



INFOR-Projekt Nr. 117

Energetische Optimierung der Trockenpartie
Wärmetechnische Bewertung zur Steigerung der Energieeffizienz

Schlussbericht

Juni 2012

Technische Universität Dresden
Professur für Papiertechnik

Technische Universität Dresden
Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik

Prof. Dr.-Ing. Harald Großmann
Projektleiter:
Dr. Roland Zelm

Prof. Dr.-Ing. Norbert Mollekopf
Projektbearbeiter:
Dipl.-Ing. Konrad Treppe



Abschlussbericht
Energetische Optimierung der Trockenpartie
Wärmetechnische Bewertung zur Steigerung der Energieeffizienz
INFOR-Projekt Nr. 117

Dipl.-Ing. Konrad Treppe*
Dr.-Ing. Roland Zelm**
Dipl.-Ing. Lars Schinke***
Dipl.-Ing. Stefan Kuitunen****
Dipl.-Ing. Sebastian Pinnau****
B.-Sc. Robert Kamischke***
Dipl.-Ing. Onkar Dixit*

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Harald Großmann**
Prof. Dr.-Ing. Norbert Mollekopf*

Technische Universität Dresden

*Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Lehrstuhl für Thermische Verfahrenstechnik

**Institut für Holz- und Papiertechnik
Professur für Papiertechnik

*** Institut für Energietechnik
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

****Institut für Energietechnik
Professur für Technische Thermodynamik

*****Fraunhofer-Institut
für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI)

Juni 2012

Das Forschungsprojekt wird gefördert über das Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP e.V., Bonn

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungen	VI
Indizes	VII
Symbole	VIII
1 Einleitung und Zielstellung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielstellung	2
2 Energetischer Hintergrund bei der Papierherstellung	4
2.1 Energieeinsatz bei der Papierherstellung – Konstanter Bedarf, steigende Kosten ..	4
2.2 Wärmerückgewinnung im Zielkonflikt zwischen Wärmemenge und Temperaturniveau.....	6
2.3 Thermische Papiertrocknung	7
2.3.1 Thermodynamische Grundlagen der Papiertrocknung.....	7
2.3.2 Kontakt Trocknung an der Zylinderoberfläche	9
2.4 Wärmetechnische Bewertung – Methode zur Steigerung der Energieeffizienz – Stand der Technik.....	11
3 Bilanzmodell – Werkzeug zur energetischen Ist-Zustandsanalyse	13
3.1 Grundlagen für das Bilanzmodell	13
3.2 Vor- und Nachteile der Modellanwendung	14
3.2.1 Vorteile	14
3.2.2 Nachteile	14
3.3 Applikation des Bilanzmodells in einer Papierfabrik	15
3.3.1 Modellbildung und -validierung	15
3.3.2 Evaluierung der Anlage mit dem Bilanzmodell.....	15
3.3.3 Automatisierte Modellanwendung und Auswertung	17
3.3.4 Heben von Energieeinsparpotenzialen	17
3.3.5 Überwachung und Langzeitanalyse.....	17
4 Ergebnisse – Anschauliche Praxisbeispiele bei der Papierherstellung	19
4.1 Analysieren und Darstellen komplexer Zusammenhänge	19
4.1.1 Beispiel 1 – Kombinierte Zulufterwärmung	19
4.1.2 Beispiel 2 – Effizienz des Dampfes in der Trockenpartie	20
4.2 Kontrolle und Diagnose zur Identifikation von Fehlfunktionen	22
4.2.1 Beispiel 3 – Lokalisieren versteckter Energiekosten	22
4.2.2 Beispiel 4 – Überwachen von Ventilen und Sensoren	22

4.3	Erkennen und Bewerten von Einsparpotenzialen	22
4.3.1	Dampfsubstitution durch bisher ungenutzte Wärmequellen	24
4.3.2	Optimieren der Wärmerückgewinnungsanlage	24
4.4	Langzeitanalyse	25
4.5	"Was-wäre-wenn?"-Analyse – Wärmepumpe zur Abwärmenutzung	25
4.5.1	Methodische Vorgehensweise	26
4.5.2	Untersuchte Fallbeispiele	27
4.5.3	Sonderfall – Abwärmenutzung zur Fernwärmeversorgung	28
4.5.4	Schlussfolgerungen	30
4.5.5	Brüden als Wärmequelle zum Einsatz einer Wärmepumpe	34
4.6	Gegenüberstellung der vier untersuchten Anlagen	35
5	Zusammenfassung	37
	Literaturverzeichnis	i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Sankeydiagramm der Wärmeströme über der Trockenpartie einer LWC-Maschine (2)	1
Abbildung 2:	Branchenanteile am industriellen Gesamtenergiebedarf in Deutschland (5)	4
Abbildung 3:	Entwicklung des spezifischen elektrischen und thermischen Energieeinsatzes in der deutschen Papierindustrie 1950–2010 (4)	4
Abbildung 4:	Industrieller Elektroenergie- und Gaspreis in Deutschland 1991–2010 (6)	5
Abbildung 5:	Zielkonflikt zwischen Wärmemenge und Temperaturniveau (Kondensationstemperatur) bei der Wärmerückgewinnung	6
Abbildung 6:	Luftzustand in der Trockenpartie – Temperatur und Dampfbeladung der Luft über den Trockenzylindern (7)	7
Abbildung 7:	Konventionelle Führung der Papierbahn in der Trockenpartie (8), (10)	10
Abbildung 8:	Slalomführung der Papierbahn in der Trockenpartie (8), (10)	10
Abbildung 9:	Schema der Enthalpieströme für die energetische Bilanzierung der Trockenpartie (25)	13
Abbildung 10:	Schema – Realisierung des anlagenbezogenen Bilanzmodells bis hin zur automatisierten Modellanwendung (27)	16
Abbildung 11:	Kombinierte Zulufterwärmung durch Wärmerückgewinnung und durch teuren Frischdampfeinsatz	20
Abbildung 12:	Effizienz des in den Trockenzylindern eingesetzten Dampfes abhängig von der Dampfmenge, sortenspezifische Darstellung	21
Abbildung 13:	Effizienz des in den Trockenzylindern eingesetzten Dampfes abhängig von der Dampfmenge und der Maschinengeschwindigkeit	21
Abbildung 14:	Überwachung der Wärmerückgewinnungsanlage – Wärmeverlust vom Heizungswasser an die Abluft und anschließende Kompensation durch Frischdampf	22
Abbildung 15:	Sankeydiagramm – Enthalpieströme zur Trockenpartie und zu sekundären Frischdampfverbrauchern	23
Abbildung 16:	Verteilung des Dampfbedarfs der Papiermaschine und darin enthaltenes Dampfeinsparpotenzial durch Frischdampfsubstitution	24
Abbildung 17:	In Abluft enthaltene Wärme (grün) und aus der Abluft zurückgewonnene Wärme (orange) abhängig von der Außentemperatur	25
Abbildung 18:	Funktionsschema – Kreisprozess einer Kompressions-Wärmepumpe	26
Abbildung 19:	Verlauf der Ablufttemperatur T_0 und des Abwärmestroms Q_0 (bezogen auf Umgebungstemperatur) am Abluftturm (Tagesmittelwerte)	27
Abbildung 20:	Jahresdauerlinie der Abwärmequelle und des Fernwärmebedarfs	30
Abbildung 21:	Zeitlicher Verlauf der Leistungszahl der Wärmepumpe	31
Abbildung 22:	Jahresdauerlinie der Leistungszahl der Wärmepumpe	31
Abbildung 23:	Zeitlicher Verlauf der elektrischen Antriebsleistung P_{el} zum WP-Betrieb	32
Abbildung 24:	Gegenüberstellung der Wärmemenge Q_H des substituierten Dampfes und der elektrischen Antriebsenergie W_{el} zum Betrieb einer Wärmepumpe	32

Abbildung 25:	Beispiel für den Einsatz einer Wärmepumpe mit Brüden als Abwärmequelle	34
---------------	--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Charakterisierung möglicher Abwärmequellen zur Frischdampfsubstitution	24
Tabelle 2:	Gegenüberstellung der Fallbeispiele – Charakterisierung der Abwärmequelle und der Wärmesenken (Angaben bezogen auf betrachteten Zeitraum)	28
Tabelle 3:	Berechnungsgrundlage zur Einbindung des Fernwärmebedarfs in das Bilanzmodell	30
Tabelle 4:	Gegenüberstellung der Ergebnisse für die untersuchten Fallbeispiele im Betrachtungszeitraum	33
Tabelle 5:	Ausgewählte Ergebnisse für die Nutzung von Brüden als Wärmequelle zum Einsatz einer Wärmepumpe	35
Tabelle 6:	Gegenüberstellung der untersuchten Anlagen (anonymisiert) – Basisdaten und ausgewählte Ergebnisse	35
Tabelle 7:	Gegenüberstellung der untersuchten Anlagen (anonymisiert) – spezifische Verbrauchsdaten	36

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
GuD	Gas und Dampf
LWC	Light Weight Coated
PLS	Prozessleitsystem
TMP	Thermo Mechanical Pulp
TP	Trockenpartie
WP	Wärmepumpe
WR	Wärmerückgewinnung
WÜ	Wärmeübertrager

Indizes

Index	Bedeutung
<i>0</i>	auf Verdampfer- bzw. auf Abwärmeseite (Wärmequelle)
<i>A</i>	Austritt
<i>C</i>	auf Kondensator- bzw. auf Seite der Wärmenutzung (Wärmesenke)
<i>C</i>	Trockenzylinder
<i>D</i>	Dampf
<i>E</i>	Eintritt
<i>el</i>	elektrisch
<i>ev</i>	verdampft (evaporated)
<i>H</i>	zum Heizen
<i>W</i>	Wasser, Wasserdampf
<i>K</i>	Kondensat
<i>KM</i>	Kältemittel
<i>L</i>	Luft
<i>max</i>	Maximalwert
<i>min</i>	Minimalwert
<i>P</i>	bezogen auf die Papiermenge o. an der Papieroberfläche
<i>sat</i>	Sättigungszustand der Dampfphase
<i>tot</i>	total, gesamt o. absolut
<i>tr</i>	trocken bzw. bezogen auf Trockenmasse
<i>V</i>	Verlust

Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche
c	$\text{kJ}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität
Le	–	Lewis-Zahl
h	kJ/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
$\dot{H}$	W	Enthalpiestrom
K	–	Permeabilität
m_A	g/m^2	Flächenbezogene Masse
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
p	bar	Druck
p_V	bar	Dampfpartialdruck
P	W	Leistung
dp_C/dy	bar/m	Druckgradient der Kapillare
$\hat{q}$	W/m^2	Wärmestromdichte
Q	J o. Wh	Wärme o. Wärmemenge
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
R_V	–	relative Gaskonstante
T	$^{\circ}\text{C}$ o. K	Temperatur
v	m/min	Bahngeschwindigkeit
W	J	Arbeit
x	–	Dampfanteil
α	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient
β	m/s	Stoffübergangskoeffizient
ε	–	Leistungszahl der Wärmepumpe
$\eta_{c,a}$	–	äußerer Carnot-Gütegrad (Berücksichtigung Temperaturdifferenz im Verdampfer und Kondensator sowie Verdichterwirkungsgrad)
μ	$(\text{N s})/\text{m}^2$	Viskosität
ρ	g/cm^3 o. kg/m^3	Dichte

1 Einleitung und Zielstellung

1.1 Einleitung

Die Menschheit steht vor einem doppelten Ressourcenproblem, gekennzeichnet durch eine Verknappung fossiler Brennstoffe bei gleichzeitiger Verringerung der CO₂-Aufnahmekapazität in der Atmosphäre. Aus diesem Zwang resultieren weit reichende Folgen für die Wirtschaft mit steigenden Energiepreisen und zunehmenden Kosten für CO₂-Emissionen, wodurch der ökonomische und gesellschaftliche Druck auf energieintensive Industriezweige wie die Papierbranche steigt. Diesem Druck kann im Negativen durch Einstellung bzw. Verlagerung der Produktion oder im Positiven durch Steigerung der Energieeffizienz begegnet werden.

Das große Potenzial für Energieeinsparungen wird in der Erhebung des BMWi (1) für das verarbeitende Gewerbe deutlich, die der Papierherstellung einen Energiekostenanteil am Bruttoproduktionswert von reichlich 6 % zuweist, welcher nur durch das Glasgewerbe und den Bergbau übertroffen wird. Gemessen an der Wertschöpfung wird demnach verhältnismäßig viel Strom und Wärme für die Papierherstellung eingesetzt.

Bei der Papierherstellung wird der größte Teil des Energiebedarfs für die Trocknung aufgewendet, Abschnitt 2.1. Die zur Trocknung des Papiers eingesetzte thermische Energie wird – abgesehen von den Wärmeverlusten in der Trockenpartie (TP) – zur Erwärmung und zu einem erheblich höheren Anteil zur Verdampfung des Wassers benötigt, das die Papierbahn aus der Pressenpartie mitbringt (Abbildung 1).

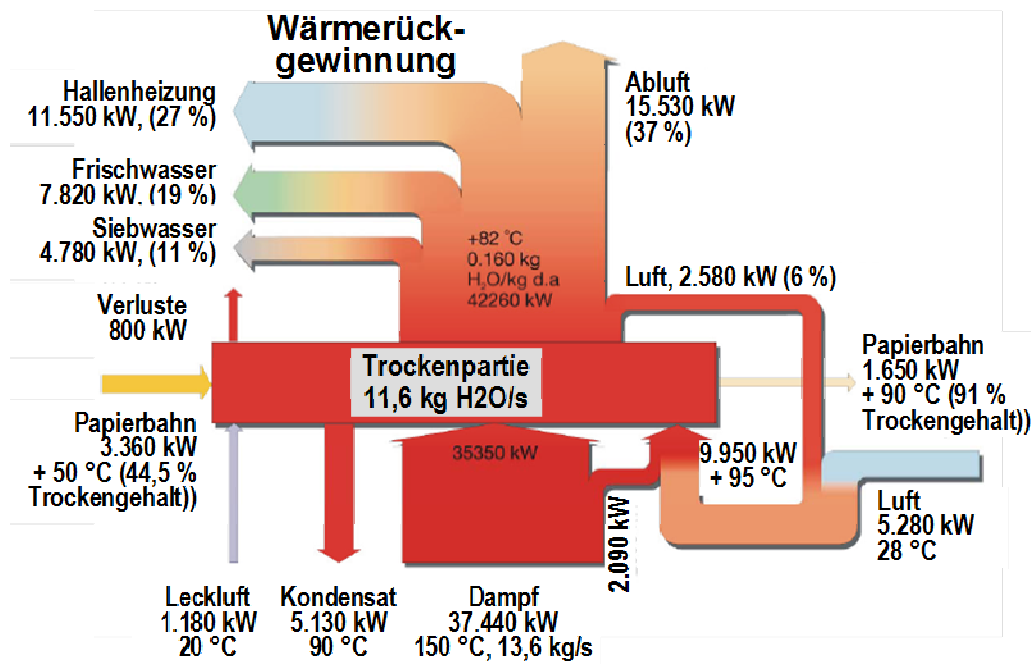


Abbildung 1: Sankeydiagramm der Wärmeströme über der Trockenpartie einer LWC-Maschine (2)

Derzeit werden im Durchschnitt zur Papierherstellung reichlich 20 % der Produktionskosten für Energie aufgewendet (3). Dabei entfallen etwa 2/3 des Bedarfs auf die hauptsächlich zur Bahntrocknung eingesetzte Wärme (4). Die Papiertrocknung bietet aufgrund des hohen Wärmebedarfs ein großes Energieeinsparpotenzial und dieses gilt es durch geeignete Maßnahmen zu heben.

Ein großer Teil der eingebrachten thermischen Energie wird im Wasserdampf als latente Wärme mit der Haubenabluft ausgetragen. Darin liegt ein großes Potenzial zur Wärmerückgewinnung (WR). Jedoch wird es mit sinkendem Temperaturniveau und abnehmender Energiedichte immer schwieriger, die in der feuchten Abluft enthaltene Wärme nutzbar zu machen. Um die in der feuchten Abluft gebundene Wärme zurückzugewinnen, muss der enthaltene Dampf kondensiert werden und dabei die Wärme auf ein Kühlmedium übertragen.

Das Ziel der WR ist die Substitution von Frischdampf durch die Nutzung von Abwärme ("Wärmerecycling") und somit bereits bezahlter Energie. Derzeit werden zur WR Netzwerke bestehend aus mehreren, teilweise komplex verschalteten Wärmeübertragern (WÜ) eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit zur WR bietet der Einsatz von Wärmepumpen (WP). Hingegen ist durch die Verbesserung der Fahrweise der Anlage bzw. Optimierung des Betriebspunkts eine Effizienzsteigerung ohne WR möglich.

Diese Möglichkeiten werden oft als Patentrezept verkauft, ohne Berücksichtigung der Besonderheiten einer Anlage und ohne quantitativen Beleg für deren Nutzen. Dem Papiermacher fehlt ein Werkzeug, das die Wirkung möglicher Einsparmaßnahmen ganzheitlich für seine Anlage berechnet, die Ergebnisse anschaulich darstellt und ihm damit eine Entscheidungshilfe für oder gegen eine Maßnahme liefert. Dies gewinnt an Bedeutung, da sowohl die Anforderungen an die Maschine (z. B. durch Veränderung des Sortenprogramms) als auch die Maschinen selbst durch Umbauten verändert werden.

An der TU Dresden wurde im Rahmen des Projektes ein solches Werkzeug als ein anlagenbezogenes Bilanzmodell realisiert und an vier Anlagen praktisch angewendet. Im Modell fließen für eine Anlage verfügbare Informationen wie Messdaten, Flussschemata, Erfahrungen des Personals sowie flankierende Handmessungen zusammen. Daraus werden wenn erforderlich in Echtzeit Stoff- und Energieströme berechnet und dargestellt. Das Modell bildet den energetischen Ist-Zustand einer Anlage mit hoher Genauigkeit nach. Abhängig von den vorliegenden Messstellen ist eine Auflösung bis zum einzelnen WÜ möglich.

1.2 Zielstellung

Ziel des Projekts ist die Identifikation von bisher nicht genutzten WR-Potenzialen um den spezifischen Energiebedarf zur Papierherstellung zu reduzieren. Im Mittelpunkt stehen die Analyse technisch und wirtschaftlich sinnvoller Maßnahmen zur Lösung des Zielkonflikts zwischen Menge und Qualität der rückgewinnbaren Wärme (Abschnitt 2.1), die Bewertung des Potenzials rückgewinnbarer Wärme zur Substitution von Frischdampf anhand von Fallbeispielen und die Abschätzung der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit.

Anhand von Untersuchungen in vier ausgewählten Papierfabriken sollte das Potenzial an rückgewinnbarer Wärme als Ersatz für Fremdenergie bewertet werden. Dafür sollte eine transparente Bewertungsmethode unter Einbeziehung betriebsinterner Dokumentationen angewendet werden. In Modellrechnungen sollte das WR-Potenzial abgeschätzt werden. Einen Schwerpunkt bildete dabei die Untersuchung des WP-Einsatzes.

Die rückgewonnene Wärme soll dazu dienen, den Einsatz von Fremdenergie zu reduzieren. Beispielsweise lässt sich mittels einer WP mit elektrischer Energie die Wärme auf ein höhe-

res Temperaturniveau anheben. Bei einem Temperaturniveau von 130 °C könnte somit auch Niederdruckdampf für die Beheizung der TP produziert werden. Nachteilig wirkt sich hierbei aus, dass der Verbrauch an Elektroenergie mit dem Temperaturhub steigt.

2 Energetischer Hintergrund bei der Papierherstellung

2.1 Energieeinsatz bei der Papierherstellung – Konstanter Bedarf, steigende Kosten

Die Papierindustrie gehört zu den energieintensivsten Industriezweigen in Deutschland (1) (Abbildung 2). Die Energiekosten haben einen großen Anteil an den variablen Herstellungskosten. Deshalb gehört die Reduzierung des spezifischen Energieeinsatzes seit langem zu den Hauptaufgaben (Abbildung 3).

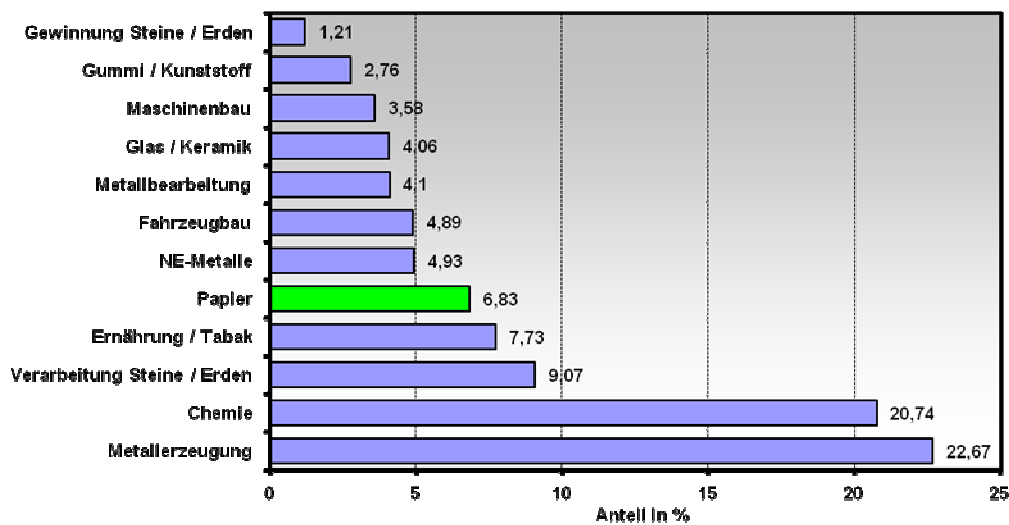


Abbildung 2: Branchenanteile am industriellen Gesamtenergiebedarf in Deutschland (5)

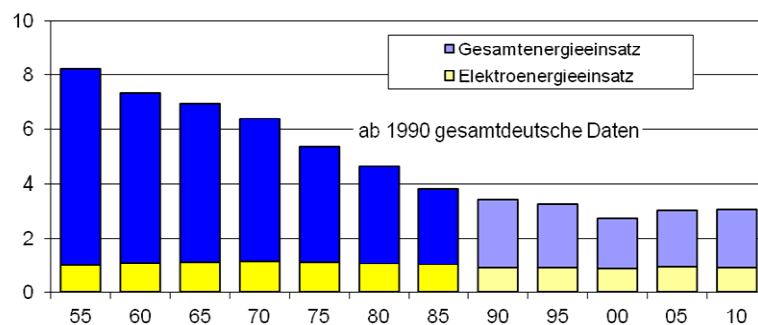


Abbildung 3: Entwicklung des spezifischen elektrischen und thermischen Energieeinsatzes in der deutschen Papierindustrie 1950–2010 (4)

Zurzeit entfallen ca. 1/3 auf den elektrischen und 2/3 auf den thermischen Energieverbrauch. Der durchschnittliche spezifische Gesamtenergieverbrauch wurde zwischen 1950 und 1995 von über 8 kWh/kg_P auf unter 3 kWh/kg_P gesenkt und bleibt seitdem nahezu konstant. Zur weiteren Senkung des Energieverbrauchs müssen größere Anstrengungen unternommen

werden, denn niedrige Temperaturniveaus und geringe Energiedichten erschweren eine Erweiterung bestehender WR-Maßnahmen.

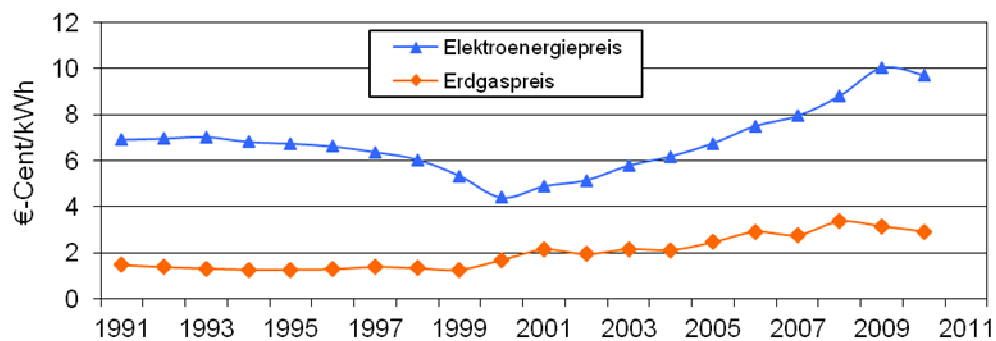


Abbildung 4: Industrieller Elektroenergie- und Gaspreis in Deutschland 1991–2010 (6)

Unter dem Druck infolge der seit 2002 stetig steigenden Energiepreise (Abbildung 4) hat die Reduzierung des zur Papierherstellung notwendigen Energiebedarfs wieder an Bedeutung gewonnen. Mittelfristig ist ein spezifischer Gesamtenergieeinsatz von unter 2 kWh/kg_P anzustreben.

2.2 Wärmerückgewinnung im Zielkonflikt zwischen Wärmemenge und Temperaturniveau

Bei der Rückgewinnung von technisch nutzbarer Wärme¹ aus Abwärme besteht ein Zielkonflikt zwischen Quantität und Qualität – also zwischen der Menge und dem Temperaturniveau der rückgewonnenen Wärme. Davon hängt ab, wie viel der rückgewonnenen Wärme im Herstellungsprozess überhaupt technisch nutzbar ist (Abbildung 5).

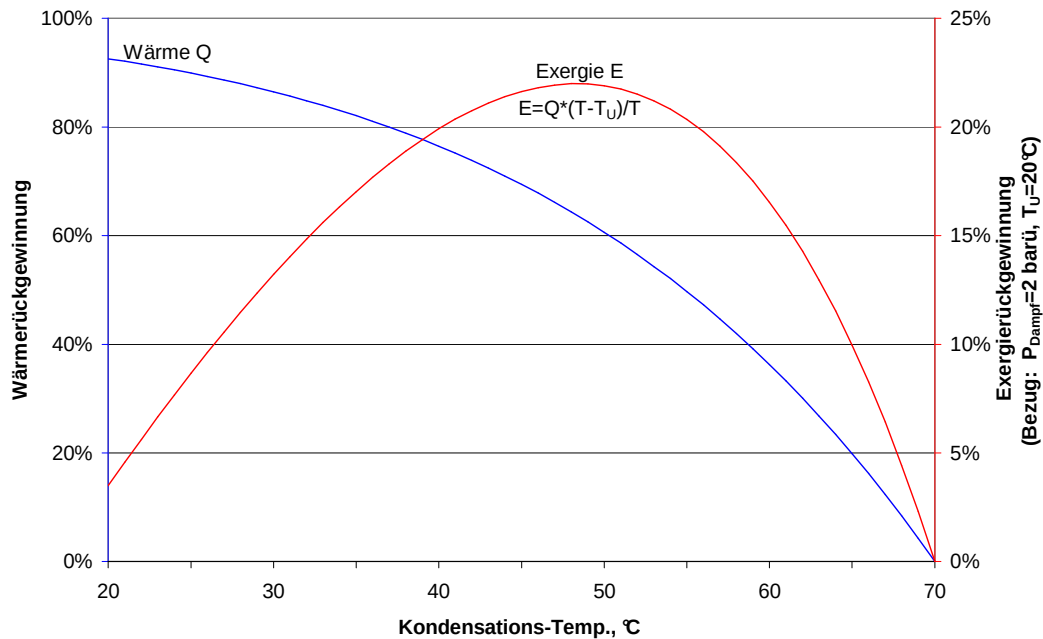


Abbildung 5: Zielkonflikt zwischen Wärmemenge und Temperaturniveau (Kondensations-temperatur) bei der Wärmerückgewinnung

Je "luftverdünnter" die Haubenluft ist, desto deutlicher wird der Zielkonflikt: Besteht die Haubenluft im Idealfall aus reinem Wasserdampf – also ohne "Luftverdünnung" – so kondensiert der Dampf vollständig bei konstant hoher Temperatur (bei atmosphärischem Druck 100 °C). Je geringer der Dampfanteil, also je niedriger der Taupunkt ist, desto niedriger ist die Temperatur, bei der der Dampf zu kondensieren beginnt. Im Gegensatz zum reinen Dampf muss die Temperatur zur möglichst vollständigen Kondensation des Dampfes bei Anwesenheit von Luft noch weiter abgesenkt werden – und zwar umso weiter, je geringer der Dampfanteil ist. Aus energetischer Sicht wäre also eine Haubenluft optimal, die aus reinem Wasserdampf besteht. Das ist allerdings prozesstechnisch nicht realisierbar, weil die TP erhebliche Mengen Falschluff zieht und Kondensation in der TP vermieden werden muss.

Die dampfbeladene Haubenluft ist in den verschiedenen Bereichen der Haube unterschiedlich gut für die WR geeignet. So hat im vorliegenden Beispiel (Abbildung 6) die Haubenluft über den Zylindern 9 bis 14 einen Taupunkt von ca. 80 °C und enthält 500 g Wasserdampf pro kg Luft. Die in diesem Luft-Dampf-Gemisch enthaltene spezifische² Energie ist um den Faktor 5 größer als über den Zylindern 3 bis 5 und wegen der höheren Temperatur zudem

¹ Exergie ist der Teil einer Wärmemenge, der bei bestimmten Bedingungen technisch nutzbar ist. Je höher das Temperaturniveau einer Abwärmequelle, desto besser kann diese technisch genutzt werden.

² bezogen auf die Masse trockene Luft

um den Faktor 2 „wertvoller“. D. h., die spezifische Exergie³ der Haubenluft über den Zylinder 9 bis 14 ist um den Faktor 10 größer als diejenige über den Zylindern 3 bis 5.

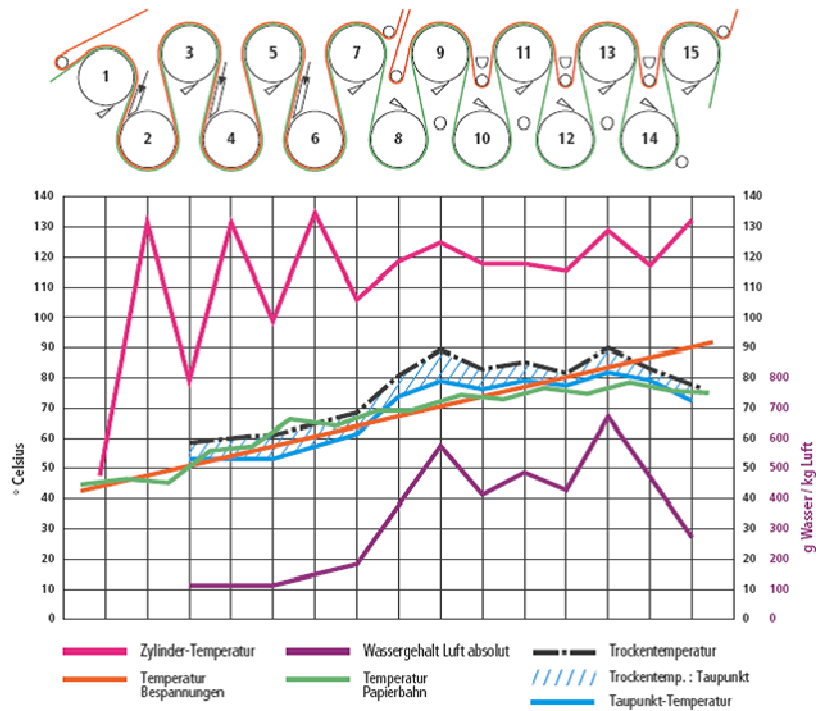


Abbildung 6: Luftzustand in der Trockenpartie – Temperatur und Dampfbeladung der Luft über den Trockenzylindern (7)

2.3 Thermische Papiertrocknung

2.3.1 Thermodynamische Grundlagen der Papiertrocknung

Die Papier- bzw. Kartonbahn hat nach der Pressenpartie im Allgemeinen einen Trockengehalt von ca. 50 %. Das bedeutet, in einem Kilogramm feuchten Papier bzw. Karton sind 0,5 kg Faserstoff und noch 0,5 kg Wasser enthalten. Dieses Wasser ist mechanisch nicht mehr entfernbar und muss daher thermisch entfernt werden. Die Entfernung des Wassers bis zu einem Trockengehalt von etwa 91–95 % ist Aufgabe der TP (8), (9).

Die thermische Trocknung der feuchten Papierbahn in der TP kann man unabhängig vom Trocknungsverlauf an jedem einzelnen Zylinder grundsätzlich in drei Phasen unterteilen.

- In der Aufheizphase erhöhen sich Papierbahntemperatur und Trocknungsgeschwindigkeit bis zum Erreichen konstanter Werte.
- In der anschließenden Phase mit konstanter Trocknungsgeschwindigkeit ist der Wärmeeintrag in die Papierbahn gleich der Wärme, die mit dem verdampften Wasser abtransportiert wird.
- In der letzten Phase nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit wieder ab. Die Ursache ist der steigende Diffusionswiderstand um den Dampf aus dem Papierinneren an die Paperoberfläche zu transportieren.

³ Exergie ist ein Maß für die Qualität der Wärme. Sie gibt an, wie viel technische Arbeit mit dieser Wärme verrichtet werden kann.

Diese Prozesse laufen in der Realität nicht getrennt nacheinander ab, sondern gehen in einander über (10).

Der Massenstrom verdampftes Wasser $\dot{m}_{ev}$ an der Papieroberfläche A in die Luftströmung lässt sich nach (8) mit der Stefan-Gleichung beschreiben:

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \frac{\beta}{R_V T} \ln \frac{p_{tot} - p_{V,L}}{p_{tot} - p_{V,P}} \quad \text{Gleichung 1}$$

p_{tot}	Absolutdruck im Papiergefüge und in der Luftströmung
$p_{V,P}$	Dampf-Partialdruck unmittelbar an der Papieroberfläche
$p_{V,L}$	Dampf-Partialdruck der Luftströmung
R_V	spezifische Gaskonstante von Wasserdampf mit 461,5 J/(kg K)
T	Kelvintemperatur
β	Stoffübergangskoeffizient

Solange die Papieroberfläche feucht ist, ist $p_{V,P}$ gleich dem Sättigungsdampfdruck für freies Wasser p_{sat} und wird mit der Antoine-Gleichung berechnet.

$$p_{sat} = 10 \exp \left(5,127 - \frac{1690}{\frac{T}{^{\circ}\text{C}} + 230} \right) \text{ bar} \quad \text{Gleichung 2}$$

T Celsiustemperatur, Gültigkeitsbereich $10^{\circ}\text{C} < T < 100^{\circ}\text{C}$

Aus der Analogie mit dem Wärmeübergang lässt sich β gemäß Gleichung 3 bestimmen.

$$\beta = \frac{\alpha_{L-P}}{\rho_L c_L Le^{2/3}} \quad \text{Gleichung 3}$$

ρ_L	Dichte der Luft
c_L	spezifische Wärmekapazität der Luft
Le	Lewis-Zahl
α_{L-P}	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Luftströmung und Papieroberfläche

Die Berechnung von α_{L-P} erfolgt mit einer für den Strömungsfall passenden Nusselt-Beziehung nach (11).

Zu Beginn der Trocknung ist der Dampf-Partialdruck an der feuchten Papieroberfläche gleich dem an einer Wasserfläche gleicher Temperatur p_{sat} . Dies gilt, solange die Kapillarkräfte im gleichen Maße freies Wasser aus dem Papiergefüge zur Oberfläche transportieren wie dort verdampft.

Die treibende Kraft für den kapillaren Wassertransport an die Papieroberfläche ist der Kapillardruck-Gradient, der aus dem Feuchtegradienten im trocknenden Papier resultiert. Die Darcy-Gleichung beschreibt den kapillaren Wassertransport:

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \rho_w \frac{K}{\mu} \frac{dp_c}{dy} \quad \text{Gleichung 4}$$

ρ_w	Dichte des flüssigen Wassers
K	Permeabilität
μ	Viskosität
dp_c/dy	Druckgradient der Kapillare

Neben der Kapillarkraft kann auch der Absolutdruck im Fasergefüge eine Triebkraft für den Transport des freien Wassers sein. Die Papierbahn wird gegen die heißen Trockenzylinder gedrückt und Wasser verdampft an der Kontaktfläche. Der Wasserdampf drückt ins Papier und führt zur Druckerhöhung.

Das freie Wasser kann sich solange im Fasergefüge bewegen, wie es eine Verbindung zwischen den Poren hat. Mit Abnahme des Feuchtegehalts verliert die Wasserphase ihren Zusammenhalt und trennt sich in Bereiche zwischen denen kein Wasserfluss möglich ist. Der kapillare Wasser-Transport endet, sobald der Feuchtegehalt unter den Sättigungspunkt der Faser fällt. Die verbleibende Feuchtigkeit liegt in Form gebundenen Wassers vor.

Mit fortschreitender Trocknung trocknet die Papieroberfläche ab und der Dampf-Partialdruck wird kleiner. Die Verdampfung erfolgt nicht mehr an der Oberfläche sondern im Papiergefüge. Der Transport des Dampfes aus dem Papierinneren zur Oberfläche erfolgt durch Diffusion. Neben den thermodynamischen Prozessen Erwärmung und Phasenübergang findet im Papier durch den Dampf ein stoffgebundener Wärmetransport statt.

Die Struktur des Papiers hat einen großen Einfluss auf die Trocknung. Das Fasergefüge nach der Pressenpartie gibt mit dem Feuchtegehalt und der Faserdichte den Anfangszustand bei der thermischen Trocknung vor.

Aus der Papierstruktur wird Wasser entfernt und das ursprünglich mit Wasser gefüllte Volumen teilweise mit Luft gefüllt oder durch Schrumpfung kompensiert. In einer Papiermaschine findet auf Grund des Zuges und der überwiegenden Orientierung der Fasern in Maschinenrichtung, in der sie weniger stark schrumpfen, kaum eine Schrumpfung in Längsrichtung statt. Das Papier schrumpft in Querrichtung und die Dickenschrumpfung (z-Richtung) beträgt typischerweise 30–40 %. Auf Grund der Änderung der Porosität und der Porengröße hat die Schrumpfung in z-Richtung einen ausgeprägten Effekt auf die Trocknung. Der Wasserdampf muss einen "verschlungenen" Weg an die Oberfläche nehmen.

2.3.2 Kontakttrocknung an der Zylinderoberfläche

Die Zylinderkontakttrocknung ist die vorherrschende Technologie zur Papier- und Kartontrocknung. Die Wärmestromdichte $\hat{q}$ bei der Kontakttrocknung berechnet sich aus:

$$\hat{q} = \alpha_{C-P}(T_C - T_P) \quad \text{Gleichung 5}$$

α_{C-P}	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Trockenzylinder und Papierbahn
T_C	Temperatur an Oberfläche des Trockenzylinders
T_P	Temperatur an Papieroberfläche, zylinderseitig.

Bei der Kontakttrocknung wird das feuchte Papier über dampfbeheizte Trockenzylinder geführt (Abbildung 7). In der konventionellen TP läuft die Kontakttrocknung beim Lauf von Zy-

linder zu Zylinder zyklisch ab. Nach dem Kontakt der Bahnunterseite mit dem heißen Trockenzylinder folgt die kontaktfreie Überführung zum nächsten Zylinder, wo die entgegengesetzte Seite, also die Bahnoberseite, berührt wird.

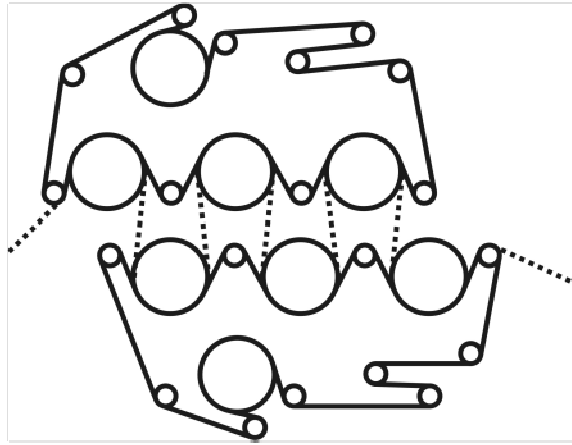


Abbildung 7: Konventionelle Führung der Papierbahn in der Trockenpartie (8), (10)

Die Bahntemperatur ist abhängig von der Temperatur an der Zylinderoberfläche, vom Feuchtegehalt der Bahn und von der Verweilzeit an der Zylinderoberfläche (also von der Bahngeschwindigkeit). Die Bahntemperatur übersteigt auch bei stark überhitzten Zylindern in Folge der hohen Verdampfungsenthalpie des Wassers nicht wesentlich ein Niveau von 90 °C. Die Trocknungsgeschwindigkeit wird u.a. durch den Stoffcharakter, die Dicke des Fasermaterials und den Feuchtgradienten zwischen Papier und Trockenfilz bzw. zwischen Papier und Luftströmung, d. h. von der Feuchtluftabführung beeinflusst (10).

1976 wurde die Slalomführung eingeführt. Diese ermöglicht die Steigerung der Produktivität durch Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit und somit die Senkung der spezifischen Kosten (Abbildung 8). Bei der Slalomführung befindet sich der Trockenfilz an den unteren Zylindern zwischen Papierbahn und Zylinder. Dadurch werden die unteren Zylinder für die Trocknung ineffektiv.

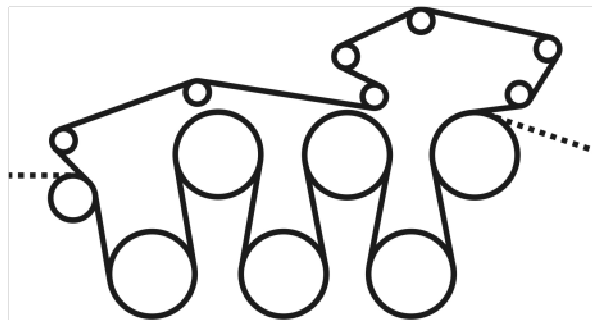


Abbildung 8: Slalomführung der Papierbahn in der Trockenpartie (8), (10)

Mit weiter zunehmender Produktionsgeschwindigkeit verliert die Papierbahn die Haftung am Filz. In den 1980er Jahren wurden deshalb Vakuumzylinder anstelle der unteren Trockenzylinder eingebaut. Diese halten das Papier am Trockenfilz und behindern gleichzeitig die Querschrumpfung des Papiers (12).

Mit weiteren Entwicklungen wie Bahnunterstützungssystemen und Schuhpressen sind inzwischen Geschwindigkeiten bis zu 2.000 m/min möglich. Allerdings ist mit der Slalomführung die Trockengruppe noch länger und teurer geworden. Dennoch konnte auch diese Form der Papiertrocknung nicht dazu beitragen, die Papiereigenschaften aktiv zu beeinflussen. Die TP dient ausschließlich zum Trocknen und dem Papiertransport.

Vorteile der Zylinderkontakttrocknung (13), (14):

- Möglichkeit für weitere Effizienzsteigerung durch Abwärmenutzung,
- Haube über der TP als Bestandteil eines WR-Systems,
- als Wärmequelle dient Niederdruckdampf, der oftmals die günstigste Wärme in einer Papierfabrik ist,
- Papierfabriken mit integrierter Zellstoff- oder TMP-Herstellung erzeugen einen Dampfüberschuss, der in den Trockenzylindern verwendet werden kann,
- Schrumpfung in Maschinen-Querrichtung kann durch die Slalomführung mit Vaku-umwalzen reduziert werden. Zusätzlich wird durch die Zylinder eine Glätte gewährleistet und
- gute Runnability, einfaches Aufführen und weitestgehend Selbstreinigung bei Bahnabriss.

Nachteile der Zylinderkontakttrocknung:

- großer Platzbedarf aufgrund geringer flächenspezifischer Verdampfung im Vergleich zu anderen Trocknungsmethoden,
- langsame Reaktionszeiten zur Kontrolle des Feuchteprofils,
- schlechte Kontrolle des Feuchteprofils in Maschinenquerrichtung und
- Verringerung der Trocknung bei Geschwindigkeitserhöhung durch verkürzte Verweilzeit an der Zylinderoberfläche und der damit verbundenen reduzierten Wärmeübertragung.

2.4 Wärmetechnische Bewertung – Methode zur Steigerung der Energieeffizienz – Stand der Technik

Es können drei Ansatzpunkte zur Erhöhung der Energieeffizienz bei der Papierherstellung unterschieden werden.

- Prozesstechnische Optimierung: Dabei werden einzelne Schritte in der Prozesskette zur Papierherstellung optimiert oder durch neue, bessere Prozesse ersetzt.
- Frischdampfsubstitution: Hier wird durch WR eine verbesserte Abwärmenutzung erreicht und somit der Frischdampfbedarf reduziert.
- Verringerung von Material- und Energieverlusten durch Leckagen, über unisolierte Flächen und durch unterschiedliche Temperaturniveaus bei der Mischung mehrerer Stoffströme.

Um Energieeinsparungen entsprechend dem zweiten und dritten Ansatzpunkt zu erzielen, müssen die Stoff- und Wärmeströme in der Anlage für einen möglichst langen Zeitraum bekannt sein. Als erster Schritt einer fundierten Analyse müssen also die Stoff- und Wärmeströme bilanziert werden. Die Bilanzierung der Anlage und die anschließende Auswertung der Daten erfordert thermodynamisches Know-How.

Die Papiertechnische Stiftung München hat 2002 in der Studie "Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie" Möglichkeiten zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme untersucht. Darin wird ein methodischer Ansatz zur Bilanzierung von Abwärmeströmen beschrieben (15).

Im Bericht "Chancen der Papierindustrie im Rahmen der Klimastrategie" von der österreichischen Energieverwertungsagentur wurde 2005 eine ganzheitliche Bewertungsmethode beschrieben, bei der Produktionsdaten, Brennstoff- und Stromverbrauch sowie die CO₂-Emissionen berücksichtigt werden (16).

In dem 2008 veröffentlichten Artikel "Exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments" analysieren die Autoren für die schwedische Papierindustrie Hemmschwellen, die der Realisierung von Maßnahmen zur Energieeinsparung entgegen stehen. Welche Faktoren bremsen eine weitere Steigerung der Energieeffizienz bei der Papierherstellung? (17)

Mit der Software "Einstein" wird ein automatisierter Ansatz zur Unterstützung der energetischen Analyse bzw. von Energieberatern verfolgt. Dafür werden Betriebsdaten abgefragt, die Analyse folgt einer fest vorgegebenen Schrittfolge (18).

Zur Verbesserung der Energieeffizienz bei der Papierherstellung müssen mehrere Kompetenzen interdisziplinär zusammenarbeiten. Die wärmetechnische Optimierung in einer Papierfabrik setzt sowohl thermodynamisches als auch verfahrenstechnisches Verständnis für den Herstellungsprozess voraus. Außerdem wird zunehmend eine ökonomische Kompetenz zur Bewertung einzelner Sparmaßnahmen erforderlich. Denn nicht alles was thermodynamisch und prozesstechnisch sinnvoll erscheint, rechnet sich am Ende auch. Außerdem gilt, je komplexer Sparmaßnahmen in ihrer Realisierung sind, desto größer ist die Gefahr von Fehlinvestitionen (19), (20), (21).

Durch Energieeinsparungen werden der Brennstoffverbrauch und folglich die CO₂-Emissionen verringert. Die freigestellten Emissionszertifikate können für die Papierfabrik bei entsprechenden Rahmenbedingungen eine Einnahmequelle darstellen (22).

Die Auswirkungen der Vakuumtrocknung auf die Eigenschaftskennwerte vom Papier wie z. B. Festigkeit und optische Eigenschaften wurden an der TU Dresden untersucht (23).

3 Bilanzmodell – Werkzeug zur energetischen Ist-Zustandsanalyse

3.1 Grundlagen für das Bilanzmodell

Das anlagenbezogene Bilanzmodell wird aus dem Blackboxmodell heraus umgesetzt (Abbildung 9). Im Blackboxmodell werden ein- und austretende Stoff- und Energieströme berücksichtigt, ausführliche Beschreibung in (24). Die bei der Papiertrocknung auftretenden gekoppelten Wärme- und Stofftransport-Mechanismen bleiben unberücksichtigt.

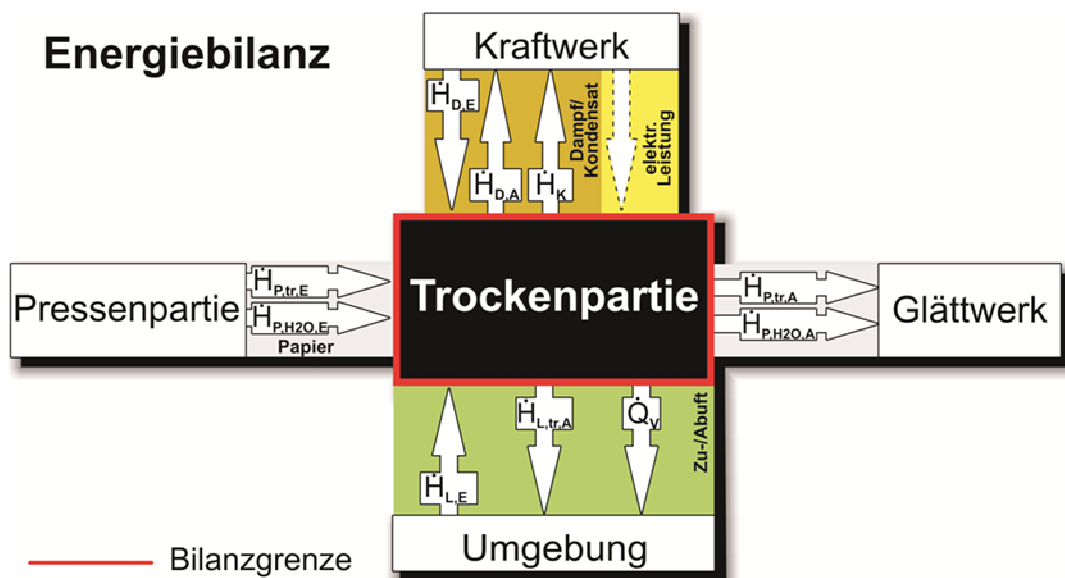


Abbildung 9: Schema der Enthalpieströme für die energetische Bilanzierung der Trockenpartie (25)

Im Bilanzmodell werden die Erhaltungssätze für Masse und Energie für folgende Stoff- und Energieströme angewendet:

- Dampf,
- Kondensat,
- Zuluft⁴,
- Leckageluft⁴,
- Abluft⁴,
- Papier am Eintritt⁵,
- Papier am Austritt⁵,
- elektrische Energie und
- Wärmeverluste.

Im anlagenbezogenen Bilanzmodell werden für eine ganzheitliche Analyse der Papierherstellung neben der TP zusätzlich sekundäre Dampfverbraucher wie Dampfblaskästen, Erwär-

⁴ unter Berücksichtigung des darin enthaltenen Wasserdampfes

⁵ unter Berücksichtigung des darin enthaltenen flüssigen Wassers

mung Heizungswasser, Vorwärmung Kreislaufwasser, Stärkeaufbereitung etc. berücksichtigt (25).

3.2 Vor- und Nachteile der Modellanwendung

3.2.1 Vorteile

Neben der Identifizierung von Energieeinsparpotenzialen und der Bewertung möglicher Sparmaßnahmen kann durch eine automatisierte Modellanwendung mit einer kompetenten Aufarbeitung der gewonnenen Daten weiterer Nutzen für den Anlagenbetrieb gewonnen werden:

- Detailverständnis der gekoppelten Prozesse in der Anlage: Durch eine anschauliche Darstellung vermuteter Zusammenhänge, können Rückschlüsse für eine optimierte Betriebsführung gezogen werden.
- Kontroll- und Diagnosemöglichkeit: Aufdeckung von Fehlfunktionen wie defekte WÜ, fehlerhafte Messstellen, undichte Ventile.
- Die Langzeitanalyse macht Zusammenhänge wie schleichende Prozesse (z. B. Verschmutzung von WÜ) und jahreszeitliche Schwankungen über einen großen Zeitraum sichtbar. Die Langzeitanalyse kann auch rückwirkend erfolgen, vorausgesetzt Messdaten aus der Vergangenheit liegen vor und Änderungen der Anlage sind dokumentiert.

Dem Betreiber wird mit dem Bilanzmodell ein Diagnosewerkzeug zur Analyse des thermischen Energiebedarfs seiner Anlage in die Hand gegeben. Weil im Bilanzmodell die Verbindungen und Rückkopplungen der einzelnen Prozesse berücksichtigt werden können, ergibt sich die Möglichkeit zur Vertiefung des Anlagenverständnisses. Bei entsprechender Messtechnik schließt dies das Anlagenmonitoring ein.

Bei kompetenter und sachverständiger Analyse der Daten bietet das Bilanzmodell die Möglichkeit Energieeinsparpotenziale zu identifizieren und zu quantifizieren. Steht ein Dateninterface zum Prozessleitsystem zur Verfügung, können aktuelle Messwerte in die Analyse einbezogen werden und die energetische Bewertung der laufenden Produktion unterstützen ohne in diese einzugreifen.

Mit dem Bilanzmodell können auf Basis von Fallstudien ("Was-wäre-Wenn?"-Analysen) technische Änderungen und Umbauten an der Anlage anhand echter Messwerte über den Jahresverlauf berechnet und so die Auswirkungen auf den Produktionsprozess im Voraus abgeschätzt werden (26). Beispielsweise kann so die Produktionssteigerung durch eine Umbaumaßnahme wie die Nachrüstung einer Schuhpresse sortenspezifisch untersucht werden.

3.2.2 Nachteile

Der Hauptnachteil eines detaillierten Bilanzmodells ist der große Aufwand zur Erstellung und zur Parametrisierung des Modells. Vor allem bei älteren Anlagen, die i. d. R. nicht über umfangreiche Online-Messtechnik im WÜ-Netzwerk verfügen, ist der manuelle Aufwand zur Erfassung der notwendigen Daten für verschiedene Betriebszustände groß. Andererseits ist bei älteren Anlagen ein großes Energieeinsparpotenzial zu erwarten. Die Anwendung des Bilanzmodells liefert keine fertige Einsparmaßnahme sondern schafft eine objektive Grundlage zur Bewertung des energetischen Ist-Zustandes.

3.3 Applikation des Bilanzmodells in einer Papierfabrik

3.3.1 Modellbildung und -validierung

Die Bilanzierung des Energiebedarfs muss jeweils an die konkrete Papierproduktionslinie angepasst werden. Bei der Berechnung des erforderlichen Dampfbedarfs zur Vermeidung von Versorgungsengpässen müssen sowohl die sekundären Dampfverbraucher als auch die unterschiedlichen Bedingungen im Sommer- und Winterbetrieb berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass jede Anlage unter Berücksichtigung ihrer Besonderheiten individuell bilanziert werden muss.

Die Vorgehensweise zur Applikation des Modells in einer Papierfabrik bis hin zur automatisierten Modellanwendung für die kontinuierliche Bilanzierung wird in vier Phasen gegliedert (Abbildung 10)⁶.

Der Modellierung der Anlage geht deren genaue Analyse voraus, bei der bereits vorhandene Daten z. B. Flussschemata, Grafiken des PLS und Informationen zu den Messstellen gesammelt (1.1) und in einem Anlagenschema (1.2) systematisiert werden. Die Zusammenarbeit mit dem Anlagenpersonal ist hierbei unbedingt erforderlich, damit deren Erfahrungen in das Modell mit einfließen. Die gesammelten Informationen werden in Gleichungen übersetzt und ausgehend vom bestehenden Blackboxmodell zum anlagenbezogenen Bilanzmodell (1.3) zusammengeführt.

Bei Bedarf werden an ausgewählten Stellen der Anlage flankierende Handmessungen durchgeführt. Ist eine Messung an einer Stelle nicht möglich, werden gemeinsam mit dem Anlagenpersonal sinnvolle Annahmen getroffen.

Bei einer kurzen Messkampagne werden die zur Modellierung erforderlichen Werte erfasst (1.4). Bei der anschließenden Auswertung und Validierung des Modells (1.5) werden die Daten in das Modell gespeist und die Ergebnisse hinsichtlich Plausibilität kontrolliert, anhand derer das Modell schrittweise verbessert wird. Die in (1.4) erfassten Daten entsprechen einer Momentaufnahme des Anlagenbetriebes.

3.3.2 Evaluierung der Anlage mit dem Bilanzmodell

In der Evaluierungsphase (2.1) wird das validierte Bilanzmodell zur Untersuchung des Energieeinsparpotenzials der Anlage genutzt. Die Untersuchungsergebnisse werden in einem Maßnahmenkatalog zusammengefasst. Darin werden erste Vorschläge für Sparmaßnahmen gegenübergestellt, die mit dem Betreiber diskutiert werden. Zur Absicherung der Ergebnisse kann eine automatisierte Modellanwendung (2.2) zur kontinuierlichen Bilanzierung der Anlage umgesetzt werden.

Der Vorteil der automatisierten Modellanwendung gegenüber einer einmaligen Messung (nur Phase 1) ist, dass die Anlage über einen langen Zeitraum betrachtet wird und dadurch schwankende Produktions- und Umweltbedingungen (jahreszeitlicher Verlauf) in der Analyse berücksichtigt werden. Die Wirkung möglicher Sparmaßnahmen kann damit über einen langen Zeitraum untersucht werden. Die Prognosesicherheit, gegenüber der in (1.4) gewonnenen Datenbasis, wird dadurch größer.

⁶ Die Zahlen in den Klammern beziehen sich auf die in der Abbildung nummerierten Schritte zur Modellierung einer Anlage.

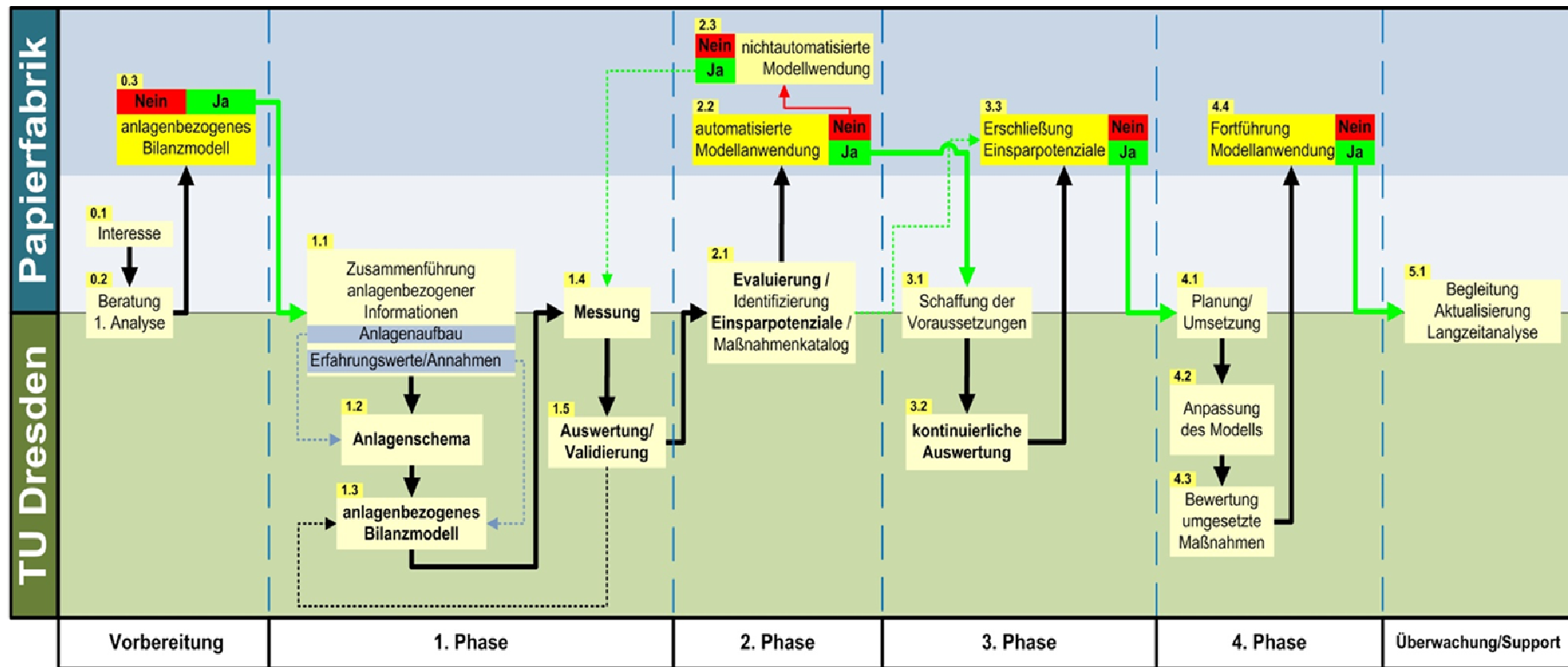


Abbildung 10: Schema – Realisierung des anlagenbezogenen Bilanzmodells bis hin zur automatisierten Modellanwendung (27)

3.3.3 Automatisierte Modellanwendung und Auswertung

Sind die Voraussetzungen zur automatisierten Modellanwendung (3.1) wie Nachrüstung erforderlicher Messtechnik und Koppelung des Modells an das PLS erfüllt, beginnt die kontinuierliche Bilanzierung der Anlage und die Auswertung (3.2).

Die durch das Bilanzmodell darstellbaren Zusammenhänge sind vielfältig und komplex und können an die Besonderheiten einer Anlage angepasst werden. Somit folgt die Auswertung nicht einem vorgegeben Schema sondern ist – wie das Modell selbst – anlagenbezogen und trägt damit den Unterschieden zwischen den Anlagen Rechnung.

Möglichkeiten zur Aufbereitung und Auswertung der Ergebnisdaten, Abschnitt 4.1 bis 4.4:

- Verhalten der Anlage in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie jahreszeitliche Schwankungen, Maschinengeschwindigkeit und Papiersorte,
- Darstellung der von WÜ übertragenen Wärmeströme im zeitlichen Verlauf, Überwachung
- detailliertes Energieflussbild der Anlage, Sankeydiagramm,
- Charakterisierung relevanter Wärmequellen und -senken ("Wärmeverbraucher") hinsichtlich Quantität (Wärmemenge), Qualität (Temperaturniveau) und der Verfügbarkeit im Betriebsablauf. Damit wird eine wichtige Voraussetzung für die Substitution von Frischdampf durch Nutzung von Abwärme im Produktionsprozess geschaffen.

Auf Grundlage der ausgewerteten Daten werden Maßnahmen zur Nutzung des Einsparpotenzials unter Berücksichtigung der Fahrweise der Anlage erarbeitet:

- Frischdampfsubstitution durch gezielte Rückgewinnung von Abwärme,
- Optimierung der WR-Anlage,
- WP-Einsatz zur Anhebung des Temperaturniveaus von Abwärmeströmen auf ein im Anlagenbetrieb nutzbares Temperaturniveau, Abschnitt 4.5 und
- Einsatz Absorptionskältemaschinen zur Kälteerzeugung (28).

Zum Abschluss der 3. Phase ist eine Priorisierung der Sparmaßnahmen und Entscheidung zur Umsetzung (3.3) zu treffen. Ggf. muss eine Wirtschaftlichkeitsrechnung und eine Sensitivitätsanalyse zur Bewertung und Priorisierung der Maßnahmen bei Änderung von Energiekosten und -bedarf durchgeführt werden.

3.3.4 Heben von Energieeinsparpotenzialen

Gemeinsam mit dem Betreiber und einem erfahrenen Planer werden die Sparmaßnahmen geplant und deren Umsetzung überwacht. Entsprechend der Änderungen der Anlage wird das Bilanzmodell aktualisiert, so dass eine Kontrolle der Wirksamkeit der Maßnahmen anhand aktueller Messdaten schnell möglich ist.

3.3.5 Überwachung und Langzeitanalyse

Eine Fortsetzung der Modellanwendung zur Überwachung und zur Langzeitanalyse der Anlage ist möglich:

- Selbstständige Modellanwendung und Auswertung: Das Modell wird eigenständig durch das Anlagenpersonal betreut.

- Begleitende Modellanwendung und Auswertung: Die Anlage wird bezüglich ihrer Wärmeverbräuche, WÜ etc. evaluiert und das Modell wird weiterentwickelt und an Umbauten der Anlage angepasst.

Die produktionsbegleitende Überwachung sollte durch das Maschinenpersonal erfolgen, um unabhängig von externen Energieberatern das Anlagenverständnis in der Belegschaft zu erhöhen. Gegebenenfalls sind dazu Einweisungen oder Schulungen notwendig.

4 Ergebnisse – Anschauliche Praxisbeispiele bei der Papierherstellung

4.1 Analysieren und Darstellen komplexer Zusammenhänge

Die Anwendung des Bilanzmodells in einer Papierfabrik setzt sowohl thermodynamische Kompetenz als auch verfahrenstechnisches Verständnis für den Herstellungsprozess voraus. In diesem Abschnitt werden ausgewählte Beispiele für die Modellanwendung bei der Papierherstellung vorgestellt. Daran wird die Vielseitigkeit und Flexibilität der Bilanzierungsmethode nachvollziehbar, die weit über die Bestimmung von Einsparpotenzialen hinausgeht. Die hier gezeigten Beispiele beziehen sich auf die Anlage, in der dank des großen Engagements des Betreibers die Modellanwendung und Auswertung am weitesten vorangebracht wurde. Dafür wurden Messdaten über einen Zeitraum von ca. einem Jahr bilanziert und ausgewertet.

Die detaillierte Analyse der mit dem Bilanzmodell gewonnen Daten kann noch unbekannte und teilweise überraschende Zusammenhänge zeigen. Dadurch ist es möglich, das Wissen über die Anlage bei denjenigen zu vertiefen, die täglich an der Anlage arbeiten. So können unabhängig von externen Beratern das Know-How für Energieeinsparungen in der Belegschaft gefestigt und Ideen zur Prozessoptimierung motiviert werden.

4.1.1 Beispiel 1 – Kombinierte Zulufterwärmung

Die für die Zuluft verwendete Hallenluft wird auf ihrem Weg in die TP durch Abluft und im Anschluss mit Dampf über WÜ auf die notwendige Eintrittstemperatur erwärmt.

Abbildung 11 zeigt für die Wärmequellen die jeweilige Wärmemenge zur Zulufterwärmung bezogen auf die Luftmasse über einen Zeitraum von 24 h. Damit wird deutlich, in welchem Maße der Wärmebedarf für die Zulufterwärmung über die kostengünstige WR aus Abluft bzw. den teureren Einsatz von Frischdampf gedeckt wird. Außerdem zeigt das Diagramm deutlich, wie effektiv abluftseitige Schwankungen durch die Regelung der Dampfzufuhr kompensiert werden.

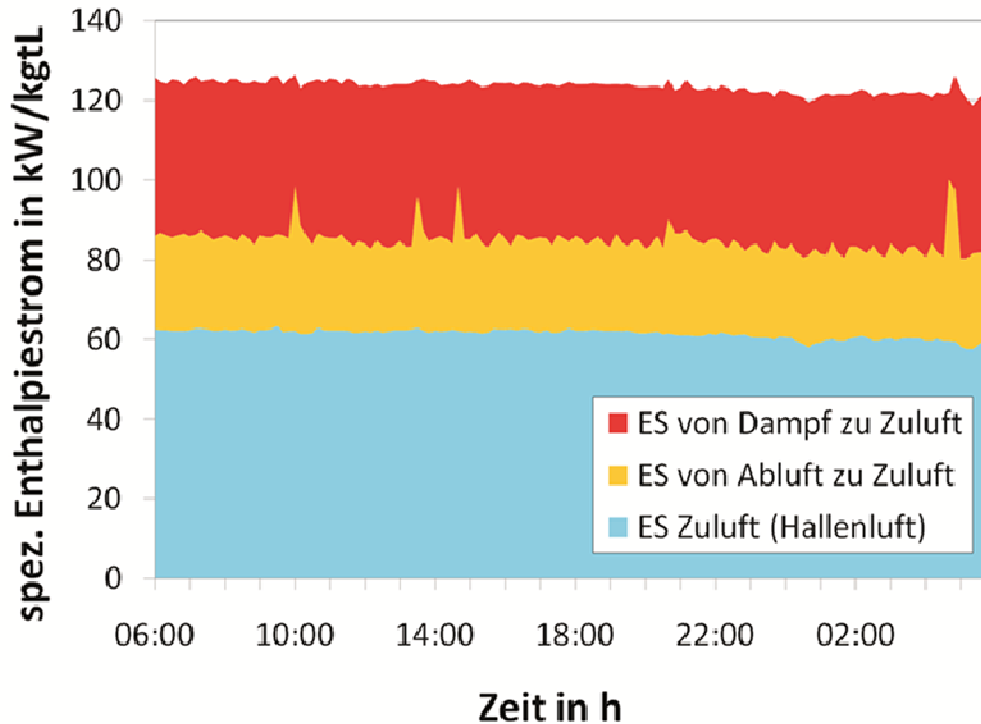


Abbildung 11: Kombinierte Zulufterwärmung durch Wärmerückgewinnung und durch teuren Frischdampfeinsatz

4.1.2 Beispiel 2 – Effizienz des Dampfes in der Trockenpartie

Aus den Ergebnissen der kontinuierlichen Bilanzierung ist die Effizienz des in den Trockenzylindern eingesetzten Dampfes für verschiedene Betriebszustände darstellbar. Die Effizienz des Dampfeinsatzes ist die mit einem kg Frischdampf aus dem Papier verdampfte Wassermenge. Je größer der Wert, desto besser wird die im Frischdampf enthaltene Enthalpie zur Verdampfung des Wassers aus dem Papier eingesetzt.

Abbildung 12 zeigt sortenspezifisch, dass die Effizienz mit zunehmender Frischdampfmenge abnimmt. Eine Ursache dafür kann die mit steigender Dampfmenge also zunehmender Produktionsgeschwindigkeit abnehmende Verweilzeit der Papierbahn in der TP sein.

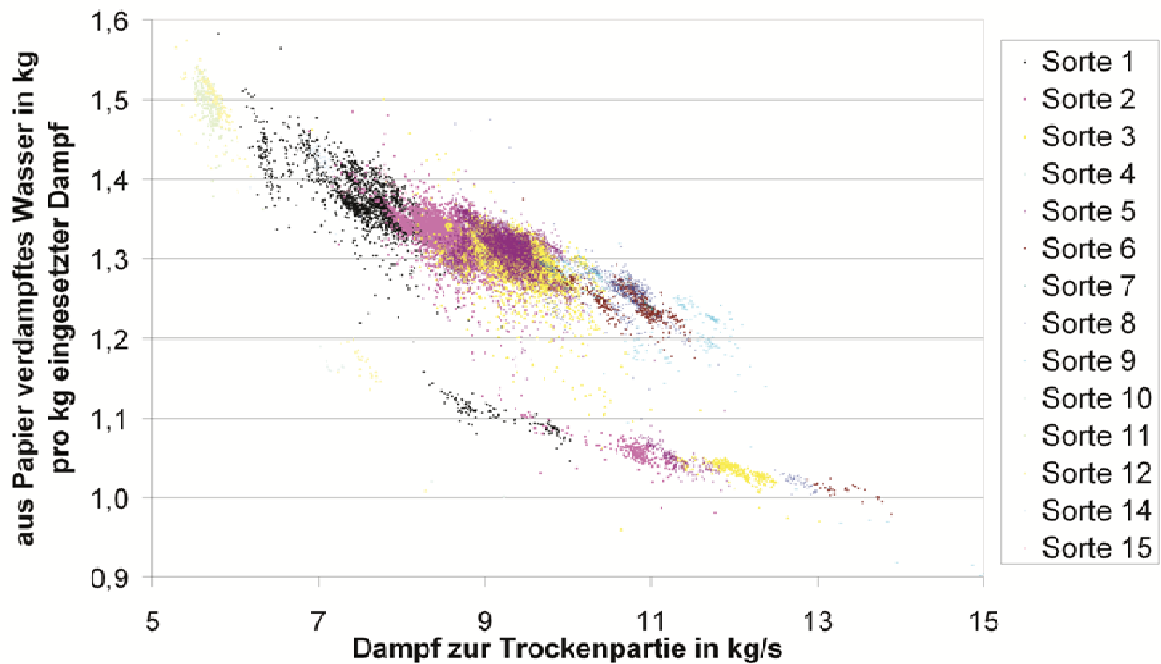


Abbildung 12: Effizienz des in den Trockenzylindern eingesetzten Dampfes abhängig von der Dampfmenge, sortenspezifische Darstellung

Abbildung 13 zeigt die Effizienz des Dampfeinsatzes über der Dampfmenge und der Maschinengeschwindigkeit. Aus der Darstellung wird deutlich, dass die Effektivität nur geringfügig von der Maschinengeschwindigkeit aber stark von der Dampfmenge abhängt.

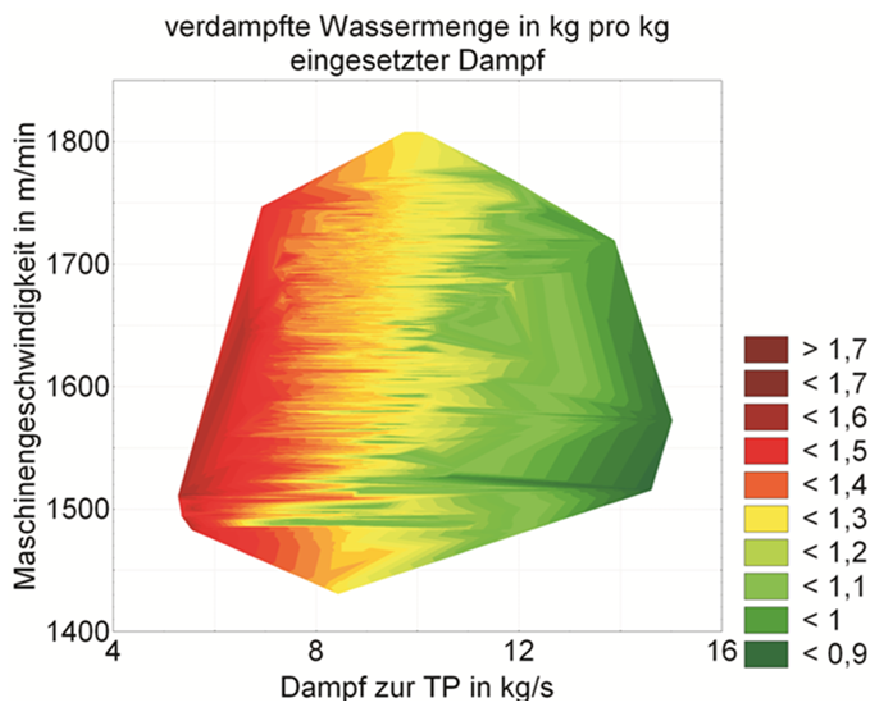


Abbildung 13: Effizienz des in den Trockenzylindern eingesetzten Dampfes abhängig von der Dampfmenge und der Maschinengeschwindigkeit

4.2 Kontrolle und Diagnose zur Identifikation von Fehlfunktionen

4.2.1 Beispiel 3 – Lokalisieren versteckter Energiekosten

Bei der Auswertung der Daten für die WR-Anlage wurde eine Fehlfunktion im Abluft-Heizungswasser-WÜ festgestellt. Unter Umständen erfolgt hier ein Wärmeaustausch vom Heizungswasser auf die Abluft – also in die falsche Richtung. Die dem Heizungswasser dadurch entstehenden Wärmeverluste werden im nachgeschalteten Dampf-Heizungswasser-WÜ durch Dampf kompensiert.

In Abbildung 14 ist der Wärmeverluststrom vom Heizungswasser an die Abluft grün und der anschließend zur Kompensation der Verluste vom Dampf auf das Heizwasser übertragene Wärmestrom rot dargestellt. Die Dampfmenge zur Kompensation beträgt allein im ersten Halbjahr 2010 ca. 900 t Dampf.

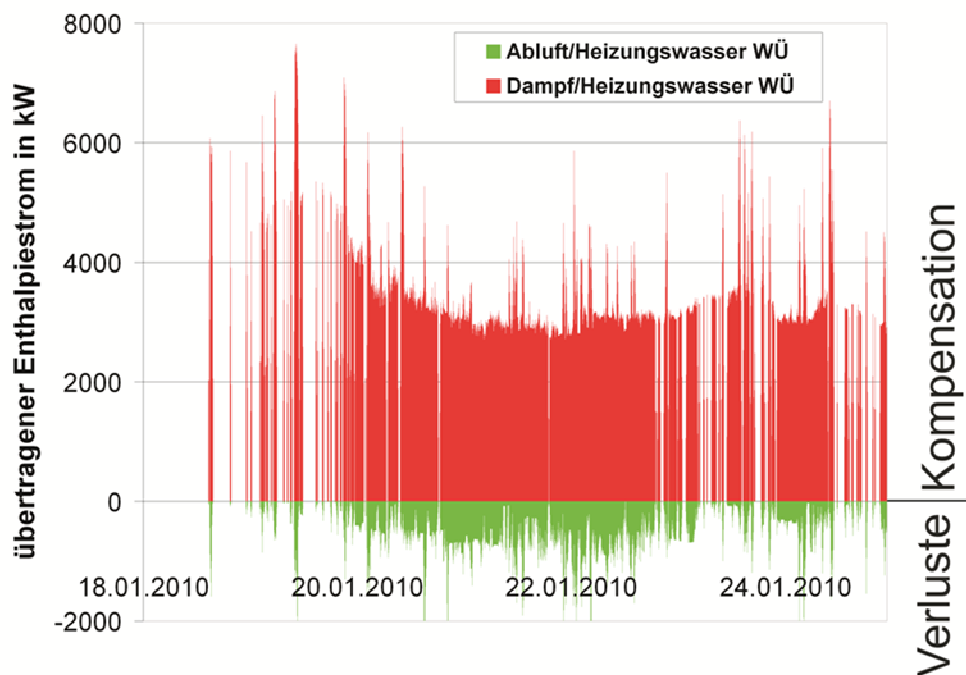


Abbildung 14: Überwachung der Wärmerückgewinnungsanlage – Wärmeverlust vom Heizungswasser an die Abluft und anschließende Kompensation durch Frischdampf

4.2.2 Beispiel 4 – Überwachen von Ventilen und Sensoren

Im anlagenbezogenen Modell ist eine Gegenüberstellung der Massenströme für offene bzw. geschlossene Ventile integriert. So wurde bei einer Massenstrommessung im Dampfsystem 75 % des Durchflusses gemessen, obwohl das zugehörige Ventil als geschlossen angezeigt wurde. Derartige Informationen helfen dem Anlagenpersonal, etwaige undichte Ventile bzw. defekte Sensoren zu erkennen.

4.3 Erkennen und Bewerten von Einsparpotenzialen

Mit Sankeydiagrammen werden die mit dem Modell ermittelten Wärmeströme, deren Vernetzung und Relation visualisiert (

Abbildung 15). Anhand dieser Darstellung sind Wärmequellen und -senken wie sekundäre Frischdampfverbraucher schnell erfassbar.

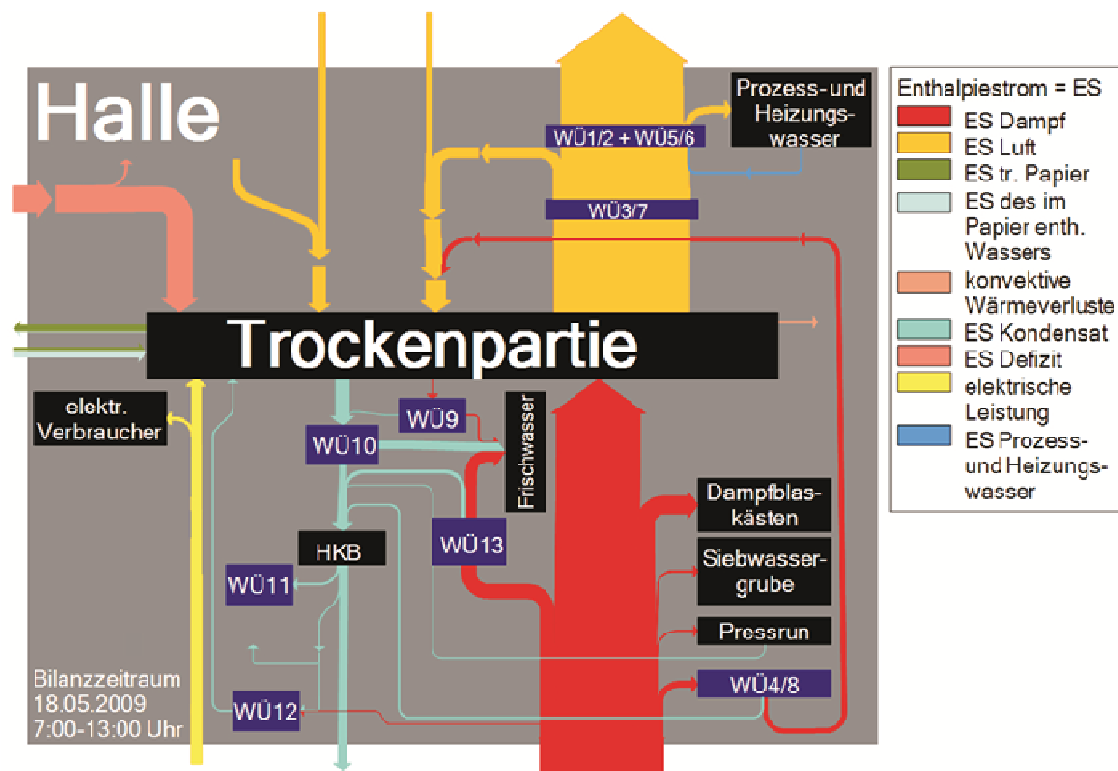


Abbildung 15: Sankeydiagramm – Enthalpieströme zur Trockenpartie und zu sekundären Frischdampfverbrauchern

Bei der Analyse wurden verschiedene sekundäre Dampfverbraucher identifiziert, deren Wärmebedarf anstatt mit Dampf durch Abwärmequellen gedeckt werden könnte. Abbildung 16 zeigt, dass das für die Anlage ermittelte Dampfeinsparpotenzial bis zu 10 % des gesamten Dampfbedarfs der Papiermaschine beträgt. Pro Jahr entspricht dies ca. 27.000 Tonnen Dampf.

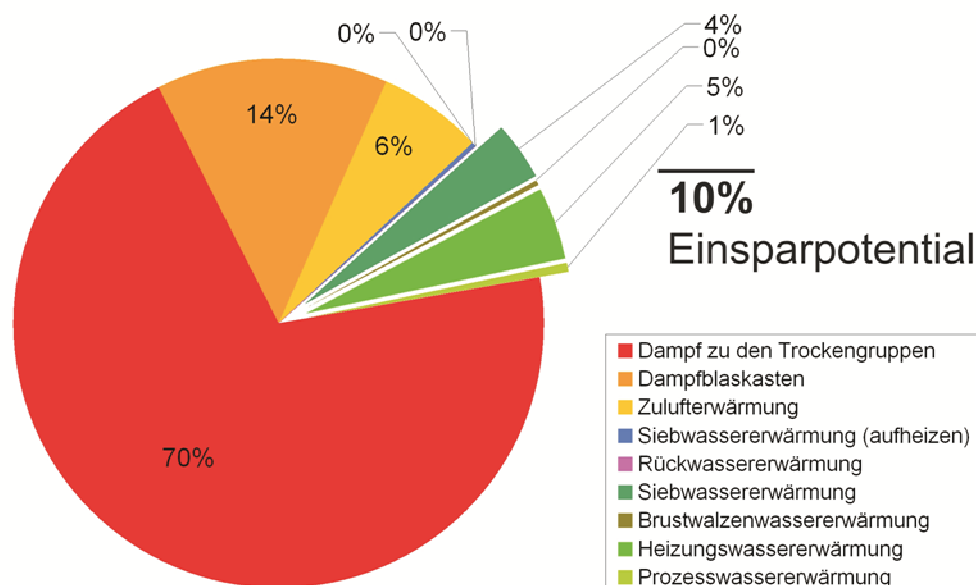


Abbildung 16: Verteilung des Dampfbedarfs der Papiermaschine und darin enthaltenes Dampfeinsparpotential durch Frischdampfsubstitution

4.3.1 Dampfsubstitution durch bisher ungenutzte Wärmequellen

Für die Nutzung des in Abbildung 16 dargestellten Dampfeinsparpotenzials wurden alternative Wärmequellen identifiziert und hinsichtlich Qualität, Quantität und Verfügbarkeit untersucht (Tabelle 1). Für eine günstige Verschaltung von Wärmequellen und -senken werden diese Informationen für alle zur Dampfsubstitution in Frage kommenden Wärmequellen benötigt.

Tabelle 1: Charakterisierung möglicher Abwärmequellen zur Frischdampfsubstitution

Bezeichnung	Quantität	Qualität	Kontinuität	Anmerkung
Einheit	kW / %	°C		
Erläuterung	Verfügbarer Enthalpiestrom / Einsparpotential bez. auf gesamte Dampfmenge	Temperaturniveau	Verfügbarkeit	
Kondensatstrom Enddampfkondensator	400 / 3,1	85–90	kontinuierlich	Kondensatabkühlung technologisch bedingt
Kondensatstrom zum Hauptkondensatbehälter	X	X (>100)	kontinuierlich	Kondensatabkühlung technologisch bedingt
Kühlwasserstrom von Vakuumumpen	X	X	kontinuierlich	z.Z. Abkühlung über WÜ an Außenluft technologisch bedingt
Heizwasserstrom	750 / 1,6	55–60	diskontinuierlich (Sommer)	Nicht verfügbar innerhalb der Heizperiode

4.3.2 Optimieren der Wärmerückgewinnungsanlage

In einem Abluftturm wird durch die Abluft kühles Prozesswasser erwärmt und im Anschluss warmes Heizungswasser ungewollt wieder abgekühlt (Abbildung 14). Durch die Vertau-

schung der Reihenfolge der WÜ wäre es möglich, den Wärmeverlust des Heizungswassers an die Abluft und den damit verbundenen unnötigen Dampfeinsatz zu vermeiden.

4.4 Langzeitanalyse

Die Langzeitanalyse ermöglicht beispielsweise die Untersuchung der WR-Anlage in Abhängigkeit der Außentemperatur. In Abbildung 17 wird dargestellt, dass der Enthalpiestrom, der aus der TP austretenden Abluft von der Außentemperatur weitestgehend unbeeinflusst bleibt. Die durch die WR-Anlage zurückgewonnene Wärme hingegen nimmt bei Außentemperaturen über 5 °C stetig ab.

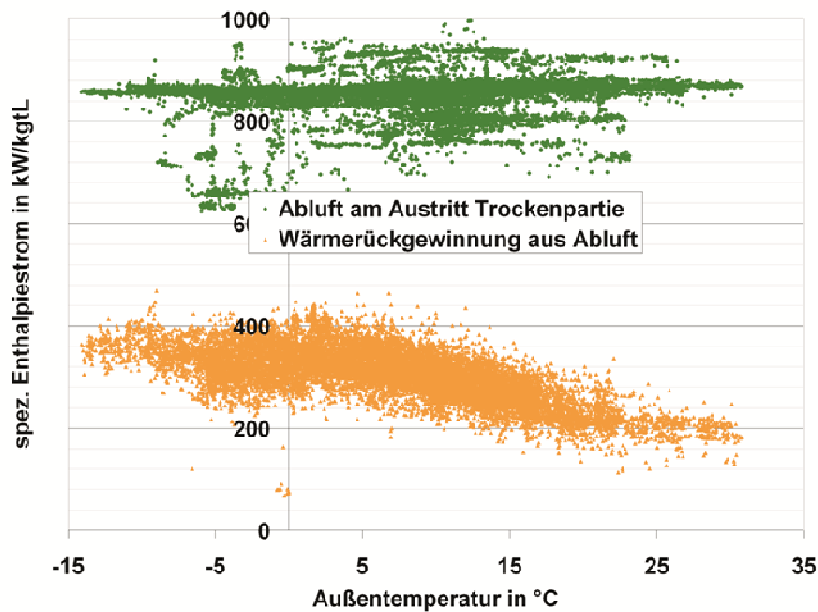


Abbildung 17: In Abluft enthaltene Wärme (grün) und aus der Abluft zurückgewonnene Wärme (orange) abhängig von der Außentemperatur

4.5 "Was-wäre-wenn?"-Analyse – Wärmepumpe zur Abwärmenutzung

Mit dem Bilanzmodell können neben der detaillierten Ist-Zustandsanalyse auch Umbaumaßnahmen und Änderungen der Prozessführung vor der Realisierung hinsichtlich deren Wirkung im Gesamtprozess untersucht werden. Damit hat der Betreiber eine zusätzliche Entscheidungshilfe für oder gegen eine Umbaumaßnahme.

Häufig steht die Qualität der Abwärme deren Wiederverwendung entgegen, d. h. die Temperatur der Abwärme T_0 ist meist zu niedrig, um sie durch WÜ dem Herstellungsprozess wieder zuzuführen und auf diese Weise Dampf zu substituieren. Eine Lösung dafür kann der Einsatz einer Kompressions-WP bieten, mit der die Temperatur auf ein zur Nutzung erforderliches Niveau T_c aufgewertet wird (Abbildung 18). Dabei ist aber zu klären, ob die erreichbare Dampfeinsparung die zum WP-Betrieb erforderliche elektrische Antriebsleistung P_{el} überhaupt rechtfertigt.

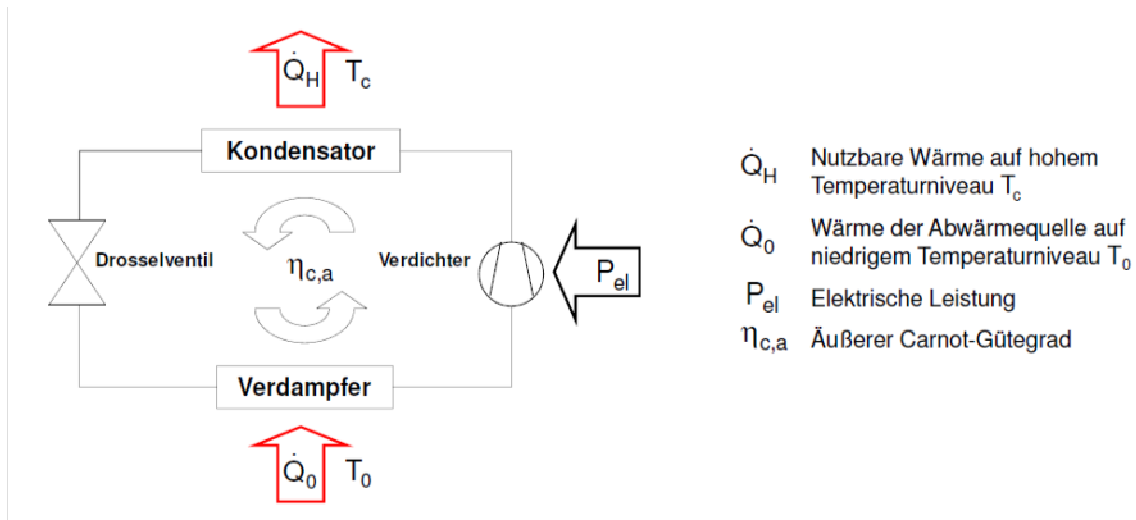


Abbildung 18: Funktionsschema – Kreisprozess einer Kompressions-Wärmepumpe

4.5.1 Methodische Vorgehensweise

Die WP-Anwendung bei der Papierherstellung wird für die Beispielanlage exemplarisch anhand von drei Fallbeispielen und einem vierten Sonderfall untersucht.

Die Analyse aller Fälle folgt einer einheitlichen Methode, für die das anlagenbezogene Bilanzmodell angepasst wurde. Der Untersuchung liegen über einen Zeitraum vom 18.01.2010 bis 30.09.2010 beim Anlagenbetrieb gemessene Werte zu Grunde (256 Tage, 10 min Intervall, 105 Messstellen). Damit werden im Gegensatz zu einer reinen Simulation anlagenseitig keine Annahmen getroffen und es werden jahreszeitliche Schwankungen im betrachteten Zeitraum berücksichtigt.

Das Bilanzmodell wird um die Berechnung der Leistungszahl ε des äußeren Carnot-Prozesses erweitert. Diese wird mit den Werten der Kelvintemperatur durchgeführt.

$$\varepsilon = \frac{T_c}{T_c - T_0} \eta_{c,a} \quad \text{Gleichung 6}$$

ε	Leistungszahl
T_c	Temperaturanforderung auf Seiten des Wärmebedarfs (hohes Temperaturniveau)
T_0	Temperaturniveau der Abwärmequelle (niedriges Temperaturniveau)
$\eta_{c,a}$	Äußerer Carnot-Gütegrad (Berücksichtigung der Temperaturdifferenz im Verdampfer und Kondensator sowie des Verdichterwirkungsgrades)

Mit der aus Gleichung 6 berechneten Leistungszahl lässt sich aus der Beziehung

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{Q_H}{W_{el}} \quad \text{Gleichung 7}$$

die zum WP-Betrieb erforderliche elektrische Antriebsleistung P_{el} bzw. Arbeit W_{el} ermitteln. Der Wärmebedarf $\dot{Q}_H$ wird mit dem Bilanzmodell anhand des gemessenen Dampfverbrauchs für das jeweilige Fallbeispiel berechnet.

4.5.2 Untersuchte Fallbeispiele

Eine WP kann an verschiedenen Stellen in einer Papierfabrik zur WR eingesetzt werden. Für diese Untersuchung wurde die warme, feuchte Abluft nach dem WR-System – also unmittelbar vor der Entsorgung in die Umgebung – als Abwärmequelle festgelegt. Natürlich sind weitere Abwärmequellen denkbar (Abschnitt 4.5.5), die hier projektspezifisch festgelegte Beschränkung auf die Abluft hat folgende Gründe:

- Von allen Abwärmeströmen ist in der Abluft mit Abstand die größte Wärmemenge enthalten (Abbildung 19).
- Abluft strömt mit großer Kontinuität und ist damit zur WR geeignet (Abbildung 19).
- Abluft steht unabhängig von prozesstechnischen Besonderheiten in jeder Papierfabrik zur Verfügung → Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anlagen.
- Die Abluft erfährt nach dem WR-System keine weitere Nutzung → geringer Eingriff in die Prozessführung der Anlage.

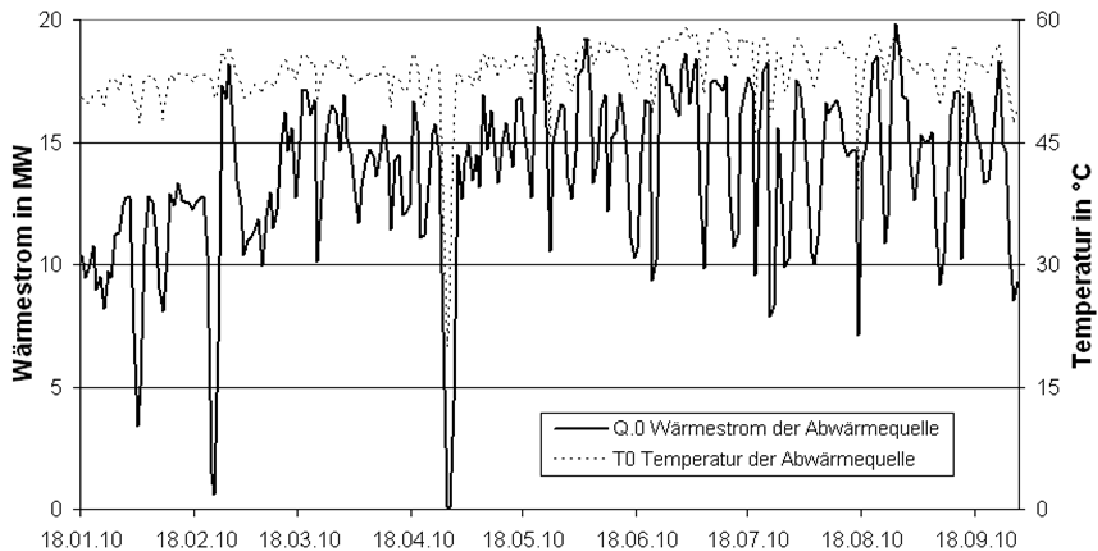


Abbildung 19: Verlauf der Ablufttemperatur T_0 und des Abwärmestroms $\dot{Q}_0$ (bezogen auf Umgebungstemperatur) am Abluftturm (Tagesmittelwerte)

Als Wärmesenke wird hier eine Stelle im Herstellungsprozess bezeichnet, an der ein Wärmebedarf $\dot{Q}_H$ durch Frischdampf gedeckt wird. Die WR und -aufwertung an der Abwärmequelle zur Frischdampfsubstitution an einer Wärmesenke stellt ein Fallbeispiel dar. Bei der Betrachtung der Fallbeispiele werden folgende Festlegungen und Vereinfachungen getroffen:

- Durch den Dampfeinsatz wird der Senke nur die Kondensationswärme zugeführt, d. h. eine Abkühlung des Dampfes bzw. des Kondensats wird nicht berücksichtigt (Dampf Temperatur ist gleich Kondensattemperatur, vollständige Kondensation).
- Verluste bei der Wärmeübertragung werden vernachlässigt (abgegebene Wärme ist gleich aufgenommene Wärme).
- Abrisse und Stillstände der Anlage wurden berücksichtigt, um dem Anspruch auf Praxisnähe gerecht zu werden.

Die drei Fallbeispiele wurden entsprechend den Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchungen (Abbildung 16) festgelegt und sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Fallbeispiele – Charakterisierung der Abwärmequelle und der Wärmesenken (Angaben bezogen auf betrachteten Zeitraum)

Fallbeispiel	1	2	3
Abwärmequelle	warme, feuchte Abluft; Abluftturm 2 nach WR-System		
Wärmemenge Q_0	84,1 GWh	verfügbare Wärmemenge bei Abkühlung des Abluftstromes auf Temperaturniveau der Umgebung, theoretisches Maximum	
Mittlerer Wärmestrom $\dot{Q}_0$	13,7 MW		
Mittleres Temperaturniveau T_0	53 °C		
Zeitlicher Verlauf Anteil der Werte im Bereich von + / - 2 K um das mittlere Temperaturniveau T_0 , $\dot{Q}_{0,\pm 20\%}$ analog	$T_{0,max} = 67\text{ °C}$; Anteil $T_{0,\pm 2K} = 45\text{ \%}$ $\dot{Q}_{0,max} = 22,6\text{ MW}$; Anteil $\dot{Q}_{0,\pm 20\%} = 51\text{ \%}$		
Wärmesenke	Erwärmung Heizungswasser	Erwärmung Zuluft	Beheizung Trockenzylinder
Wärmemenge Q_H	3,9 GWh	10,1 GWh	37,4 GWh
Mittlerer Wärmestrom $\dot{Q}_H$	2,2 MW	1,7 MW	6,1 MW
Mittleres Temperaturniveau T_c	63 °C	96 °C	139 °C
Zeitlicher Verlauf $T_{c,max}$; Anteil $T_{c,\pm 2K}$ $\dot{Q}_{H,max}$; Anteil $\dot{Q}_{H,\pm 20\%}$	81 °C; 17 % 8,0 MW; 11 %	110 °C; 14 % 2,3 MW; 92 %	159 °C; 78 % 6,4 MW; 94 %

Die Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Abwärmequelle und der Wärmesenken liefert bei Stillständen einheitlich einen minimalen Wärmestrom von $\dot{Q}_{0,min} = 0$ bzw. $\dot{Q}_{H,min} = 0$.

Die Analyse des zeitlichen Dampfverbrauchs von Fallbeispiel 1 zeigt, dass im betrachteten Zeitraum lediglich an 74 Tagen Dampf zur Heizungswassererwärmung eingesetzt wurde. Zur Bewertung von Fall 1 wird daher der Zeitraum vom 18.01.2010 bis 01.04.2010 herangezogen, in dem ein großer Dampfverbrauch gemessen wurde. Geringe Dampfmen gen, die darüber hinaus noch in der warmen Jahreszeit eingesetzt werden, können durch regelungstechnische Maßnahmen eingespart werden.

4.5.3 Sonderfall – Abwärmenutzung zur Fernwärmeversorgung

Neben den drei Fallbeispielen zur betriebsinternen Dampfeinsparung wird zusätzlich der Sonderfall des WP-Einsatzes zur Fernwärmeversorgung untersucht. Was spricht aber eigentlich für diese Maßnahme, mit der keine Dampfeinsparung bei der Papierherstellung erreicht wird? Abhängig von der Struktur und Größe angrenzender Siedlungsgebiete lässt sich in der Fernwärmeversorgung ggf. ein bedeutend größerer Wärmebedarf akquirieren, als zur internen Dampfsubstitution.

Eine erste Abschätzung liefert die flächenspezifische Wärmedichte, die je nach Gebäudetypologie und Bebauungsdichte zwischen 100 bis 2.000 MWh/(h a) liegt. Am Anlagenstandort existiert bereits ein Fernwärmenetz mit einem jährlichen Wärmeabsatz von etwa 15 GWh. Im

Vergleich dazu beträgt die verkaufte Wärme der DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH 1.877 GWh/a in 2009 (29). Der Fernwärmemischpreis – enthält Arbeit, Leistung und Messkosten – bewegt sich derzeit im Bereich von etwa 45 bis 100 €/MWh (30). Damit lässt sich die Maßnahme unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich darstellen.

Welche Voraussetzungen müssen für die Fernwärmeversorgung erfüllt werden?

- Kommunalen bzw. industrieller Wärmebedarf in Anlagennähe.
- Vorlauftemperatur von 85 °C bei Übergabe an das Leitungsnetz. Für die Berechnung wird $T_c = 85$ °C konstant angenommen. Bei ausschließlicher Versorgung neuerer Gebäude kann die Temperatur auch reduziert werden, zudem besteht generell die Möglichkeit einer gleitenden Fahrweise in Abhängigkeit von der Außentemperatur.
- Temperaturniveau: Der durch die WP zu leistende Temperaturhub von $T_0 = 53$ °C auf $T_c = 85$ °C ist relativ gering. Je geringer der Temperaturhub desto größer die Leistungszahl, wodurch sich die aufzuwendende elektrische Arbeit reduziert (Gleichung 7).
- Wärmemenge: Die Charakterisierung der Abluft als Abwärmequelle zeigt, dass die zur Verfügung stehende Abwärmemenge sehr groß ist (Tabelle 3).
- Verfügbarkeit: Die Abwärmequelle muss im Winterhalbjahr kontinuierlich zur Verfügung stehen, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Etwaige Ausfälle können mit einem Wärmespeicher überbrückt werden.

Die Herausforderung bei der Untersuchung der Fernwärmeversorgung besteht in der Charakterisierung der Bedarfsseite. Hierzu ist im ersten Schritt die kumulierte Jahresheizarbeit der betrachteten Gebäude zu ermitteln. Dies erfolgte über eine grobe Flächenabschätzung im nicht mit Fernwärme versorgten Stadtgebiet und liefert eine Wärmemenge von $Q_H = 5$ bis 15 GWh/a, die später schrittweise durch echte Verbrauchsdaten detailliert werden kann. Für die weitere Untersuchung wird der Mittelwert von $Q_H = 10$ GWh/a vorgegeben.

Zur Einbindung in das Bilanzmodell, wurde im weiteren Schritt ein Lastprofil für die Verbraucher erzeugt. Hierzu wurde ein Verfahren genutzt, welches auch in der Gaswirtschaft zur Berechnung von Standardlastprofilen zum Einsatz kommt. Der generierte Lastgang verteilt die vorgegebene Jahresheizarbeit mit einer stündlichen Auflösung auf den gesamten Jahreszeitraum, wobei das typische Verhalten von Wohn- und Gewerbebauten einschließlich Warmwasserbereitung und Berücksichtigung von Spitzenlastzeiten abgebildet wird. Für den betrachteten Zeitraum wird aus dem Lastgang eine Wärmemenge von $Q_H = 5,6$ GWh berechnet. Die Randbedingungen für die Einbindung der Fernwärmeversorgung in das Bilanzmodell sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Berechnungsgrundlage zur Einbindung des Fernwärmebedarfs in das Bilanzmodell

Sonderfall	Fernwärmeversorgung
Wärmesenke	Kommunale Fernwärmeversorgung
Wärmemenge Q_H	5 bis 15 GWh/a 10 GWh/a für Berechnung vorgegeben 5,6 GWh im betrachteten Zeitraum aus dem Lastgang
Mittlerer Wärmestrom $\dot{Q}_H$	0,9 MW
Temperaturniveau T_c	85 °C
Zeitlicher Verlauf $\dot{Q}_{H,min}$; $\dot{Q}_{H,max}$; Anteil $\dot{Q}_{H,\pm 20\%}$	0,2 MW; 2,9 MW; 13,5 %

Die Dimensionierung der WP ist unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten vorzunehmen. Bei einer Auslegung auf 50 % der maximalen Heizleistung $\dot{Q}_{H,max} = 2,9 \text{ MW}$ kann bereits 85 % der Fernwärmeversorgung abgedeckt werden, wie in Abbildung 20 durch die orange Fläche unter der roten Jahresdauerlinie des Fernwärmebedarfs dargestellt. Die Abbildung zeigt außerdem das große Wärmepotenzial der Abluft.

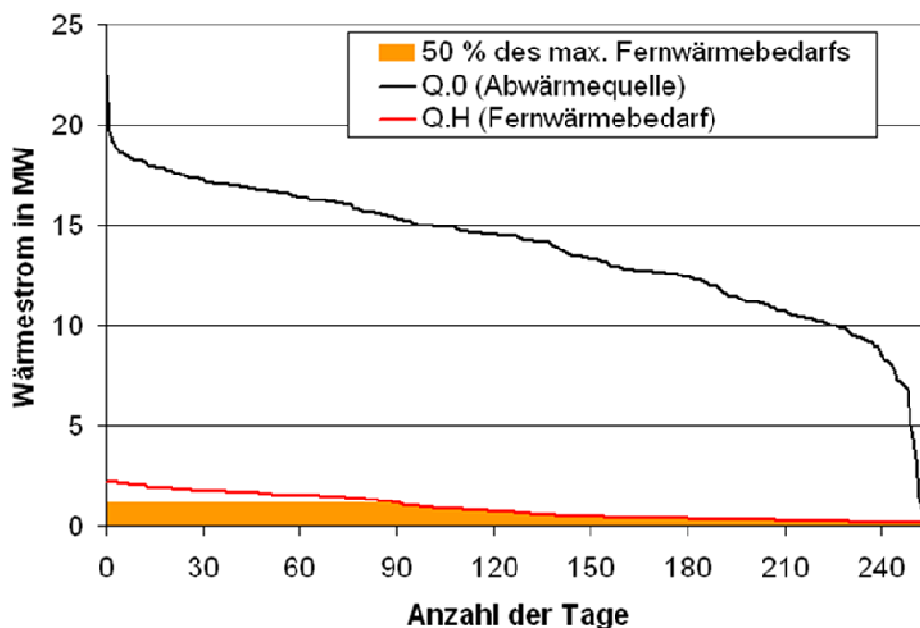


Abbildung 20: Jahresdauerlinie der Abwärmequelle und des Fernwärmebedarfs

Die Bedarfsspitzen können – genauso wie Ausfälle bzw. Stillstände bei der Papierherstellung – durch kurzzeitigen, direkten Dampfeinsatz oder durch einen Wärmespeicher gepuffert werden. Das wirtschaftliche Optimum der Auslegung, das sowohl den Anforderungen der Produktionssicherheit als auch der Versorgungssicherheit gerecht wird, muss in einer Machbarkeitsstudie mit einem kompetenten Planer ermittelt werden.

4.5.4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse für alle vier Fallbeispiele sind in Abbildung 21 bis Abbildung 24 grafisch dargestellt, um darin den zeitlichen Verlauf der berechneten Größen bewerten zu können. In

Tabelle 4 sind die Ergebnisse gegenübergestellt. Alle Diagramme und Ergebnisse beziehen sich auf den betrachteten Zeitraum des WP-Einsatzes.

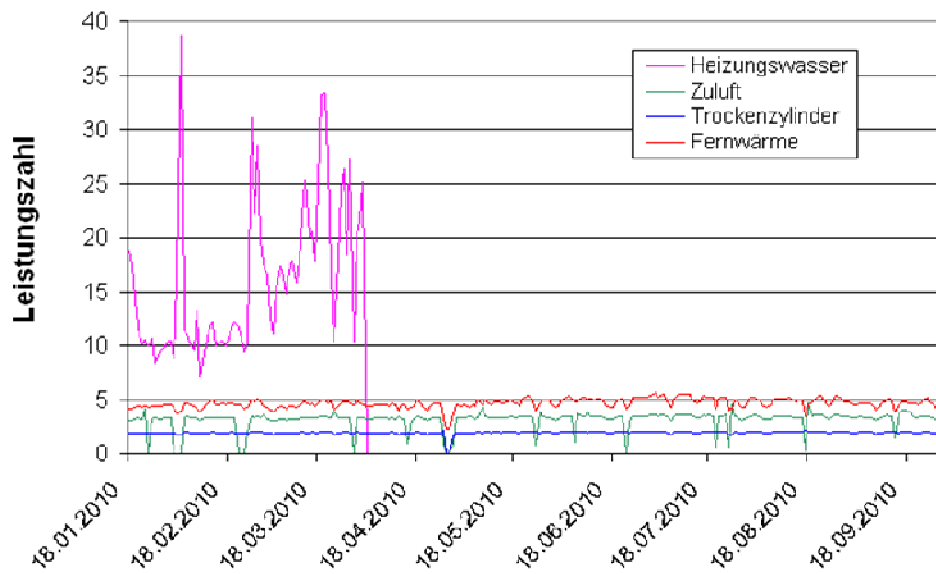


Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Leistungszahl der Wärmepumpe

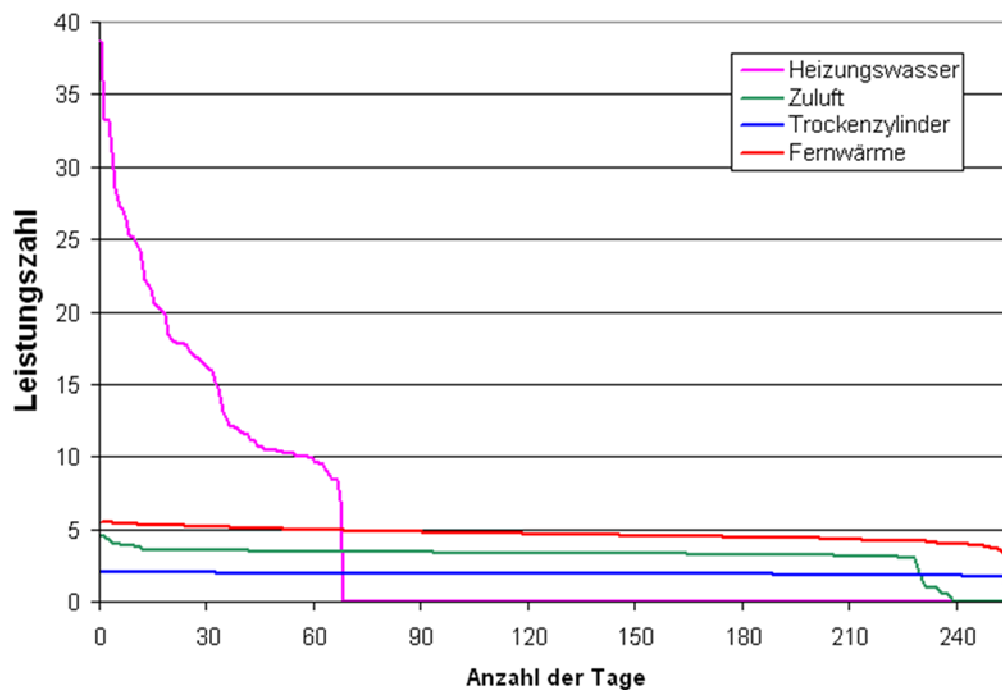


Abbildung 22: Jahresdauerlinie der Leistungszahl der Wärmepumpe

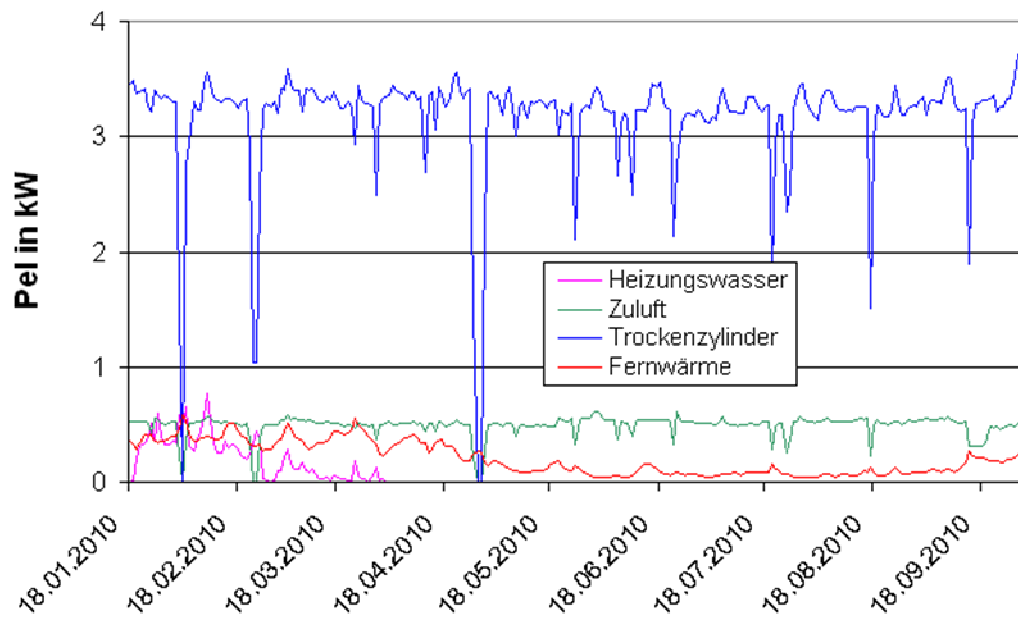


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der elektrischen Antriebsleistung P_{el} zum WP-Betrieb

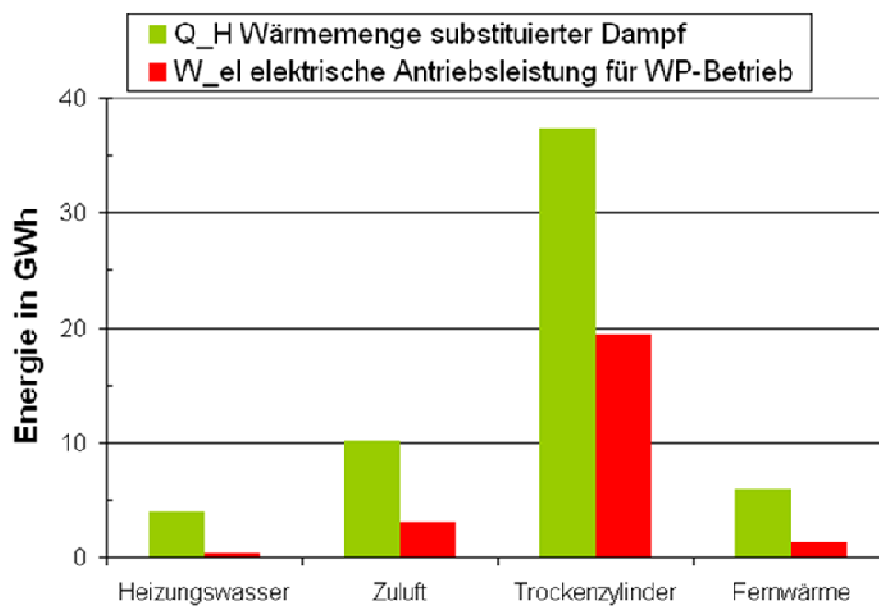


Abbildung 24: Gegenüberstellung der Wärmemenge Q_H des substituierten Dampfes und der elektrischen Antriebsenergie W_{el} zum Betrieb einer Wärmepumpe

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die untersuchten Fallbeispiele im Betrachtungszeitraum

Fallbeispiel	1	2	3	Sonderfall
Wärmemenge Q_H	4,1 GWh	10,1 GWh	37,4 GWh	5,6 GWh
Substituierte Dampfmenge	7.000 t	17.000 t	63.000 t	–
Elektrische Antriebsenergie W_{el}	0,4 GWh	3,0 GWh	19,4 GWh	1,3 GWh
Mittlere Leistungszahl ε	15,0	3,3	1,9	4,6
Mittlerer Temperaturhub	10,2 K	44,1 K	86,1 K	32,3 K

Die Ergebnisse lassen sich auf die Abwärmenutzung am zweiten Abluftturm übertragen.

Fallbeispiel 1 – Heizungswasser:

- Sehr hohe Leistungszahl $\varepsilon = 15,0$ – weil nur geringer Temperaturhub von 10,2 K zu realisieren ist. WP arbeitet mit geringer Antriebsenergie $W_{el} = 0,4$ GWh.
- Stark schwankender zeitlicher Verlauf, Anwendung nur in Heizperiode – erschwert technische Umsetzung.
- Die einzusparende Dampfmenge ist mit 7.000 t relativ gering.

Zur Realisierung der Dampfeinsparung mit geringerem technischem Aufwand als einer WP sollte die Möglichkeit der internen Wärmeübertragung mit Abwärmeströmen auf einem hohen Temperaturniveau untersucht werden. Dies erfordert die Auswahl geeigneter Abwärmeströme und einer sinnvollen Verschaltung in der Anlage.

Fallbeispiel 2 – Zuluft:

- Relativ geringe Leistungszahl $\varepsilon = 3,3$ – weil ein großer Temperaturhub von 44,1 K zu realisieren ist. WP müsste mit relativ viel Antriebsenergie $W_{el} = 3,0$ GWh betrieben werden.
- Geringe Schwankungen im zeitlichen Verlauf, Anwendung über den gesamten Jahresverlauf – erleichtert technische Umsetzung.
- Mit 17.000 t ist die einzusparende Dampfmenge hoch.

Für diesen Fall kommt der WP-Betrieb zur Realisierung der Dampfeinsparung in Frage. Die WP sollte aber mit einer höheren Leistungszahl als 3,3 betrieben werden. Dafür ist im nächsten Schritt zu untersuchen, ob durch eine günstigere Gestaltung des WR-Systems eine höhere Ablufttemperatur abgreifbar ist.

Fallbeispiel 3 – Trockenzylinder:

- Sehr geringe Leistungszahl $\varepsilon = 1,9$.

WP-Einsatz ist in diesem Fall nicht sinnvoll. Zur Reduzierung der großen Dampfmenge für die Beheizung der Trockenzylinder ist der Trocknungsprozess selbst zu verbessern (Leckage, günstiger Betriebspunkt, Wärme- und Stoffübergänge).

Sonderfall (kommunale Fernwärmeversorgung):

- Relativ hohe Leistungszahl $\varepsilon = 4,6$ – WP würde mit relativ wenig Antriebsenergie $W_{el} = 1,3$ GWh arbeiten.

- Große Schwankungen im zeitlichen Verlauf, bedingt durch jahreszeitliche Temperaturschwankungen, trotzdem Anwendung über den gesamten Jahresverlauf durch Warmwasserbereitstellung.
- Da in diesem Fall kein Dampf substituiert wird, ist die einzusparende Dampfmenge 0. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit ist die Fernwärmemenge, die verkauft werden kann.

Zur Erschließung von Erlösen aus dem Fernwärmeverkauf könnte auch der WP-Betrieb in Frage kommen. Dazu ist im nächsten Schritt der kommunale Fernwärmebedarf anhand der Gebäudefläche abzuschätzen bzw. mit Verbrauchsdaten zu unterlegen. Damit kann in einer groben Wirtschaftlichkeitsanalyse unter Berücksichtigung der Investitionen für das Netz, die Anbindung und ggf. den Wärmespeicher untersucht werden, ob weitere Betrachtungen überhaupt sinnvoll sind.

4.5.5 Brüden als Wärmequelle zum Einsatz einer Wärmepumpe

In einer anderen Anlage wurde Brüden als Wärmequelle für den WP-Einsatz untersucht (31) (Abbildung 25). Weil der Dampfanteil x im Brüden nicht bekannt ist, wird die Untersuchung für $x = 0$ und $x = 0,1$ durchgeführt.

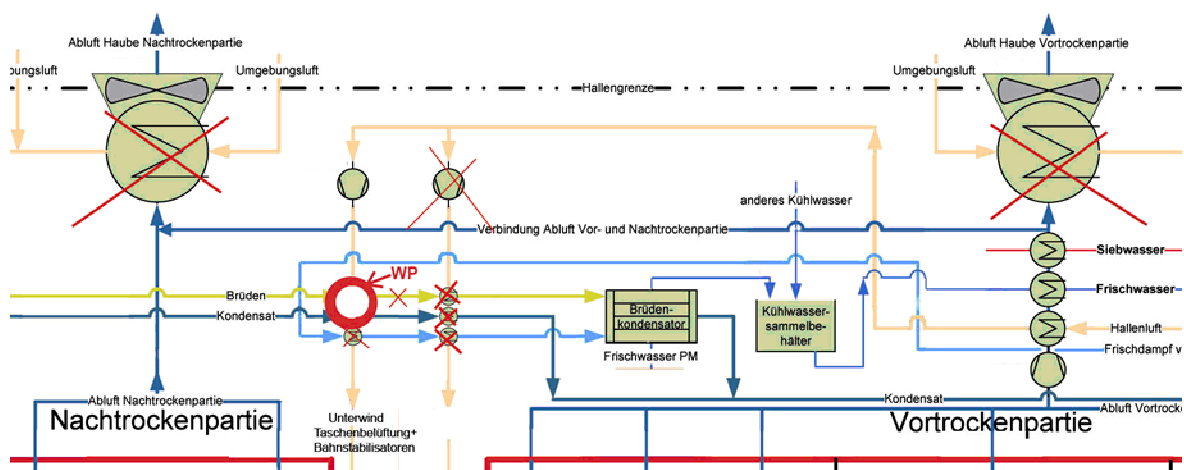


Abbildung 25: Beispiel für den Einsatz einer Wärmepumpe mit Brüden als Abwärmequelle

Das Verhältnis von tatsächlich eingesparter Wärmeenergie $\dot{Q}$ zur erforderlichen elektrischen Leistung P_{el} für den WP-Betrieb wird als Bewertungskriterium festgelegt und soll größer drei sein (Tabelle 5).

$$\frac{\dot{Q}}{P_{el}} > 3$$

Gleichung 8

Tabelle 5: Ausgewählte Ergebnisse für die Nutzung von Brüden als Wärmequelle zum Einsatz einer Wärmepumpe

x	0	0,1
ε	3,21	10,56
$\dot{Q}/P_{el}$	2,57	8,45

Für $x = 0$ wird in diesem Beispiel das minimale Einsparungsverhältnis nicht erreicht. Für $x = 0,1$ ergibt sich jedoch ein Verhältnis von 8,45. Schon bei einem geringen Dampfanteil im Brüden kann also die darin enthaltene Wärme mit einer WP sinnvoll aufgewertet werden. Es wird deutlich, dass die im Dampf gespeicherte latente Wärme (Kondensationswärme) einen sehr großen Einfluss auf den WP-Betrieb hat.

4.6 Gegenüberstellung der vier untersuchten Anlagen

Im Rahmen des Projekts wurde das Bilanzmodell als ein Werkzeug zur Identifizierung und Bewertung von Energieeinsparpotenzialen bei komplexen Produktionsprozessen erstellt und an vier verschiedenen Papierfabriken angewendet.

Aufgrund der Unterschiede in Produktionsprogramm, Anlagenaufbau, messtechnischer Ausrüstung und Bilanzzeitraum ist ein Vergleich der Anlagen anhand der Ergebnisse nicht sinnvoll. Die Modellanwendung auf vier verschiedene Anlagen verdeutlicht die Flexibilität der Bilanzierungsmethode.

Im Gegensatz zu Simulationen werden für die Bilanzierung einer Anlage möglichst viele Messwerte berücksichtigt und nur wenige Annahmen getroffen. Folglich sind die Enthalpie- und Wasserbilanz überbestimmt. Die Differenz zwischen Ein- und Austritt gibt Hinweise auf Leckagen, defekte Sensoren und ungünstige Messstellen.

Bei allen vier Anlagen ist die Differenz in der Wasserbilanz gering, bei der Enthalpiebilanz hingegen ist die Differenz bei den Anlagen A, B und D groß und bei Anlage D positiv nach (32),(25),(33) und (34) (Tabelle 6).

Tabelle 6: Gegenüberstellung der untersuchten Anlagen (anonymisiert) – Basisdaten und ausgewählte Ergebnisse⁷

Anlage			A	B	C	D
Jahreszeit der Bilanzierung			Winter	Sommer	Sommer	Sommer
Flächenbezogene Masse ⁸	$m_{A,A}$	g/m ²	170	100	50,7	45
Bahngeschwindigkeit	v	m/min	849	1000	660	1701
Fördermenge Papier, Austritt	$\dot{m}_{P,A}$	kg/s	14,60	8,55	1,89	11,84
Differenz Wasserbilanz	Δm_W	kg/kg _P	-0,0055	0,012	-0,021	0
Differenz Enthalpiebilanz	Δh	kJ/kg _P	-982,2	-39,2	-541,8	683,5

Zur Bewertung der Wärme- und Elektroenergiebereitstellung wird die Energieerzeugung im Kraftwerk berücksichtigt (Tabelle 7).

⁷ Die Ergebnisse sind auf die produzierte Papiermenge bezogen.

⁸ der Papiersorte zum Zeitpunkt der Bilanzierung, am Austritt

Tabelle 7: Gegenüberstellung der untersuchten Anlagen (anonymisiert) – spezifische Verbrauchsdaten

Anlage		A	B	C	D
Kraftwerkstyp		GuD	Braunkohle	Braunkohle- staub	GuD
Kraftwerkswirkungsgrad		86,8	80,0	82,0	87,5
Wärmeverbrauch	kJ/kg _P	2987,8	2932,8	3811,1	2434,3
Stromverbrauch	kJ/kg _P	202,1	299,2	452,2	243,2
Gesamtverbrauch	kJ/kg _P	3189,9	3232,0	4263,3	2677,5

Für die vier Anlagen wird ein gemittelter Kraftwerkswirkungsgrad von 84,1 % berechnet. Der mittlere spezifische Wärmeverbrauch beträgt 3041,5 kJ/kg_P und der mittlere spezifische Elektroenergieverbrauch 299,2 kJ/kg_P.

5 Zusammenfassung

Die Papierindustrie gehört zu den energieintensivsten Industriezweigen in Deutschland. Vor diesem Hintergrund treffen die Verknappung fossiler Ressourcen, die damit verbundene Steigerung der Energiepreise sowie die Reglementierung der CO₂-Emissionen die Papierbranche besonders hart.

Seit 1950 hat die Branche den durchschnittlichen spezifischen Gesamtenergieverbrauch zur Papierherstellung von über 8 kWh/kg_P auf unter 3 kWh/kg_P gesenkt. In den letzten fünfzehn Jahren jedoch stagniert dieser positive Trend und der Energieverbrauch bleibt nahezu konstant. Zur weiteren Senkung des Energieverbrauchs müssen größere Anstrengungen bei der Analyse des energetischen Ist-Zustands einer Anlage sowie bei der Realisierung von Sparmaßnahmen unternommen werden.

Dafür sind fachübergreifendes Wissen und Erfahrung erforderlich, denn die wärmetechnische Optimierung erfordert sowohl thermodynamisches als auch verfahrenstechnisches Verständnis für den Herstellungsprozess und außerdem planerische Kompetenz für die jeweilige Anlage. Darüber hinaus wird ökonomisches Know-How zur wirtschaftlichen Bewertung von Sparmaßnahmen immer wichtiger. Für den Betreiber besteht die Herausforderung darin, sich die erforderlichen Kompetenzen für die energetische Optimierung an seine Anlage zu holen und nicht in eine relativ teure Energieberatung "von der Stange" zu investieren.

Es gibt drei Ansatzpunkte zur Erhöhung der Energieeffizienz bei der Papierherstellung.

- Bei der prozesstechnischen Optimierung werden einzelne Schritte in der Prozesskette optimiert oder durch neue, bessere Prozesse ersetzt.
- Bei der Frischdampfsubstitution wird durch Rückgewinnung und Nutzung von Abwärme die eingesetzte Frischdampfmenge reduziert.
- Verringerung von Material- und Energieverlusten durch Leckagen, über unisolierte Flächen und durch unterschiedliche Temperaturniveaus bei der Mischung mehrerer Stoffströme.

Um Energieeinsparungen entsprechend dem zweiten und dritten Ansatz zu erzielen, müssen die Stoff- und Wärmeströme in der Anlage für einen möglichst langen Zeitraum bekannt sein.

Im Rahmen des Projekts wurde ein thermodynamisches Bilanzmodell als ein Werkzeug zur Erfassung des energetischen Ist-Zustands und zur Identifizierung und Bewertung von Energieeinsparpotenzialen erstellt. Das Modell ermöglicht die Charakterisierung relevanter Wärmequellen und -senken (Wärmeverbraucher) hinsichtlich Wärmemenge, Temperaturniveau und Verfügbarkeit. Damit wird eine wichtige Voraussetzung für die Substitution von Frischdampf durch WR und Nutzung der Abwärme im Produktionsprozess geschaffen. Das Bilanzmodell wurde mit Excel® realisiert, um unabhängig von Spezialsoftware die in vielen PLS vorhandenen Excel®-Schnittstellen zur Datenübernahme für eine Langzeitanalyse nutzen zu können. Dadurch wird in den Papierfabriken eine Analyse über einen längeren Zeitraum möglich.

Das Modell berechnet die Wirkung möglicher Einsparmaßnahmen ganzheitlich für eine Anlage und liefert damit eine Entscheidungshilfe für oder gegen eine Maßnahme. Das Modell kann flexibel an verschiedene Anlagen angepasst werden und trägt so den Unterschieden zwischen den Anlagen Rechnung. Entsprechend der Datenlage liefert das Modell genaue Ergebnisse unter Berücksichtigung jahreszeitlicher Schwankungen.

Das Modell wurde zur wärmetechnischen Analyse von vier Papierproduktionsanlagen angewendet und an die jeweilige Anlage angepasst. Mit dem Modell wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt u.a. zur Abwärmenutzung aus der Abluft mittels WP, zur Bewertung des WR-Potenzials und zur Substitution von Frischdampf durch Rückführung von Abwärme in den Prozess.

Ein WP-Einsatz zur Aufwertung von Abwärme und deren Wiederverwendung im Prozess kann thermodynamisch sinnvoll sein. Als Abwärmequellen wurden dafür exemplarisch die feuchte Abluft vor dem Austritt in die Umgebung und der Brüden untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die im Dampf gespeicherte latente Wärme (Kondensationswärme) den WP-Betrieb stark beeinflussen.

Die Anwendung des durch Messwerte mit dem Prozess gekoppelten Modells erweitert die Möglichkeiten bei der energetischen Optimierung beträchtlich, da auf diese Weise die jeweiligen Bedingungen einer Anlage berücksichtigt werden. Andererseits ist ein relativ großer Aufwand zur Anpassung des Modells an die jeweilige Anlage erforderlich, da es durch die Individualität der Anlagen kein allgemeingültiges Modell geben kann.

Der hohe Aufwand zur Implementierung ist der größte Nachteil der jetzigen Modellumsetzung. Die Bearbeiter dieses Projektes sehen einen großen Anwendungsbereich für ein Modellierungswerkzeug mit größerer Flexibilität, die eine schnellere Nachmodellierung einer Anlage ermöglicht. Für die Realisierung eines solchen Werkzeuges besteht ein großer Entwicklungsbedarf.

Das Modell kann neben der Identifizierung und Bewertung von Energieeinsparpotenzialen und möglicher Umbauten außerdem zum Prozess- bzw. Energiemonitoring angewendet werden. Die Nutzung und Aufbereitung der ohnehin im PLS vorhandenen Daten nach energetischen Kriterien bietet die Möglichkeit, das Energiemonitoring entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Anlage zu verbessern.

Durch eine automatisierte Modellanwendung und kompetente Aufarbeitung der gewonnenen Daten kann weiterer Nutzen für den Anlagenbetrieb gezogen werden:

- Detailverständnis der gekoppelten Prozesse in der Anlage,
- Kontroll- und Diagnosemöglichkeit zur Aufdeckung von Fehlfunktionen,
- eine Langzeitanalyse macht Zusammenhänge wie schleichende Prozesse und jahreszeitliche Schwankungen über einen großen Zeitraum sichtbar.

Es wurde gezeigt, dass mit dem methodischen Ansatz (Bilanzmodell) Einsparpotenziale identifiziert und bewertet werden können. Die erarbeiteten Maßnahmen führen zur Steigerung der energetischen Effizienz und sparen dem Anlagenbetreiber Geld.

Literaturverzeichnis

1. **BMWi, [Hrsg.]**. Energiekostenanteile verarbeitendes Gewerbe in Deutschland für 2007. Berlin : s.n., 2008.
2. **Pettersson, H.** Energiekontrolle und Möglichkeiten zur Energieeinsparung mit Hilfe von Ventilationssystemen. *Wochenblatt für Papierfabrikation*. 2007, S. 319–325.
3. **Rembeck, Raimund und Klein, Karl-Heinz**. Erfahrungen mit Energie-Audits an Fallbeispielen. *Wochenblatt für Papierfabrikation*. Oktober 2009, S. 850–853.
4. **N.N.** *Papier 2011 – Ein Leistungsbericht*. Verband Deutscher Papierfabriken. Bonn : s.n., 2011.
5. **Rixen, W.** Die deutsche Papierindustrie – eine energieintensive Industrie. *ipw*. 2000, 10, S. 159–161.
6. **BMWi**. Energiepreise und Energiekosten. [Online] <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/Energiedaten/energiepreise-energiekosten.html>.
7. **Bock, Thomas und Durniok, Ina**. Wie lässt sich die Effizienz in der Trockpartie steigern? [Hrsg.] Düren Heimbach GmbH & Co. KG. [Press Release].
8. **Heikkilä, Pertti und Paltakari, Jouni**. Fundamentals of paper drying. [Buchverf.] Markku Karlsson. [Hrsg.] J. Gullichsen, H. Paulapuro und M. Karlsson. *Papermaking Science and Technology. Papermaking Part 2 – Drying*. Helsinki : Fapet Oy, 2000, Bd. 9, S. 54–83.
9. **Schuster, Sebastian**. *Untersuchung der Auswirkung alternativer Trocknungstechnologien auf die Papiereigenschaften*. Dresden : s.n., 2007. DA 695, unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden.
10. **Opherden, Arnold und Blechschmidt, Jürgen**. *Zellstoff – Papier*. 3. Leipzig : VEB Fachbuchverlag, 1976. S. 480.
11. **Huhn, Jörg**. *Umdruck Wärmeübertragung*. Dresden : s.n., 2005.
12. **Heikkilä, Pertti, Timofeev, Oleg und Kiiskinen, Harri**. Multicylinder dryer. [Buchverf.] Markku Karlsson. [Hrsg.] J. Gullichsen, H. Paulapuro und M. Karlsson. *Papermaking Science and Technology. Papermaking Part 2 – Drying*. Helsinki : Fapet Oy, 2000, Bd. 9, S. 85–125.
13. **Karlsson, Markku**. Drying of Paper – An Overview, The State of Paper Drying Knowledge. [Vortrag]. Oxford : s.n., September 2001.
14. **Kuhasalo, Antti, et al.** Introduction to paper drying and principles and structure of a dryer section. [Buchverf.] Markku Karlsson. [Hrsg.] J. Gullichsen, H. Paulapuro und M. Karlsson. *Papermaking Science and Technology. Papermaking Part 2 – Drying*. Helsinki : Fapet Oy, 2000, Bd. 9, S. 16–53.
15. **Papiertechnische Stiftung München**. *Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie – Nutzung von Niedertemperaturabwärme*. [Hrsg.] Bayrisches Landesamt für Umweltschutz (LfU). 2002. ISBN 3-936385-36-x.
16. **Brand, Jürgen, et al.** *Chancen der Papierindustrie im Rahmen der Klimastrategie - Energieeffizienz und CO₂-Emissionen der österreichischen Papierindustrie – Entwicklungen und Potenziale*. Energieverwertungsagentur – the Austrian Energy Agency (E.V.A.). Wien : s.n., 2005. Endbericht.
17. **Thollander, Patrik und Ottosson, Mikael**. An energy efficient Swedish pulp and paper industry – exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments. *Energy Efficiency*. 2008, S. 21–34.

18. **Brunner, Christoph, et al.** Expertensystem spürt systematisch Energie-Einsparpotenziale auf. *Energy 2.0 – Kompendium 2011*. 2010, S. 270–272.
19. **Treppe, Konrad, et al.** Energetische Optimierung bei der Papierherstellung. *Wochenblatt für Papierfabrikation*. April 2012, S. 238–240.
20. **Treppe, Konrad, Dixit, Onkar und Kuitunen, Stefan.** On identifying and capturing the energy-saving potential. *ipw – The magazine for the international pulp and paper industry*. Mai 2011, S. 26–30.
21. **Dixit, Onkar, et al.** Energy Optimization through Capturing of Energy-saving Potential. *Zellcheming*. [Vortrag]. Wiesbaden : s.n., 29. Juni 2011.
22. **Kamischke, Robert, et al.** Wettbewerbsfaktor: Energieeinsparpotenziale – Brennstoffeinsparung und Reduktion von Emissionen. *Österreichische Papierfachtagung*. [Vortrag]. Graz, Österreich : s.n., 08. Juni 2011.
23. **Großmann, Harald, Zelm, Roland und Schuster, Sebastian.** *Untersuchungen der Auswirkungen alternativer Trocknungstechniken*. 2008. Abschlussbericht.
24. **Treppe, Konrad.** *Grundlagen zur Bilanzierung der Trockenpartie – Das Blackboxmodell*. TU Dresden. 2008. unveröffentlicht.
25. **Kuitunen, Stefan.** *Energetische Optimierung der Trockenpartie – Untersuchung des Wärmerückgewinnungspotenzials mittels des Bilanzmodells am Beispiel der Papiermaschine*. Dresden : s.n., 2009. DA 713, unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden.
26. **Treppe, Konrad, Kuitunen, Stefan und Pinnau, Sebastian.** Fallstudie zur Abwärmenutzung mittels Wärmepumpe. *Wochenblatt für Papierfabrikation*. März 2011, S. 26–29.
27. **Treppe, Konrad und Kuitunen, Stefan.** Energie-Audit 2.0 – Bilanzmodell zur energetischen Optimierung. *Wochenblatt für Papierfabrikation*. 2010, S. 748–753.
28. **Borngräber, Maximilian.** *Energetische Optimierung – Kälteerzeugung durch Abwärmeintegration: Vergleich zwischen Absorptions- und Kompressionswärmepumpe*. Dresden : s.n., 2011. Nr. 621, unveröffentlichte Interdisziplinäre Projektarbeit, TU Dresden.
29. **N.N.** *Geschäftsbericht*. DREWAG. Dresden : s.n., 2009.
30. —. *Fernwärmepreisvergleich*. AGFW. 2010.
31. **Treppe, Konrad, Zelm, Roland und Nebel, Martin.** Anwendung einer Methode zur energetischen Bewertung der Trockenpartie. [Vortrag]. Graz, Österreich : s.n., 27. Mai 2009.
32. **Nebel, Martin.** *Energetische Optimierung der Trockenpartie unter besonderer Berücksichtigung des Wärmerückgewinnungspotenzials und der Investitions- und Betriebskosten*. 2008. unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden.
33. **Wurdinger, Ronny.** *Energetische Optimierung der Trockenpartie – Untersuchung des Wärmerückgewinnungspotenzials mittels eines Bilanzmodells am Beispiel einer Testliner Papiermaschine*. 2010. unveröffentlichter Großer Beleg, TU Dresden.
34. **Schmidt, Claudia.** *Bewertung des Energieeinsparpotenzials bei der Wärmerückgewinnung am Beispiel ausgewählter Papierfabriken unter besonderer Berücksichtigung der ökologischen Leistung*. 2011. DA 713, unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden.