



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

**Abschlussbericht** 5. April 2012

---

# **Prozessanalyse der Trockner in zwei Werken zur Faserplattenherstellung**

**Auftraggeber:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Industrielle Prozesse  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer:**

Kalbermatter Management Services  
Trüllernstrasse 25  
3205 Gümmenen  
und  
Thomas Bürki  
Gerlisbrunnenstrasse 20  
8121 Benglen

**Autoren:**

Kalbermatter Erich, Thomas Bürki

**BFE-Bereichsleiter:** Martin Pulfer

**BFE-Programmleiter:** Martin Pulfer

**BFE-Vertrags- und Projektnummer:** 101518 / 151792

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.



BFE

# Prozessanalyse der Trockner in zwei Wer- ken zur Faserplatten- herstellung

Schlussbericht



**BFE**

# **Prozessanalyse der Trockner in zwei Wer- ken zur Faserplatten- herstellung**

**Schlussbericht**

**Gümmenen/Benglen, 10. August 2010**

## **Inhalt**

1. Zusammenfassung	4
2. Ausgangslage	7
3. Messung 1: Werk 1, zwei Trocknerstufen	8
3.1 Vorgehen, Messstellen und Geräte	8
3.2 Resultate	9
3.2.1 Trockner	9
3.2.2 Abluftkamine	10
3.3 Beobachtungen zu den Messwerten	11
3.4 Auswertung	13
3.4.1 Energieflüsse	13
3.4.2 Bilanzen	13
3.4.3 Zusammenfassung, Energieflussbild	14
3.4.4 Beurteilung	14
3.5 Verbesserungsmöglichkeiten	16
3.5.1 Reduktion Abluftverluste	16
3.5.2 Wärmerückgewinnung an den Kaminen	17
3.5.3 Isolation der Armaturen	19
3.5.4 Isolation des Trockners	20
3.6 Zusammenfassung	20

# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

4. Messung 2: Werk 2	21
4.1 Vorgehen, Messstellen und Geräte	21
4.2 Resultate	23
4.2.1 Temperaturen am Trockner	23
4.2.2 Abluftkamin	24
4.3 Beobachtungen zu den Messwerten	25
4.4 Auswertung	25
4.4.1 Energieflüsse	25
4.4.2 Bilanzen	26
4.4.3 Zusammenfassung, Energieflussbild	27
4.4.4 Beurteilung	27
4.5 Verbesserungsmöglichkeiten	28
4.5.1 Reduktion Abluftverluste	28
4.5.2 Wärmerückgewinnung am Kamin	29
4.6 Zusammenfassung	31
5. Messung 3: Werk 1, drei Trocknerstufen	32
5.1 Vorgehen, Messstellen und Geräte	32
5.2 Vorbemerkung	32
5.3 Resultate	33
5.3.1 Trockner	33
5.3.2 Abluftkamine	33
5.4 Beobachtungen zu den Messwerten	34
5.5 Auswertung	35
5.5.1 Bilanzen	35
5.5.2 Beurteilung	36
5.6 Vergleich zum Betrieb mit 2 Trocknerstufen	36
5.6.1 Trocknereffizienz und spezifischer Wärmeverbrauch	37
5.6.2 Bemerkungen	38
6. Allgemeine Fragestellungen	39
6.1 Wärmeverbrauch in Funktion der Jahreszeit (Aussentemperatur)	39
6.1.1 Umgebende Gebäudehülle / Isolation der Gebäudewände	41
6.1.2 Abwärmennutzung zur Hallenluftvorheizung: sinnvoll?	42
6.1.3 Pinch-Analyse	44

## 1. Zusammenfassung

Die Trocknung von Faserplatten ist wie alle thermischen Trocknungsprozesse sehr wärmeintensiv. Aufgrund der Situation, dass die Wärme in den untersuchten Werken partiell mit fossilen Energieträgern erzeugt wird, führt dazu, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Werke relativ hoch sind. Das ist einer der Auslöser zur Analyse der Trockner und zum Ermitteln allfälliger Verbesserungspotentiale.

Der Wärmeverbrauch auch einen erheblichen Kostenfaktor dar. Schliesslich ist der spezifische Wärmeverbrauch in den beiden Werken stark unterschiedlich, ohne dass bisher eine schlüssige Erklärung dafür bekannt ist.

Diese Gründe haben dazu geführt, dass die Arbeitsgemeinschaft Kalbermatter Services und Thomas Bürki GmbH beauftragt wurde, den Wärmeverbrauch zu analysieren, die Energieflüsse darzustellen, die Wirkung einer Trocknererweiterung (Erweiterung um eine dritte Trocknerstufe sowie eine weitgehende mechanische Entwässerung) zu messen sowie Verbesserungsvorschläge zu unterbreiten.

Das Projekt wurde vom BFE im Rahmen des Forschungsprogramms "Industrielle und verfahrenstechnische Prozesse VTP" finanziell unterstützt.

Die Messungen zeigten folgende Resultate:

### 1. Messung am ersten zweistufigen Trockner

Die Messung zeigte folgende Hauptresultate:

- a Der Hauptwärmeverlust (rund  $\frac{2}{3}$ ) ist die feuchte Abluft, die durch die beiden Abluftkamine ausgestossen wird
- b Der Wassergehalt in der feuchten Abluft ist in den beiden Kaminen sehr unterschiedlich: das Kamin mit dem kleinen Abluftstrom hat einen praktisch optimalen Wassergehalt, das Kamin mit der grossen Abluftmenge entlässt deutlich zu trockene Abluft
- c Die Trocknereffizienz, d.h. das Verhältnis zwischen theoretisch nötiger und effektiv aufgewandter Wärmemenge, beträgt 2,4 : 1
- e Als Verbesserungsmassnahmen werden vorgeschlagen:
  - Wärmerückgewinnung an den Kaminen
  - Isolation der Dampfarmaturen
  - Untersuchen, ob es sich ökonomisch lohnt, die Trocknertüren mit einem Strahlungsschutz nachzurüsten

### Messung am zweiten zweistufigen Trockner

Die Messungen führten zu folgenden Erkenntnissen:

- a Auch in der zweiten Anlage geht die zugeführte Wärme zum grössten Teil über den Abluftkamin verloren
- b Der Wassergehalt in der Abluft ist gering; dadurch wird über die Abluft mehr Energie verloren, als bei optimal gesättigter Abluft
- c Die Trocknereffizienz beträgt 2,1 : 1
- e Als Verbesserungsmassnahmen werden vorgeschlagen:

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

- Regelung des Trockners, dass die Abluftfeuchte deutlich höher liegt
- Wärmerückgewinnung an den Kaminen

### 2. Messung am dreistufigen Trockner

Nach dem Einbau der dritten Trocknerstufe wurde die Messung an der ersten Anlage wiederholt. Sie zeigte folgende Resultate:

- a In der neuen gasbefeuerten ersten Stufe wird rund 40% des Wassers aus den Platten ausgetrieben
- b Der Wassergehalt in der feuchten Abluft in den beiden Abluft-Kaminen lag deutlich höher als bei der ersten Messung
- c Die Trocknereffizienz, d.h. das Verhältnis zwischen theoretisch nötiger und effektiv aufgewandter Wärmemenge, beträgt 1,5 : 1

Die Verbesserung führte zu einer gemessenen Reduktion des spezifischen Wärmeverbrauchs 42%. Diese Verbesserung konnte nur zum Teil modellmäßig erklärt werden.

Unsicherheiten in der Interpretation der Ergebnisse bestehen durch folgende Unterschiede in den Messbedingungen:

- unterschiedlichen Messbedingungen (Sommer, Winter)
- unterschiedliche ausgetriebene Wassermenge aus den Platten
- dadurch unterschiedliche Heizleistungen
- kürzere Messperiode, da am Tag der zweiten Messung zu Beginn eine Trocknerstörung auftrat, die nur eine vergleichsweise kurze Messperiode erlaubte

Folgende Verbesserungen tragen zur Erklärung bei, warum der spezifische Wärmeverbrauch nach dem Einbau der dritten Trocknerstufe sinkt:

- α Die Effizienz der ersten, gasbefeuerten Trocknerstufe ist höher als die der beiden anderen Stufen.  
Anteil an der gesamten Reduktion des spezifischen Wärmeverbrauchs: 42%
- β Reduzierte spezifische Abluftverluste (weniger Abluft pro Tonne Platte, höherer Wassergehalt, etwas tiefere Temperatur).  
Anteil an der gesamten Reduktion des spezifischen Wärmeverbrauchs: 19 %
- γ Wärmere Platten am Trocknereinlauf.  
Anteil an der gesamten Reduktion des spezifischen Wärmeverbrauchs: 8 %

# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

## Empfehlungen

- 1 Die nach den ersten Messungen dargelegten Verbesserungen sollen umgesetzt werden.
- 2 Die technisch-ökonomische Machbarkeit des Ersatzes der Hallenheizung durch Nutzung der Trocknerabwärme ist zu untersuchen
- 3 Die Haupt-Wärmeeinsparung ist erreichbar, wenn die Wärme in der Abluft (mindestens partiell) zurückgewonnen werden könnte. Hier stellt sich das Problem, dass die Abluft u.a. hochsiedende Komponenten enthält, d.h. Abluftbestandteile, die schon bei hoher Temperatur kondensieren, was zu einer Verschmutzung und damit Leistungsreduktion des Wärmetauschers führt. Es wird deshalb empfohlen zu untersuchen, ob es Wärmetauscher gibt, die in solcher Atmosphäre mit angemessener Reisezeit Wärme zurückgewinnen. Nach der Klärung dieser Ausgangslage ist es sinnvoll, eine pinch-Analyse durchzuführen, mit der das optimale Mass an rückgewinnbarer Wärme festgestellt wird (Abwärme aus allen vorhanden Quellen, nicht nur aus der Abluft in Beziehung auf alle Wärme-aufnehmenden Stoffströme inkl. Zuluft aller Art).

## 2. Ausgangslage

In den beiden Werken werden Hart- und Weichfaserplatten hergestellt. Der Prozess besteht im Wesentlichen aus den Arbeitsschritten Fasern herstellen, Fasern in Wasser lösen und Wasser-Faser-Lösung entwässern und zu Platten trocknen.

Der Prozessschritt mit dem dominierenden Anteil des Wärmeverbrauchs ist die Trocknung der Platten. Es wurde festgestellt, dass der spezifische Wärmeverbrauch zur Trocknung in Werken 1 und 2 (trotz gleichen Produkts) starke Unterschiede aufweist und der Temperaturverlauf im Werk 1 nicht den Vorstellungen des Betreibers entspricht.

Diese Ausgangslage sowie der Wunsch, den Trocknungsprozess genauer auf Mängel v.a. auf Energieverluste zu untersuchen, hat zur Untersuchung der beiden Trocknungsprozesse geführt.

Im Werk 1 wurde 2008 eine dritte Trocknungsstufe installiert. Daher war es von Interesse, den Zustand vor und nach dieser Installation zu kennen und die Verbesserung, d.h. die Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs zu ermitteln.

Ziele der Untersuchung ist die Identifikation von Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und das Aufzeigen von ökonomisch interessanten Verbesserungsmassnahmen.

Das gesamte Vorgehen wird in zwei unabhängige Projekte unterteilt:

- Projekt 1: *Energie- und Stoffflussanalyse der Trockner in den Werken 1 und 2.*  
Vergleich der beiden Trockner, Beurteilung und Schwachstellenanalyse; Aufzeigen von Verbesserungsmöglichkeiten.
- Projekt 2: *Energie- und Stoffflussanalyse des Trockners im Werk 1 nach der Installation der dritten Stufe.*  
Vergleich zur Zweistufen-Trocknung. Aufzeigen allfälliger Verbesserungs- resp. Optimierungsmöglichkeiten.

Die Wärmestrommessungen wurden mit messtechnischer Unterstützung der Hochschule Luzern - Technik und Architektur, Zentrum für integrale Gebäudetechnik (ZIG) durchgeführt.

## 3. Messung 1: Werk 1, zwei Trocknerstufen

### 3.1 Vorgehen, Messstellen und Geräte

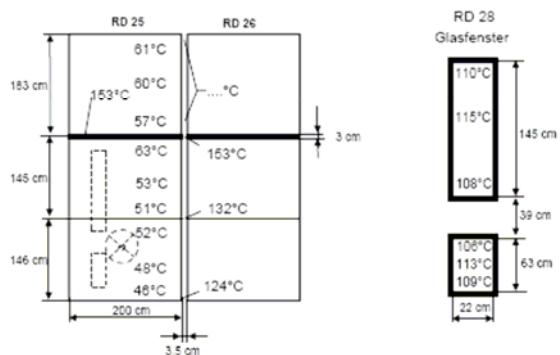
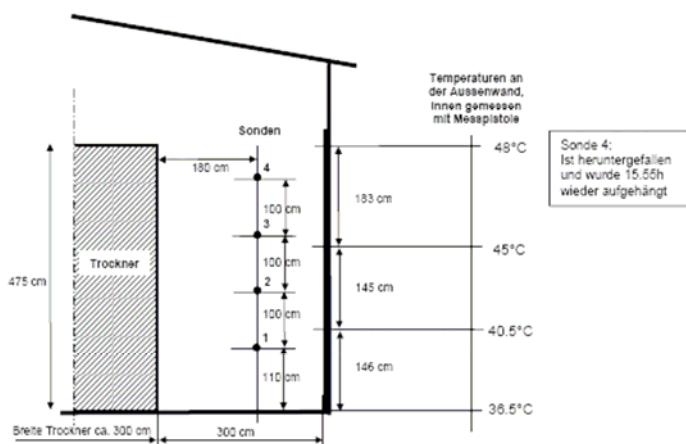
Ziel der Messungen war die Ermittlung der Energieflüsse am Trockner des Werkes 1. Aufgrund verschiedener Komplikationen bei den Messungen wurde an drei Tagen gemessen: 20. Juli 2005, 2. Nov. 2005 und 30. März 2006.

Am Trockner wurden folgende Messungen vorgenommen:

- Messung der Oberflächentemperaturen am Trockner
- Messung der Lufttemperaturen in der Umgebung des Trockners
- Oberflächentemperaturen der umgebenden Flächen
- Menge und Zustand der Abluft durch die beiden Kamine auf dem Dach
- Dampfverbrauch.

Mit folgenden Messanordnungen wurden gemessen:

Temperaturen am und um den Trockner:



# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Abwärme aus den Kaminen:

Mit einem Messkreuz wurde der Staudruck ( $\rightarrow$  Geschwindigkeit) oben am Austritt der Kamine simultan und kontinuierlich gemessen. Ebenso wurde die Temperatur der Abluftströme kontinuierlich erfasst. Der Abluftzustand (Wassergehalt, Enthalpie, Taupunkt) hingegen konnte nur jeweils alternativ an einem der Kamine gemessen werden.

## 3.2 Resultate

Es wurden folgende Messresultate ermittelt:

### 3.2.1 Trockner

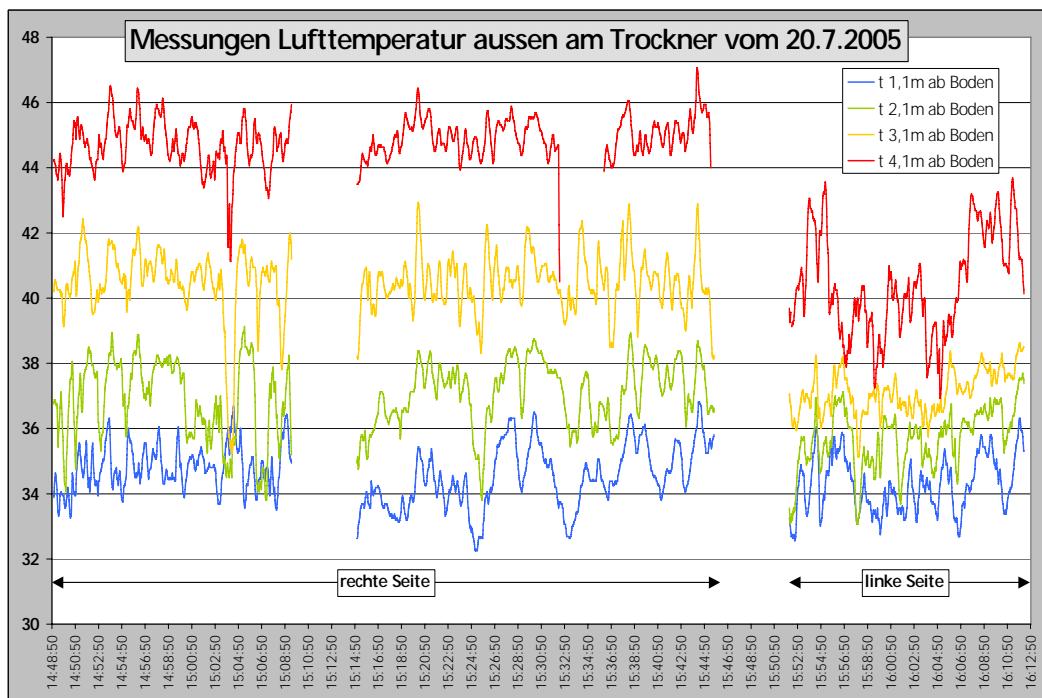


Abbildung 1: Verlauf der Lufttemperatur in Trocknernähe in verschiedenen Höhen ab Boden

Das Bild zeigt, dass die Lufttemperatur um den Trockner erwartungsgemäss mit zunehmender Höhe ansteigt. Die maximale gemessene Temperatur oben am Trockner erreicht knapp 50°C.

Im Kern der Platten und an der Oberfläche stellen sich folgende Temperaturen ein:

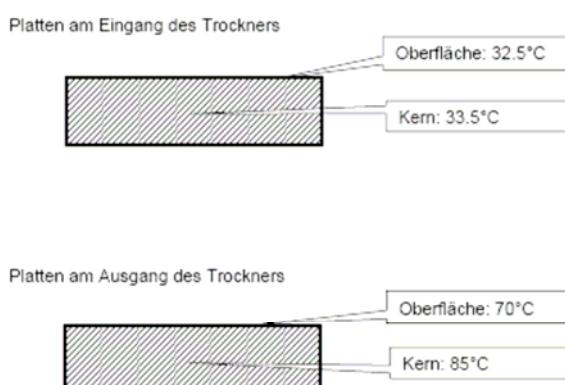


Abbildung 2: Temperaturen der Platten am Ein- und Austritt des Trockners

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

### 3.2.2 Abluftkamine

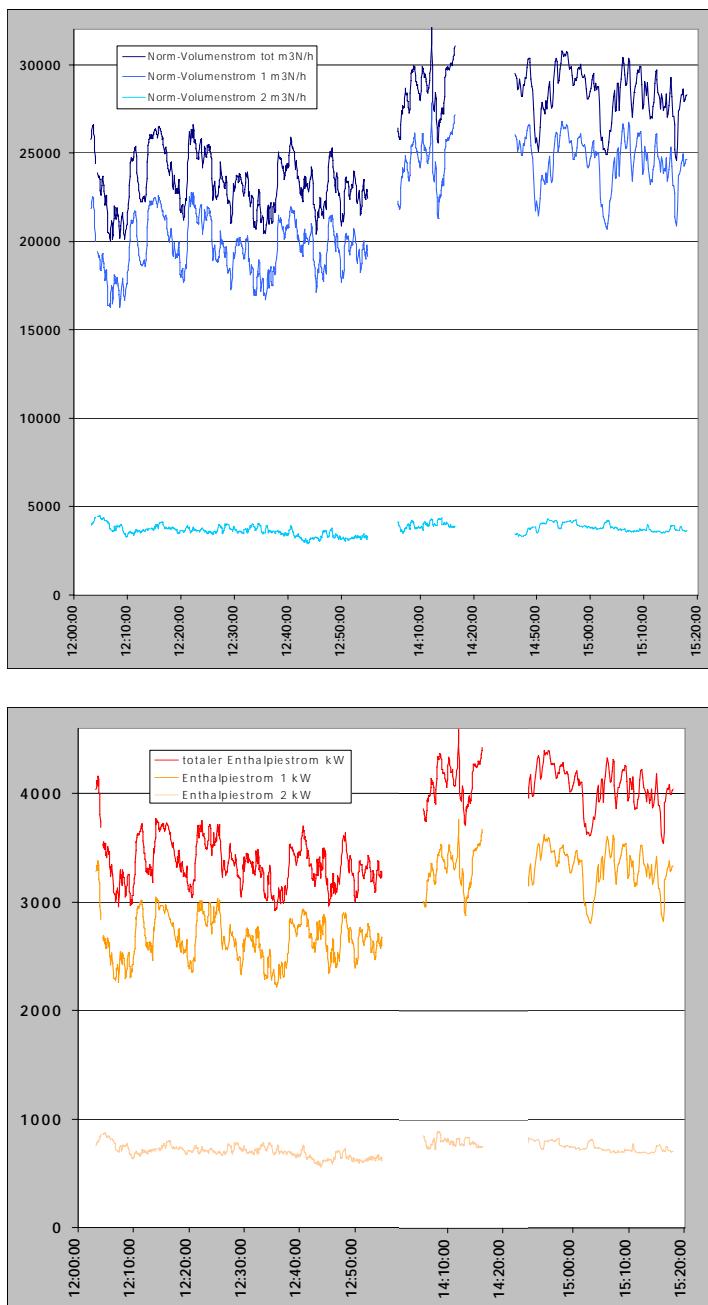


Abbildung 3 Verlauf der Volumen- und Energieströme in den beiden Kaminen

# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

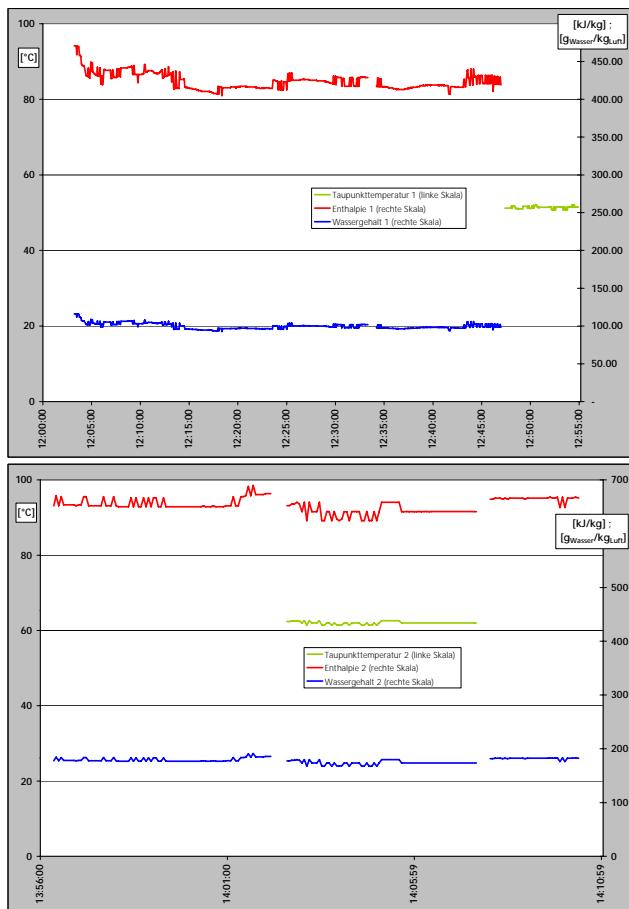


Abbildung 4: Verlauf des Zustandes der Abluft in den beiden Kaminen

Abbildung 3 zeigt die stark unterschiedlichen Abluftmengen in den beiden Kaminen; in Abbildung 4 sind die unterschiedlichen Abluftbedingungen dargestellt.

### 3.3 Beobachtungen zu den Messwerten

Die Messungen zeigen, dass der Zustand der Abluft, ebenso wie die Geschwindigkeiten, sehr unterschiedlich ist.

Die Messwerte (Mittelwerte) sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Mittelwerte der Messung an den Abluftkaminen

Messwert		
	Kamin 1	Kamin 2
Betriebs-Volumenstrom [ $m^3_B/h$ ]	32'400	6'120
Norm-Volumenstrom [ $m^3_N/h$ ]	21'203	3'696
Wassergehalt [ $g_{Wasser}/kg_{Luft}$ ]	100	178
Enthalpie [kJ/kg]	424	606
Taupunkt [°C]	51	62

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Es zeigt sich, dass im vorderen Kamin deutlich mehr Abluft hinausgeblasen wird. Das führt einerseits einem grösseren Energieverbrauch (Wärme; Strom für den Ventilator), andererseits zu einem geringeren Wassergehalt der Abluft und damit zu ungünstigeren Bedingungen für die Abwärmenutzung.

Der Energiestrom in beiden Kaminen zusammen beträgt rund 3,5 MW bei einer Austrittstemperatur von ca. 145 - 150°C. Die Umgebungstemperatur lag während der Messzeit bei 11 - 15°C.

# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

## 3.4 Auswertung

### 3.4.1 Energieflüsse

Aus den Messresultaten können folgende Energieflüsse ermittelt werden:

#### 3.4.1.1 Eintretende Energieflüsse

- Heizdampf
- Wärme im eintretenden Material (nasse Platten)
- Elektrizität (UL-Ventilator im Trockner)

#### 3.4.1.2 Austretende Energieflüsse

- Kondensatrückfluss zum Heizkessel
- Abluft und Wasserdampf durch die Kamine
- Konvektion und Strahlung der Trockneroberfläche
- Wärme in den austretenden trockenen Platten

Der Dampf, der in den Trockner eingeblasen wird (Auslöser Funkendetektor etc.), tritt durch die Abluftkamine wieder aus; er ist im gemessenen Dampfverbrauch erfasst resp. in der gemessene Abluftmenge/zustand enthalten.

## 3.4.2 Bilanzen

### 3.4.2.1 Energiebilanz

Die Bilanz dieser Energieströme ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Energiebilanz am Trockner

	Eintritt	Austritt	Bilanz / Fehler
	kW		
Dampf	5'415		
Kondensat		1'219	
Platten	92	153	
Elektrizität	40		
Abluft		3'581	
Konvektion		302	
Strahlung		209	
total	5'547	5'464	1.5%

### 3.4.2.2 Plausibilisierung Wasserbilanz

Eine Plausibilisierung der Wasserbilanz zeigt folgendes Bild:

- Plattenzulauf: Wassergehalt 51% (Messung FHBB<sup>1</sup>)
- Plattenauslauf 2,2% (Werksmessung)

<sup>1</sup> FHBB = Fachhochschule beider Basel in Muttenz

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Tabelle 3: Wasserbilanz am Trockner

	Eintritt	Austritt	Bilanz
verdampftes Wasser, in den Kaminen gemessen [kg/h]			3'043
über Produktemenge und Plattenfeuchte berechnet			3'115
Differenz / Fehler [%]			2.3

### 3.4.3 Zusammenfassung, Energieflussbild

Die Auswertung der Messungen ergibt folgendes Energieflussbild:

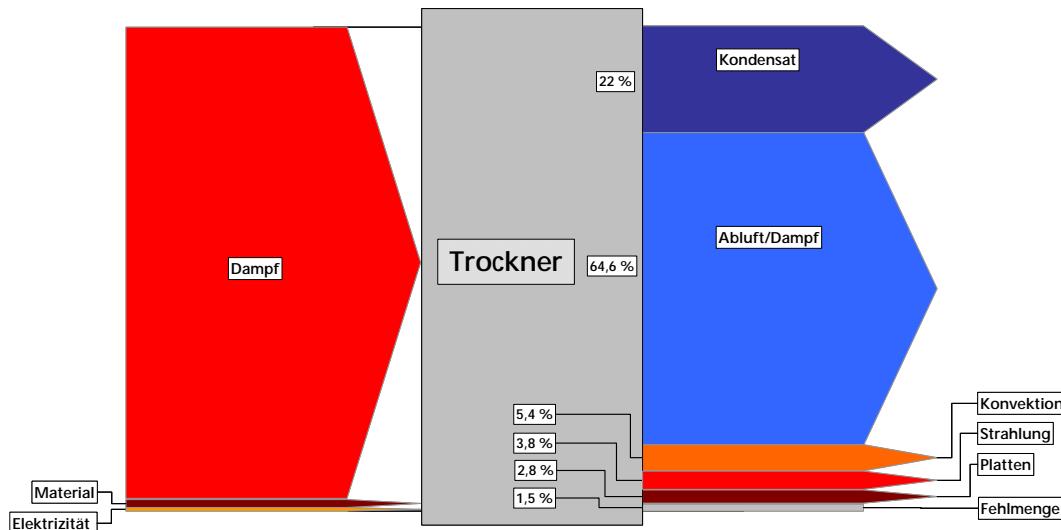


Abbildung 5: aggregiertes Energieflussbild des Trockners im Werk 1

Die Grafik zeigt, dass die eingebrachte Energiemenge den Trockner zu etwa  $\frac{2}{3}$  via Abluft/Wasser dampf verlässt und zu etwa  $\frac{1}{4}$  als Kondensat zum Dampferzeuger zurückgeführt wird; rund 10% der eingebrachten Energie sind Verluste durch die Trockneroberfläche.

### 3.4.4 Beurteilung

#### 3.4.4.1 Trocknereffizienz

Das Verhältnis zwischen effektiv aufgewendeter Wärmeleistung und dem theoretischen Wärmeleistungsbedarf, um das Wasser zu verdampfen, ergibt den Effizienz-Kennwert des Trockners.

Um 3'100 kg Wasser pro Stunde zu verdampfen, braucht es folgende theoretische Wärmeleistung:

Tabelle 4: theoretischer Wärmeleistungsbedarf

	kW	%
Erwärmung des Wassers in den Platten	234	10.3
Verdampfung des Wassers	1'956	86.0
Überhitzen des Dampfs	85	3.7
theoretisch benötigte Wärmeleistung	2'275	

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Unter Dampfüberhitzung wird folgendes verstanden: das Wasser verdampft beim Druck im Trockner (= ca. Atmosphärendruck) bei rund 100°C. Der Dampf tritt also mit rund 100°C aus den Platten aus. Im Trockner wird der Dampf anschliessend auf die Temperatur aufgeheizt, mit der er den Trockner durch das Abluftkamin verlässt (145 bis 150°C).

Der gemessene Wärmeleistungsbezug beträgt 5'415 kW.

Das Verhältnis zwischen effektiv aufgewendeter und theoretisch notwendiger Wärme beträgt demzufolge 2,4 : 1.

### 3.4.4.2 Trocknungsprozess

Frühere Messungen haben gezeigt, dass die Kerntemperatur der Platten sehr schnell den Endwert von rund 80°C erreicht und dann dort verharrt.

Die feuchten Platten treten mit einer Oberflächentemperatur von knapp 35°C in den Trockner ein. Dort werden sie von der heissen und feuchten Umluft überströmt. In der ersten Phase der Trocknung (= Aufwärmung der nassen Platten) steigt gemäss Werksmessungen die Temperatur der nassen Platten vom Eintritt (ca. Meter 3) innerhalb ca. 4,5 Minuten (d.h. bis zu Meter 6) von rund 33 °C auf 80°C an.

Thermodynamisch heisst das:

Von den Platten werden in 5 Minuten ca. 20 kWh Wärme aufgenommen. Das heisst, dass von der heissen Umluft rund 240 kW Leistung abgegeben werden. Bei einer umgewälzten Luftmenge von 34 m<sup>3</sup>/h kühlst sich die Luft deshalb um etwa 5°C ab. Das bedeutet, dass die Abluft insgesamt nicht kondensiert; örtliche, geringe Kondensatausscheidungen in der Grenzschicht sind aber denkbar.

## 3.5 Verbesserungsmöglichkeiten

### 3.5.1 Reduktion Abluftverluste

Die Messungen haben gezeigt, dass die Volumenströme durch die beiden Kamine sehr unterschiedlich sind. Zudem weist die Abluft in den Kaminen mit nur 100 resp. 178 g/kg einen eher geringen Wassergehalt auf.

Die Steigerung des Wassergehalts in der Abluft, v.a. bei einem Kamin, führt zu einer Verringerung des Abluftstroms und damit zu einer Verringerung der Abwärmeverluste. Bezuglich der Verluste in den Abwärmekaminen existiert ein Optimum. Begründung:

- je höher der Wassergehalt der Abluft (bei konstanter Ablufttemperatur von angenommen  $145^{\circ}\text{C}$ ), desto höher ist die Enthalpie  $h$  (spezifischer Energieinhalt);
- je höher der Wassergehalt der Abluft (bei angenommener konstanter abzuführender Wassermenge), desto geringer der Luftbedarf und desto geringer die gesamte Menge der abgeführten feuchten Abluft  $m_{\text{tot}}$ ;
- Die Wärmeverlustleistung in der Abluft ist das Produkt aus Enthalpie und Abluftmassenstrom. Diese ist wie erwartet eine Hängekurve, es existiert also ein Optimum. Dieses liegt unter den getroffenen Annahmen bei einem Wassergehalt von etwa 220 g/kg.

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6 gezeigt.

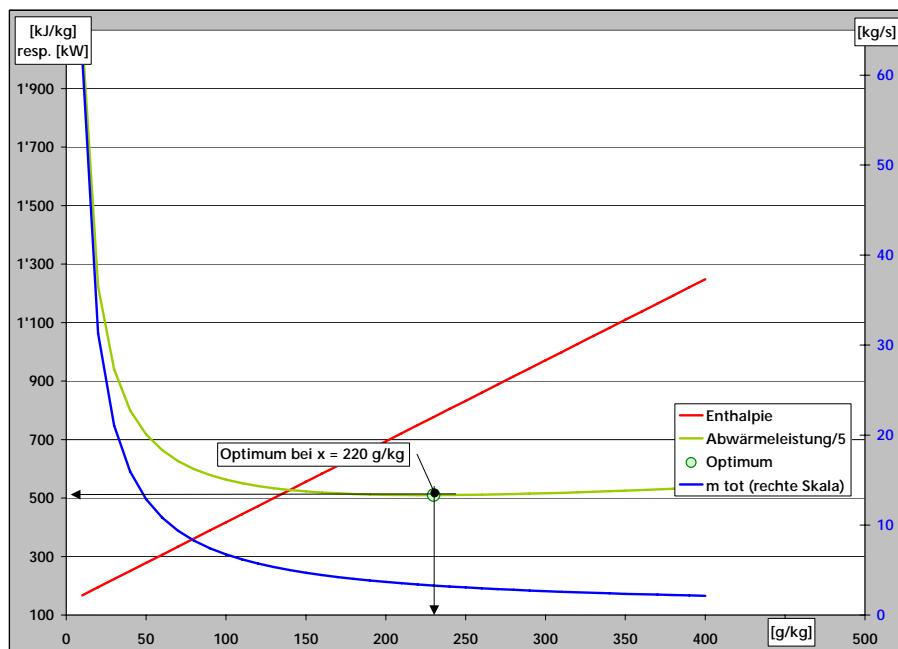


Abbildung 6: Enthalpie und Verlustleistung in Funktion des Wassergehalts in der Abluft

Die Feuchtigkeit der Abluft wird über eine  $\text{O}_2$ -Sonde im Trockner gesteuert. Der eingestellte Wert ist ein Erfahrungswert, der so eingestellt wird dass

- der geforderte Durchsatz (Plattenmenge pro Stunde) erreicht wird;
- der Wassergehalt der trockenen Platten ein Maximum nicht überschreitet (kritisch ist v.a. der Wassergehalt im Kern).

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Zudem wird ein gewisser Sicherheitsabstand vom kritischen Wert angestrebt.

Um eine Reduktion der Abluftverluste zu erreichen, müsste eine "engere Regelung", d.h. ein härteres Heranfahren an den kritischen Wert, gesucht werden.

Die Faustregel für die Einsparung lautet etwa:

- pro g Feuchtigkeitserhöhung im Bereich von  $x = 100 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}}$  werden - bei der gemessenen Abluftmenge - rund 7 kW Wärmeleistung eingespart. Das bedeutet bei einer angenommenen Betriebszeit von 7'500 Stunden pro Jahr eine Einsparung von rund 50 MWh/a oder rund 65 t Dampf pro Jahr (entspricht bei 55 Fr/t einer Einsparung von 3'700.- Fr/a)
- pro g Feuchtigkeitserhöhung im Bereich von  $x = 180 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}}$  wird - bei der gemessenen Abluftmenge - nur noch rund 0,3 kW Wärmeleistung eingespart. Das bedeutet bei einer angenommenen Betriebszeit von 7'500 Stunden pro Jahr eine Einsparung von rund 2,5 MWh/a oder rund 3 t Dampf pro Jahr (entspricht bei 55 Fr/t einer Einsparung von 150.- Fr/a)

### 3.5.2 Wärmerückgewinnung an den Kaminen

Die verbleibende Abwärmemenge in den Kaminen könnte genutzt werden.

Heute wird die Ersatzluft (Ersatz der durch die Kamine ausgestossenen, warmen Abluft durch frische Aussenluft) von oben am Trockner über einen Ventilator direkt in den Trockner gesaugt und dort von den dampfbeheizten Wärmetauschern aufgeheizt. Mit der Kaminabwärme könnte diese Ersatzluft vorgewärmt werden<sup>2</sup>. Die Luftmenge beträgt rund 22'000 m<sup>3</sup>/h. Die eintretende Luft hat heute eine Temperatur von knapp 50°C (Temperatur oberhalb des Trockners). Durch die Vorwärmung durch Abwärmenutzung kann Wärmeleistung eingespart werden; sie hängt von der Temperatur ab, auf die die Ersatzluft vorgewärmt wird.

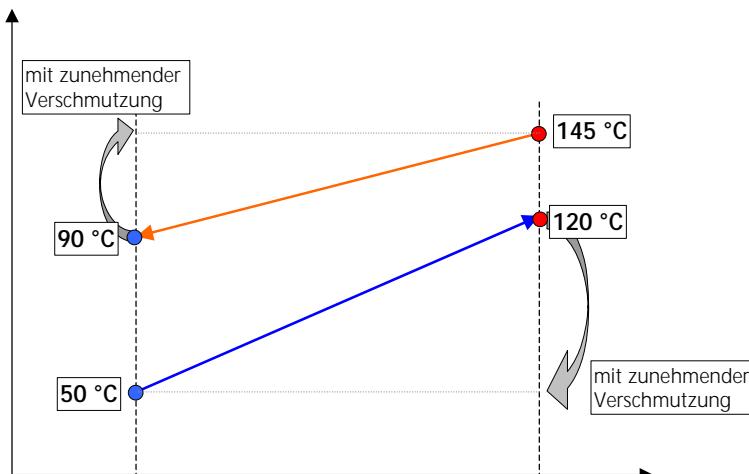


Abbildung 7: Temperaturverlauf Abluft und Ersatzluft im Wärmetauscher

In Abbildung 7 ist der optimale Fall dargestellt, bei dem die Wärmetauscher sauber und damit leistungsfähig sind. Durch die zunehmende Verschmutzung des abluftseitigen Teils der Wärmetauscher wird der Wärmeübergang schlechter<sup>3</sup>, die übertragene Wärmeleistung geringer und damit die Er-

<sup>2</sup> vgl. dazu Kapitel 6.1.3

<sup>3</sup> Aufgrund der belasteten Abluft verschmutzen die Wärmetauscher langsam; sie werden mit einer "Isolationsschicht" belegt.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

satzluft weniger stark vorgewärmt. Das Verhältnis von Vorwärmtemperatur der Ersatzluft und eingesparter Wärmemenge (eingesparter Dampfmenge) ist in Abbildung 8 dargestellt.

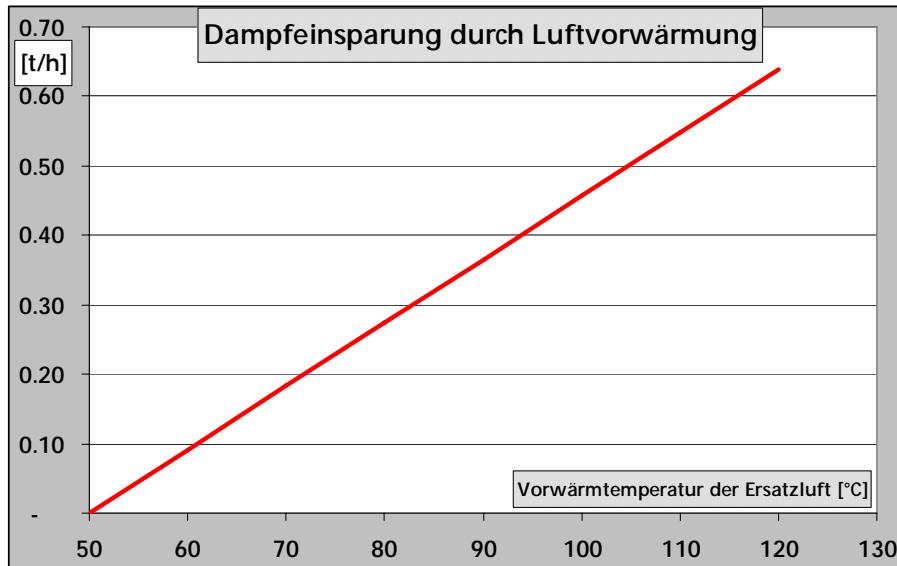


Abbildung 8: Dampfeinsparung durch Ersatzluftvorwärmung bei variablen Bedingungen

Bei starker Verschmutzung kann angenommen werden, dass praktisch kein Wärmerückgewinn mehr stattfindet; dieser Zustand werde (Hypothese) in 3 Monaten erreicht. Anschliessend wird der Urzustand durch Reinigung wieder hergestellt. Es wird sich also eine "Sägezahnkurve" einstellen, die wie folgt aussehen dürfte:

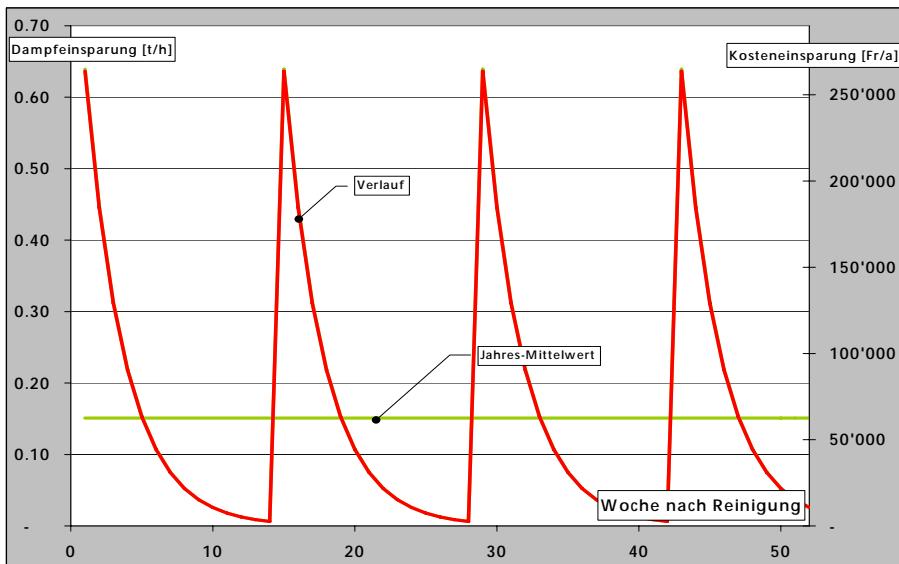


Abbildung 9: Jahresverlauf der rückgewonnenen Wärme (Dampfeinsparung)

Unter diesen Annahmen würde sich eine Jahreseinsparung von etwa 60'000 Fr/a ergeben.

Eine weitere Wärmerückgewinnungsmöglichkeit besteht darin, die Wärme in einer ORC-Anlage zu nutzen und damit Strom zu produzieren. Mit einer ORC-Anlage könnten rund 200 kW elektrische Leistung (brutto, d.h. ohne Abzug des Eigenverbrauchs) produziert werden.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Als Probleme sind für beide Fälle abzuklären

- Verschmutzung des Wärmetauschers und damit Reinigungsmöglichkeiten;
- Kosten;
- vor allem für die ORC-Anlage ist es sinnvoll, auch die Abwärme im Abgas des neuen Kessels zu nutzen. Damit würde die Leistungsausbeute grösser und der spezifische Anlagenpreis tiefer.

### 3.5.3 Isolation der Armaturen

Neben dem Trockner befinden sich rund 20 unisolierte Armaturen. Die Oberflächentemperaturen liegen bei etwa 215 °C.



Abbildung 10: Unisolierte Armaturen auf der rechten Seite des Trockners

Die Wärmeverluste der nicht isolierten Armaturen (Annahme DN 25) betragen rund 30 MWh/a oder  $40 t_{Dampf}/a$ . Durch isolieren der Armaturen werden die Verluste um etwa 90% reduziert. Die Verluste betragen dann noch rund 2 MWh/a (oder  $3 t_{Dampf}/a$ ).

Die Einsparungen gegenüber heute betragen damit ca. 28 MWh/a;  $36 t_{Dampf}/a$ ; 2'000.- Fr/a.

Als Isolationsmaterial könnten z.B. Isolierdecken der Firma Franz Gysi, Suhr eingesetzt werden. Sie werden um die Armatur gewickelt und mit einem Klettverschluss festgemacht, das Handrad bleibt offen. Leicht montier- und demontierbar. Industrietauglich. Der Hersteller spricht von einer Pay-Back-Zeit in der Grössenordnung von  $\frac{1}{2}$  Jahr.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

### 3.5.4 Isolation des Trockners

Die grossen Flächen des Trockners nachzuisolieren ist ökonomisch uninteressant. Allerdings wäre es sinnvoll zu prüfen, ob an den Türen auf beiden Seiten kleine "Strahlungs-Schutzbleche" angebracht werden können, um die Abstrahlungsverluste der Spalten zwischen den Türen reduzieren. Damit könnten die Strahlungsverluste mindestens um ein Drittel gesenkt werden.

In Zahlen: die Verlustleistung würde von ca. 140 kW auf 95 kW sinken. Bei wiederum 7'500 h/a resultiert eine Wärmeeinsparung von rund 338 MWh/a ( $432 \text{ t}_{\text{Dampf}}/\text{a}$ ); mit dem Dampfpreis von 55 Fr/t ergibt das eine Jahreseinsparung von rund Fr. 23'000 .-.

## 3.6 Zusammenfassung

Die vorgeschlagenen Massnahmen führen zu folgenden Einsparungen

Tabelle 5: Zusammenfassung der Einsparungen

Massnahme	Wärme- einsparung	Dampf- einsparung	Kosten- einsparung
	MWh/a	$\text{t}_{\text{Dampf}}/\text{a}$	Fr/a
Reduktion Abluftverluste pro g Feuchtezunahme			
<i>Kamin vorne (180 g)</i>	3	3	176
<i>Kamin hinten (100 g)</i>	50	64	3'521
Isolation Armaturen	22	28	1'540
Strahlungsschütze Türen	338	433	23'803
Ersatzluftvorwärmung (Mittelwert)	830	1'063	58'451

## 4. Messung 2: Werk 2

### 4.1 Vorgehen, Messstellen und Geräte

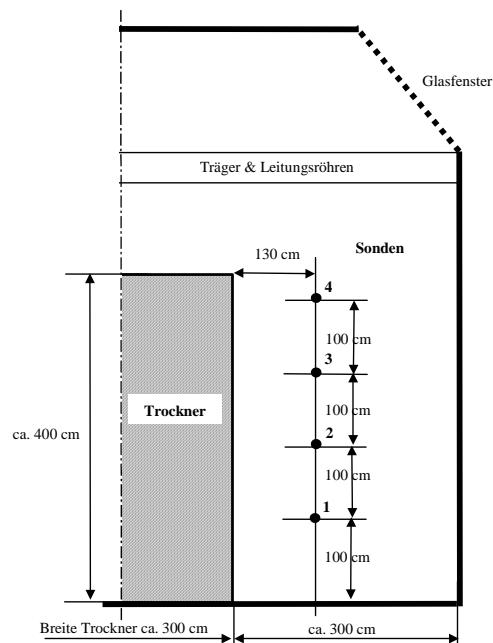
Ziel der Messungen war die Ermittlung der Energieflüsse am Trockner des Werkes 2. Die Messungen fanden statt am 21. Juni 2006. Produziert wurden wie die gleichen Platten wie im Werk 1.

Am Trockner wurden folgende Messungen vorgenommen:

- Messung der Oberflächentemperaturen am Trockner
- Messung der Lufttemperaturen in der Umgebung des Trockners
- Oberflächentemperaturen der umgebenden Flächen
- Menge und Zustand der Abluft durch die beiden Kamine auf dem Dach
- Dampfverbrauch.

Mit folgenden Messanordnungen wurden gemessen:

#### Temperaturen Trockner:



Start Messung	Trockner-Position
11.37h	3-4
12.08h	7-8
12.36h	13-14
12.58h	18
13.25h	29-30

Abbildung 11: Messstellen am Trockner

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

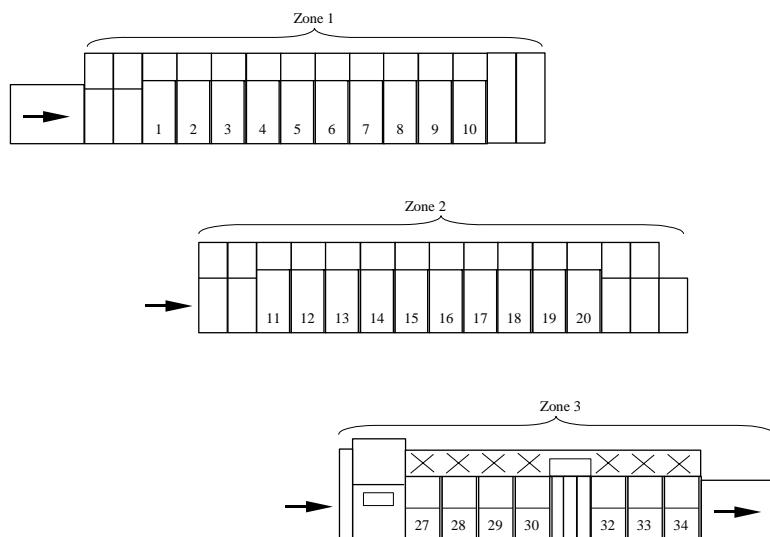


Abbildung 12: Messstellen am Trockner

### Abwärme aus den Kaminen:

Mit einem Messkreuz wurde der Staudruck ( $\rightarrow$  Geschwindigkeit) oben am Austritt des Kamins simultan und kontinuierlich gemessen. Mit einem Messgerät (Testo 645 mit Sonde zur Messung des Wassergehaltes der Abluft) wurde der Zustand der Abluft (Temperatur, Wassergehalt, Enthalpie, Taupunkt) gemessen.



Abbildung 13: Messkreuz zur Staudruckmessung im Kamin

# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

## 4.2 Resultate

Es wurden folgende Messresultate ermittelt.

### 4.2.1 Temperaturen am Trockner

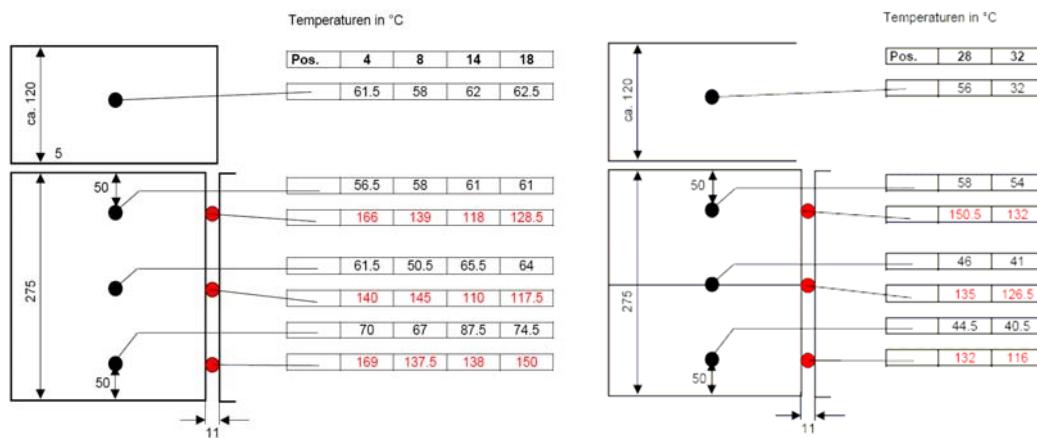


Abbildung 14: Messresultate an den Messstellen gem. Abbildung 12

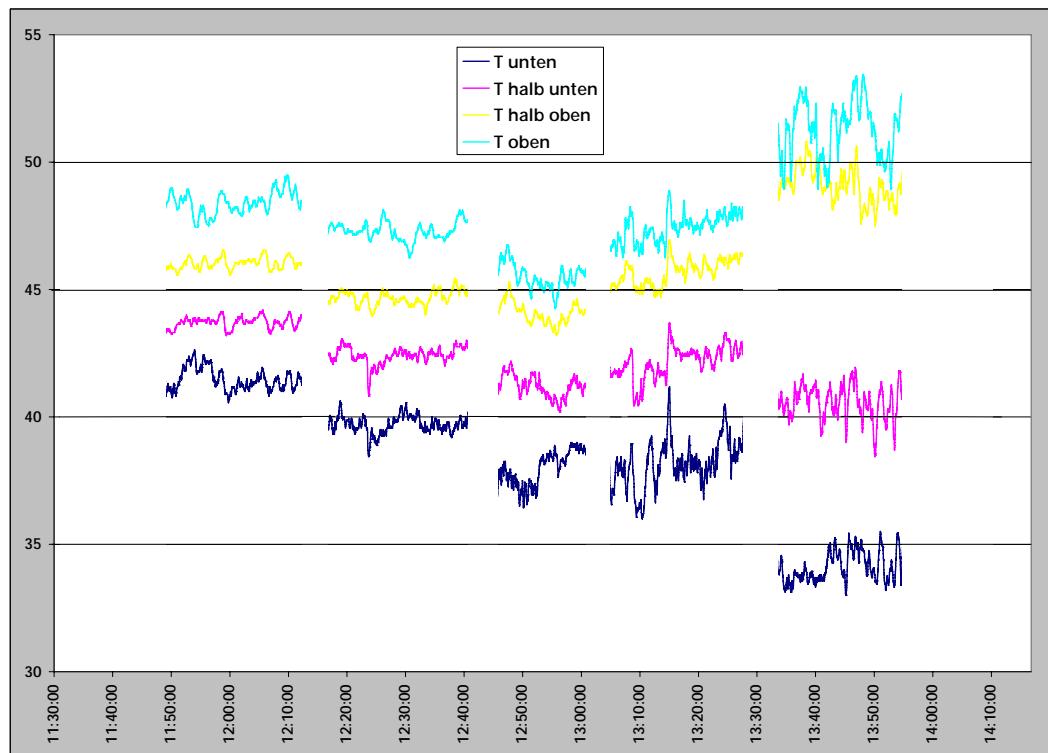


Abbildung 15: Verlauf der Lufttemperatur in Trocknernähe in verschiedenen Höhen ab Boden.  
Positionen (vgl. Abbildung 12) von links: 3-4, 7-8, 13-14, 18, 29-30

Die Messungen zeigen, dass die Lufttemperatur aussen am Trockner von unten (0,5 m über Boden) bis oben (3,4 m über Boden) um rund 5 bis 20°C ansteigt. Die Spitzentemperatur der Luft erreicht Werte von deutlich über 50°C.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Kern und Oberflächen der Platten zeigten folgende Temperaturen.

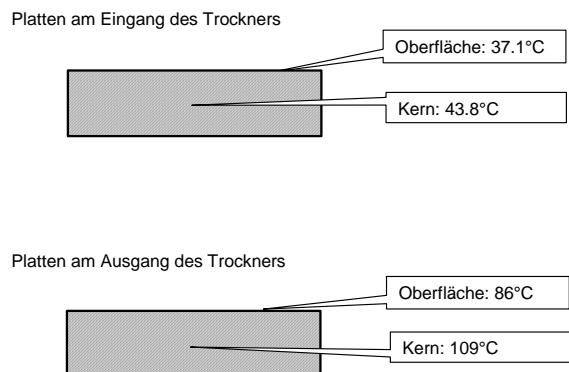


Abbildung 16: Temperaturen der Platten am Ein- und Austritt

### 4.2.2 Abluftkamin

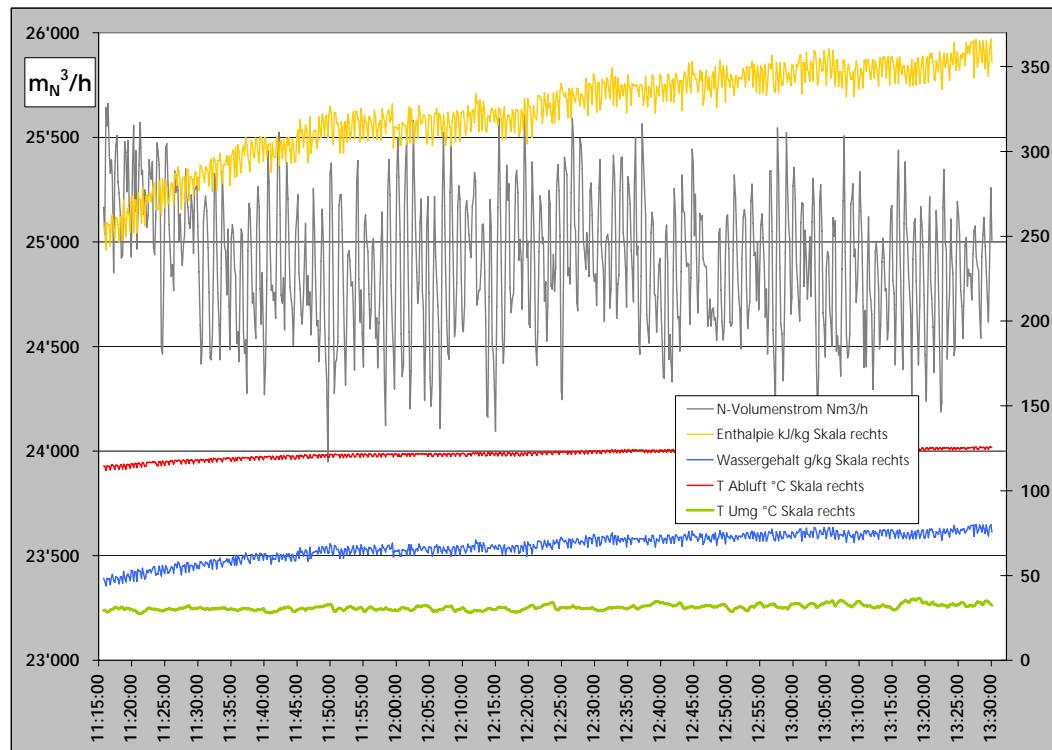


Abbildung 17: Verlauf vom Volumenstrom und Zustand der Abluft im Kamin

Auffällig ist der kontinuierliche Anstieg von Temperatur und Wassergehalt und damit Energieinhalt (Enthalpie) der Abluft, während der Volumenstrom zuerst während rund  $\frac{3}{4}$  Stunden abnimmt und anschliessend konstant bleibt.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

## 4.3 Beobachtungen zu den Messwerten

Die Messwerte (Mittelwerte) sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 6: Zusammenstellung der Mittelwerte aus der Messung im Abluftkamin

<b>Messwert</b>	
<b>Betriebs-Volumenstrom [<math>m^3_B/h</math>]</b>	37'800
<b>Norm-Volumenstrom [<math>m^3_N/h</math>]</b>	24'900
<b>Wassergehalt [<math>g_{\text{Wasser}}/kg_{\text{Luft}}</math>], Mittelwert</b>	67
	min
	44
	max
	80
<b>Enthalpie [kJ/kg] Mittelwert</b>	323
	min
	242
	max
	366
<b>Taupunkt [°C]</b>	46

Der Energiestrom durch das Abluftkamin beträgt damit rund 2,7 MW bei einer Austrittstemperatur von ca. 135°C. Die Umgebungstemperatur lag während der Messzeit bei 28 - 37°C (Mittel ca. 31°C).

## 4.4 Auswertung

#### 4.4.1 Energieflüsse

Aus den Messresultaten können folgende Energieflüsse ermittelt werden:

#### 4.4.1.1 Eintretende Energieflüsse

- Heizdampf
  - Wärme im eintretenden Material (nasse Platten)
  - Elektrizität (UL-Ventilator im Trockner)

#### 4.4.1.2 Austretende Energieflüsse

- Kondensatrückfluss zum Heizkessel
  - Abluft und Wasserdampf durch das Kamin
  - Konvektion und Strahlung der Trockneroberfläche
  - Wärme in den austretenden trockenen Platten

# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

## 4.4.2 Bilanzen

### 4.4.2.1 Energiebilanz

Die Bilanz dieser Energieströme ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Energiebilanz am Trockner

	Eintritt	Austritt	Bilanz / Fehler
	kW		
Dampf	6'527		
Kondensat		2'003	
Platten	71	190	
Elektrizität	40		
Abluft		2'640	
Konvektion		212	
Strahlung		133	
total	6'638	5'178	22.0%

### 4.4.2.2 Plausibilisierung Wasserbilanz

Eine Plausibilisierung der Wasserbilanz zeigt folgendes Bild:

- Plattenzulauf: Wassergehalt 56.7 % (Werksangabe)
- Plattenauslauf 4 % (Werksangabe)

Tabelle 8: Wasserbilanz am Trockner

	Eintritt	Austritt	Bilanz
über Produktemenge und Plattenfeuchte berechnet			4'327
verdampftes Wasser, im Kamin gemessen [kg/h]			2'209
Differenz / Fehler [%]			48.9

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

### 4.4.3 Zusammenfassung, Energieflussbild

Die Auswertung der Messungen ergibt folgendes Energieflussbild:

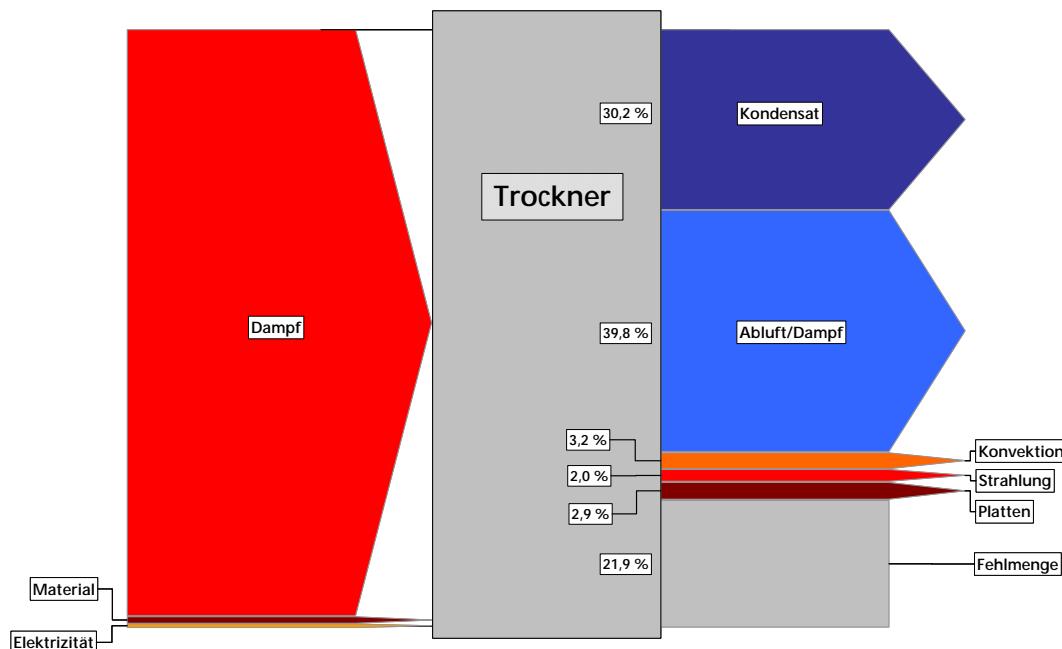


Abbildung 18: aggregiertes Energieflussbild des Trockners Werk 2

Die Grafik zeigt, dass

- die eingebrachte Energiemenge den Trockner zu etwa 40% via Abluft/Wasserdampf verlässt;
- etwa  $\frac{1}{3}$  als Kondensat zum Dampferzeuger zurückgeführt wird;
- rund 5% der eingebrachten Energie sind Verluste durch die Trockneroberfläche;
- etwa 20% der Energie nicht zugeordnet werden können.

### 4.4.4 Beurteilung

#### 4.4.4.1 Trocknereffizienz

Das Verhältnis zwischen effektiv aufgewendeter Wärmeleistung und dem theoretischen Wärmeleistungsbedarf, um das Wasser zu verdampfen, ergibt den Effizienz-Kennwert des Trockners.

Um 4'300 kg Wasser pro Stunde zu verdampfen, braucht es folgende theoretische Wärmeleistung:

Tabelle 9: theoretischer Wärmeleistungsbedarf

	kW	%
Erwärmung des Wassers in den Platten	290	9.3
Verdampfung des Wassers	2'720	87.7
Überhitzen des Dampfs	93	3.0
theoretisch benötigte Wärmeleistung	3'103	

Unter Dampfüberhitzung wird folgendes verstanden: das Wasser verdampft beim Druck im Trockner (= ca. Atmosphärendruck) bei rund 100°C. Der Dampf tritt also mit rund 100°C aus den Platten aus. Im Trockner wird der Dampf anschliessend auf die Temperatur aufgeheizt, mit der er den Trockner durch das Abluftkamin verlässt (rund 135°C).

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Der gemessene Wärmeleistungsbezug beträgt 6'530 kW. Das Verhältnis zwischen effektiv aufgewandter und theoretisch notwendiger Wärme beträgt demzufolge 2,1 : 1.

### 4.5 Verbesserungsmöglichkeiten

#### 4.5.1 Reduktion Abluftverluste

Die Messungen haben gezeigt, dass die Abluft relativ trocken ist; der Wassergehalt beträgt im Mittel knapp 70 g<sub>Wasser</sub>/kg<sub>trockene Luft</sub> (bei einer Schwankungsbreite von min 44 bis max 80 g/kg)

Die Steigerung des Wassergehalts in der Abluft führt zu einer Verringerung des Abluftstroms und damit zu einer Verringerung der Abwärmeverluste. Bezüglich der Verluste in den Abwärmeräumen existiert ein Optimum. Begründung:

- je höher der Wassergehalt der Abluft (bei konstanter Ablufttemperatur von angenommen 135°C), desto höher ist die Enthalpie  $h$  (spezifischer Energieinhalt);
- je höher der Wassergehalt der Abluft (bei angenommener konstanter abzuführender Wassermenge), desto geringer der Luftbedarf und desto geringer die gesamte Menge der abgeführten feuchten Abluft  $m_{tot}$ ;
- Die Wärmeverlustleistung in der Abluft ist das Produkt aus Enthalpie und Abluftmassenstrom. Diese ist wie erwartet eine Hängekurve, es existiert also ein Optimum. Dieses liegt unter den getroffenen Annahmen bei einem Wassergehalt von etwa 220 g/kg.

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 19 gezeigt.

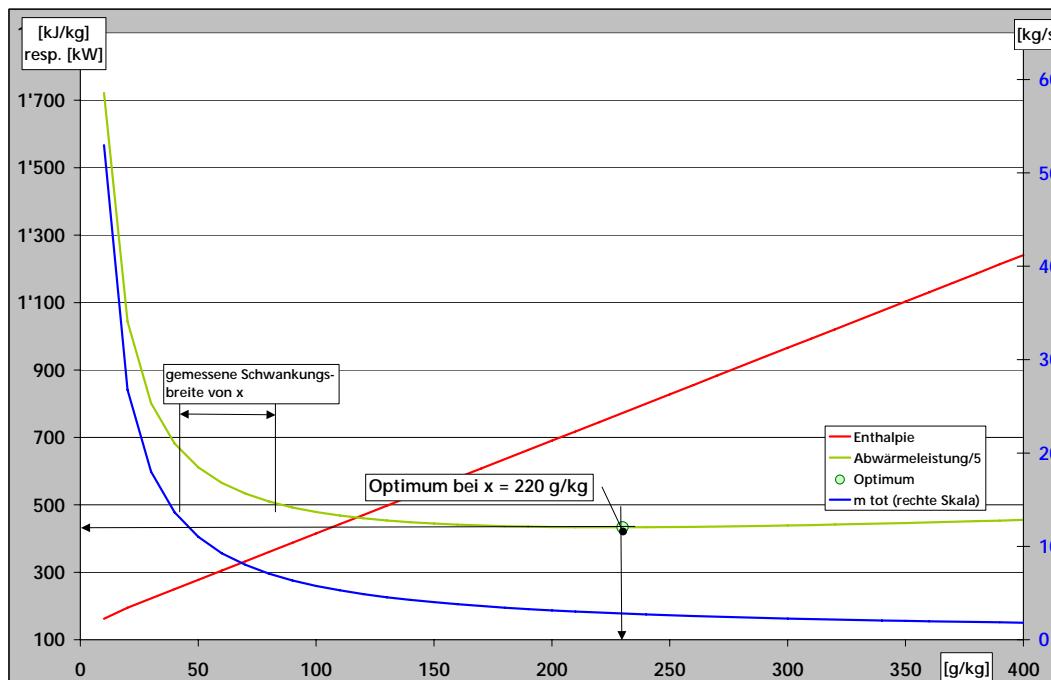


Abbildung 19: Enthalpie und Verlustleistung in Funktion des Wassergehalts in der Abluft

Die Faustregel für die Einsparung lautet etwa:

- pro g Feuchtigkeitserhöhung im Bereich von  $x = 40 - 100$  g<sub>Wasser</sub>/kg<sub>trockene Luft</sub> werden - bei der gemessenen Abluftmenge - rund 20 kW Wärmeleistung eingespart. Das bedeutet bei einer

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

angenommen Betriebszeit von 7'500 Stunden pro Jahr eine Einsparung von rund 150 MWh/a oder rund 270 t Dampf pro Jahr (bei 55 Fr/t<sub>Dampf</sub> entspricht das einer Einsparung von 15'000.- Fr/a)

- pro g Feuchtigkeitserhöhung im Bereich von  $x = 100 - 200 \text{ g}_{\text{Wasser}}/\text{kg}_{\text{trockene Luft}}$  wird - bei der gemessenen Abluftmenge - nur noch rund 2 kW Wärmeleistung eingespart. Das bedeutet bei einer angenommen Betriebszeit von 7'500 Stunden pro Jahr eine Einsparung von rund 15 MWh/a oder rund 28 t Dampf pro Jahr (entspricht bei 55 Fr/t einer Einsparung von 1'500.- Fr/a pro g erhöhten Wassergehalt)

Es ist zu prüfen, ob der Wassergehalt nicht deutlich erhöht werden kann, z.B. von durchschnittlich 70 g/kg auf rund 100 g/kg.

### 4.5.2 Wärmerückgewinnung am Kamin

Die verbleibende Abwärmemenge im Kamin kann weiter genutzt werden.

Heute wird die Ersatzluft (Ersatz der durch den Kamin ausgestossenen, warmen Abluft) von oben am Trockner über einen Ventilator direkt in den Trockner gesaugt und dort von den dampfbeheizten Wärmetauschern aufgeheizt. Mit der Kaminabwärme könnte diese Ersatzluft vorgewärmt werden. Die Luftmenge beträgt rund 22'000 m<sup>3</sup>/h. Die eintretende Luft hat heute eine Temperatur von ca. 50°C (Temperatur oberhalb des Trockners). Durch die Vorwärmung kann Wärme eingespart werden; die eingesparte Leistung hängt von der Temperatur ab, auf die die Ersatzluft vorgewärmt wird.

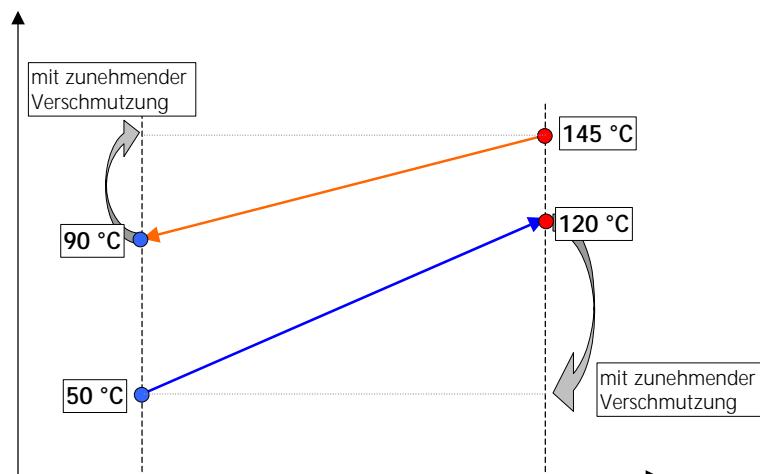


Abbildung 20: Temperaturverlauf Abluft und Ersatzluft im Wärmetauscher

In Abbildung 20 ist der optimale Fall dargestellt, bei dem der Wärmetauscher sauber und damit leistungsfähig ist.

Durch die zunehmende Verschmutzung des abluftseitigen Teils des Wärmetauschers wird der Wärmeübergang schlechter<sup>4</sup>, die übertragene Wärmeleistung geringer und damit die Ersatzluft weniger stark vorgewärmt. Das Verhältnis von Vorwärmtemperatur der Ersatzluft und eingesparter Wärme- menge (eingesparter Dampfmenge) ist in Abbildung 21 dargestellt.

<sup>4</sup> Aufgrund der belasteten Abluft verschmutzen die Wärmetauscher langsam; sie werden mit einer "Isolationsschicht" belegt.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

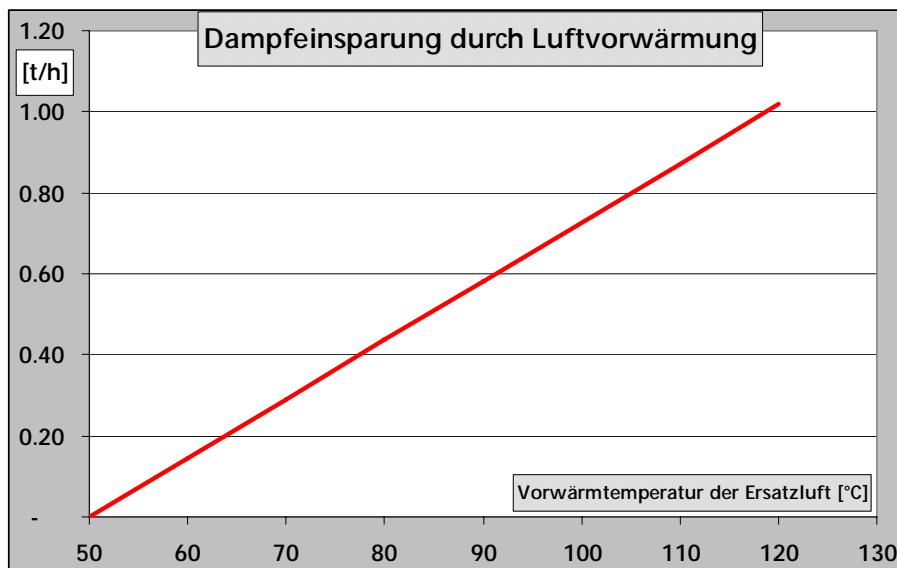


Abbildung 21: Dampfeinsparung durch Ersatzluftvorwärmung bei variablen Bedingungen

Bei starker Verschmutzung kann angenommen werden, dass keine Wärmerückgewinn mehr stattfindet; dieser Zustand werde (Hypothese) in 3 Monaten erreicht. Anschliessend wird der Urzustand durch Reinigung wieder hergestellt. Es wird sich also eine "Sägezahnkurve" einstellen, die wie folgt aussehen dürfte:

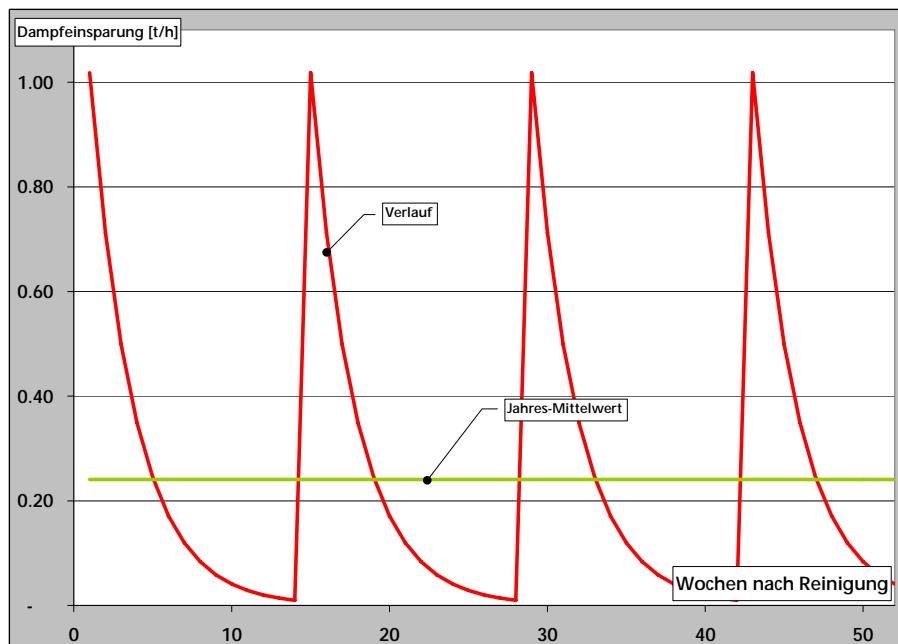


Abbildung 22: Jahresverlauf der rückgewonnenen Wärme (Dampfeinsparung)

Unter diesen Annahmen würde sich eine Jahreseinsparung von etwa 100'000 Fr/a ergeben.

Im Werk 2 wurde diese Form der Wärmerückgewinnung schon versucht, ist aber an der Wärmetauscherverschmutzung gescheitert. Deshalb ist vor einem neuen Versuch ein Wärmetauscher zu entwickeln, der diesen Bedingungen gewachsen ist.

# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

## 4.6 Zusammenfassung

Die vorgeschlagenen Massnahmen führen zu folgenden Einsparungen

Tabelle 10: Zusammenfassung der Einsparungen

Massnahme	Wärmeeinsparung	Dampfeinsparung	Kosteneinsparung
	MWh/a	t <sub>Dampf</sub> /a	Fr/a
<i>Abluftfeuchte auf ca. 100 g<sub>Wasser</sub>/kg<sub>Luft</sub> erhöhen</i>	2'000	3'700	200'000
Ersatzluftvorwärmung (Mittelwert)	1'000	1'800	100'000

## 5. Messung 3: Werk 1, drei Trocknerstufen

### 5.1 Vorgehen, Messstellen und Geräte

Ziel der Messungen war die Ermittlung der Energieflüsse am Trockner des Werkes 1 nach dem Einbau der dritten Trocknerstufe. Messtag war der 14. Mai 2009.

Am Trockner wurden folgende Messungen vorgenommen:

- Menge und Zustand der Abluft durch die beiden Kamine auf dem Dach
- Dampfverbrauch
- Die Oberflächentemperaturen der umgebenden Flächen des Trockners wurden nur überschlägig gemessen, da die Erfahrung aus der ersten Messung zeigte, dass diese Verluste marginal sind und damit geringe Veränderungen noch unbedeutender sind.

Die Abwärme aus den Kaminen wurde wiederum mit je einem Messkreuz (Staudruck → Geschwindigkeit) oben am Austritt der Kamine simultan und kontinuierlich gemessen. Ebenso wurde die Temperatur der Abluftströme kontinuierlich erfasst. Der Abluftzustand (Wassergehalt, Enthalpie, Taupunkt) hingegen konnte nur jeweils alternativ an einem der Kamine gemessen werden.

### 5.2 Vorbemerkung

Die Messwerte waren zu Beginn der Messungen äusserst instabil, da der Trockner ausgefallen war und zuerst in einen Gleichgewichtszustand hochgefahren werden musste. Dieser Gleichgewichtszustand wurde gemäss Werksprotokoll ab 14:30h erreicht.

Daher wurden von den Messungen nur die entsprechend kurzen Strecken in die Auswertung einbezogen.

# Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

## 5.3 Resultate

Es wurden folgende Messresultate ermittelt:

### 5.3.1 Trockner

Eine kurze Überprüfung Oberflächentemperaturen am Trockner ergab, dass die Temperaturen nicht wesentlich von den in der ersten Messung ermittelten abweichen.

Im Kern der Platten und an den Oberflächen wurden folgende Temperaturen gemessen:

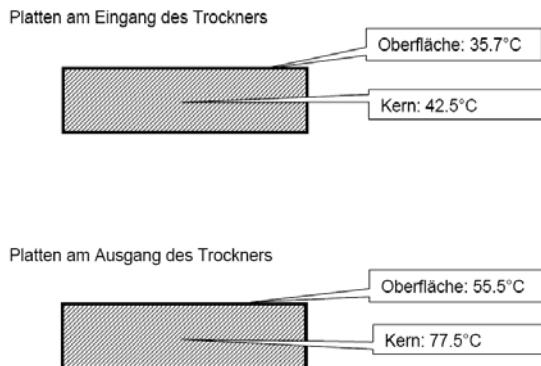


Abbildung 23: Temperaturen der Platten am Ein- und Austritt

### 5.3.2 Abluftkamine

Für die Phase des stabilen Trocknerbetriebs wurden folgende Messwerte ermittelt:

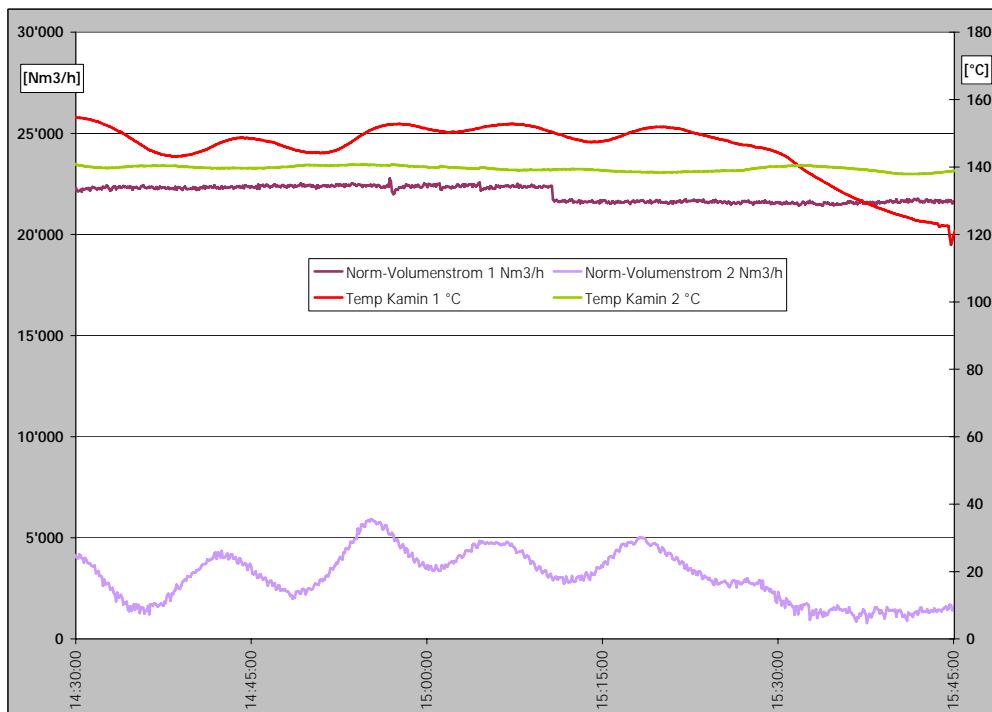


Abbildung 24 Verlauf der Volumenströme und Temperaturen in den beiden Kaminen

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

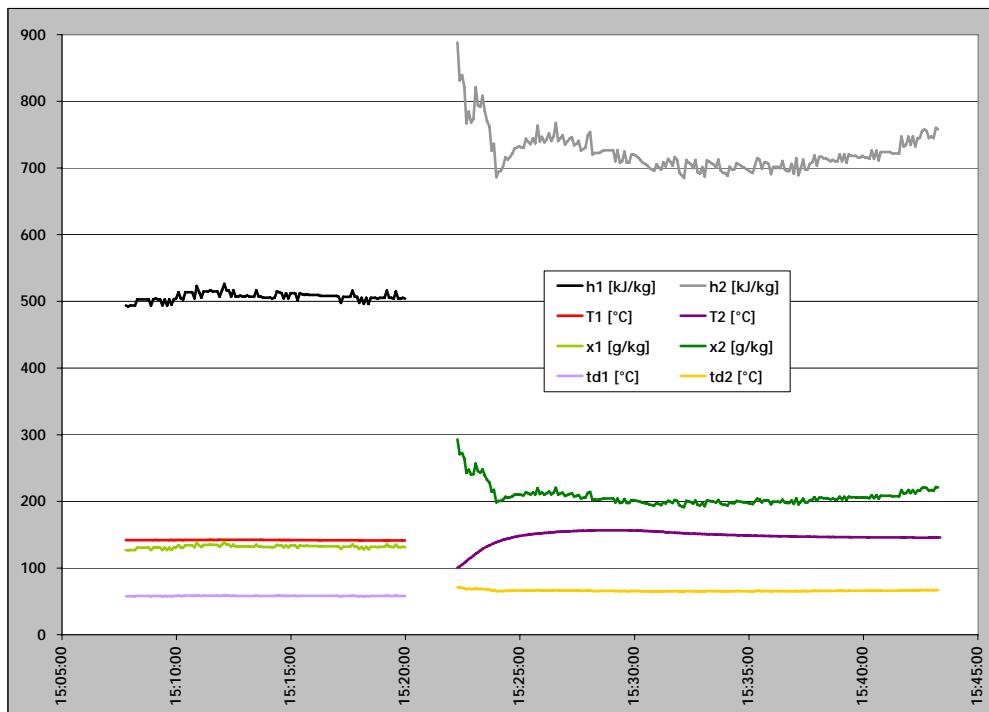


Abbildung 25: Verlauf des Zustandes der Abluft in den beiden Kaminen

Abbildung 24 bestätigt die Erfahrungswerte des Werks, wonach aus dem ersten Kamin der Hauptteil des Abgases austritt. Während der Messzeit war das Massenstromverhältnis etwa 89% Kamin vorne und 11% Kamin Mitte. In Abbildung 25 ist der Unterschied der Abluftzustände dargestellt.

### 5.4 Beobachtungen zu den Messwerten

Die Messungen zeigen, dass die Zustände der Abluft, ebenso die Geschwindigkeiten, sehr stark variieren. Die Mittelwerte der Messwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 11: Zusammenstellung der Mittelwerte der Messungen an den Abluftkaminen

Messwert		
	Kamin 1	Kamin 2
Betriebs-Volumenstrom [ $m^3_B/h$ ]	33'693	4'105
Norm-Volumenstrom [ $m^3_N/h$ ]	21'666	2'701
Ablufttemperatur [°C]	141,9	147,5
Wassergehalt [ $g_{Wasser}/kg_{Luft}$ ]	132,1	207,2
Enthalpie [kJ/kg]	507,1	722,4
Taupunkt [°C]	58,2	65,9

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Es zeigt sich, dass im vorderen Kamin wohl deutlich mehr Abluft hinausgeblasen wird; da aber sowohl die Temperatur als auch der Wassergehalt der Abluft geringer sind als am hinteren Kamin, ist der spezifische Energieinhalt geringer.

Der Energiestrom aus beiden Kaminen zusammen beträgt damit rund 4,1 MW. Die Umgebungstemperatur lag während der Messungen bei  $25 \pm 3^\circ\text{C}$ .

### 5.5 Auswertung

#### 5.5.1 Bilanzen

##### 5.5.1.1 Energiebilanz

Die Bilanz dieser Energieströme ist in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Energiebilanz am Trockner

	Eintritt	Austritt	Bilanz / Fehler
	kW		
Dampf	3'455		
Kondensat		649	
Dampfverbrauch		2'806	
Gas	1'459		
Platten	270	245	
Elektrizität	40		
Abluft		3'967	
Konvektion		200	
Strahlung		100	
total	5'224	5'161	1.2%

##### 5.5.1.2 Plausibilisierung Wasserbilanz

Eine Plausibilisierung der Wasserbilanz zeigt folgendes Bild:

- Plattenzulauf Wassergehalt 50,1% (Werksmessung)
- Plattenauslauf Wassergehalt 6,5% (Werksmessung)

Tabelle 13: Wasserbilanz am Trockner

	Eintritt	Austritt	Bilanz
über Produktemenge und Plattenfeuchte berechnet			3'955
verdampftes Wasser, in den Kaminen gemessen [kg/h]			3'300
Differenz / Fehler [%]			16.6

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

### 5.5.2 Beurteilung

#### 5.5.2.1 Trocknereffizienz

Das Verhältnis zwischen effektiv aufgewendeter Wärmeleistung und dem theoretischen Wärmeleistungsbedarf, um das Wasser zu verdampfen, ergibt den Effizienz-Kennwert des Trockners. Um 3'955 kg Wasser pro Stunde zu verdampfen, braucht es folgende theoretische Wärmeleistung:

**Tabelle 14: theoretischer Wärmeleistungsbedarf**

	kW	%
Erwärmung des Wassers in den Platten	297	10.3
Verdampfung des Wassers	2'480	86.2
Überhitzen des Dampfs	100	3.5
theoretisch benötigte Wärmeleistung	2'877	

Unter Dampfüberhitzung wird verstanden, dass das Wasser beim Druck im Trockner (= ca. Atmosphärendruck) bei rund 100°C verdampft wird. Im Trockner wird der Dampf anschliessend auf die Temperatur aufgeheizt, mit der er den Trockner durch das Abluftkamin verlässt (145°C bis 150°C).

- Effektiv bezogene Wärmeleistung 4'265 kW
- theoretisch nötige Wärmeleistung 2'877 kW

Das Verhältnis zwischen effektiver und theoretisch notwendiger Wärme beträgt demzufolge 1,48 : 1.

### 5.6 Vergleich zum Betrieb mit 2 Trocknerstufen

Die Messungen des Trockners mit 2 Stufen zeigten folgendes Ergebnis:

Das Verhältnis zwischen effektiv aufgewendeter und theoretisch notwendiger Wärme betrug 2,4 : 1.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Der Vergleich der Messungen zeigt damit folgendes Resultat.

### 5.6.1 Trocknereffizienz und spezifischer Wärmeverbrauch

Die Trocknereffizienz betrug bei der Messung mit 2 Stufen 2,4:1, d.h. der Trockner brauchte die 2,4-fache Wärmeleistung, verglichen mit der theoretisch notwendigen. Mit 3 Stufen sinkt dieses Verhältnis auf 1,5:1.

Der spezifische Wärmeverbrauch sinkt dank der dritten Stufe um rund 40%.

### Interpretation

Versucht man diese Verbesserung zu modellieren, zeigt sich folgendes Resultat:

#### Reduzierte spezifische Abluftverluste

Die spezifische Abluftmenge war bei der Messung mit der dritten Stufe um 28% geringer. Die Ausenlufttemperatur war an den beiden Messtagen deutlich unterschiedlich (13°C bei der Messung mit 2 Stufen, 27°C bei der Messung mit 3 Stufen).

Energetisch hat das folgende Konsequenzen:

Die *Abluftmenge* war bei der Messung mit 3 Stufen a) geringer b) weniger warm und c) mit mehr Wasser gesättigt. Dadurch war der spezifische Abwärmeverlust des 3-stufigen Trockners entsprechend geringer.

Die *Nachströmluft* in den Trockner musste im 3-stufigen Fall entsprechend der höheren Aussentemperatur weniger stark aufgeheizt werden; zudem war der Massenstrom der Nachströmluft bei der Messung mit 3 Stufen geringer. Folge: eine weitere Reduktion des spezifischen Wärmeverbrauchs.

#### Geringere Verdampfungsenergie

Die Temperaturdifferenz des Wassers vom Eintritt (in den Platten) in den Trockner bis zum Austritt aus dem Kamin war bei der Messung des 3-stufigen Trockners geringer als beim 2-stufigen Trockner. Dadurch wurde weniger Verdampfungsenergie via Kamin ausgetragen.

#### Energiebilanz der Platten

Die Platten waren am Eintritt in den 3-stufigen Trockner wärmer als beim Eintritt in den 2-stufigen Trockner (40°C statt 33°C). Beim Austritt aus dem 3-stufigen Trockner waren die Platten ebenfalls weniger warm (70°C statt 80°C). Das bedeutet, dass die Platten weniger aufgeheizt werden mussten und weniger Abwärme aus dem Trockner abtransportierten.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

### Ersatz von Dampf durch Gas in der neuen ersten Stufe

Anlässlich der Garantiefahrt der Trocknerverlängerung wurden folgende Werte gemessen

Versuch 1:

- Feuchtigkeit am Trockner-Eingang: 56% TS\*)
- Ende 1. Zone: 72 % TS
- Trockner-Ausgang: 95% TS

\*) TS= Trockensubstanz

Versuch 2:

- Feuchtigkeit am Trockner-Eingang: 49% TS
- Ende 1. Zone: 67.3 % TS
- Trockner-Ausgang: 94% TS

Das heisst, dass im Mittel rund 41% des Wassers in der ersten Stufe ausgetrieben wurden, dazu aber nur etwa 34% des Gesamtverbrauchs in der gasbefeuerten Stufe verbraucht wurden. Diese Effizienzsteigerung entspricht einer Reduktion des spezifischen Verbrauchs von rund 17%.

### 5.6.2 Bemerkungen

Die Temperatur der Platten am Eintritt in den Trockner war bei der zweiten Messung (3-stufiger Trockner) rund 5°C höher, am Austritt lag sie dagegen um rund 10°C tiefer.

Während der ersten Messung wurden 3'100 kg<sub>Wasser</sub>/h verdampft, bei der zweiten Messung 3'956 kg/h.

## 6. Allgemeine Fragestellungen

### 6.1 Wärmeverbrauch in Funktion der Jahreszeit (Aussentemperatur)

Es wird festgestellt, dass im Winter deutlich mehr Wärme verbraucht wird als im Sommer. Abbildung 26 zeigt, dass der Dampfverbrauch im Winter mehr als 25% höher liegt als im Sommer.

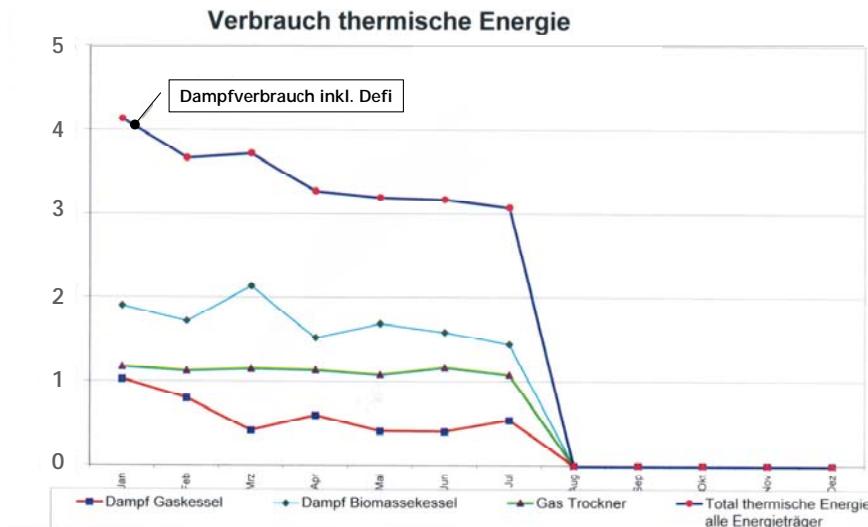


Abbildung 26: Verlauf des Dampfverbrauchs in Funktion der Jahreszeit

Hier stellt sich die Frage: wie ist der Einfluss der Aussentemperatur auf den Prozess und zu welchem Teil ist der Mehrverbrauch Raumklima-bedingt?

Der Wärmeverbrauch wird durch mehrere Faktoren beeinflusst, u.a.

- durch den Feuchtegehalt der Hackschnitzel (im Winter nach Werksangabe etwa 30% höherer Wassergehalt als im Sommer);
- durch die Temperatur der am Trockner angesaugten Luft (= Nachströmluft, d.h. Ersatzluft für die über die Kamine ausgestossene feuchte Abluft);
- durch die Temperatur der in den Trockner eintretenden feuchten Platten;
- durch die Temperatur der den Trockner umgebenden Wände (= Gebäudehülle).

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

Der Wärmeverbrauch wird durch die drei ersten Faktoren wie folgt beeinflusst (grobe rechnerische Abschätzung).

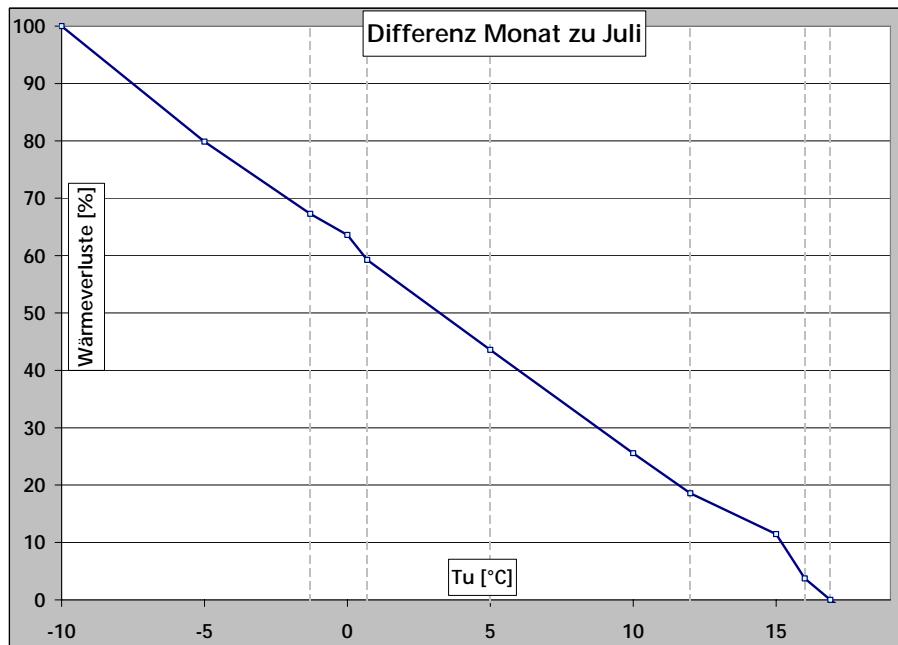


Abbildung 27: rechnerische Abschätzung des Wärme-Mehrverbrauchs durch tiefere Umgebungstemperatur und höheren Wassergehalt der Hackschnitzel.

Der Wert auf der Ordinate zeigt den spezifischen Mehrverbrauch bezogen auf den Sommerverbrauch (Angenommen: Juli)

Die rechnerische Abschätzung des Wärmeverbrauchs für den gesamten Trocknungsprozess ergibt bei  $T_u = 20^\circ\text{C}$  ("Sommer") einen spezifischen Wärmeverbrauch von ca. 89% des Wertes bei  $10^\circ\text{C}$  ("Winter"). Hier ist eingerechnet, dass neben dem Mehrverbrauch für die Aufheizung der kalten Außenluft die Hackschnitzel einen um rund 30% höheren Wassergehalt haben. In die Grafik von Abbildung 26 eingetragen sieht das wie folgt aus:

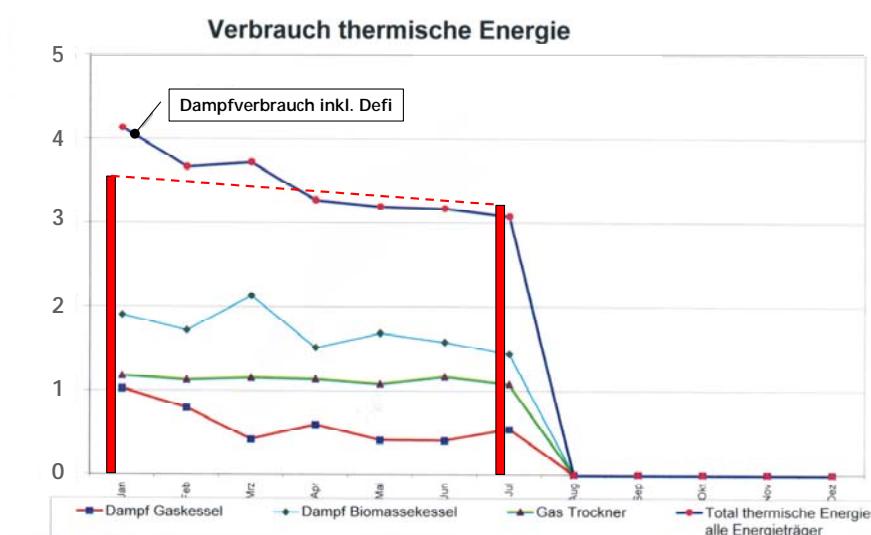


Abbildung 28: Verlauf des Dampfverbrauchs in Funktion der Jahreszeit. Kurven: gemessen; rote Balken/gestrichelte Linie: rechnerische Schätzung (ohne Einfluss Hallentemperatur)

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

### 6.1.1 Umgebende Gebäudehülle / Isolation der Gebäudewände

Die Temperatur der den Trockner umgebenden Gebäudehülle hat einen Einfluss auf den Wärmeverlust des Trockners. Vereinfacht kann man nur den Verlust durch Strahlung rechnen, da die Temperatur der umgebenden Luft in der Halle als unverändert angenommen werden kann.

Der Wärmeverlust ist damit nur von den Materialien der Trockner-Oberfläche sowie der Gebäudewände abhängig und vor allem von den Oberflächentemperaturen von Trockner und Gebäude.

Die Strahlungsleistung (= Wärmeverlust an der Trockner-Oberfläche) berechnet sich mit der 4. Potenz der beiden Temperaturen mit folgender Formel:

$$Q = F \cdot c_{12} \cdot \left[ \left( \frac{T_{Tr}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] / 1000$$

mit

$Q$  Wärmeleistung (= Wärmeverlust) in kW

$F$  Oberfläche Trockner

$c_{12}$  Strahlungskoeffizient Trockner - Gebäude

$T_{Tr}$  Oberflächentemperatur des Trockners

$T_w$  Innen-Oberflächentemperatur der Gebäudehülle

Die abgestrahlte Wärmeleistung ist in Abbildung 29 dargestellt.

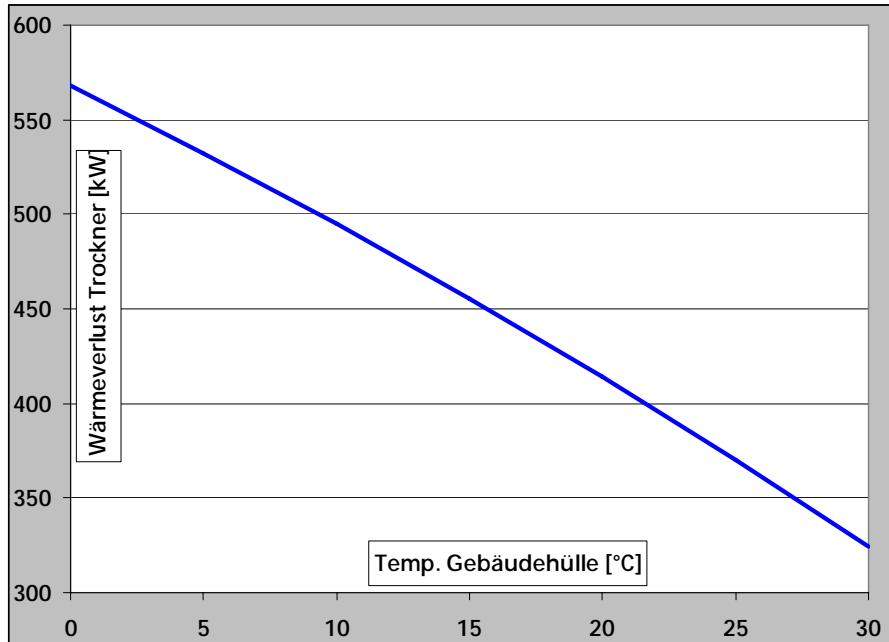


Abbildung 29: Verlauf des Wärmeverlusts des Trockners durch Strahlung in Funktion der Gebäudeoberflächen-Temperatur

Lesehilfe: bei Wandtemperatur (Hülle) von 25°C entsteht ein Wärmeverlust von rund 370 kW. Sinkt die Wandtemperatur (Winter) z.B. auf 10°C ab, steigt der Verlust auf 495 kW an.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

### 6.1.2 Abwärmenutzung zur Hallenluftvorheizung: sinnvoll?

Heute wird die Hallenluft im Winter aktiv aufgeheizt, um Kondensationserscheinungen zu vermeiden. Es besteht die Idee, als Verbesserungsmassnahme die warme Luft oberhalb des Trockners abzuziehen, um die Luft so nicht mehr aktiv aufheizen zu müssen (= Energieeinsparung). Hier stellt sich die Frage: ist das energetisch sinnvoll oder steigen dadurch die Trocknerverluste und die Massnahme ist ein Nullsummenspiel?

#### Abschätzung

Nimmt man an, dass durch das Absaugen der Luft oberhalb des Trockners die Temperatur der Luft sinkt, so ergibt sich folgender Verlauf der Wärmeverluste am Trocknerdach:

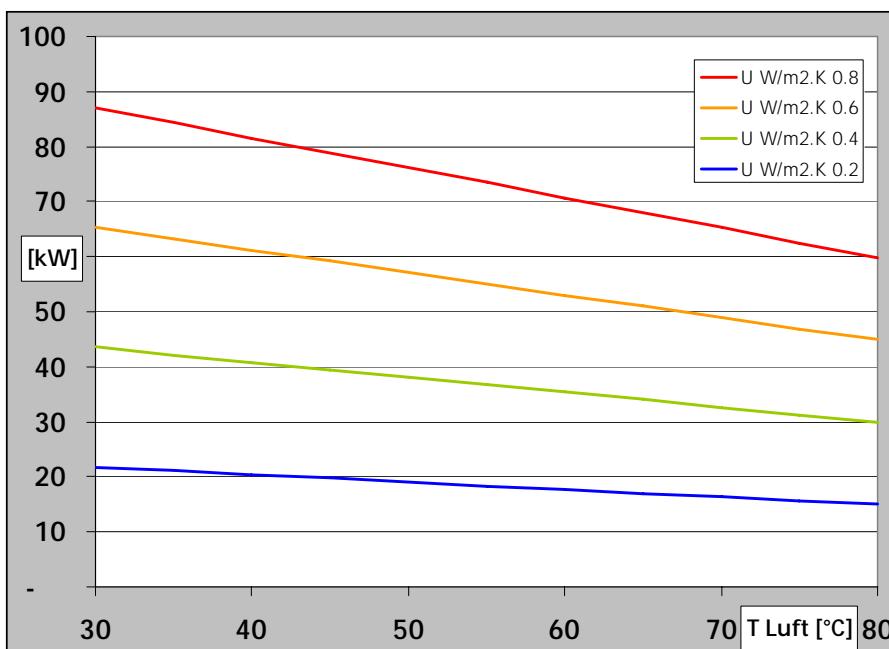


Abbildung 30: Wärmeverlust am Trocknerdach in Funktion der Temperatur der Luft oberhalb des Trockners  
Parameter: unterschiedliche Qualität der Isolation, ausgedrückt als U-Wert.

Der Heizleistungsbedarf für die Hallenluftheizung kann nur grob abgeschätzt werden, da die Berechnungsgrundlagen fehlen (Luftvolumenstrom, der aufgeheizt werden muss).

Nimmt man beispielhaft an, das Hallenvolumen betrage  $(250 \times 6 \times 8) 12'000 \text{ m}^3$ . Abzüglich Trocknervolumen ( $3'300 \text{ m}^3$ ) resultiert ein Luftvolumen von  $8'700 \text{ m}^3$ . Nimmt man weiter an, dass das Luftvolumen 2 - 4 mal pro Stunde ausgetauscht wird, ergibt sich ein Luft-Volumenstrom zwischen  $17'000$  und  $35'000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Nimmt man schliesslich an, dass die Luft frei in die und aus der Halle strömt (keine Wärmerückgewinnung, da Luft nicht geführt) ergibt sich folgender Heizleistungsbedarf in Funktion der Außentemperatur:

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

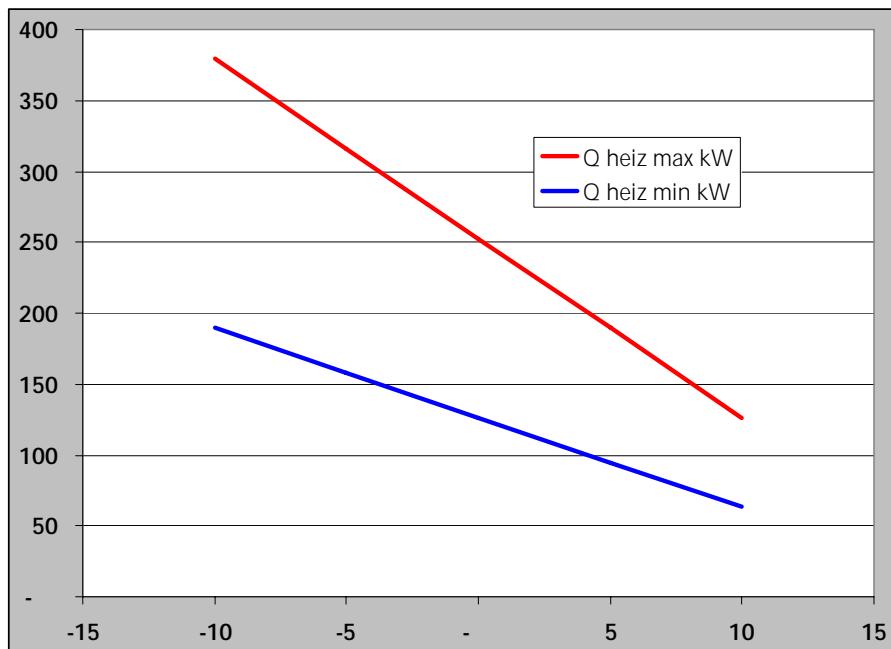


Abbildung 31: Heizleistung unter Annahme obiger Rechendaten  
Rote Linie = Heizleistung bei 4 Luftwechseln/h, blaue Linie: 2 Luftwechsel/h

Abbildung 32 zeigt, dass der Heizleistungsbedarf (wenn die getroffenen Annahmen grob zutreffen) erheblich ist. Es ist zu beachten, dass die Heizleistung linear in der Außentemperatur ist, die Summenhäufigkeit der Außentemperatur (Auftreten in h/a) aber nicht linear ist. Das heisst, dass sehr tiefe Temperaturen nur während weniger Stunden pro Jahr auftreten, höhere Temperaturen aber über sehr lange Perioden.

Nichtsdestotrotz wäre unter diesen Annahmen der Heizleistungsbedarf deutlich grösser als die Erhöhung des Trocknerverlusts (der zudem reduziert werden könnte durch Isolation, vgl. weiter unten). In anderen Worten: die Massnahme "Ersetzen der Heizung durch Abwärmenutzung" wäre energetisch sinnvoll.

Sollten diese Größenordnungen zutreffen hiesse das: das Ersetzen der aktiven Luftheizung durch Abwärmenutzung dürfte zu einer Energieeinsparung führen, da die eingesparte Heizenergie grösser ist als der Zusatzverlust am Trocknerdach.

Unterfrage: ist es sinnvoll, das Trocknerdach nachzusolieren, um damit die Wärmeverluste zu reduzieren? Zur Beantwortung dieser Frage ist die Reduktion der Wärmeverluste in Abbildung 32 dargestellt.

## Prozessanalyse an Faserplattentrocknern

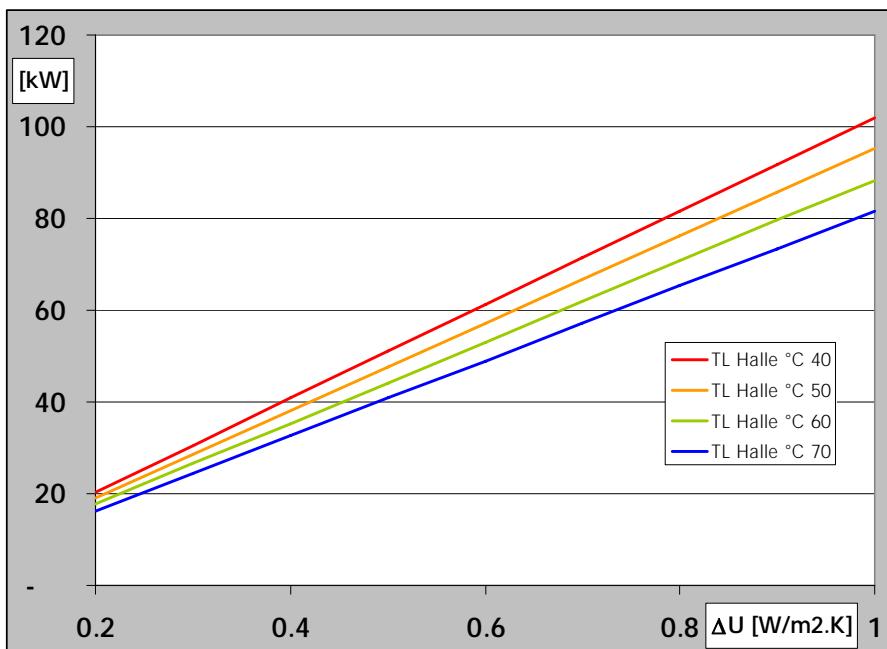


Abbildung 32: Reduktion der Wärmeverluste am Trocknerdach in Funktion der Verbesserung des U-Wertes

### 6.1.3 Pinch-Analyse

Mit der Pinch-Analyse wird - kurz gesagt - analysiert, wo welche Wärmemengen intern zurückgewonnen werden können und das dazu nötige Wärmetauschnetzwerk wird entworfen. Die Optimierung erfolgt aufgrund energetischer und ökonomischer Vorgaben. Das Resultat sind minimierte Wärme-Energiekosten.

Grundsätzlich ist eine solche Analyse bei den Trocknern sinnvoll, da damit in einem nächsten, konkreten Schritt dargestellt wird, wie die in der vorliegenden Messkampagne festgestellten Abwärmemengen (und wohin) zurückgeführt werden können.

Die ausgeführten Messungen haben gezeigt, dass der mit Abstand grösste Wärmeverlust in den Kaminen der Trockner auftritt. Es wird also sicher ein Resultat der Pinch-Analyse sein, dass diese Wärmemenge gefasst und am (derzeit nicht identifizierten) optimalen Punkt in den Prozess zurückgeführt werden soll. Die Abluft aus den Kaminen ist allerdings nicht nur feucht und heiss, sondern auch mit Komponenten belastet, welche einen hohen Siedepunkt aufweisen (d.h. schon bei hohen Temperaturen kondensieren). Das bedeutet, dass der Einsatz eines Wärmetauschers nicht einfach ist (die schlechten Erfahrungen im Werk 2 bestätigen das). Wenn aber diese Abwärme nicht gefasst werden kann, fällt die grösste Abwärmequelle für die Wärmerückgewinnung aus; sollte dies der Fall sein, sinkt der Wert der Pinch-Analyse erheblich.

Es wird deshalb empfohlen, der Pinch-Analyse eine Untersuchung vorzuschalten, in der die (technisch-ökonomische) Machbarkeit der Wärmerückgewinnung aus der Trockner-Abluft belegt werden soll. Diese Untersuchung kann z.B. im Rahmen eines vom BFE unterstützten Forschungsprojekts der Hochschule Luzern durchgeführt werden, das derzeit gerade anläuft.