jahresmittel (Referenzzeitraum 2005):

---

<b>Spezifischer Verbrauch</b>	<b>2.650 kWh/t Papier</b>
Strom	950 kWh/t Papier
Dampf	1.700 kWh/t Papier

---

#### 4.3.2 Dampfverbrauch

Der gesamte Dampf wird im betriebseigenen Kesselhaus in zwei Kesseln erzeugt. Der in den Kesseln produzierte Satttdampf (11 bar, 185 °C) wird auf etwa 3,5 bar ohne weitere Nutzung des Energieinhaltes entspannt. Ein weiterer Kessel wird in Bereitschaft gehalten. Als Brennstoff

kommt überwiegend Ergas zum Einsatz, nur ein geringer Teil des Energiebedarfs der Kessel wird über Heizöl gedeckt.

Aufgrund des hohen Dampfbedarfs für Heizzwecke richtet sich die Betriebsstundenzahl der Kessel nach dem Heizwärmebedarf. In der Heizperiode werden die Kessel daher auch am Wochenende durchgängig betrieben.

Der Beitrag des Bereitschaftskessels zur Dampfversorgung ist sehr gering. Daher ist es aus Gründen der Energieversorgung nicht erforderlich, den Kessel in Warmreserve zu halten. Als Einsparung lassen sich 480 MWh/a erzielen.

Die Kessel sollten hinsichtlich ihrer Isolierung insbesondere an den Rauchgaskanälen sowie den Stirnseiten (Brenner) überprüft werden. Durch eine optimierte Isolierung der Kessel lassen sich die Abstrahlverluste reduzieren, eine Isolierung der Kondensatrückleitung ins Kesselhaus steigert die Speisewassertemperatur der Kessel.

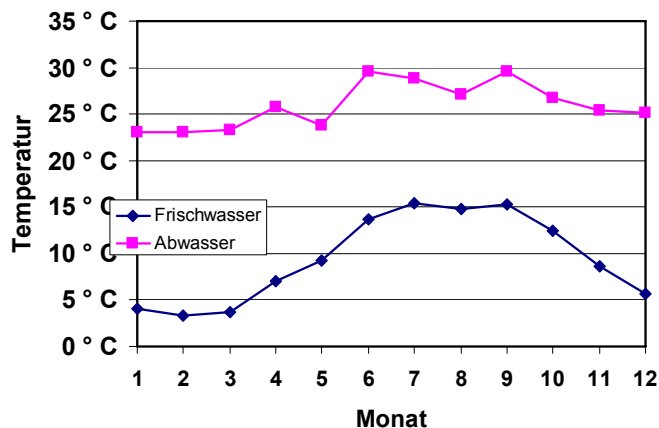
Die installierte Raumheizung im Kesselhaus sollte abgeschaltet werden, so dass sich 130 MWh/a an Heizwärme einsparen lassen.

Ferner kann der Heizenergiebedarf der Wasseraufbereitung weitgehend durch die Kompressorabwärme einer nahegelegenen Druckluftstation gedeckt werden.

Bei den Versorgungsleitungen liegen keine Engpässe vor. Zu den einzelnen Verbrauchern gibt es für die Teilanlagen Messungen der Dampfmenge. Alle wesentlichen Dampf- und Kondensatleitungen sind isoliert. Die Verluste an Dampf bzw. Kondensat im gesamten Werk sind gering.

Um den Energieinhalt des Sattdampfes bei der Entspannung von 11 auf ca. 3,5 bar nutzen zu können bietet sich die Installation einer einstufigen Gegendruckturbine mit großem Regelbereich zur Eigenstromversorgung an. Aufgrund der geringen Betriebszeiten kann nur der Dampfmassenstrom berücksichtigt werden, der für die Produktion in den Papiermaschinen erzeugt wird. Damit können jährlich rund 600 MWh Strom erzeugt werden. Dies schlägt sich nicht nur in einer entsprechenden Einsparung des Fremdstrombezugs nieder, sondern ermöglicht darüber hinaus auch Steuereinsparungen für Strom aus KWK-Anlagen. Die Amortisationszeit für diese Maßnahme liegt bei etwa drei Jahren.

Der Betreiber bezieht Flusswasser als Produktionswasser. Das Abwasser wird indirekt eingeleitet. Der Jahrestemperaturgang von Frisch- und Abwasser ist im Diagramm dargestellt:



**Abbildung 4.3-1: Jahresgang von Frisch- und Abwassertemperaturen**

Im Vergleich zu anderen Anlagen mit überwiegendem Altpapiereinsatz sind die Temperaturen im Kernprozess mit ca. 27 °C (Papiermaschine A), 34 °C (Papiermaschine B) und 32 °C (Papiermaschine C) relativ niedrig.

Das Potenzial liegt in einer Aufwärmung des Frischwassers im Wärmetausch mit dem Abwasser. Dadurch kann die Siebwassertemperatur um etwa 4 bis 5 °C im Mittel erhöht werden, was eine bessere Entwässerung in der Pressenpartie zur Folge hat und zu einer Reduzierung im Dampfverbrauch der Trockenpartie führt. Es wird von einer Reduzierung um 0,4% pro 1 Grad Temperaturerhöhung ausgegangen. Damit ließen sich Einsparungen von 1.030 MWh/a realisieren, die nach etwa 2 Jahren zu einer Amortisation der erforderlichen Installation eines Plattenwärmetauschers führen.

Neben der vorgeschlagenen Maßnahme führt auch eine Reduzierung des Frischwasserverbrauchs (spezifische Einengung) zu höheren Prozesstemperaturen. Zur Quantifizierung und Erschließung dieses Potenzials sind weitere Untersuchungen und Investitionen erforderlich.

Die Haubenzuluft der Papiermaschine A setzt sich aus Frisch- und Umluft zusammen, das Mischungsverhältnis wird fix über eine Handklappe eingestellt.

Durch die Installation eines Temperaturreglers zur Steuerung des Frischluftanteils lässt sich in Abhängigkeit von der Außentemperatur der Umluftanteil so regeln, dass die Mischtemperatur weitgehend konstant ist. Anzustreben ist eine Anhebung der Temperatur um 5 °C auf ca. 25 °C. Damit lassen sich jährlich 125 MWh Dampf einsparen.

Die Haubenzuluft wird über ein Dampfregister weiter auf rund 120 °C aufgeheizt. Nach der Trocknung wird die Haubenabluft ohne Wärmerückgewinnung abgeführt. Durch Wärmerückgewinnung lassen sich jährlich 650 MWh einsparen. Allerdings ist die Installation eines Glasrohrwärmetauschers notwendig, woraus Amortisationszeiten von rund 7 Jahren resultieren.

Generell empfehlenswert ist eine regelmäßige Kontrolle des Wartungszustandes der Haubenluftversorgung (Luftfilter) sowie des Verhältnisses der Zu- und Abluftvolumenströme, um mögliche Leckagen zu identifizieren. Hierzu sind nach dem Dampfregister weitere Messstellen sinnvoll.

An den Papiermaschinen B und C wird die Haubenzuluft jeweils über einen Luft-Luft-Glasrohrwärmetauscher durch die Haubenabluft vorgewärmt, anschließend erfolgt über ein Dampfregister die Einstellung der Zulufttemperatur von ca. 120 °C.

Regelmäßige Messungen zur Kontrolle der WRG sowie zum Wartungszustand der Haubenluftversorgung werden empfohlen.

Es sind viele unregelmäßige Dampfregister vorhanden, bei denen Einsparpotenziale zu erwarten sind.

Für eine exakte Bestimmung des Einsparpotenzials im gesamten Werk ist eine detaillierte Bestandsaufnahme über die Anzahl und Dampfmasseströme der unregelmäßigen Dampfregister erforderlich. Durch eine bedarfsorientierte Regelung der Dampfregister lassen sich pro Register Einsparpotenziale von mindestens 20 % realisieren. Investiert werden muss in diesem Fall in eine Temperaturregelung, die Amortisationszeiten liegen unter einem Jahr.

Das Einsparpotenzial an Heizenergie ist für das Werk beträchtlich und beträgt insgesamt 6.900 MWh/a. Zur Realisierung des Einsparpotenzials tragen auch die Maßnahmen zur Dampfeinsparung z.B. beim Dampf- und Kondensatsystem, im Kesselhaus oder zur Nutzung von Kompressorabwärme aus der Druckluftversorgung (siehe dort) bei.

Durch eine Umstellung der Hallenbelüftung von einer reinen Außenluftversorgung auf Mischluft lässt sich die Zulufttemperatur während der Heizperiode anheben. Limitierend sind die raumlufttechnischen Anforderungen, da eine Unterschreitung des Taupunktes auf jeden Fall vermieden werden muss. Wesentliche Wärmequelle ist die Maschinenabwärme, so dass eine zusätzliche Heizung nur bei äußerst niedrigen Außentemperaturen und Maschinenstillstand erforderlich ist.

Damit reduziert sich der Dampfverbrauch für die Erwärmung der Zuluft. Durch eine Temperaturregelung kann in Abhängigkeit von der Außentemperatur der Umluftanteil in den drei Produktionshallen auf maximal 75 % erhöht werden. Damit können die Dampfregister zur Aufheizung der Zuluft in vielen Fällen geschlossen werden. Sie werden nur bei Bedarf temperaturgeregelt geöffnet. Die Einsparungen betragen insgesamt 2.280 MWh/a.

Wärmeverluste entstehen derzeit auch aufgrund des Zustandes der Gebäudehülle sowie mangelnder Isolierung von Außenwänden und Dächern. Daraus resultiert ein jährlicher Wärmeverlust von 130 MWh, der sich durch Instandhaltung und Isolierung auf 26 MWh/a reduzieren lässt.

### **4.3.3 Stromverbrauch**

Die Refiner arbeiten im Teillastbetrieb, so dass der Stromverbrauch durch einen hohen Leerlaufanteil bestimmt wird. Da die Leerlaufleistung als fixer Stromverbrauch beim Betrieb eines Refiners unabhängig der Betriebsweise und Auslastung anfällt, ist der energetisch günstige Volllastbetrieb anzustreben. Ein höherer Durchsatz (beim Volllastbetrieb) hat eine Absenkung des Anteils der Leerlaufleistung zur Folge. Dies kann durch einen diskontinuierlichen Betrieb der Mahlstraße (Chargenbetrieb) erreicht werden. Durch diese Maßnahme sind Stromeinsparungen von 130 MWh/a möglich. Durch Betriebsversuche ist vorab allerdings das Mahlergebnis zu prüfen.

In der Sieb- und Pressenpartie werden Drehkolben-Vakuumpumpen zur Vakuumerzeugung eingesetzt. Die Regelung erfolgt über Drossel- und Falschluffklappen. Es wird teilweise eine starke Drosselung um bis zu

50 % festgestellt. Durch Anpassung der Vakuumleistung durch Drehzahländerung kann der Stromverbrauch um 65 MWh/a gesenkt werden.

Ferner werden im Werk zwei Wasserring-Vakuumpumpen eingesetzt, die ebenfalls über Drossel- und Falschluffklappen zu regeln sind. Die Drosselung beträgt bis zu 60 %. Zur besseren Auslastung der Wasserringpumpen wird ein Umschluss der angeschlossenen Verbraucher auf eine Wasserringpumpe (WRP) und eine Drehzahlreduzierung der anderen WRP empfohlen. Damit lassen sich Einsparungen von 120 MWh/a realisieren.

Bei Pumpen mit einer Motorleistung über 20 kW wurde geprüft, ob Frequenzregelung oder Drosselregelung vorliegen. Bei gedrosselten Pumpen wird geklärt, ob sie in einem ungünstigen Betriebspunkt arbeiten. Das Einsparpotenzial für einzelne Pumpen wird mit verbessertem Wirkungsgrad und ohne den erhöhten Druckverlust der Drosselklappe berechnet.

In der Stoffaufbereitung und an der Papiermaschine A sind Maßnahmen für drei stark gedrosselte Pumpen vorgeschlagen worden. Durch die Installation kleinerer Laufräder bzw. durch Drehzahlregelung mit Frequenzumrichtern lässt sich hier ein Einsparpotenzial von 50 MWh/a mit einem Payback von vier Jahren realisieren.

In den Anlagenteilen Papiermaschine B und C erfolgt die Regelung der installierten Pumpen ausschließlich über Drosselung, Frequenzumrichter sind dort nicht installiert.

Durch den Einbau kleinerer Laufräder bzw. durch Drehzahlregelung mit Frequenzumrichtern lassen sich an fünf ausgewählten Pumpen allein Einsparungen von 360 MWh/a mit einer mittleren Amortisationszeit von weniger als 2 Jahren realisieren.

An den Papiermaschinen A, B und C sind danach weitere Potenziale in Höhe von 230 MWh/a vorhanden. Die vorgeschlagenen Maßnahmen amortisieren sich allerdings erst nach längerer Laufzeit und wurden daher nicht weiter betrachtet.

Die Druckluft (DL) wird mit einem Netzdruck von 8,3 - 9 bar mit sechs luftgekühlten, einstufigen Schraubenkompressoren in verteilten drei Stationen produziert. Die Kompressoren werden übergeordnet durch eine Druckbandregelung über ein Kompressorleitsystem geregelt, das auch eine Erfassung des Luftverbrauchs und die Einzelansteuerung von Kompressoren erlaubt. Jedem Kompressor ist ein Kältetrockner nachgeschaltet, die Druckluft wird in Druckluftkesseln gespeichert.

Das Druckluftnetz ist gewachsen und daher hinsichtlich der Druckluftverteilung nicht optimiert. Es sind in einem großen Umfang Verluste durch Leckagen sowie Druckverluste durch ungünstige Rohrquerschnitte festgestellt worden. Die identifizierten Leckagen verursachen einen Strombedarf von 260 MWh/a. Eine systematische und regelmäßige Untersuchung der Rohrleitungen sowie der Leckagerate hinsichtlich Querschnitten und Druckverlusten ist zu empfehlen. Bei vergleichbaren historisch gewachsenen Werken beträgt das Einsparpotenzial der Druckluftherzeugung bis zu 30 % des Stromverbrauchs.

Die Kompressoren laufen auch bei eingeschränktem Druckluftbedarf weiter, solange in einem Betriebsteil DL benötigt wird. Durch eine Analyse des DL-Verbrauchs der einzelnen Betriebsteile lassen sich deutliche Einsparpotenziale ermitteln, so dass sich die Betriebsstundenzahl der Kompressoren um rund 1.000 h reduzieren lässt. Damit können weitere 220 MWh/a Strom eingespart werden.



Um die Schaltrate der Kompressoren zu limitieren, ist eine ausreichende Kapazität der DL-Speicher notwendig. Berechnungen ergaben für die einzelnen DL-Zentralen ein erforderliches Speichervolumen von je 5 m<sup>3</sup>, das gegenwärtig nicht zur Verfügung steht. Eine großzügige Dimensionierung der Druckluftspeicher ist wirtschaftlich günstig.

Der Netzdruck sollte im Anschluss an eine Optimierung der Druckluftverteilung auf 6,5 bis 7 bar reduziert werden. Je bar Druckabsenkung lassen sich 6 % der Kompressorleistung einsparen, wodurch sich im konkreten Fall weitere 150 MWh/a Strom sparen lassen.

Die Abwärme der luftgekühlten Schraubenkompressoren kann als Wärmequelle für die Raumheizung erschlossen werden. Die Druckluftkompressoren in den drei Zentralen stellen jeweils Abwärme von 220 MWh/a zur Verfügung. Sie können damit ortsnah zu Heizzwecken verwendet werden und ergeben damit insgesamt eine Dampfeinsparung von 660 MWh/a. Trotz der erforderlichen Investitionen (Ventilator, Temperaturregelung, Lüftungsklappen, Rohrleitungen) amortisiert sich diese Maßnahme innerhalb eines Jahres.

Außerdem soll eine Dokumentation des DL-Systems erstellt und die durchgeführten Wartungsarbeiten wie z.B. Luftfilterwechsel verzeichnet werden.

Die Potenziale der vorgeschlagenen Maßnahmen sind in Tabelle 4.3-1 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4.3-1 Zusammenfassung der möglichen Einsparpotenziale

Bereich	Maßnahmen	Energie-träger	Einsparung MWh/a	Payback
Kesselhaus	Vermeidung Warmreserve des Ersatzkessels	Dampf	480	<< 1 Jahr
	Abschaltung Raumheizung	Dampf	130	<< 1 Jahr
Dampf- & Kondensat	Nutzung der Druckentspannung zur Eigenstromerzeugung	Strom	600	3 Jahre
Haubenluft	Steuerung des Frischluftanteils	Dampf	125	1 Jahr
	Wärmerückgewinnung zur Zulufterwärmung	Dampf	650	7 Jahre
Prozesstemperatur	Wärmerückgewinnung aus Abwasser für Produktionsfrischwasser	Dampf	1.030	2 Jahre
Mahlung	Diskontinuierlicher Betrieb	Strom	130	< 1 Jahr
Pumpen	Drehzahlregelung, kleinere Laufräder	Strom	410	2 – 4 Jahre
Vakuumanlagen	Drehzahlreduzierung Wasserringpumpen	Strom	120	1 Jahr
	Drehzahlreduzierung Kolbengebläse	Strom	65	1 – 4 Jahre
Druckluft	Regelmäßige Instandsetzung von Leckagen	Strom	260	< 1 Jahr
	Optimierung der Steuerung	Strom	220	< 1 Jahr
	Schrittweise Absenkung des Netzdruckes	Strom	150	< 1 Jahr
	Abwärmenutzung zur Raumbeheizung	Dampf	660	1 Jahr
Raumluft	Regelung der Heizregister	Dampf	1.340	< 1 Jahr
	Umstellung der Frischluftzufuhr	Dampf	2.280	< 1 Jahr
	Gebäudeisolierung	Dampf	104	8 Jahre

## 4.4 Ungestrichene grafische Papiere

Bei grafischen Papieren handelt es sich um holzhaltige oder holzfreie Papiere, die zur Herstellung von Druckerzeugnissen verwendet werden.

In dieser Kategorie werden alle Papiere zusammengefasst, die als Träger gedruckter Informationen dienen. Der Flächengewichtsbereich erstreckt auf 40 bis 150 g/m<sup>2</sup>.

Ungestrichene grafische Papiere sind mengenmäßig bedeutend und umfassen ein breites Produktspektrum. So werden z.B. ungestrichene Zeitschriftenpapiere, Dünndruckpapier für Werbezwecke sowie Zeitungsdruckpapiere für kurzlebige Druckerzeugnisse mit niedrigen Qualitätsansprüchen in großen Mengen produziert.

Zeitungsdruckpapier zeichnet sich durch ein Flächengewicht von 40 bis zu 56 g/m<sup>2</sup> aus und ist üblicherweise aus holzhaltigem Faserstoff hergestellt. Es kommen schnell laufende Papiermaschinen ohne Streicheinheit und mit Kalandern zum Einsatz.

### 4.4.1 Produktionsdaten und Struktur der Anlage

Diese Papierfabrik stellt Papier für den Zeitungsdruck sowie hochwertige grafische Recyclingpapiere her und produziert auf der hier betrachteten Papiermaschine im Jahr 2005 ca. 55.000 t im Grammaturbereich zwischen 50 und 110 g/m<sup>2</sup>.

Bezogen auf die Nettoproduktion hat dieses Werk im Jahresmittel folgenden spezifischen Dampf- und Stromverbrauch (Referenzzeitraum 2005):

---

<b>Spezifischer Verbrauch</b>	<b>2.300 kWh/t Papier</b>
Strom	1.000 kWh/t Papier
Dampf	1.300 kWh/t Papier

---

### 4.4.2 Dampfverbrauch

Die Dampferzeugung erfolgt in einem extern betriebenen Heizkraftwerk. Dieses war nicht im Untersuchungsumfang enthalten. Dampf wird in der Trockenpartie der Papiermaschine, im Disperger, im Glättwerk, im Stärkekocher sowie zu Heizzwecken eingesetzt.

Die Versorgung erfolgt über ein Dampf- und Kondensatnetz; bei den Versorgungsleitungen wurden keine Engpässe identifiziert. Allerdings sind insbesondere bei der Heizwärmeversorgung Leckagen und mangelnde Isolierung aufgefallen. Unter der konservativen Annahme, dass 200 m Rohrleitung mit Nennweite DN50 bei 100°C unisoliert sind, ergibt sich ein Einsparpotenzial von mehr als 180 MWh/a.

Das Kondensat wird ohne Mengemessung über den Kondensatsammler und an den Energieversorger zurückgeführt. Eine Nachrüstung von Messstellen zur möglichst weitgehenden Erfassung aller Hauptdampf- und -kondensatströme wird empfohlen, da dadurch erhöhte Transparenz über die wesentlichen Verbraucher erreicht wird und Abweichungen zum üblichen Verbrauch eindeutige Hinweise z.B. auf Leckagen geben.

Der Frischdampf wird mit 17 bar bereitgestellt und unmittelbar an der Übergabestation auf 6,5 bis 7 bar zur Versorgung der Hauptdampfschiene gedrosselt. Für die Papiermaschine erfolgt eine weitere Drosselung je

nach Papiersorte auf 4,5 bis 2 bar. Alle restlichen Verbraucher benötigen Dampf bei 2 bar.

Zur Nutzung des Energieinhaltes bei der Reduzierung von 17 auf 7 bar zur Eigenstromerzeugung kämen entweder eine einstufige Gegendruckturbine oder ein Dampfmotor in Frage. Der Einsatz kann entweder auf Seiten des Heizkraftwerks oder im Eigenbetrieb erfolgen. Verfügbar ist hierfür ein Dampfmassenstrom von 90.380 t/a, so dass sich ein Einsparpotenzial im Fremdstrombezug von 1.640 MWh/a ergibt. Diese Investition hat Paybackzeiten von 2,6 bis 2,9 Jahren.

Nach Auskunft des Betreibers ist die Trockenpartie für die derzeit bevorzugt gefahrenen leichten Papiersorten überdimensioniert. Sofern eine Entscheidung für die Einengung des Produktspektrums auf leichte Grammaturen getroffen wird, sollte die Abschaltung des hinteren Teils der Trockenpartie sowie eine Mengenreduzierung der Haubenluft geprüft werden.

Die Trockenhaube der Papiermaschine wird durch zwei Ventilatoren (Zuluftventilatoren 1 und 2) mit Frischluft versorgt. Die Frischluft wird über zwei Nachströmöffnungen angesaugt, wobei die Massenströme der lufttechnischen Auslegung der Haube im Untersuchungszeitraum nicht erreicht wurden. Dies ist zu einem großen Teil auf eine Verschmutzung der Luftansauggitter zurückzuführen.

Es ist eine Wärmerückgewinnung aus der Haubenabluft installiert, mit einer Ablufttemperatur nach Wärmetauscher von 55 °C. Um bei dieser Temperatur Kondensation zu vermeiden, ist die Wasserbeladung der Abluft auf 80 g/kg beschränkt. Aus der Haubenbilanz ergibt sich damit ein erforderlicher Abluftmassenstrom von 145.000 kg/h (feucht). Durch eine deutliche Reduzierung um 25% der derzeitigen Abluftmenge lassen sich ohne die Gefahr von Taupunktunterschreitungen beträchtliche Einsparpotenziale sowohl beim Dampfbedarf (4.130 MWh/a) als auch beim Stromverbrauch für Ventilatorantriebe der Trockenhaube (90 MWh/a) realisieren. Dies kann durch eine Drehzahlreduzierung erfolgen, wobei der Ventilator nach der Abluffeuchte geregelt werden sollte.

Die beiden installierten Abluftventilatoren sind je für 65.000 kg/h ausgelegt, so dass die Gesamtmenge von 145.000 kg/h über dem Nennbereich liegt. Dies wurde offensichtlich im Zuge der Produktionssteigerung und der damit verbundenen Erhöhung der Maschinengeschwindigkeit durch Steigerung der Motordrehzahl der Ventilatoren erreicht. Damit ist jedoch auch eine überproportionale Erhöhung des Energiebezugs für die Ventilatoren verbunden.

Das Verhältnis der gemessenen Massenströme Haubenzuluft zu Haubenabluft liegt weit unterhalb des bei modernen Hauben anzustrebenden Verhältnisses von 0,7. Als Konsequenz tritt ein hoher Leckluftstrom über das Kellergeschoss in die Haube ein. Diese Luft ist mit ca. 25 bis 35 °C deutlich kälter als die Haubenzuluft und in der Regel mit einer größeren Wasserfracht beladen. Dies kann die Gefahr von lokalen Taupunktunterschreitungen in der Haube erhöhen. Durch eine Erhöhung der Zuluftmenge kann dem begegnet werden. Der Strombedarf für die Zuluftventilatoren steigt dann zwar, gleichzeitig sinkt jedoch der Heizwärmebedarf für die Halle, wie später noch dargestellt wird. Erforderlich ist hierfür eine Drehzahlregelung mit Frequenzumrichter für den Zuluftventilator, mit dessen Hilfe die Ventilatordrehzahl entsprechend der erforderlichen Trockenleistung der Haube produktabhängig gesteuert werden kann.

Darüber hinaus sollte die Leistungsaufnahme aller Ventilatoren ermittelt und überprüft werden, ob die jeweils installierte Motorleistung ausrei-

chend dimensioniert ist. Dies ist für eine hohe Anlagenverfügbarkeit unabhängig von energiewirtschaftlichen Erwägungen notwendig. Gegebenenfalls sind Antriebsmotoren gegen stärkere, mit Effizienzklasse 1 (EFF 1) auszutauschen. Die Lufttechnik in der Haube und der Halle muss aufeinander abgestimmt werden, da auch nach Durchführung der Maßnahmen Leckluft aus der Halle in die Haube strömen wird. Ferner ist auf eine möglichst niedrige Wasserbeladung aller Zuluftströme zu achten.

Für Heizzwecke wurden im Bezugsjahr 14.570 t Frischdampf entsprechend 9.910 MWh/a verwendet.

Zur Heizung wird in der Regel Frischluft angesaugt und über unregulierte Heizregister erwärmt. Lediglich ein Werkstattbereich wird bereits zum Teil mit Kondensat beheizt. Zu dem hohen Heizenergiebedarf tragen auch die identifizierten Leckagen sowie die schlechte Isolierung des Dampf- und Kondensatsystems bei.

Es besteht Einsparpotenzial beim Dampfeinsatz für die Heizung durch

- Anpassung der Heizung in schwach genutzten Räumen an die aktuelle Raumnutzung (Luftwechsel reduzieren, Temperatur absenken)
- höheren Umluftanteil der Zuluft
- Optimierung des Versorgungsnetzes (Leckagen, Isolierung)
- Dampfmengenregelung der Heizregister über Temperatur

Bei einer angestrebten Raumtemperatur von 20 °C unter Berücksichtigung des zu heizenden Raumvolumens und der erforderlichen Luftwechselrate wurde der optimierte Heizwärmebedarf zu 5.360 MWh/a ermittelt, so dass sich ein Einsparpotenzial von 4.550 MWh/a bzw. 6.690 t Dampf jährlich ergibt.

Bislang ist keine adäquate Anpassung der Raumheizung an die aktuelle Raumnutzung erfolgt. Durch eine Reduzierung der Luftwechselrate (Außenluft) lässt sich in verschiedenen Gebäuden der Heizwärmebedarf deutlich reduzieren.

So wird eine frühere Produktionshalle derzeit als Lagerraum für Fertigwaren verwendet. Von einem ausreichenden Frostschutz und der Vermeidung von Kondensation abgesehen, ist hier keine weitere Raumheizung erforderlich.

Der Aufwand ist überwiegend den Instandhaltungsmaßnahmen zuzuordnen, so dass nur geringe Investitionen z.B. für die Temperaturregelung der Heizregister notwendig sind. Die Paybackzeiten liegen daher unter einem Jahr.

Die Hallenzuluft wird über zwei Stränge der Halle Papiermaschine zugeführt. Messungen ergaben, dass der Volumenstrom der Zuluftventilatoren bei nur 72 % des Nennvolumenstroms lag. Dies war auf Verschmutzungen der Frischluftfilter, der Heizregister sowie der Ansaugöffnungen zurückzuführen. Die Hallenabluft wird maßgeblich über Deckenventilatoren abgeführt. Die Bilanz der Hallenzu- und -abluft deutet darauf hin, dass die nicht über die Ventilatoren gelieferte Zuluft über geöffnete Türen, (Dach-) Fenster, Tore usw. unkontrolliert und nicht temperiert angesaugt wird.

Derzeit ist der Luftwechsel in der Halle zusätzlich erhöht, da ein beträchtlicher Teil der Hallenluft als Leckluft in die Trockenhaube gesaugt wird.

Durch einen teilweisen Umluftbetrieb mit der Hallenabluft kann unter Beibehaltung der Wasserbeladung der Dampfbedarf für die Raumhei-

zung gedrosselt werden. Dabei wird ein Teil der Frischluft durch den Abluftstrom eines Abluftventilators ersetzt und die Zulufttemperatur in der Heizperiode auf durchschnittlich  $\sim 20^{\circ}\text{C}$  gesteigert. Außerhalb der Heizperiode kann der Frischluftanteil auf bis zu 100 % erhöht werden. Damit lassen sich Einsparungen von 1.570 MWh/a bzw. 2.310 t Dampf/a erzielen. Die erforderlichen Investitionen für Lüftungskanäle, Regelung und Gebläse sind mit Paybackzeiten unter einem Jahr zu realisieren.

Die Solltemperaturen der Frischluft nach Dampfregister in beiden Strängen können ohne Gefahr der Taupunktunterschreitung gesenkt und damit der Dampfverbrauch weiter reduziert werden.

Durch eine Optimierung der Lufttechnik für die Trockenhaube lässt sich der Anteil der Hallenluft, der derzeit in die Haube eintritt (Leckluft), deutlich reduzieren. Damit sinken die Luftwechselrate in der Halle und der Energiebedarf zur Raumheizung.

Zur Vermeidung von Taupunktunterschreitungen soll das Hallenklima hinsichtlich der Taupunkttemperatur an verschiedenen Stellen kontrolliert werden. Gegebenenfalls kann in Abhängigkeit von der jeweiligen Taupunkttemperatur in der Halle die Temperatur der Hallenzuluft gesenkt werden. Eine Integration der zusätzlichen Messfühler in das Prozessleitsystem ist vorteilhaft, so dass Luftwechsel und Temperatur an die jeweiligen Verhältnisse angepasst werden können.

#### **4.4.3 Stromverbrauch**

Die Stromversorgung erfolgt wie die Dampfversorgung ebenfalls durch den örtlichen Energieversorger.

Zu den Hauptverbrauchern zählen Stoffauflaufpumpen, Pulper und Disperger sowie der Antrieb der Papiermaschine und der Konstantteil. Der Stromverbrauch der Papiermaschine korreliert unmittelbar mit der Maschinengeschwindigkeit. Bei der Maximalgeschwindigkeit der Papiermaschine laufen einige Antriebe mit 85 Hz und damit außerhalb des optimalen Betriebspunktes. Dies gilt auch für einen Teil der Antriebsmotoren für die Lufttechnik. Die Effizienzklassen der eingesetzten Motoren sind unbekannt und FU sind nicht flächendeckend installiert.

Auffällig ist der hohe Anteil an sonst nicht erfassten Verbrauchern, bei denen es sich nach Betreiberankunft im Wesentlichen um die Beleuchtung handelt. Durch die Ermittlung der sonstigen nicht erfassten Verbraucher lässt sich möglicherweise weiteres Einsparpotenzial ermitteln.

Der Stromverbrauch der Hauptverbraucher lässt sich durch die in den folgenden Abschnitten erläuterten Einzelmaßnahmen reduzieren:

Der Gesamtstromverbrauch der Stoffaufbereitung ist gegenüber typischen Werten etwas erhöht.

Eine Erhöhung der Disperger-Stoffdichte um 3 %-Punkte auf 25% führt zu Dampfeinsparung für die Stoffaufwärmung von  $\sim 1.100$  MWh/a bei Paybackzeiten von ca. 2 Jahren. Voraussetzung ist die Erhöhung der Zulaufstoffdichte zu den Entwässerungsschnecken nach dem Scheibenfilter. Gleichzeitig führt eine höhere Stofftemperatur zu Stromeinsparungen, was aber nur bei hoher Disperger-Stoffdichte und hoher Schmutzpunktreduktion rentabel ist.

An der Papiermaschine werden Wasserring-Vakuumpumpen und einstufige Gebläse zur Vakuumerzeugung eingesetzt, die über Drossel- und

Falschluffklappen geregelt werden. Das Dichtwasser der Wasserringpumpen wird im Kreislauf über einen Kühlturm geführt.

Am ersten und zweiten Filzrohrsauger liegt überdurchschnittlich hohes Vakuum an. An einer der Vakuumpumpen liegt am Saugstutzen ein höheres Vakuum an, als an den anderen Saugstellen. Es sind relativ viele Drosselventile installiert. Die Überkapazität gegenüber dem tatsächlichen Bedarf sollte durch eine Drehzahlreduzierung (Änderung der Übersetzung durch einen Wechsel der Riemenscheibe) reduziert werden. Die Drosselregelung sollte durch eine Falschluffregelung ersetzt werden. An zwei weiteren Vakuumpumpen sollte die Betriebsweise geprüft und gegebenenfalls eine Falschluffregelung installiert werden.

Ein Gebläse wird relativ stark angedrosselt. Hier kann die Drehzahl reduziert werden durch Wechsel der Riemenscheiben.

Insgesamt ergeben sich durch die vorgeschlagenen Maßnahmen Einsparpotenziale von 230 MWh/a bei Paybackzeiten von unter 2 Jahren.

Für die Antriebe im konstanten Teil zeigte sich ein erhöhter Strombedarf. Dabei ist die spezifische Leistung bei geringer Produktionsmenge höher. Der spezifische Strombedarf wird bei steigendem Stoffdurchsatz günstiger, da die Pumpen in einem Betriebspunkt mit besserem Wirkungsgrad laufen.

Es besteht Optimierungspotenzial durch Drehzahlregelung mit Frequenzumrichtern bei Pumpen. Eine pauschale Abschätzung ergibt ein Potenzial von bis zu 50 kWh/t. Die Betrachtung einzelner auffälliger Pumpen ergab ein Einsparpotenzial von ca. 10 kWh/t. Eine vollständige Nutzung des Potenzials erfordert eine umfassende Detailanalyse aller Pumpen-Antriebe in den verschiedenen Betriebszuständen.

Im Zuge der in den vergangenen Jahren vollzogenen Anhebung der Papiermaschinengeschwindigkeit sind die Motordrehzahlen teilweise beträchtlich erhöht worden, so dass einige Antriebe nicht mehr mit 50 sondern mit 85 Hz laufen. Dies kann eine Überlastung darstellen. Auch können Wirkungsgradeinbußen auftreten, da die elektrischen Antriebe nicht mehr in ihrem Auslegungspunkt betrieben werden. Die oben dargestellte Auswertung zeigte keine Anzeichen auf erhebliche Wirkungsgradeinbußen. Die Antriebe sollten jedoch einzeln auf Überlastung überprüft werden.

Durch die Installation von Frequenzumrichtern, den Wechsel von Laufträgern und Optimierung der Regelung lassen sich jährlich 507 MWh/a Strombezug für Pumpen einsparen. Die mittlere Paybackzeit beträgt 3,2 Jahre.

Es werden vier Schraubenkompressoren verwendet, wovon sich immer zwei im Stand-by-Modus befinden. Ferner sind ein Kältetrockner, ein Mikrofilter, ein Ölabscheider, und zwei Kondensatabscheider an das System angeschlossen. Die gesamte Anlage wird elektronisch gesteuert.

Um einen möglichst niedrigen Stromverbrauch zu gewährleisten, ist die minimale Schaltdifferenz auf 0,2 bar eingestellt. Außerdem ist ein Grundlastwechsel der Kompressoren in der Schaltung integriert, um größere Druckschwankungen im Netz zu vermeiden. Es erfolgen keine regelmäßigen Kontrollen am Druckluftnetz bei laufendem Betrieb. Das Druckluftsystem ist für die jetzt bestehende Anlagenkonfiguration zu groß ausgelegt. Das weitläufige Netz wird mit einem vergleichsweise hohen Netzdruck von 8 bar betrieben und weist zahlreiche Leckagen auf. Es liegt keine Dokumentation der Verbraucher vor.

Bezogen auf die Nettoproduktionsmenge ergibt sich ein eher niedriger spezifischer Energieeinsatz von 21 kWh/t Nettoproduktion. Hingegen ist der spezifische Energiebedarf für die Druckluftherzeugung bei einem durchschnittlichen Luftbedarf von 16 m<sup>3</sup>/min mit 8,1 kW/m<sup>3</sup>/min deutlich zu hoch.

Provisorische Leckagebeseitigungen ließen erkennen, dass durch eine regelmäßige Beseitigung der Leckagen rund 12 % der Fördermenge an Druckluft und damit Energie einsparen lassen. Das tatsächliche Einsparpotenzial ist weitaus höher bei etwa 30 % der Liefermenge einzuschätzen und ließe sich durch die Stilllegung des Druckluftstrangs für die nur noch als Lagerraum genutzten Werkteile sowie durch Optimierung des Netzes erreichen. Damit ließe sich der Strombezug für Druckluft um 330 MWh/a senken.

Die Analyse hat außerdem ergeben, dass das Werk eine maximale Liefermenge von 25 m<sup>3</sup>/min benötigt, wofür jeweils zwei der installierten Kompressoren ausreichend wären.

Beim Abschalten von zwei Kompressoren wird die Stand-by-Leistung von 20,7 kW eingespart woraus sich ein Einsparpotenzial von 170 MWh/a ergibt.

Weitere Potenziale von 80 MWh/a ergeben sich durch die schrittweise Absenkung des Netzdruckes auf 7 bar.

Im Zuge einer Überprüfung der Beleuchtungssituation sollten folgende Maßnahmen geprüft werden:

- Einsatz alternativer Leuchtsysteme wie Dreiband-Leuchtstofflampen (35 % mehr Lichtausbeute als herkömmliche Leuchtstoffröhren)
- Quecksilberdampf-Hochdrucklampen in hohen Räumen
- Ersatz konventioneller durch elektronische Vorschaltgeräte in Leuchtstofflampen (bis zu 20 % Stromeinsparung und Steigerung der Lebensdauer um 50 %).

Durch oben genannte Maßnahmen ist eine Reduzierung des Beleuchtungsbedarfes um 10 bis 20 % zu erwarten.

Die Potenziale der vorgeschlagenen Maßnahmen sind in Tabelle 4.4-1 nochmals zusammengefasst:



**Tabelle 4.4-1 Zusammenfassung der möglichen Einsparpotenziale**

Bereich	Maßnahmen	Energie-träger	Einsparung MWh/a	Payback
Kesselhaus	Eigenstromerzeugung	Strom	1.640	3 Jahre
Dampf- & Kondensat	Vervollständigung der Isolierung	Dampf	180	1 Jahr
Haubenluft	Reduzierung Abluft-massenstrom	Dampf	4.130	1 Jahr
		Strom	90	1 Jahr
Gebäudeklimatisierung	Anpassung an tatsächlichen Bedarf, höherer Umluftanteil, Optimierung der Regelung	Dampf	4.550	< 1 Jahr
Produktionshalle	Höherer Umluftanteil	Dampf	1.570	< 1 Jahr
Disperger	Erhöhung der Stoffdichte im Zulauf	Dampf	1.100	2 Jahre
Vakuumanlage	Reduzierung der Drehzahl, Umstellung von Drossel- auf Falschluffregelung	Strom	230	< 2 Jahre
Druckluft	Strangstilllegung für nicht genutzten Betriebsteil	Strom	330	<< 1 Jahr
	Stilllegung von zwei Kompressoren (Erhöhung der Auslastung der übrigen Kompressoren)	Strom	170	<< 1 Jahr
	Absenkung des Netzdruckes	Strom	80	<< 1 Jahr

## 4.5 Gestrichene holzfreie Papiere

Betrachtet wird im Folgenden die Herstellung von gestrichenen grafische Papieren. Zur Klassifizierung der grafischen Papiere siehe Kapitel 4.4.

Unter gestrichenen grafischen Papieren versteht man holzhaltige oder holzfreie Papiere, die zur Produktion von Druckerzeugnissen wie Zeitschriften, Büchern aber auch Werbeprospekten verwendet werden. Bei gestrichenen Papieren muss neben dem Flächengewicht des Rohpapiers auch das Strichgewicht berücksichtigt werden. Zu den Druckpapieren mit geringem Flächengewicht ( $\leq 45 \text{ g/m}^2$ ) zählen vor allem Telefon-, Adress- und Kursbuchpapiere. Bei LWC-Papier (engl.: light weight coated) handelt es sich um zweiseitig gestrichenes Rollendruckpapier mit einer flächenbezogenen Masse unter  $72 \text{ g/m}^2$ , das für Zeitschriften und Versandhauskataloge usw. eingesetzt wird.

### 4.5.1 Produktionsdaten und Struktur der Anlage

Die untersuchte Papierfabrik stellt auf zwei Papiermaschinen A und B (PM A und PM B) gestrichene grafische Papiere her. Beide Papiermaschinen sind mit einer Leimpresse, PM B zusätzlich mit einem Glättwerk ausgestattet. Die Produktionskapazität der PM A liegt bei 60.000 t/a mit einem Flächengewicht von 110 bis  $210 \text{ g/m}^2$  und der PM B bei 170.000 t/a mit einem Flächengewicht von 50 bis  $90 \text{ g/m}^2$ .

Bezogen auf die Nettoproduktion hat diese Produktion folgenden spezifischen Dampf- und Stromverbrauch im Jahresmittel (Referenzzeitraum 2004):

<b>Spezifischer Verbrauch</b>	<b>2.210 kWh/t Papier</b>
Strom	710 kWh/t Papier
Dampf	1.500 kWh/t Papier

### 4.5.2 Dampfverbrauch

Die Dampferzeugung erfolgt im Heizkraftwerk, wobei Strom über eine Gegendruckturbine erzeugt wird. In der Produktion wird Dampf auf den Druckstufen 4,5 und  $2,8 \text{ bar}_{\text{abs}}$  benötigt. Die Dampf- und Kondensatleitungen sind fast vollständig isoliert.

Die Kondensatpumpen fördern kontinuierlich aus den jeweiligen Sammelbehältern. Die Regelung erfolgt über ein niveaugesteuertes Ventil, so dass ein Teil der elektrischen in Drosselverluste umgewandelt wird. Alternativ könnten die Pumpen diskontinuierlich oder über eine Drehzahlregelung betrieben werden. Eine Stromreduzierung kann sich durch Drehzahlregelung der Kondensatpumpen ergeben. Das Kondensatsystem selber arbeitet im optimalen Bereich.

Die Hallenbelüftung erfolgt durch mehrere Zu- und Abluftanlagen. Bei den Zuluftanlagen handelt es sich um reine Außenluftanlagen ohne Umluftanteil. Die Wärme wird über Dampfheizregister zugeführt. Die Zulufttemperatur beträgt ca.  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . In der Zuluft der Aufrollseite ist ein Kreislaufverbundsystem mit der Haubenablufte integriert, welches derzeit allerdings nicht in Betrieb ist.

Die PM A verfügt über je eine Haube für die Vortrockenpartie (VTP) und die Nachtrockenpartie (NTP). Zusätzliche Zuluft wird für die VTP und

NTP über den Unterwind zugeführt. In die Stränge der VTP wird die Abluft des Vakuumgebläses eingeblasen.

Die Erwärmung der Zuluft erfolgt in einer ersten Stufe über je ein Wärmerückgewinnungssystem (Luft/Luft-WRG) für die VTP und die NTP. Einige Glasrohre der Wärmetauscher, insbesondere bei der VTP sind gebrochen. Somit gelangt feuchte Abluft in die Zuluft. Eine zusätzliche zweite, momentan nicht funktionsfähige (Luft/Wasser-WRG-Stufe) ist als Kreislaufverbundsystem mit der Hallenlüftung „Aufrollseite“ verbunden. Das nachgeschaltete Brüden-Dampfheizregister erwärmt die gemeinsame Zuluft der VTP und der NTP. Der Strang „Unterwind“ wird über ein Brüden-Dampfregister aus dem Dampfsystem der PM auf die Endtemperatur geheizt. Die Zone der VTP und der NTP werden über 2,8 bar-Dampf-Heizregister beheizt. Diese Heizregister werden dampfseitig geregelt. Die Kapillaren der Regelventile sind nicht in Funktion.

Die Abluft wird über je einen Ventilator für die VTP und für die NTP gemeinsam abgeführt.

Durch die Einbindung der Hallenzuluftanlagen in das Kreislaufverbundsystem ergäbe sich eine jährlich Einsparung von ca. 13.800 MWh/a. Der höhere Strombedarf durch den zusätzlichen Widerstand in den Zuluftgeräten beträgt ca. 150 MWh/a.

Eine WRG-Stufe in der Haubenabluft zur Vorwärmung des Brauchwassers ist wegen fehlendem Niedertemperaturpotenzial nicht wirtschaftlich.

Die Hallenbelüftung der PM B erfolgt durch Zu- und Abluftanlagen. Bei den Zuluftanlagen handelt es sich um Außenluftanlagen mit Umluftanteil. Die Wärme wird über Warmwasser-Heizregister zugeführt. Durch den Einbau einer zusätzlichen Hauben-WRG-Stufe als Kreislaufverbundsystem zur Vorwärmung der Hallenaußenluft ergeben sich wärmeseitige Einsparungen von 14.000 MWh/a. Die Gesamtluftmenge der Hallenlüftung kann in den Wintermonaten feuchteabhängig reduziert werden. Die Anpassung der Abluft erfolgt über die drehzahlgeregelten Dachventilatoren.

Der zusätzliche Strombedarf für die Antriebsleistung der Ventilatoren unter Berücksichtigung der Einsparungen durch die Abschaltung einzelner Anlagen in den Wintermonaten beträgt 100 MWh/a.

Die jahreszeitliche Abschaltung einiger Hallenlüftungsanlagen im Winter kann nach Einbau der erforderlichen Messtechnik (Feuchte) ohne zusätzliche WRG erfolgen. Bei einer Reduzierung der Luftmenge um 20% bei Außentemperaturen unter 10°C werden 4.200 MWh/a an Wärme und 50 MWh/a an Strom eingespart.

PM B verfügt über zwei Hauben für die zweistufige Vortrockenpartie und eine Haube für die Nachtrockenpartie

In der Abluft der Trockenpartien sind zwei Wärmerückgewinnungsstufen eingebaut. Die erste Luft-Luft-Glasrohrwärmerückgewinnung erwärmt die Außenluft. Die zweite Luft-Wasser-Wärmerückgewinnung ist in das in der Vakuumabluft eine zusätzliche WRG-Stufe zur Warmwasser-Heiznetz der Luftheizregister integriert. Bei der VTP 1 ist Erwärmung eines Teilvolumenstromes der Außenluft eingebaut. Bei der VTP 2 und der NTP wird die Vakuumabluft in den Zuluftvolumenstrom nach der ersten WRG-Stufe zugeführt. Die restliche Erwärmung erfolgt über nachgeschaltete Brüden-Dampf- und Dampfheizregister. Durch Öffnen der Schiebetüren der NTP wird zurzeit je nach Produkt die Feuchte reguliert.

Relevante Verbraucher an den Papiermaschinen A und B werden mit Frischwasser (Brunnen) gespeist. Die durch erwärmtes Kühlwasser ein-

getragene Wärmeenergie wird an der PM A über den Kühlwassersammelbehälter in die Frischwasserleitung zurückgeführt. Die eingetragene Wärmeenergie der Kühler wird damit letztlich an die PM-Wasserverbraucher geführt.

Potenziale liegen in einer Erhöhung der Wasserkreislauf-temperatur durch Kreislaufeinengung. Würde in der vorhandenen Schaltung der Frischwasserverbrauch reduziert, erhöhten sich die Vorlauf-temperaturen der einzelnen Kühler. Diese arbeiten dann nicht mehr effizient. Daher muss ein Warmwasserbehälter eingesetzt werden. Hierzu eignet sich der vorhandene Kühlwassersammelbehälter oder ein entsprechender Behälter, der den jetzigen undichten Behälter ersetzt. Durch die Reduzierung der Frischwassermenge auf 8 l/kg und Speisung aller Wasserverbraucher aus einem Warmwasserbehälter kann der Frischwasserbezug um 45 % reduziert werden, was in einer Erhöhung der Wasserkreislauf-temperatur von 36 °C auf 44 °C resultiert. Durch die bessere Entwässerung in der Nasspartie wird der Trockengehalt nach den Pressen von 45 % auf 46 % angehoben. Damit lassen sich entweder der Dampfbedarf zum Trocknen um 5 % reduzieren oder, bei gleichbleibendem Dampfeinsatz in der Trockenpartie, die Produktion um 5 % erhöhen.

Eine Produktionssteigerung ist bei den Sorten möglich, die in der jetzigen Situation durch die Trocknungskapazität der Trockenpartie limitiert sind. Bei den übrigen Sorten ist eine Dampfeinsparung möglich. Der abgeschätzte Gesamtnutzen setzt sich für die PM A aus Einsparungen an Frischwasser sowie Dampf zusammen und beträgt 388.000 m<sup>3</sup>/a Frischwasser sowie 3.600 MWh/a für Dampf.

Zur Kalkulation des Aufwands ist eine detaillierte Untersuchung des Wasserkreislaufs notwendig, da durch stärkere Erwärmung in den Frischwasserleitungen vermehrt Kalk ausfallen kann. Da außerdem der Wassereinsatz im Kernprozess reduziert wird, steigt die Störstoffkonzentration, wiedergegeben durch den CSB-Wert. Dies kann die Papierchemie und im ungünstigen Fall die Produkteigenschaften beeinflussen.

Durch eine Schuhpresse lässt sich der Trockengehalt vor Einlauf in die Trockenpartie um 2-4 %-Punkte erhöhen. Dies ermöglicht eine Dampfeinsparung in der Trockenpartie um ca. 8-15 % oder alternativ eine entsprechende Produktionserhöhung, soweit die Maschinenantriebe dies zulassen.

Der Nutzen an den PM A und B ergibt sich bei einer Steigerung des Trockengehalts nach Presse um 4 % nach folgender Tabelle:

	<b>Papiermaschine A</b>	<b>Papiermaschine B</b>
Dampfeinsparung	22.000 t/a	22.500 t/a
Produktionssteigerung	-	16.500 t/a

Durch Erhöhen der Bahntemperatur vor Pressen- und Trockenpartie kann die Entwässerung verbessert und der Dampfbedarf der Trockenpartie reduziert werden. Hierzu lässt sich ein Dampfblaskasten einsetzen, der vorzugsweise über der Siebsaugwalze installiert wird. Eine Bahntemperaturerhöhung um z. B. 10 °C erhöht den Trockengehalt nach Pressen um etwa 1 % und reduziert den Dampfverbrauch in der Trockenpartie um 4 %. Eine entsprechende Produktionserhöhung ist alternativ möglich.

Der Nutzen für die PM A ergibt sich bei konstanter Produktionsmenge zu 135 MWh/a durch Anhebung der Bahntemperatur um 10 °C auf 46 °C.

Auch bei der PM B kann die Bahntemperatur auf 46 °C angehoben werden. Die zusätzlich verfügbare Trockenkapazität der Hauben wird in diesem Fall jedoch für eine Produktionssteigerung um 3.100 t/a verwendet und resultiert in einer Erhöhung des Wärmebedarfs von 4.500 MWh/a. Insgesamt sinkt damit jedoch der spezifische Dampfverbrauch an der PM B.

Zusätzlicher erheblicher Nutzen besteht in der Möglichkeit zur Regelung des Feuchtequerschnitts. Weitere Vorteile können geringeres Bahnrupfen und höhere Festigkeitswerte sein.

Zu berücksichtigen ist die Erhöhung der Temperaturen im Wasserkreislauf durch die Installation eines Dampfblaskastens und damit eine Steigerung der Abwassertemperatur.

### **4.5.3 Stromverbrauch**

In der Stoffaufbereitung der PM A werden Kegelrefiner eingesetzt. Im Vergleich zu alten Steilkegelrefiner haben Doppelscheibenrefiner im Allgemeinen einen besseren Wirkungsgrad. Neuentwicklungen im Bereich der Kegelrefiner weisen ebenfalls gute Wirkungsgrade auf. Ein Ersatz der Refiner sollte geprüft werden. Die erzielbare Energieeinsparung werden zu 10 % geschätzt, müssen jedoch durch Betriebsversuche verifiziert werden. Bei der geschätzten Einsparung ergibt sich eine Reduzierung des Energieverbrauchs um 250 MWh/a.

An der PM B wird Zellstoff mit 8 Refinern gemahlen. Die Einstellung der erforderlichen Mahlleistung an den Refinern erfolgt nach Densimetermessungen. Durch energiesparende Refiner-Garnituren (feinere Verrippung, logarithmische Spirale) kann mit Einsparungen gerechnet werden. Die Potenziale sind im Betriebsversuch zu ermitteln, können jedoch mit 5 % vorsichtig abgeschätzt werden. Damit sind Einsparungen von 1.230 MWh/a realisierbar.

Nur wenige Pumpen an der PM A sind drehzahl geregelt. Die Pulperfüllpumpen werden kontinuierlich betrieben, aber jeweils nur zu 6 % bzw. 12 % der Zeit zur Pulperfüllung genutzt. 63 % bzw. 73 % der Zeit erfolgt keinerlei Abnahme, in der verbleibenden Zeit nur eine sehr geringe Abnahme. Einsparpotenziale können sich durch Anpassung der Laufräder oder Drehzahlregelung ergeben.

An der PM B sind alle relevanten Pumpen drehzahl geregelt und es wurden keine relevanten Einsparpotenziale identifiziert.

Kälteanlagen stehen an den Papiermaschinen A und B, an der Streichmaschine, in der zentralen Streichfarbenaufbereitung und im Bereich der Papierveredlung. An den Papiermaschinen wird das Kühlwasser der Kältemaschinen als Warmwasser genutzt oder in das Frischwasser zurückgeführt. Die erzeugte Kälte wird im Wesentlichen zur Kühlung von elektrischen Schalträumen, Büros und zur Nachkühlung der Druckluft verwendet.

An der Streichmaschine wird die Abwärme der Absorptionsanlagen über Kühltürme abgeführt. Als Heizmedium wird an den Absorptionsanlagen Frischdampf von 2,5 bar eingesetzt. Der Frischdampf wird über Druckminderer auf 0,8 bar und eine Zulauftemperatur von 110 °C reduziert. Gekühlt werden neben der Papierbahn (über Kühlzylinder) und den Farbauftragswerken vor allem elektrische Schalträume. Zur Überbrü-

ckung von Engpässen, wie sie in sehr heißen Sommern auftreten können, wurde eine zweite Absorptionsanlage installiert.

An den Absorptionsanlagen besteht Optimierungspotenzial durch die Nutzung freier Kühlung. Durch Wärmetausch gegen Außenluft könnten im Winter die Absorptionsanlagen entlastet oder abgeschaltet werden.

Im Werk wird ein Druckluftsystem mit fünf dezentralen Druckluftstationen an den jeweiligen Verbrauchsschwerpunkten betrieben. Der Regelbereich liegt zwischen 6,2 und 7,4 bar und ist damit unwirtschaftlich hoch. Die anfallende Abwärme der Druckluftstationen wird fast vollständig im Frischwassersystem genutzt. Der jährliche Strombedarf liegt bei 11.800 MWh/a. Durch eine zentrale Regelung und Steuerung aller Druckluftherzeuger ließen sich jährlich 10 % des Strombezugs einsparen.

Die spezifische Leistung der zwölf installierten Druckluftkompressoren beträgt insgesamt 7,6 kWmin/m<sup>3</sup> Druckluft und liegt damit in einem energetisch ungünstigen Bereich. Die Effizienz der Druckluftherzeugung kann bei einigen älteren Kompressoren gesteigert werden, so dass eine jährliche Stromeinsparung von 5 %, entsprechend 590 MWh/a realisiert werden kann.

Aufgrund der weiter steigenden Strompreise und dem Alter einiger Anlagen wird empfohlen, die Wirtschaftlichkeit einer neuen, angepassten Druckluftherzeugung dieser Stationen unter Einbeziehung der laufenden Betriebskosten zu untersuchen.

Die Potenziale der vorgeschlagenen Maßnahmen sind in Tabelle 0-1 nochmals zusammengefasst:

**Tabelle 4.5-1 Zusammenfassung der möglichen Einsparpotenziale**

Bereich	Maßnahmen	Energie-träger	Einsparung MWh/a	Payback
Hallenklimatisierung PM A	Einbindung ins Kreislaufverbundsystem	Dampf	13.800	2 Jahre
		Strom	- 150	
Hallenklimatisierung PM B	Zusätzliche WRG in die Haubenabluft, Einbindung ins Kreislaufverbundsystem	Dampf	14.000	3 Jahre
		Strom	- 100	
	Jahreszeitliche Abschaltung der Zuluftanlagen	Dampf	4.200	< 1 Jahr
		Strom	50	
Wasserkreislauf PM A	Temperaturerhöhung im Kernprozess durch Kreislaufeinengung	Dampf	3.600	3 Jahre
Pressenpartie PM B	Höherer Trockengehalt durch Schuhpresse	Dampf	36.000	9 Jahre
Mahlung PM A	Einsatz von energiesparenden Garnituren	Strom	250	< 1 Jahr
Mahlung PM B	Einsatz von energiesparenden Garnituren	Strom	1.230	< 1 Jahr
Pumpen PM A	Optimierung der Steuerung	Strom	160	< 1 Jahr
Druckluft	Zentrale Steuerung des Systems	Strom	590	1 Jahr

## **4.6 Zusammenfassende Bewertung**

Bei den Betriebsanalysen wurden zahlreiche Einsparpotenziale identifiziert, die selbst bei ausschließlicher Berücksichtigung von Maßnahmen mit einem geringen investiven Aufwand und Kapitalrücklaufzeiten von maximal 3 Jahren zu deutlichen Einsparung beim Endenergieeinsatz führen. So konnte durchschnittlich eine Stromeinsparung von 3,6 % mit einer betriebsspezifischen Spannweite von 1,2 bis 8 % erzielt werden. Der Wärmebedarf ließ sich durchschnittlich um 9,3 %, in den einzelnen Betrieben um 2,2 bis 16,1 % senken. Entsprechend reduzierte sich der Primärenergieeinsatz im Durchschnitt der betrachteten Papierfabriken um 6,4 %, für einzelne Betriebe waren Einsparungen von 4 bis 8,8 % erreichbar.

## **4.7 Literatur**

[4-1] Umweltbundesamt; Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, Referenzdokument über die Besten Verfügbaren Techniken in der Zellstoff- und Papierindustrie

[4-2] Dunn, D. F.; Troubleshooting of paper machine vacuum systems, TAPPI Papermakers Conference (11.03. – 14.03.2001, Cincinnati), TAPPI Press, 2001, S. 1-5

[4-3] ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V.; Fachverband für Starkstromkondensatoren; Energieeffizienzsteigerung durch Blindleistungskompensation; März 2006

[4-4] Münster, H.; Möglichkeiten der Energieeinsparung bei der Stoffaufbereitung in: Blum, O., Maur, B. (Hrsg.); PTS Symposium Energiemanagement, PTS-Manuskript PTS-MS 793, München, 2007



## **5 Instrumente zur Unterstützung der rationalen Energienutzung**

In den vorigen Kapiteln wurden zahlreiche Maßnahmen zur Energieeinsparung beschrieben. Es wurde aufgezeigt, dass gute Kenntnisse über die Hauptenergieverbraucher und eine Transparenz der betrieblichen Abläufe des eigenen Unternehmens wichtige Grundlagen für die Entscheidungen im Bereich der Energieversorgung und Energienutzung sind. Die aufgeführten Praxisbeispiele stellen anschaulich dar, dass der rationelle Umgang mit Energie – und damit die erfolgreiche Kostensenkung in diesem Bereich – in der Regel im ersten Schritt Verhaltensanpassungen, organisatorische Optimierung und kleinere Anschaffungen erfordert. Erst mittelfristig bis langfristig sind gegebenenfalls umfangreichere Investitionen in neue Technologien und Anlagen oder aufwändige Umstrukturierungen notwendig.

Für die Verantwortlichen in den Unternehmen stellt sich aber nun die Frage, welche Maßnahmen im eigenen Betrieb umgesetzt werden können und wie auf Dauer ein hohes Niveau bei der Energieeffizienz gehalten werden kann. Die Beantwortung dieser Fragen ist Aufgabe des Energiemanagements. In diesem Kapitel werden daher die Einführung und Verankerung des betrieblichen Energiemanagements (Kapitel 5.1) vorgestellt. Anschließend wird der Ablauf einer Energieanalyse erläutert (Kapitel 5.2). Die Energieanalyse ist ein wichtiger Bestandteil des Energiemanagements zur Schaffung von Transparenz und zur Identifizierung der geeigneten Maßnahmen.

### **5.1 Energiemanagement**

Die Notwendigkeit des Energiemanagements (EM) eines Unternehmens ergibt sich aus dem ständig steigenden Kostendruck. Der Kostendruck ist alltägliche Realität. Hinzu kommt, dass seitens Politik und Gesellschaft zunehmend die Anforderung an einen Beitrag zur Energieeffizienz und zum Klimaschutz wächst.

Die Einführung eines Energiemanagementsystems muss von der Geschäftsführung oder den zuständigen Verantwortlichen beschlossen, angestoßen und gefördert werden. Die Geschäftsführung muss die Information und Einbindung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aktiv verfolgen. Sie muss bereit sein, den mit dem Energiemanagement verbundenen Zeitaufwand und die Ausgaben zu tragen.

#### **5.1.1 Zielsetzung des betrieblichen Energiemanagements**

Das Ziel eines Energiemanagements (EM) ist es, den Energieeinsatz in einem Unternehmen – vom Energieeinkauf bis zum Energieverbrauch – ökonomisch und ökologisch zu optimieren. Energiemanagement ist die Summe aller Maßnahmen, die geplant und durchgeführt werden, um die geringste mögliche Energiemenge bei maximalem Komfortniveau zu verbrauchen [5-6].

Das Energiemanagement konzentriert sich daher auf:

- **Versorgungssicherheit** – zuverlässige Bereitstellung von Energie, um die gewünschte Qualität und den erforderlichen Komfort zu gewährleisten.
- **Kosten** – Einsparungen von Energie bzw. Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verbesserung der Energieeffizienz von Prozessen, Anlagen und Geräten, beispielsweise durch Rückgewinnung von Energie (Wärme) oder Energieträgerwechsel (Strom auf Gas).
- **Umweltschutz** – Sensibilisierung der Nutzer (Mitarbeiter/innen) bezüglich Energieeffizienz und Klimaschutz.

### 5.1.2 Elemente des Energiemanagements

Die wichtigsten Elemente des Energiemanagements sind die Energiepolitik, die Energieziele und das Energiecontrolling sowie eine passende Aufbau- und Ablauforganisation (vergleiche Abbildung 5-1). Zum Energiecontrolling gehören die betriebliche Energieanalyse, die regelmäßige Verbrauchs- und Kostenkontrolle sowie die Umsetzung von Maßnahmen. Das Energiecontrolling muss so organisiert sein, dass Verbesserungsmöglichkeiten kontinuierlich schnell und sicher identifiziert und umgesetzt werden.

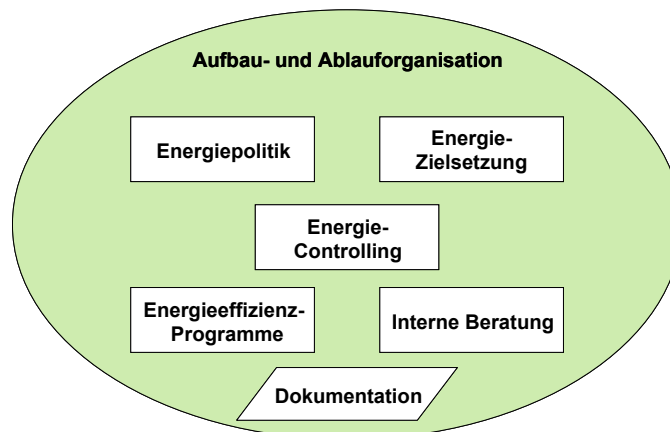


Abbildung 5-1: Elemente des Energiemanagements

Zunächst sollte die Geschäftsführung eines Unternehmens die Energiepolitik formulieren. Die Energiepolitik dient dazu, die Unternehmensphilosophie und strategischen Prinzipien hinsichtlich des Umgangs mit der Energie festzulegen und festzuschreiben. Die Energiepolitik ist Ausdruck eines internen Bewusstseins für die rationelle Energienutzung. In der Regel reicht ein einziger Satz aus dem klar wird, dass die Energiekostenreduzierung wichtig ist.

Als nächstes sollten konkrete Energieziele, abgeleitet aus den allgemeinen Unternehmensgrundsätzen, schriftlich formuliert werden. Zum Beispiel könnte das Energieziel für die ersten drei Jahre sein, Transparenz zu schaffen und alle nicht investiven Maßnahmen umzusetzen. Die Energieziele sollten bei Bedarf regelmäßig nach einigen Jahren aktualisiert werden.

Das Energiecontrolling dient zur Koordinierung der Energiebedarfssteuerung. Kernstück ist ein internes Informationssystem, welches aus folgenden Modulen bestehen kann:

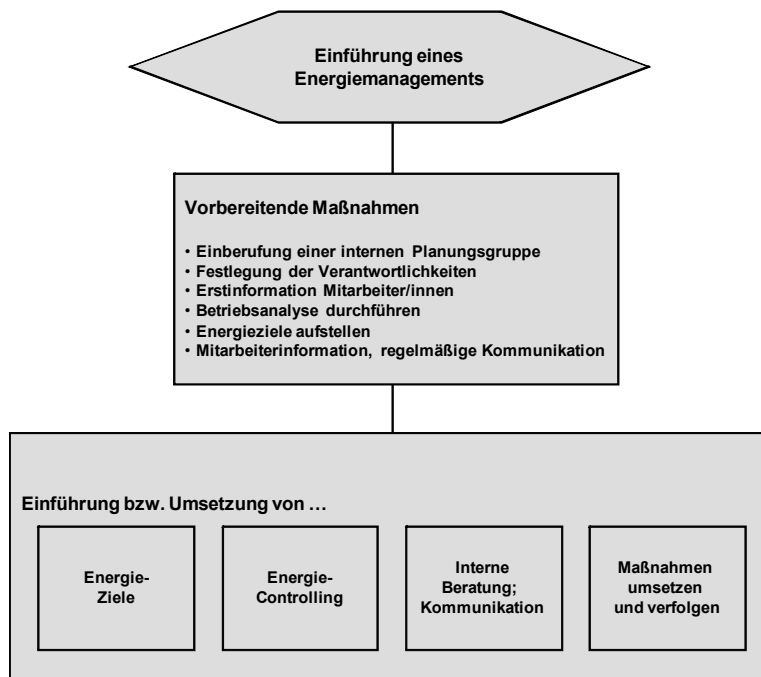
- Datenerfassung: Energiedaten (z.B. Verbrauch, Preise) und andere energierelevante Daten
- Verwaltung und Buchhaltung der Energiedaten (z.B. monatlicher Verbrauch an Strom, Erdgas, Wasser)
- Datenanalyse und -auswertung (z.B. Tabellen und Grafiken zu Zeitreihen, Hinweis auf ungewöhnlichen Verbrauchsanstieg)
- Planung und Budgetierung des Energiebedarfs und der geplanten Maßnahmen (z.B. Festlegung des Budget für Energieberater)
- Energiekostenrechnung und Energieberichtswesen: systematische und regelmäßige Dokumentation der Daten

Auf Basis dieser Module werden Energieeffizienzprogramme (z.B. Austausch von Glühbirnen) festgelegt. Darüber hinaus werden Mitarbeiter benannt, die interne Beratung (z.B. Beantwortung von Fragen zum Lüftungsverhalten) durchführen können. Soweit möglich sollten die Daten, Maßnahmen und Erfolge dokumentiert werden.

Aufbau- und Ablauforganisation beziehen die relevanten Mitarbeiter/innen und die Geschäftsführung in den Aufbau und die Durchführung des Energiemanagementsystems mit ein. Sie legen Aufgaben und Verantwortungsbereiche der beteiligten Personen fest, wobei die Wechselwirkungen mit gegebenenfalls schon bestehenden Managementsystemen (beispielsweise Qualitätsmanagementsystem) berücksichtigt werden. Das Energiemanagement sollte in die bestehenden Organisationsstrukturen eingebunden und adäquat dokumentiert sein. Bewährte Strukturen lassen sich beispielsweise auch aus den Normen zum Qualitätsmanagement (DIN EN ISO 9000 ff. [5-7]) ableiten und auf die Unternehmen anpassen.

### **5.1.3 Einführung eines Energiemanagements**

Die Einführung des Energiemanagements (vergleiche Abbildung 5-2) setzt zunächst eine Entscheidung über die Organisationsform voraus, mit der das Energiemanagement im Unternehmen eingeführt und durchgeführt wird.



**Abbildung 5-2: Einführung eines Energiemanagementsystems im Unternehmen**

Im Unternehmen empfiehlt es sich, die Energieleitung und die Energietechnik mit den Aufgaben zu betrauen. Gibt es im Haus einen Verantwortlichen für das Gebäudemanagement, so sollte dieser auch mit einbezogen werden. Der Kreis der Verantwortlichen muss aber überschaubar bleiben. In vielen Fällen ist es auch sinnvoll, einen externen Energieexperten ins Energieteam aufzunehmen.

Das Energieteam informiert regelmäßig und umfassend über Ziele und Ergebnisse des Energiemanagements und bezieht alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ein. Die Information der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ist essentiell für ein erfolgreiches Energiemanagement. Das Energiemanagement wird nicht nur zu technischen Änderungen führen. Es wird auch zu Änderungen im Ablauf und den Gewohnheiten von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern führen. Das Personal ist der wichtigste Erfolgsfaktor.

Das Energieteam benötigt einen Überblick über den Energieverbrauch und die Energiekosten, sowie die vertraglichen Abmachungen mit den Energielieferanten und der Verbesserungsmöglichkeiten im Betrieb. Die Informationen werden im Rahmen einer betrieblichen Energieanalyse (siehe Kapitel 5.2) erarbeitet. Das dort erarbeitete Energieeffizienzprogramm (Maßnahmenplan) ist mit einem zeitlich gestaffelten Handlungsplan verknüpft. Es zeigt Verbesserungsmaßnahmen auf und ist Grundlage für die Arbeit des Energieteams.

Die betriebliche Energieanalyse liefert auch die Grundlage, um den Energieverbrauch und die Energiekosten in Zukunft verfolgen und vergleichen zu können. Diese Grundlagen (siehe Kapitel 5.2) ermöglichen den Datenvergleich mit früheren Jahren, branchenbezogenen Kennzahlen sowie mit vergleichbaren Unternehmen.

#### 5.1.4 Energiecontrolling

Unter Energiecontrolling wird die systematische regelmäßige Erfassung und Bewertung des Energieverbrauchs verstanden. Das Energiecontrolling ist die entscheidende Komponente eines wirkungsvollen Energiemanagements. Wichtig ist, dass die Erfassung der Energieverbräuche zeitnah erfolgt.

Für die zeitnahe Erfassung bieten sich zwei Methoden an: Zum einen kann die Erfassung der Betriebs- und Verbrauchsdaten durch entsprechend qualifiziertes Personal durchgeführt; zum anderen kann eine automatische Erfassung der Energieverbräuche über Fernmess- und Fernauslesegeräte erfolgen.

Die manuelle Erfassung bietet sich in der Regel da an, wo mit verhältnismäßig geringem Personaleinsatz die Energiedaten von nur wenigen Verbrauchern/ Verbrauchergruppen erfasst werden müssen.

Sollen die Daten von zahlreichen Verbrauchern (Geräte, Anlagen, Maschinen) aufgezeichnet werden, ist die automatische Erfassung in der Regel günstiger, da die hierzu erforderlichen Investitionen meistens nur einen Bruchteil der Personalkosten für die regelmäßig manuelle Erfassung ausmachen. Darüber hinaus sind die Abfrageintervalle und die möglichen Reaktionszeiten auf Unregelmäßigkeiten dann deutlich kürzer.

Sowohl die manuell als auch automatisch erfassten Daten müssen auf einem Rechner zusammengeführt und analysiert werden. Aus den Analyseergebnissen sollte dann der Maßnahmenplan optimiert werden und die Maßnahmen zur Energie- und Betriebsoptimierung schrittweise realisiert werden. Nach Umsetzung der Maßnahmen wird das Energiecontrolling zur Erfolgskontrolle herangezogen.

Die Einführung des Energiecontrollings erfolgt üblicherweise in drei Schritten:

**(1) Vorbereitungsphase**

Zusammenstellung der grundlegenden Informationen zur Organisation, technischen Ausstattung und die Vorbereitung einer betrieblichen Energieanalyse.

**(2) Einführungsphase**

Analyse der aufgenommenen Energiedaten und Bildung von Bewertungsmaßstäben (Kennzahlen, Benchmarking; siehe unten).

**(3) Durchführungsphase**

Der Energieverbrauch wird kontinuierlich an Hand der zuvor definierten Bewertungsmaßstäbe (z.B. Endenergie pro Umsatz u. a.) überwacht. Die Bewertungsmaßstäbe müssen beispielsweise nach Einsparinvestitionen angepasst werden.

Das Energiecontrolling kann sich nur zum wirkungsvollen Instrument des Energiemanagements entwickeln, wenn es konsequent praktiziert wird. So kann das Energiemanagement schrittweise die betrieblichen Energiekosteneinsparpotenziale realisieren.

### 5.1.5 Energiekennzahlen

Zur Vereinfachung und Systematisierung der Analyse werden typischerweise Kennzahlen gebildet. Für Unternehmen der Papierindustrie bieten sich verschiedene Kennzahlen an. Wichtige Größen wie der Verbrauch, die Kosten von Heizenergie und elektrischer Energie sowie Trinkwasser und Abwasser werden zu typischen Bezugsgrößen ins Verhältnis gesetzt, wie etwa die Produktionsmenge oder dem Umsatz.

Im Folgenden sind Beispiele für Energiekennzahlen (EKZ) aufgeführt:

$$\frac{\text{Energiekosten} \times 100}{\text{Umsatz}} \quad [\%]$$

$$\frac{\text{Energiekosten} \times 100}{\text{Gesamtkosten}} \quad [\%]$$

Produktionsbezogene Kennzahlen, zum Beispiel

$$\frac{\text{Gesamtenergieeinsatz}}{\text{Produktionsmenge}} \quad \left[ \frac{\text{kWh}_{\text{ges}}}{\text{t, m}^2} \right]$$

$$\frac{\text{Energieträger}}{\text{Produktionsmenge}} \quad \left[ \frac{\text{kWh}_{\text{ges}}}{\text{t, m}^2} \right]$$

$$\frac{\text{Stromeinsatz}}{\text{Produktionsmenge}} \quad \left[ \frac{\text{kWh}_{\text{el}}}{\text{t, m}^2} \right]$$

$$\frac{\text{Wasserverbrauch}}{\text{Produktionsmenge}} \quad \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{t, m}^2} \right]$$

Die Vergleiche der Kennzahlen unterschiedlicher Jahre geben Hinweise auf systematische Veränderungen bei der Produktion, Verhaltensänderungen des Personals bezüglich Änderungen des Betriebsablaufes oder über technische Veränderungen sowie Mängel an Anlagen und anderen Geräten.

## 5.2 Energieorientierte Betriebsanalyse

Die Energieanalyse ist ein wichtiger Bestandteil des Energiecontrollings und des Energiemanagements und liefert die Grundlage für die Identifizierung und Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen sowie für die Festlegung der konkreten Energieziele des Unternehmens. Sie schafft die Grundlage für das zielgerichtete Arbeiten im Energiemanagementsystem. Die Ergebnisse, die während der betrieblichen Energieanalyse erarbeitet werden, sind außerdem auch die Basis für das Energiecontrolling.

Zunächst wird in diesem Kapitel ein kurzer Überblick über die wichtigsten Schritte einer strukturierten Analyse der energietechnischen und energiewirtschaftlichen Bereiche eines Unternehmens gegeben. Ziel ist es, dass sich die für die Energietechnik verantwortlichen Personen eigenständig in systematischer Form einen guten Überblick über die Energieeffizienz der Prozesse, Geräte und Anlagen ihres Betriebs verschaffen können.

Neben dem primären Ziel, die Energiekosten im Unternehmen zu senken, werden mit einer betrieblichen Energieanalyse (Energieaudit) folgende weitere Ziele verfolgt:

- Transparenz und Information über die Energieversorgungs- und Energieeinsatzstrukturen innerhalb des Betriebs sowie über die möglichen Einspar- und Optimierungspotenziale.
- Sensibilisierung der Verantwortlichen in Hinblick auf die möglichen Kosteneinsparungen durch rationelle Energienutzung.
- Motivation aller Mitarbeiter zum effizienteren Umgang mit Energie.

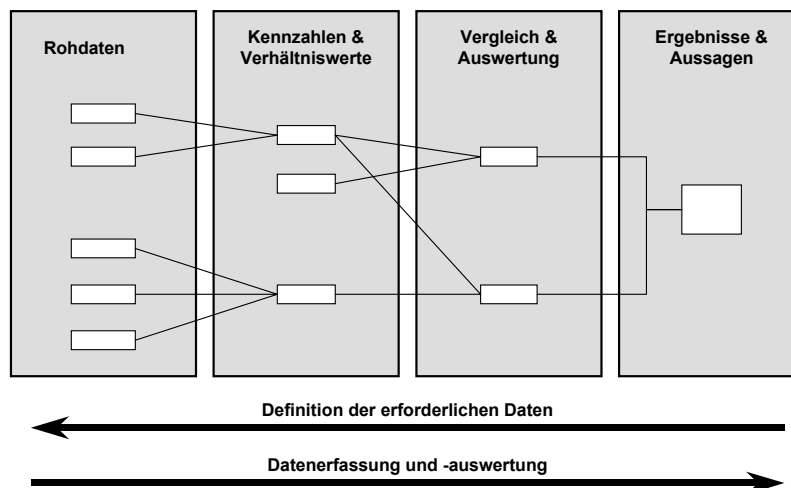
### **5.2.1 Vorgehensweise und Systematik**

Um den Aufwand einer betrieblichen Energieanalyse überschaubar zu halten, können nicht alle Verbrauchsbereiche (Arbeitsbereiche) oder Anlagen und Maschinen mit derselben Detaillierungstiefe untersucht werden. Die betriebliche Energieanalyse wird daher in der Regel in zwei Schritte unterteilt: Grob- und Feinanalyse. Wie der Name schon sagt ist der wesentliche Unterschied der beiden Analysen die Detaillierungstiefe. Die Ergebnisse und Informationen der beiden Analyseschritte ergänzen einander.

In der Grobanalyse (auch „Top-down-Analyse“ genannt) werden Verbesserungspotenziale identifiziert und die näher zu untersuchenden Bereiche, Anlagen und Maschinen ausgewählt. Dies sind in der Regel Bereiche, Anlagen und Geräte, die die meiste Energie verbrauchen, in denen die größten Einsparungen oder am schnellsten Einsparungen erzielt werden können (siehe auch Kapitel 5.2.2).

Nach der Grobanalyse wird eine Feinanalyse der ausgewählten Bereiche, Anlagen und Geräte durchgeführt („Bottom-up-Analyse“). Es werden Daten gemessen, Angebote eingeholt und konkrete Verbesserungsmaßnahmen inklusive Umsetzungsplanung erarbeitet. Die standortspezifischen Verbesserungspotenziale können unmittelbar umsetzbar sein, aber auch nur mittel- oder längerfristig realisierbar. Auch können es so genannte abhängige Maßnahmen sein, die nur bei größeren Sanierungsmaßnahmen derzeit wirtschaftlich realisierbar sind (siehe auch Kapitel 5.2.2).

Für jeden Analyseschritt sollten Ziele festgelegt werden. Dies verhindert, dass unnötige Daten erhoben, aber auch relevante Daten nicht vergessen werden. Abbildung 5-3 veranschaulicht den Prozess. Bei der Vorbereitung einer Analyse wird zunächst bestimmt, welche Ergebnisse und Aussagen gewünscht sind. Davon ausgehend werden die durchzuführenden Vergleiche und Auswertungen sowie die aufzustellenden Kennzahlen und Verhältniswerte festgelegt. Anschließend werden die zu erhebenden Daten definiert. Die Datenaufnahme und -auswertung selbst läuft umgekehrt ab, ausgehend von den „Rohdaten“ werden Kennzahlen und Verhältniswerte ermittelt. Über Vergleiche und Auswertungen werden anschließend Ergebnisse und Aussagen erarbeitet.



**Abbildung 5-3: Vorgehensweise bei der Festlegung zu erhebender Daten (von rechts nach links) und bei der Analyse (von links nach rechts)**

## 5.2.2 Ablauf einer energieorientierten Betriebsanalyse

Ein mit einer betrieblichen Energieanalyse beauftragtes Beratungsunternehmen wird im Wesentlichen die nachfolgend dargestellten Arbeitsschritte leisten. Dieses Kapitel soll die im Unternehmen für den rationellen Energieeinsatz verantwortlichen Personen in die Lage versetzen, die Arbeiten des Beraters besser zu verstehen und zu überwachen.

Der erste Schritt (Grobanalyse) der betrieblichen Energieanalyse umfasst die Bestandsaufnahme des Unternehmens unter energetischen Gesichtspunkten. Dazu werden auch betriebswirtschaftliche Größen wie Anzahl der Mitarbeiter, Höhe der Produktionsmengen etc. erfasst. Im Einzelnen werden zum Beispiel nachfolgende Größen und Informationen für die Auswertung benötigt:

- Energiebedarfsprofil (Energieverbrauch von Gas, Öl, Strom etc.) und dessen Entwicklung über die letzten 2 – 3 Jahre.
- Anschluss- und Leistungsdaten (Nennleistungen, Höchstleistungen, Blindleistungen etc.).
- Bezugsverträge und -tarife aller Energiearten (wie Strom, Gas, Fernwärme, Heizöl). Es ist sinnvoll, diese Daten für Wasser und Abwasser gleichfalls zu erheben.
- Transparenz über die „Energiepfade“ durch das Unternehmen, das heißt welche Anlagen werden mit Strom, Wärme, Gas etc. versorgt und wie viel verbrauchen sie.
- Ermittlung der Hauptverbraucher (Heizungs- und Lüftungsanlagen, Beleuchtung).
- Wartungsdaten (Intervalle, letzte Wartung, Unternehmen etc.).
- Kenntnis über die Situation der (Energie-) Datenerfassung im Unternehmen (Standort Zähler für Strom, Gas, ggf. Wärme, Wasser).

Die Informationen liegen in der Regel im Betrieb vor – leider jedoch in den wenigsten Fällen strukturiert erfasst und dokumentiert. Die Aufgabe besteht also auch darin, diese Informationen systematisch für die Geschäftsführung oder das Energiemanagementteam aufzubereiten.



Die Ermittlung des jährlichen Verbrauchs und der Kosten erfolgt anhand der Gas-, Heizöl-, Fernwärme und Stromabrechnungen.

Die Bezugsbedingungen für Strom und Gas sind den Lieferverträgen zu entnehmen, ebenso die Kosten für eine Kilowattstunde oder Megawattstunde Energie. Die Kosten für Transformatornutzung, Leistungsspitzen, Anschlussleistungen etc. sind ebenfalls im Vertrag festgelegt. Wichtig ist ferner, dass die Regelungen zu Vertragslaufzeit und Fristen für Vertragskündigung zusammengestellt werden.

Die Durchführung dieser Schritte – Datenerfassung und deren Auswertung – liefert bereits einen guten Überblick über die Energieversorgungs- und Energieverbrauchssituation. Folgende Ergebnisse liegen in einer strukturierten Form vor:

- Verbrauchs- und Kostendaten,
- Vertragliche Vereinbarungen zur Kostenkalkulation,
- Energiesparmöglichkeiten, Aufdeckung erster Verbesserungspotenziale,
- Qualitätsverbesserungen (Energieversorgung, Energieverbrauchssituation),
- Effizienzsteigerungen,
- Reihenfolge der erforderlichen Maßnahmen,
- Festlegung der näher zu untersuchenden Energieverbraucher (wie Heizkessel, Beleuchtung, Lüftungsanlage) oder Maschinen und Anlagen für die Feinanalyse.

Die Feinanalyse untersucht einzelne Bereiche oder Prozesse und Anlagen genauer. Diese Untersuchungen können von Unternehmen zu Unternehmen variieren, da die Hauptverbraucher unterschiedlich sein können. Gegebenenfalls können die spezifischen Kosten mit anderen Unternehmen verglichen werden. Neben den technischen Bewertungen sind auch ökonomische Aspekte zu beachten, um für das Unternehmen das betriebliche Optimum auszuarbeiten. Im Rahmen der Feinanalyse können Einzelmessungen (Lastgang, Lüftungsanlage, Heizkessel, Heizungssystem, erforderlich sein (siehe auch Kapitel 5.2.3).

Die Ergebnisse der Feinanalyse sind zusammengefasst:

- Ergänzung der Datenlage über die Energieversorgungs- und Energieverbrauchsstrukturen einzelner Geräte bzw. Anlagen.
- Kenntnis der Energieeffizienz der wichtigsten energie-technischen Systeme (Heizungsanlage, Lüftungsanlage, Kälteanlage).
- Aufdeckung, Quantifizierung und Bewertung von Verbesserungsmöglichkeiten.
- Ausarbeitung von konkreten Verbesserungsmaßnahmen im Bereich Energie.

### **5.3 Literatur zu Kapitel 5**

[5-1] BINE Informationsdienst: basisEnergie 15 – Was ist Energie?; Herausgeber: Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe GmbH; <http://www.bine.info>

[5-2] Energieagentur NRW: Energiepfade durch den Betrieb - Ein Leitfaden für Industrie und Gewerbe, Wuppertal, o. J.

- [5-3] Wanke, Andreas; Stefan Trenz (Hrsg.)–  
Energiemanagement für mittelständische Unternehmen. Rationeller  
Energieeinsatz in der Praxis. Arbeitsschritte – Planungshilfen –  
Lösungsbeispiele Dt. Wirtschaftsdienst, 2001, (ISBN 3-87156-344-7)
- [5-4] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI-Richtlinie 3922  
Energieberatung für Industrie und Gewerbe, VDI-Gesellschaft  
Energietechnik, Düsseldorf, 1998
- [5-5] Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V.  
(VIK): Praxisleitfaden zur Förderung der rationellen Energieverwendung  
in der Industrie, Essen, 1998
- [5-6] VDI-Richtlinie 4602, Blatt 1, Vorentwurf:  
Energiemanagement Begriffe, Definitionen, Düsseldorf 2005.
- [5-7] DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme -  
Grundlagen und Begriffe (ISO 9000), Berlin 2005.

## 6 Finanzierung

Wie in den Kapiteln zuvor eingehend beschrieben, sind zahlreiche kurzfristig umsetzbare Energieeinsparungen in vielen Betrieben mit keinen Kosten verbunden. Dies sind in der Regel organisatorische Maßnahmen, die keine Finanzierung sondern nur eine Sensibilisierung und Schulung des Personals erfordern. Andere der vorgestellten Maßnahmen sind mit nur geringen Investitionen verbunden, die meist selber finanziert werden können.

Schwieriger ist oft die Umsetzung von mittel- oder langfristige Maßnahmen, die mit einem höheren Kapitalaufwand verbunden sind. Wie Förderprogramme oder andere Finanzierungsinstrumente dabei helfen können, diese Projekte umzusetzen, wird in diesem Kapitel beschrieben.

### 6.1 Kredit- und Förderprogramme

Auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene existiert eine Vielzahl von Förderprogrammen, welche die rationelle Energienutzung in Industrie- und Gewerbebetrieben und den Einsatz regenerativer Energien mit Zuschüssen unterstützen. Gefördert werden Investitionen, Forschung und Entwicklung sowie Beratung. In der Regel ist eine Antragsstellung sowie die Bewilligung für das zu fördernde Projekt vor Projektbeginn erforderlich. Der Förderumfang ist dabei stark von der Größe des Unternehmens und vom innovativen Charakter des Projektes abhängig. Neben den öffentlichen Stellen gibt es verschiedene Stiftungen, die abhängig von ihrem Schwerpunkt Maßnahmen fördern, wie zum Beispiel die Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

Teilweise fördern auch Energieversorgungsunternehmen die rationelle Energieverwendung und die Nutzung regenerativer Energien. Energieversorgungsunternehmen geben Ihren Kunden gerne darüber Auskunft.

Im Folgenden wird kurz und übersichtlich auf unterschiedliche aktuelle Förderprogramme eingegangen.

Im Februar 2008 haben das BMWi und die KfW Förderbank gemeinsam die Initiative "Sonderfonds Energieeffizienz in KMU" gestartet. Dieses Programm dient der Erschließung von Energieeffizienzpotenzialen in kleinen und mittelständischen Unternehmen. Bestandteile des Sonderfonds sind die beiden Komponenten "Energieeffizienzberatung" und "Investitionskredite für Energieeinsparmaßnahmen". Im Rahmen der "Energieeffizienzberatungen" werden Zuschüsse für qualifizierte und unabhängige Energieberatungen in Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft und für Freiberufler gewährt. Durch die Beratung sollen Schwachstellen bei der effizienten Energieverwendung aufgezeigt und Vorschläge bzw. konkrete Maßnahmenpläne für Energie und Kosten sparende Verbesserungen gemacht werden. Die Energieeffizienzberatung gliedert sich in zwei Stufen. Die erste Stufe, die Initialberatung, wird dabei mit bis zu 80% bezuschusst und die nachgeschaltete Detailberatung mit bis zu 60%.

Mit dem Investitionskredit im Rahmen des ERP-Energieeffizienzprogramms können kleine und mittlere Unternehmen

Investitionen zur Energieeinsparung zinsgünstig finanzieren. Gefördert werden alle Investitionen in Deutschland, die wesentliche Energieeinspareffekte erzielen, d. h. die Investitionen müssen zu einer Energieeinsparung von mindestens 20% bei Ersatzinvestitionen bzw. 15% bei Neuinvestitionen führen. Dieser Nachweis kann etwa im Rahmen der Energieeffizienzberatung durch den Energieberater erfolgen. Förderfähig sind Investitionen zur Senkung des Energieverbrauchs, z. B. in den Bereichen Haus- und Energietechnik, Gebäudehülle, Maschinenpark, Prozesswärme, Prozesskälte, Wärmerückgewinnung/Abwärmenutzung, Mess-, Regel- und Steuerungstechnik, Informations- und Kommunikationstechnik. Gefördert wird auch die Sanierung eines Gebäudes auf das Neubauniveau nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) bzw. der Bau eines Gebäudes, wenn das Neubauniveau nach EnEV um mindestens 30% unterschritten wird.

Beide Bausteine können unabhängig voneinander beantragt werden. Sinnvollerweise sollte aber eine Energieeffizienzberatung der Investitionsentscheidung vorangehen.

Die EnergieAgentur.NRW bietet derzeit (2008) einen unentgeltlichen sowie anbieter- und produktneutralen Informationsservice an. Darüber hinaus werden Initialberatungen angeboten. Im Rahmen von Initialberatungen werden von Mitarbeitern der EnergieAgentur.NRW anhand von Erhebungsbögen und Checklisten erste Potenziale zur Energieeinsparungen abgeschätzt. Ebenfalls können Broschüren zu den wichtigsten Beratungsthemen bei der EnergieAgentur.NRW angefordert werden. Ausführliche Informationen, u.a. auch zu den Förderbedingungen, sind auf der Homepage der EnergieAgentur.NRW unter [www.ea-nrw.de/foerderung](http://www.ea-nrw.de/foerderung) erhältlich.

Die KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) bietet unterschiedliche Kreditprogramme, bezogen auf die energetische Sanierung von Gebäuden, an. Diese beruhen in der Regel auf zinsvergünstigten Krediten für

- die CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierung,
- das ökologische Neubauen.

Die Homepage [www.kfw-foerderbank.de](http://www.kfw-foerderbank.de) gibt zu diesem Thema umfassende Informationen.

Im Folgenden ist eine Auswahl der von der KfW als „förderungsfähig“ genannten Anlagen aufgeführt:

- Blockheizkraftwerke (BHKW) erzeugen gleichzeitig sowohl Wärme als auch Strom und sind somit im Vergleich zu einer getrennten Erzeugung wesentlich effizienter. Insbesondere bei Unternehmen mit einer gleichbleibenden und ausreichenden Grundwärme (z.B. der Warmwasserbedarf) kann die Kraft-Wärme-Kopplung eine gute Alternative zur herkömmlichen Kesselanlage darstellen. Kleine, dezentrale Blockheizkraftwerke können auch mit Pflanzenöl zur Strom- und Wärmeerzeugung betrieben werden. Pflanzenöl kann in der Regel überall dort eingesetzt werden, wo momentan noch Heizöl verwendet wird. Die Vorteile sind dabei, dass Pflanzenöl aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen wird und somit CO<sub>2</sub>-neutral ist und bei der Verbrennung nur geringe Schadstoffemissionen aufweist.
- Fernwärme wird meist mit Hilfe von fossilen Energieträgern in speziellen Heizwerken erzeugt, als „Abfallprodukt“ der Stromversorgung oder aus Industrieprozessen zur Verfügung gestellt. Stammt die Fernwärme aus Abwärme oder wurde sie über

regenerative Energieträger erzeugt, ist ihr Einsatz besonders umweltfreundlich. Trotz im Vergleich zu den Brennstoffen hohe Wärmepreise ist Fernwärme häufig dennoch konkurrenzfähig, da die Investitionen in die Anlagentechnik deutlich niedriger sind.

- Lüftungsanlagen sind in gut gedämmten Neubauten und energetisch sanierten Altbauten eine sinnvolle Alternative oder Ergänzung zur klassischen Fensterlüftung. Die Anlagen sorgen zuverlässig für eine gleichbleibend hohe Raumluftqualität bei einem geringen Energieverbrauch. Dabei werden Luftschadstoffe und hohe Kohlendioxid-Konzentrationen sicher abgeführt und die Luftfeuchtigkeit vollautomatisch auf ein unschädliches Maß begrenzt.
- Solaranlagen zur Stromerzeugung (Photovoltaikanlagen) ermöglichen dem Betreiber, als "Stromversorger" tätig zu werden. Die Anlagen können auf Häusern, Fassaden, an öffentlichen Gebäuden, Hallendächern, Lärmschutzwänden etc. installiert werden und "Grünen Strom" ins öffentliche Netz einspeisen. Rahmenbedingungen hierfür liefert das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG). Darüber hinaus stellen das Land über das Förderprogramm „progres“<sup>2</sup> und die KfW beispielsweise über das Förderprogramm „Solarstrom erzeugen“ Förder- und Finanzierungsmöglichkeiten bereit.
- Die Nutzung von Solarenergie zur Wärmeerzeugung ist eine weitere Möglichkeit in Kombination mit Gas/Öl-Brennwertkesseln Brennstoffkosten einzusparen. Land und Bund fördern Solarthermische Anlagen über einen Zuschuss.
- Eine effiziente Möglichkeit, Heizwärme mittels sogenannter „unerschöpflicher“ Energiequellen bereitzustellen, bietet die Wärmepumpe. Sie nutzt dazu Wärme aus der Umgebung oder aus anderen Wärmequellen und fördert diese mittels des vom Kühlschrank bekannten thermodynamischen Prinzips auf ein Temperaturniveau, das beispielsweise für die Gebäudebeheizung geeignet ist. Für Wärmepumpenprojekte stehen verschiedene Förder- und Finanzierungsmöglichkeiten zur Verfügung [6-2].
- Der mangelhafte Wärmeschutz in alten Gebäuden führt oft zu Unbehaglichkeit und hohen Energiekosten. Besonders wirtschaftlich gestaltet sich eine energetische Sanierung (Wärmedämmung, Heizungssanierung), wenn am Gebäude ohnehin Instandsetzungsmaßnahmen wie zum Beispiel ein neuer Anstrich oder Putzerneuerungen anstehen. Für Sanierungsmaßnahmen stehen verschiedene Förder- und Finanzierungsmöglichkeiten zur Verfügung.

Des Weiteren existieren in Nordrhein-Westfalen Initiativen, wie beispielsweise ÖKOPROFIT, die interessante Informationen und Kooperationsmöglichkeiten zum Thema Energieeinsparung anbieten. Unter [www.oekoprofit-nrw.de](http://www.oekoprofit-nrw.de) wird dieses Kooperationsprojekt zwischen Kommune und Wirtschaft vorgestellt, welches dazu beiträgt, die Umwelt zu entlasten und Kosten für Unternehmen zu senken.

## 6.2 Contracting

Beim Contracting muss das Unternehmen nicht selbst die Investitionen für die neue Anlage tätigen. Das Unternehmen zahlt nur das Produkt, beziehungsweise die Dienstleistung. Weil bei Contracting-Projekten in

---

<sup>2</sup> „Progres“ löst das Ende 2006 ausgelaufene REN-Programm ab.

der Regel neueste Energieeffizienztechnologien eingesetzt werden, fallen die Betriebskosten geringer aus als bei den vorhandenen älteren Anlagen. Im Idealfall lassen sich aus dieser Kosteneinsparung nicht nur die Aufwendungen des Contractors decken. Vielmehr profitiert auch das Unternehmen von dauerhaft geringeren Neben- oder Energiekosten. Die Zeitspanne der vertraglichen Bindung beträgt in der Regel 10 bis 15 Jahre.

Unter Contracting wird allgemein die Übertragung von eigenen Aufgaben auf ein Dienstleistungsunternehmen verstanden. Zu den Hauptanwendungen gehören im Energiebereich Finanzierungs- und Betreibermodelle. Beim Contracting werden zum Beispiel die Energieversorgungsanlagen eines Gebäudes (Wärme- und Kälteversorgung, Beleuchtung, Lüftung oder Klimatisierung etc.) nicht mehr vom Gebäudeeigentümer selbst gekauft, gewartet und betrieben, sondern dies wird von einem externen Unternehmen übernommen, dem Contractor. Dieser Contractor kann zum Beispiel ein Hersteller von Heizungsanlagen, ein Dienstleister der Energietechnik oder ein Energieversorgungsunternehmen sein.

Im Wesentlichen wird bei Contracting zwischen Anlagencontracting und Einsparcontracting, auch Performance Contracting genannt, unterschieden.

### **6.2.1 Anlagencontracting**

Beim Anlagencontracting steht auf der einen Seite der Energieabnehmer, der eine entsprechende Nutzenergie in Form von Wärme, Kälte oder Strom benötigt, und auf der anderen Seite der Contractor, der die gewünschte Nutzenergie bereitstellt. Je nach Vertragsumfang übernimmt der Contractor die Planung, Finanzierung, Bauausführung und den laufenden Betrieb des Investitionsprojektes weitgehend auf eigenes Risiko. Für den Energieabnehmer ergeben sich daraus mehrere Vorteile. Er muss kein eigenes Investitionskapital aufbringen und profitiert von dem meist größeren Know-how und den Einkaufspreisvorteilen der Contracting-Gesellschaft.

Die Preise für die Nutzenergielieferung sind projektbezogen kalkuliert und werden in der Regel aufgeteilt in einen Grund- und einen Arbeitspreis. Im Grundpreis sind die verbrauchsunabhängigen Kosten, insbesondere die Kapitalkosten, im Arbeitspreis die verbrauchsgebundenen Kosten enthalten. Häufig findet im Rahmen der vertraglich festgelegten Laufzeit eine Vollamortisation der getätigten Investitionen statt, d. h. alle Aufwendungen der Contracting-Gesellschaft einschließlich ihres Gewinns werden durch die Zahlungen, die der Energienutzer im Rahmen der nicht kündbaren Laufzeit leistet, gedeckt.

Kernpunkt des Anlagencontracting ist, dass der Contractor für die Energieversorgung zuständig ist und das damit verbundene Risiko trägt. Das Unternehmen bekommt die Energie geliefert, während der Contractor dafür eine Vergütung unabhängig von der erzielten Primärenergieeinsparung erhält.

#### **Beispiel Wärmelieferung**

Die Heizzentrale eines Gebäudes soll nicht mehr vom Gebäudeeigentümer selbst, sondern von einem externen Unternehmen betrieben werden. Aufgabe des externen Unternehmens ist es, die benötigte Nutzwärme in der Heizzentrale des Gebäudes zu erzeugen und in das Heizungsnetz einzuspeisen. Anders als bei der Fernwärmeversorgung

wird die gelieferte Nutzwärme also in unmittelbarer Nähe, nämlich im Gebäude selbst, erzeugt. Diese Form der Wärmelieferung wird deshalb auch als „Nahwärmeversorgung“ bezeichnet.

Der Wärmelieferant ist als Contractor für die gesamte Durchführung des Projektes verantwortlich. Er plant, tätigt die Investitionen und betreibt die Heizungsanlage nach der Installation.

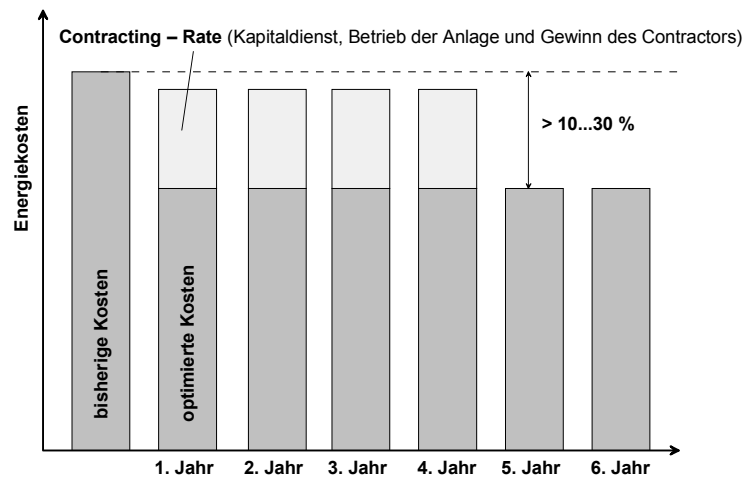
Die von der Heizanlage abgegebene Nutzwärme wird an einer festgelegten Übergabestelle (Wärmemengenzähler) kontinuierlich erfasst. Der Contracting-Kunde bezahlt für diese Wärmemenge einen vorher vereinbarten Preis an den Wärmelieferanten. Hierdurch werden sämtliche Aufwendungen des Contractors gedeckt.

### **6.2.2 Einsparcontracting**

Im Gegensatz zum Anlagencontracting sind beim Einsparcontracting die eingesparten Energiekosten Grundlage für die Finanzierung der Maßnahmen und Investitionen des Contracting-Unternehmers. Bevorzugte Anwendungsbereiche für das Einsparcontracting sind Technologien, die den Energieverbrauch stark reduzieren. Hierzu zählen vor allem Maßnahmen aus den Bereichen Lüftung und Klimatisierung, Heizung, Pumpen, Kälteversorgung sowie Beleuchtung.

In Abbildung 6-1 ist das Finanzierungsprinzip des Einspar-Contractings dargestellt. Die Basis für die Investitionen des Contractors bildet der vorgefundene Ist-Zustand, das heißt der Zustand vor Projektstart, in dem die Energiekosten in bestimmter Höhe vorliegen (Basiskosten). Der Contractor realisiert die energietechnischen Maßnahmen – zum Beispiel Installation neuer Anlagentechnik, Ersatz von Kessel- und Brenneranlagen im Wärmeerzeugungsbereich oder Optimierung von Steuerungs- und Regelungssystemen – und erreicht so eine Reduzierung des Energiebezugs und der Energiekosten. Wird die vertraglich vereinbarte Einspargarantie jedoch nicht erreicht, so geht dies ausschließlich zu finanziellen Lasten des Contractors.

Die Kosten des Nutzers liegen nach Umsetzung der Maßnahme oder der Maßnahmen zwar oberhalb der Energieverbrauchskosten des Contractors, jedoch deutlich unterhalb der Basiskosten (Energiekosten des Unternehmens beim Vertragsabschluss). Aus der Differenz zwischen vertraglich vereinbarten Energiekosten und tatsächlichen Kosten refinanziert die Contracting-Gesellschaft über die Vertragslaufzeit ihre Maßnahmen und Investitionen. Nach dem Vertragsende profitiert der Kunde von der ganzen Kostenreduktion.



**Abbildung 6-1: Prinzipielles Finanzierungsmodell beim Einspar-Contracting (Quelle: eigene Darstellung)**

Die Vertragsmodalitäten bei Einsparcontracting-Projekten variieren sehr stark voneinander und müssen sorgfältig gelesen und den individuellen Randbedingungen angepasst werden.

Eine mögliche Variante beim Einsparcontracting ist beispielsweise die Einspargarantie. Hierbei verpflichtet sich der Contractor vertraglich, eine festgelegte Einsparquote über die Vertragslaufzeit zu realisieren. Erreicht er diese Einsparquote nicht, muss er dem Contracting-Kunden die Differenz zwischen erreichter Energieeinsparung und von ihm garantierter Energieeinsparung vergüten.

Im Gegensatz zum Anlagencontracting sind beim Einsparcontracting die Einnahmen des Contractors erfolgsabhängig.

Weitere Informationen sind in der überarbeiteten 2. Auflage aus dem Jahr 2007 des „Leitfaden Contracting“ (EnergieAgentur.NRW) zu finden [6-1].

### 6.3 Literatur zu Kapitel 6

[6-1] EnergieAgentur.NRW, c/o Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen: Leitfaden Contracting der EnergieAgentur.NRW, 2. überarbeitete Auflage 2007.

[6-2] „Wärmepumpen Leitfaden EnergieAgentur.NRW, Wuppertal 2007.für die Wohnungswirtschaft“,



## Anhang

---

### Verwendete Abkürzungen

a	Jahr, lat.: annus
BHKW	Blockheizkraftwerk
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius, Maßeinheit der Temperatur
CO <sub>2</sub>	Chemisches Symbol für Kohlendioxid
d	Durchmesser, Rohrendurchmesser
d	Tag, lat.: dies
d.h.	das heißt
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
elektr.	elektrisch
EM	Energiemanagement
etc.	et cetera
ETN	ETN steht für Energie, Technologie, Nachhaltigkeit. Der Projektträger ETN ist Koordinierungsstelle für das Land NRW
€	EURO (€)
e.V.	eingetragener Verein
EVG	elektronisches Vorschaltgerät (für Leuchtstofflampen)
ggf.	gegebenenfalls
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde, lat.: hora
Hu	Unterer Heizwert
Ho	Oberer Heizwert, Brennwert
hPa	Hektopascal, Maßeinheit des Druckes
HT	Hochtarif
i.a.	im Allgemeinen
i.d.R.	in der Regel
inkl.	inklusive
IR	Infrarot
J	Joule, Maßeinheit der Energie
K	Kelvin, SI-Einheit der Temperatur
	<i>Temperaturdifferenzen werden in Kelvin angegeben, Absoluttemperaturen können in K (Kelvin) oder °C (Grad Celsius) oder °F (Grad Fahrenheit) angegeben werden</i>
kg	Kilogramm, SI-Einheit der Masse
kJ	Kilojoule
KVG	konventionelles Vorschaltgerät (für Leuchtstofflampen)

kW	Kilowatt, Maßeinheit der Leistung
kWh	Kilowattstunde, Maßeinheit der Energie
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
l	Liter
lt.	laut
m	Meter, SI-Einheit der Länge
m	Masse
min	Minute
Mio.	Millionen ( $10^6$ )
MJ	Megajoule
Mrd.	Milliarden ( $10^9$ )
MWh	Megawattstunde
n.b.	nicht bestimmt
NOx	Chemisches Symbol für Stickstoffmonoxid
NT	Niedertarif
o.a.	oben angeführt
p	Druck
Pa	Pascal, SI-Einheit des Drucks
rd.	rund
red.	reduziert
REN	REN steht für „Rationelle Verwendung von Energie und Nutzung unerschöpflicher Energiequellen“. Das REN-Programm ist ein Förderprogramm der Landesregierung NRW
s	Sekunde, SI-Einheit der Zeit
StBA	Statistisches Bundesamt
Std.	Stunde
t	Tonnen
tägl.	täglich
TWh	Terawattstunde
u.	und
u.a.	unter anderem
u.ä.	und Ähnliches
USt.	Umsatzsteuer
vgl.	vergleiche
VVG	verlustarmes Vorschaltgerät (für Leuchtstofflampen)
w	Woche
W	Watt
WRG	Wärmerückgewinnung
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
zzgl.	zuzüglich

## Indizes

a	Jahr
el	elektrisch
End	Endenergie
p	peak (→ Kilowatt peak)
PE	Primärenergie
th, therm	thermisch
krit.	kritisch

## Umrechnungsfaktoren

### Energie

	J	kcal	kWh
J	-	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-7}$
kcal	4.187	-	$1,16 \cdot 10^{-3}$
kWh	$3,6 \cdot 10^6$	860	-

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2 / \text{s}^2 = 1 \text{ Ws}$$

$$1.000 \text{ kWh} = 1 \text{ MWh}$$

$$1.000 \text{ MWh} = 1 \text{ GWh}$$

$$1.000 \text{ GWh} = 1 \text{ TWh}$$

### Druck

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^3 \text{ hPa} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ kg/(m s}^2)$$

### Temperatur

$$0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K} \quad \Rightarrow \quad x^\circ\text{C} = (x + 273,15) \text{ K}$$

## Primärenergiefaktoren

Folgende Faktoren dienen zur Umrechnung von Endenergie in Primärenergie. Bei den fossilen Energieträgern sind vereinfachend die Umwandlungs- und Transportverluste nicht berücksichtigt.

$$1 \text{ kWh}_{\text{PE}} = 0,37 \text{ kWh}_{\text{el}} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ kWh}_{\text{el}} = 2,70 \text{ kWh}_{\text{PE}}$$

$$1 \text{ kWh}_{\text{PE}} = 0,85 \text{ kWh}_{\text{th}} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ kWh}_{\text{th}} = 1,18 \text{ kWh}_{\text{PE}}$$

$$1 \text{ kWh}_{\text{PE}} = 1,00 \text{ kWh}_{\text{Erdgas}} = 1,00 \text{ kWh}_{\text{Heizöl}} = 1,00 \text{ kWh}_{\text{Kohle}} \dots$$

## Heizwerte und Stoffdaten

Energieträger 1)	Heizwert $H_u$				Dichte 2)
	kWh/kg	MJ/kg	kWh/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Steinkohle	8,178	29,441	-	-	-
Braunkohle	2,444	8,798	-	-	-
Heizöl EL	11,844	42,638	9.830,5	35.389,5	830
Heizöl S (1% S)	11,217	40,381	10.656,2	38.362,0	950
Flüssiggas	12,775	45,990	7.409,5	26.674,2	580
Erdgas L	12,492	44,971	9,369	33,728	0,75 3)
Erdgas H	13,044	46,958	10,044	36,158	0,77 3)
Holz	3,611	13,000	-	-	-

1) Werte nach GEMIS; Ökoinstitut e.V., Freiburg

2) bei 15 °C

3) Normdichte

## Emissionsfaktoren

Energieträger <sup>1)</sup>	spezifische CO <sub>2</sub> -Emission		
	(Vorkette)	(Brennstoff)	(Summe)
	kg/MWh <sub>End</sub>	kg/MWh <sub>End</sub>	kg/MWh <sub>End</sub>
Steinkohle	27,95	336,0	364,0
Braunkohle	13,73	416,9	430,6
Heizöl EL	36,61	268,1	304,7
Heizöl S (1% S)	45,53	283,6	329,1
Flüssiggas	64,08	229,5	293,6
Erdgas L	18,32	198,5	216,9
Erdgas H	18,32	206,0	224,3
Holz	1,49	365,0	366,5
Strom 2004 (lokales Netz)	-	641,3	641,3

<sup>1)</sup> Werte nach GEMIS; Ökoinstitut e.V., Freiburg

## **Glossar**

### **Abwärmenutzung**

Die bei einem Prozess anfallende Abwärme wird in anderen Prozessen verwendet. Hierdurch ist eine erhebliche Energieeinsparung möglich. Die Möglichkeit der Abwärmenutzung ist von der Wärmeleistung und den Temperaturen des wärmeabgebenden und des wärmeaufnehmenden Prozesses abhängig. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Gleichzeitigkeit zwischen den Prozessen.

### **Alternative Energiequellen**

Umgangssprachlich für den Einsatz von Energieumwandlungsanlagen, die regenerative Energieformen in Strom oder Wärme umwandeln und wenige beziehungsweise keine CO<sub>2</sub> Emissionen freisetzen.

### **Amortisationszeit**

→ Kapitalrückflusszeit

### **Arbeitspreis**

Der Arbeitspreis ist der Preis für den verbrauchten Strom in Cent pro Kilowattstunde (ct/kWh). Unterschieden wird zwischen → Hochtarif und dem deutlich günstigeren Niedrigtarif.

### **BHKW**

Blockheizkraftwerk zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung, → „Kraft-Wärme-Kopplung“

### **Brennstoffe**

Brennstoffe sind aufbereitete Primärenergieträger. Die Energie ist chemisch gebunden und wird mit einem Verbrennungsprozess in Wärme umgewandelt, die für nachfolgende Umwandschritte verwendet wird. Beispiele für Brennstoffe sind Erdgas, Kohle, Heizöl, Holz, Papier oder Abfälle.

### **Brennwertkessel**

Bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern entstehen in erster Linie CO<sub>2</sub> und Wasserdampf. Im Brennwertkessel, auch als Kondensationskessel bezeichnet, werden die Abgase mit Hilfe des Heizungsrücklaufes abgekühlt, so dass der darin enthaltene Wasserdampf kondensiert. Die freiwerdende Verdampfungswärme wird im Heizungssystem genutzt.

Brennwertkessel haben daher gegenüber herkömmlichen Kesseln eine höhere Brennstoffausnutzung; bei Erdgas sind es bis zu 10% mehr, bei Heizöl bis zu 5%.

### **Endenergie**

Ist der Energieinhalt aller gehandelten primär und sekundären Energieträger, die die Einrichtung (Endverbraucher) bezieht (Bezugsenergie), vermindert um den des nichtenergetischen Verbrauchs und den Energieeinsatz bei der Eigenerzeugung von Strom und Gas beim Endverbraucher (nach VDI-Richtlinie VDI 4661).

## Energieanalyse

Strukturierte Untersuchung der Energieversorgung, -bereitstellung und -nutzung eines Unternehmens. Ziel dieser Untersuchung ist die Erhebung und Bewertung einer Datenbasis, aus der Einsparmaßnahmen abgeleitet werden können. Gleichzeitig kann diese Datenbasis als Grundstein für ein Energiemanagementsystem dienen.

## Energie-Benchmarking

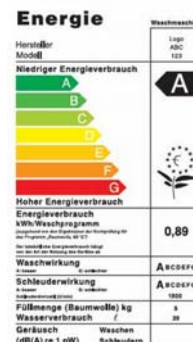
Vergleich der Energieeffizienz von Prozessen oder Einrichtungen (z.B. der stationären Altenpflege) mit Hilfe von Kennzahlen. Den jeweiligen Zielwert (Benchmark) gibt die Einrichtung (oder die Einrichtungen) mit den günstigsten Werten vor.

## Energie-Controlling

Aktive Kontrolle, Analyse und Steuerung von Informationen und von Energiedaten. Es geht darum, Verbrauchswerte regelmäßig nicht nur auf Veränderungen hin zu untersuchen, sondern die Verbräuche kritisch zu hinterfragen und Maßnahmen einzuleiten.

## Energieeffizienzklasse

Die Energieeffizienzklasse ist eine Bewertungsskala zur Unterstützung von Kaufentscheidungen für Elektrogeräte, die besonders energiesparend arbeiten. Für folgende Gerätetypen existiert eine entsprechende Klasseneinteilung: Elektrobacköfen, Geschirrspüler, Kühl- und Gefriergeräte, Lampen, Wäschetrockner, Waschmaschinen, Raumklimageräte. Die Bewertung muss auf dem Energielabel deutlich sichtbar an der Vorder- oder Oberseite jedes Geräts im Verkaufs- oder Ausstellungsraum angebracht sein. Die Bewertungsskala gibt über den Energieverbrauch (Strom und andere Energieträger) und über zusätzliche Gebrauchseigenschaften (Wasserverbrauch) des Gerätes Auskunft. Die Einteilung erfolgt in Klassen von A bis G, wobei A die beste Klasse (niedriger Verbrauch) darstellt und G die schlechteste (hoher Verbrauch).



## Energiemanagement

Ganzheitliches Steuerungsinstrumentarium, das die benötigten Energieträger vom Einkauf über die Umwandlung und Verteilung bis zur Nutzung und Abgabe in einem Unternehmen kontinuierlich erfasst und konkrete Ansatzpunkte zur Optimierung des Energieeinsatzes und der Energiekosten liefert.

## Energieumwandlung

Unter Energieumwandlung wird die Umwandlung von einer Energieart in eine andere verstanden. Die Verbrennung von Kohle ist zum Beispiel die Umwandlung von chemischer Energie in Wärmeenergie, eine Solarzelle wandelt die Strahlungsenergie des Lichtes in elektrische Energie um, in einer wiederaufladbaren Batterie wird beim Laden elektrische in chemische Energie umgewandelt, bei der Entladung derselben chemische in elektrische Energie.

## **Energieverbrauch**

Der Begriff „Energieverbrauch“ wird umgangssprachlich verwendet. Korrekter Weise sollten die Begriffe Energienutzung, Energieeinsatz oder Energiebedarf benutzt werden, da Energie aufgrund des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik weder erzeugt noch verbraucht werden kann, sondern immer nur in eine andere Energieform überführt wird.

## **Erneuerbare-Energien-Gesetz**

Das deutsche Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien, in der ge-läufigen Kurzfassung Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) genannt, soll den Ausbau von Energieversorgungsanlagen vorantreiben, die aus sich erneuernden (regenerativen) Quellen gespeist werden. Den Betreibern der zu fördernden Anlagen wird über einen bestimmten Zeitraum ein fester Vergütungssatz für den erzeugten Strom gezahlt.

Die entstandenen Mehrkosten, also die Differenz zwischen Vergütungs-satz und Marktpreis des Stroms, werden unter den Energieversorgungs-unternehmen (EVU) gleichmäßig aufgeteilt (Bundesweite Ausgleichsregelung) und fließen somit als zusätzlicher Kostenfaktor in Form der so-genannten EEG-Umlage in die Kalkulation und Abrechnung der End-verbraucherpreise ein.

## **Fernwärme**

Transport von thermischer Energie in einem wärmege-dämmten, über-wiegend erdverlegten Rohrsystem vom Erzeuger oder der Sammelstelle der Abwärme zur Zentralheizung der Verbraucher, meist zur Heizung von Gebäuden. Unter Fernheizung wird die Erschließung ganzer Städte oder ganzer Stadtteile verstanden. Bei der örtlichen Erschließung einzelner Gebäude, Gebäudeteile oder kleiner Wohnsiedlungen mit eigener Wärme-erzeugung spricht man auch von → Nahwärme.

## **Grundlast**

Die ständig benötigte Leistung in einer Einrichtung (einem Energiesys-tem). Der Begriff wird hauptsächlich für den Energieträger Strom ver-wendet. Die Grundlast kann zum Beispiel durch folgende Anlagen verur-sacht werden: Kühlaggregate, Geräte in Stand-By-Betrieb, Haus- und Versorgungstechnik (Umwälzpumpen etc.), Telekommunikations- und EDV-Anlagen im Dauerbetrieb, Klimatisierung, Beleuchtung.

## **Heizwert**

Der Heizwert ist der Messwert für die Wärme (Energie), die bei der voll-ständigen Verbrennung eines Stoffes pro Volumen oder Masse freige-setzt werden kann. Beim Heizwert wird unterschieden zwischen dem oberen Heizwert und dem unteren Heizwert. Der obere Heizwert, auch als Brennwert bezeichnet, schließt die Energie, die bei der Kondensation des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfs freigesetzt wird, mit ein und ist deshalb höher als der untere Heizwert. Der untere Heizwert errechnet sich aus dem oberen Heizwert abzüglich der Verdamp-fungswärme des Wassers.

## **Hochtarif**

In der Hochtarifzeit (tagsüber) ist der Strom teurer als in der Niedertarif-zeit. Zwischen 22 Uhr und 6 Uhr gilt der → Niedertarif, während der rest-lichen Zeit der Hochtarif. Da in der Nacht der allgemeine Strombedarf



geringer ist, ist der Niedertarif im Preis deutlich günstiger. Die Netzlast und somit die Ausnutzung der Kraftwerke ist tagsüber höher.

### **Kapitalrückflusszeit**

Zeitraum, bis die Summe der Einzahlungsüberschüsse eines Investitionsobjektes (statische Amortisationsrechnung) oder deren Kapitalwert (dynamische Amortisationsrechnung) die Anschaffungsausgaben übersteigt. Kann zur Beurteilung des Risikos einer Investition verwendet werden. Mit der Kapitalrückflusszeit kann aber keine Aussage über die Rentabilität einer Investition getroffen werden.

### **Kraft-Wärme-Kopplung**

Gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme in einer Anlage. Dieses Prinzip erhöht die Ausnutzung der in Brennstoffen gespeicherten Energie. Ein konventionelles Kraftwerk hat eine „Abwärmtemperatur“ von etwa 50 bis 80°C, für eine effiziente Wärmenutzung ist jedoch eine höhere Temperatur erforderlich, etwa 100 bis 130°C. Dies führt zu einem etwas geringeren Verstromungswirkungsgrad bei gleichzeitig deutlich verbesserter Abwärmennutzung (Steigerung des Gesamtwirkungsgrades).

### **Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)**

Das deutsche Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung) ist am 1. April 2002 in Kraft getreten. Ähnlich dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wird die Förderung (bzw. Vergütung), welche Betreiber von testierten KWK-Anlagen erhalten, auf den gesamten Stromverbrauch, und somit auf jede in der BRD verbrauchte kWh, umgelegt.

### **Heizkraftwerke**

So genannte Heizkraftwerke, bei kleineren Leistungsgrößen auch Blockheizkraftwerk (BHKW), sind Energieumwandlungsanlagen (Motoren oder Turbinen), die sowohl Strom als auch Heizwärme zur Verfügung stellen.

### **k-Wert**

→ U-Wert

### **Lastmanagement**

Das Lastmanagement dient der Kontrolle der elektrischen Spitzenleistung.

### **Lastmanagementsystem**

Durch den gleichzeitigen Betrieb von Verbrauchern kann es zu erhöhten Lastspitzen und damit zu unnötig hohen Energiekosten kommen. Das Lastmanagementsystem greift hier aktiv ein und senkt selbstständig Leistungsspitzen, indem Verbraucher gezielt, das heißt unter Beachtung definierter Vorgaben, abgeschaltet werden.

### **Lastspitze**

Die Lastspitze ist der Ausdruck für die Maximalleistung. Der Begriff wird hauptsächlich für den Energieträger Strom verwendet. Je mehr Verbraucher in einem Alten- und Pflegeheim (z.B. gleichzeitiger Betrieb der Küche, Wäscherei, etc.) innerhalb eines Bemessungszeitraums aktiv sind, umso höher ist die Maximalleistung. Lastspitzen lassen sich vermeiden

und kappen, wenn die Aktivität einzelner und energieintensiver Verbraucher gezielt in Zeiten mit niedriger Leistungsabnahme verschoben wird.

### **Leistungspreis**

Der Leistungspreis ist der Grundpreis für den Stromanschluss. Die Höhe des Leistungspreises richtet sich jedoch nach der maximalen elektrischen Leistung, die bezogen wird. Werden bei einem Alten- und Pflegeheim z. B. morgens alle Geräte gleichzeitig eingeschaltet, ergibt sich kurzzeitig eine Leistungsspitze, die einen hohen Leistungspreis nach sich zieht. Werden die Geräte dagegen zeitlich versetzt in Betrieb genommen, lassen sich diese Spitze und damit auch der Leistungspreis deutlich senken. Der Stromverbrauch wird separat als → Arbeitspreis berechnet.

### **Leuchtstofflampe**

Eine Leuchtstofflampe (auch als Gasentladungslampe bezeichnet) erzeugt durch die Gasentladung ultraviolettes Licht (UV-Licht). Die innenseitige Beschichtung des Glaskolbens setzt das erzeugte UV-Licht in ein dem Sonnenlicht möglichst ähnliches Spektrum um.

### **Lüftungswärmeverlust**

Durch aktives Lüften oder Lüftungsanlagen verlorengegangene Wärme (durch Luftaustausch bzw. Luftwechsel). Dazu gehören auch die Verluste, bei denen Wärme unkontrolliert z.B. durch undichte Fugen von Fenstern oder Türen entweicht (passive Lüftung).

### **Nahwärme**

Als Nahwärme wird die Übertragung von Wärme zwischen Gebäuden zu Heizzwecken umschrieben, wenn die Wärmeübertragung im Vergleich zur → Fernwärme nur über verhältnismäßig kurze Strecken erfolgt.

### **Netzschalter**

Verbindet und trennt ein elektrisches Gerät vom Stromnetz. Nicht jeder Geräteschalter ist jedoch ein echter Netzschalter. Bei zahlreichen Geräten wird heute aus Kostengründen auf einen Netzschalter verzichtet. Nur wenn das Gerät nach dem Ausschalten weder auf die Fernbedienung noch auf die Bedientasten am Gerät reagiert und alle Anzeigen erloschen sind, verfügt es über einen echten Netzschalter.

### **Niedertarif**

Zu Zeiten niedrigen Stromverbrauchs (22:00 bis 6:00 Uhr) bieten die Stromversorger günstige Tarife an. Vergleiche auch → Hochtarif.

### **Nutzungsgrad**

Im Gegensatz zum → Wirkungsgrad wird beim Nutzungsgrad das Verhältnis von gewonnener zu aufgewendeter Energie über einen bestimmten Zeitraum (z.B. ein Jahr) betrachtet.

### **Primärenergie**

Unter dem Begriff „Primärenergie“ beziehungsweise „Primärenergieträger“ werden die Energieträger zusammengefasst, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden, zum Bei-

spiel fossile Brennstoffe (wie Kohle, Erdöl, Erdgas), eingestrahlte Sonnenenergie, Biomasse oder Natururan.

### **Querschnittstechnik**

Querschnittstechnik umfasst die Energieumwandlungsanlagen, die in fast jeder Branche zum Einsatz kommen. Hierunter fallen insbesondere die Wärme- und Kälteerzeugung, Lüftung sowie Beleuchtung.

### **Rücklauftemperatur**

Mit der Rücklauftemperatur kommt das Heizwasser zum Kessel zurück. Die Rücklauftemperatur hängt also direkt mit der → Vorlauftemperatur zusammen, zusätzlich hat die Art der Wärmeabgabe und der aktuelle Wärmebedarf des Hauses einen Einfluss.

### **Schaltbare Steckerleiste**

Die einfachste Lösung gegen unerwünschten Stand-by-Verbrauch. Am sichersten sind zweipolige Steckerleisten, die eine vollständige Trennung der angeschlossenen Geräte vom Stromnetz bewirken. Sie sind je nach Ausführung mit einer hochwertigen internen Stromverteilung ausgestattet, verfügen über eine Kindersicherung und sollten VDE- oder TÜV-geprüft sein.

### **Stand-By**

Bereitschaftszustand von elektrischen Geräten. Dieser Zustand ermöglicht beispielsweise das Einschalten von Geräten über die Fernbedienung oder Dienste in Abwesenheit des Benutzers.

### **Stromlastspitze**

→ Lastspitze

### **Stromsteuer**

Bei der am 1. April 1999 eingeführten Stromsteuer handelt es sich um eine neue Verbrauchsteuer, die das Stromsteuergesetz (StromStG) regelt. Besteuert wird der getätigte Verbrauch von elektrischem Strom.

### **U-Wert**

Der Wärmedurchgangskoeffizient U (auch Wärmedämmwert, U-Wert, früher k-Wert) beschreibt den Wärmedurchgang von Stoffen, ist also ein Maß für die „Wärmedurchlässigkeit“. Der U-Wert ist der Kehrwert des Wärmeleitwiderstandes. Je niedriger der U-Wert eines Materials bzw. Bauteils (zum Beispiel Fenster, Mauerwerk, Dämmstoffe) desto besser ist seine isolierende Wirkung.

Der U-Wert wird in der Einheit  $W/m^2K$  (Watt pro Quadratmeter und Kelvin) angegeben und dient der Bestimmung der Transmissionswärmeverluste durch Materialien bzw. Bauteile hindurch.

### **Vorlauftemperatur**

Die Vorlauftemperatur ist die Temperatur, auf den der Heizwärmeerzeuger das Heizwasser bringen muss. Mit dieser Temperatur wird das Wärmeverteilnetz gespeist. Früher wurde mit hohen Temperaturen gearbeitet (z.B.  $90^{\circ}C$ ), moderne Heizungen kommen aber mit ca.  $50^{\circ}C$  aus.

## **Wärmerückgewinnung**

Wärmerückgewinnung (WRG) ist ein Sammelbegriff für Verfahren zur Wiedernutzbarmachung der thermischen Energie eines den Prozess verlassenden Massenstromes.

## **Wärmeübertrager – Wärmeaustauscher**

Wärmeübertrager – auch Wärmetauscher genannt – sind Apparate, in denen Wärme von einem Medium auf ein anderes übertragen wird. Verschiedene Bauarten von Wärmeaustauschern werden unterschieden: Kriterien sind die Strömungsrichtung der wärmeübertragenden Medien (Gegen-, Gleich- und Kreuzstrom) zueinander und die Bauform der Wärmeübertragungsflächen (Platten, Röhren). Zusätzlich gibt es noch einige Sonderformen wie zum Beispiel Rekuperatoren.

## **Wirkungsgrad**

Verhältnis von abgegebener und aufgenommener Leistung bei Energieumwandlungen

## Adressen

IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.	Bliersheimer Str. 60 47229 Duisburg Tel: 02065 / 418 -175 Fax: 02065 / 418 – 211 www.iuta.de
PTS	Papiertechnische Stiftung	Heßstraße 134 80797 München Tel: 089 / 12146 382 Fax: 089 / 12146 36 www.ptspaper.de
LTT	Lehrstuhl für technische Thermodynamik RWTH Aachen	Schinkelstr. 8 52062 Aachen Tel: 0241 / 80 95986 Fax: 0241 / 80-92255 www.ltt.rwth-aachen.de
EUtech	EUtech Energie & Management GmbH	Dennewartstraße 25 - 27 52068 Aachen Tel: 0241 / 963 1970 Fax: 0241 / 963 1971 www.eutech.de
MWME	Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen	Haroldstraße 4 40213 Düsseldorf Tel: 0211 / 837-02 Fax: 0211 / 837-2200 www.wirtschaft.nrw.de
ETN	Forschungszentrum Jülich Projekträger Energie, Technologie und Nachhaltigkeit	Karl-Heinz-Beckurts-Str. 13 52428 Jülich Tel: 02461 / 690-601 Fax: 02461 / 690-610 www.fz-juelich.de/etn
EA NRW	EnergieAgentur.NRW	Kasinostr. 19-21 42103 Wuppertal Tel: 0202 / 245 52-0 Fax: 0202 / 245 52-30 www.ea-nrw.de
EFA	Effizienz-Agentur NRW	Mülheimer Str. 100 47057 Duisburg Tel: 0203 / 378 79-0 Fax: 0203 / 378 79-44 www.efanrw.de
dena	Deutsche-Energie Agentur	Chausseestrasse 128a 10115 Berlin Tel: 030 / 72 61 65– 600 Fax: 030 / 72 61 65– 699 www.dena.de

ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.	Postfach 10 01 16 45001 Essen Tel: 0201 / 2701-96 Fax: 0201 / 2722-64  <a href="http://www.asue.de">www.asue.de</a>
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau	Palmengartenstrasse 5-9 60325 Frankfurt Tel: 030 / 202 64-0 Fax: 030 / 202 64-188  <a href="http://www.kfw.de">www.kfw.de</a>
UBA	Umweltbundesamt	Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel: 0340 / 2103-0 Fax: 0340 / 2103-2285  <a href="http://www.umweltbundesamt.de">www.umweltbundesamt.de</a>
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	An der Bornau 2 49090 Osnabrück Tel: 0541 / 9633-0 Fax: 0541 / 9633-190  <a href="http://www.dbu.de">www.dbu.de</a>



## Ansprechpartner

IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.	Dipl.-Ing. Monika Vogt Bliersheimer Str. 60 47229 Duisburg Tel: 02065 / 418 -175 Fax: 02065 / 418 – 211 www.iuta.de
PTS	Papiertechnische Stiftung	Dipl.-Ing. Oliver Blum Heßstraße 134 80797 München Tel: 089 / 12146 382 Fax: 089 / 12146 36 www.ptspaper.de
LTT	Lehrstuhl für technische Thermodynamik RWTH Aachen	Dipl.-Ing. Benjamin Meyer Schinkelstr. 8 52062 Aachen Tel: 0241 / 80 95986 Fax: 0241 / 80-92255 www.ltt.rwth-aachen.de
EUtech	EUtech Energie & Management GmbH	Dr. Ing. Jörg Meyer Dennewartstraße 25 - 27 52068 Aachen Tel: 0241 / 963 1970 Fax: 0241 / 963 1971 www.eutech.de

## Redaktion

Dipl.-Ing. Monika Vogt (IUTA), Oliver Blum (PTS), Achim Hutter (PTS), Holger Jung (PTS), Benjamin Meyer (LTT), Stefan Kirschbaum (LTT), Astrid Schubert (Eutech) und Jörg Meyer (Eutech)

## gefördert durch

Ministerium für Wirtschaft,  
Mittelstand und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

## unterstützt durch



Verband Deutscher  
Papierfabriken e.V.

EnergieAgentur.NRW