



Brückner Trockentechnik GmbH & Co. KG  
Benzstraße 8-10  
71229 Leonberg

## **Systemtechnische Entwicklung eines integrierten Konzeptes für die Wärmebereitstellung und Abluftbehandlung einer energieeffizienten Spannmaschine zur Textilveredlung – EnergyEffdryer –**

Abschlussbericht über ein technisch orientiertes Forschungsvorhaben, gefördert  
unter dem Az: 30609 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Zeitraum des Vorhabens:  
Oktober 2012 bis Dezember 2013

Verfasser:

Dipl.-Ing. Bettina Rösch<sup>a</sup>  
Dipl.-Ing. Torsten Reindorf<sup>b</sup>  
Dipl.-Ing. (FH) Mario Schmitt<sup>a</sup>  
Prof. Dr. Joachim M. Marzinkowski<sup>c</sup>

Leonberg, 06.05.2014

a: Brückner Trockentechnik GmbH & Co. KG, Leonberg  
b: Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld  
c: Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal



Brückner Trockentechnik GmbH & Co. KG  
Benzstraße 8-10  
71229 Leonberg

## **Systemtechnische Entwicklung eines integrierten Konzeptes für die Wärmebereitstellung und Abluftbehandlung einer energieeffizienten Spannmaschine zur Textilveredlung – EnergyEffdryer –**

Abschlussbericht über ein technisch orientiertes Forschungsvorhaben, gefördert  
unter dem Az: 30609 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Zeitraum des Vorhabens:  
Oktober 2012 bis Dezember 2013

Verfasser:

Dipl.-Ing. Bettina Rösch<sup>a</sup>  
Dipl.-Ing. Torsten Reindorf<sup>b</sup>  
Dipl.-Ing. (FH) Mario Schmitt<sup>a</sup>  
Prof. Dr. Joachim M. Marzinkowski<sup>c</sup>

Leonberg, 06.05.2014

a: Brückner Trockentechnik GmbH & Co. KG, Leonberg  
b: Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, Clausthal-Zellerfeld  
c: Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal

11/95

**Projektkennblatt**  
 der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	30609	Referat	21	Fördersumme	113.784 €
<b>Antragstitel</b>	<b>Systemtechnische Entwicklung eines integrierten Konzeptes für die Wärmebereitstellung und Abluftbehandlung einer energieeffizienten Spannmaschine zur Textilveredlung – EnergyEFFdryer</b>				
<b>Stichworte</b>	Spannmaschine, Wärmenutzung, Abluftbehandlung, Energieeffizienz, Textilveredlung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>18 Monate</b>	<b>12.07.2012</b>	<b>31.12.2013</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte:	Dezember 2012,	Juni 2013			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	<b>Brückner Trockentechnik GmbH &amp; Co. KG</b>			Tel	<b>(07152) 12-235</b>
	Benzstraße 8-10 71229 Leonberg			Fax	<b>(07152) 12-9235</b>
				Projektleitung	Dr. Klaus Guntermann
				Bearbeiter	Bettina Rösch; Mario Schmitt
<b>Kooperationspartner</b>	<b>Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC)</b> Leibnizstraße 21-23 38678 Clausthal-Zellerfeld Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich <b>Bergische Universität Wuppertal</b> Fachbereich D, Abteilung Sicherheitstechnik Fachgebiet: Sicherheitstechnik/Umweltchemie Univ.-Prof. Dr. Joachim M. Marzinkowski Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal				
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
Spannmaschinen werden weltweit in der Textilindustrie zur Ausrüstung und thermischen Behandlung von bahnenförmigen Textilien eingesetzt. Dabei ergeben sich durch den zunehmenden Anteil von komplexen technischen Textilien und Verbundstoffen immer höhere Anforderungen einerseits an die Prozessqualität und andererseits an einen effizienten energetischen und gleichzeitig auch emissionsarmen Betrieb. Ziel ist es, auf der Basis neuester Erkenntnisse ein Trocknerkonzept zu entwickeln, das Energieeinsparpotenziale konsequent ausschöpft und gleichzeitig die Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt drastisch reduziert, indem eine konsequente systemische Trennung von Trocknungszone und Kondensier- bzw. Fixierzone vorgenommen wird, eine Mehrfachnutzung von Trocknungsluftströmen und eine integrale oxidative Abgasreinigung innerhalb des Wärmereizungssystems des Trockners ermöglicht.					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
Die ersten Messreihen dienen zur Aufnahme der Produktions- und Prozessdaten an der neuen Spannmaschine Power Frame Eco mit zentralem Beheizungssystem. Hierzu wurde eine Produktionsanlage mit Messtechniken zur Volumenstrom- und Temperaturmessung verschiedener Luftströme ausgestattet. Die Gasdurchflüsse zur Ermittlung des Brennstoff- bzw. Energiebedarfs wurden ebenfalls separat für die Trocknungs- und Fixierzone messtechnisch erfasst und kontinuierlich aufgezeichnet. Zur Aufnahme der relevanten Luftinhaltsstoffe wurden verschiedene Gasanalysemethoden eingesetzt. Es wurden dabei Momentanwerte vor Ort bestimmt und Probenahmen zur Laboranalyse gezogen. Die jeweils gefahrene Warenart und eingesetzte Chemikalien wurden dokumentiert. Die gewonnenen Daten dienen neben der Erfassung des Ist-Zustandes zudem als Basis zur Erstellung von Massen-, Energie- und Stoffbilanzen.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt ● An der Bornau 2 ● 49090 Osnabrück ● Tel 0541/9633-0 ● Fax 0541/9633-190					

Daran anschließend wurden Messreihen zur Abluftregeneration durchgeführt. Hierbei wurde der ins System zurückgeführte Abluftvolumenstrom variiert. Zudem wurden die Luftinhaltsstoffe während verschiedener Produktionsarten bestimmt. Der Fokus lag bei diesen Testreihen auf dem benötigten Energieeinsatz, den Konzentrationsverläufen verschiedener Luftinhaltsstoffe und zudem auf der Einhaltung der erwarteten Warenqualität.

Die gesamten gewonnenen Erkenntnisse wurden abschließend zum Ausarbeiten möglicher Systemvarianten herangezogen.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Die angestrebte Reduzierung des einzusetzenden Energiebedarfs durch die Rückführung eines Abluftteilstroms ins System wurde erzielt. Die während des Forschungsvorhabens durchgeführten Messungen zeigten eine Energiebedarfsminderung von 7 - 10 %.

Eine Minimierung der Emissionen durch thermische Oxidation in der bereits vorhandenen Brennkammer konnte unter den gegebenen Bedingungen nicht nachgewiesen werden.

Versuche an der Technikumsanlage im Technologiezentrum der Fa. Brückner zur Nutzung der Abluft als Verbrennungsluft des Gasgebläsebrenners zeigte dagegen eine deutliche Verminderung von CH-Verbindungen. Im derzeit ausgeführten System beträgt der Verbrennungsluftmassenstrom jedoch nur ein Bruchteil des Abluftmassenstroms, weshalb ein Großteil der Abluft auf herkömmliche Weise gereinigt werden muss.

Weiter hat sich ergeben, dass teilweise eingesetzte Silikonöle bei den vorherrschenden Temperaturen zu Silikatausfällungen führen, welche sich in Anlagenkomponenten niederschlagen und zu einem erhöhten Reinigungsaufwand führen.

Alle Versuche führten zu der Erkenntnis, dass die Abluftrückführung ohne Beeinträchtigung der Warenqualität realisiert werden kann.

Die Gesamtheit der Versuchsergebnisse führte zu weiteren Ausarbeitungen für verbesserte Systemvarianten. Als mögliche Varianten werden ein konstruktiver Umbau der bisherigen Brennkammer mit Einsatz anderer Brennertypen und ein Implementieren einer TNV vorgeschlagen. Zum Einsatz einer TNV wurden verschiedene Einbindungsszenarien erstellt, welche die prinzipielle Machbarkeit aufzeigen.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Nach Abschluss des Vorhabens ist geplant, über die Ergebnisse dieses Vorhabens im Rahmen einer Vortragsveranstaltung für Textilveredlungsfachleute zu berichten.

### ***Fazit***

Das Forschungsvorhaben zeigt die grundsätzliche Möglichkeit der Abluftrückführung bei Textilveredelungsprozessen. Eine Energiebedarfsminderung von 7 - 10 % wurde nachgewiesen, für eine gleichzeitige Emissionsreduzierung wurden verschiedene vielversprechende Ansätze ausgearbeitet.

Aufgrund der bisher durchgeführten Arbeiten und gewonnenen Erkenntnisse und der hohen Umweltrelevanz der Energie- und Ressourceneffizienz sollte die Thematik weiter verfolgt werden. Hierzu sind weitere Ausführungen nötig, die innerhalb einer zweiten Phase dieses Forschungsvorhabens realisiert werden können.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Energieeffiziente Spannmaschine Power Frame Eco .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten .....</b>	<b>5</b>
3.1	Messkampagnen .....	5
3.2	Datenaufbereitung und Auswertung .....	5
3.3	Bilanzierung.....	6
3.4	Entwicklung von Verfahrenskonzepten .....	6
3.5	Modellrechnungen .....	6
<b>4</b>	<b>Messergebnisse .....</b>	<b>6</b>
4.1	Einfluss der Frischluftmenge .....	6
4.2	Wirkung der Abluftverteilung .....	8
4.3	Wirkung der Abluftrückführung .....	12
4.3.1	Stationäre Anlagenzustände im Leerlaufbetrieb .....	13
4.3.2	Stationäre Anlagenzustände mit Ware .....	13
4.4	Abluft als Verbrennungsluft .....	16
4.5	Vergilbung .....	18
4.6	Weitere Messergebnisse.....	21
4.7	Bewertung der Messergebnisse.....	22
<b>5</b>	<b>Entwicklung von Verfahrenskonzepten .....</b>	<b>22</b>
5.1	Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs .....	22
5.1.1	Minderung der Transmissionswärmeverluste.....	23
5.1.2	Minderung der abgeführten Massenströme .....	23
5.1.3	Bewertung der Maßnahmen .....	24
5.2	Maßnahmen zur Minderung der Emissionen.....	24
5.2.1	Zusammenfassung der Gegebenheiten.....	24
5.2.2	Vereinfachtes Grundschema.....	25
5.2.3	Kondensation und Stofftrennung .....	27
5.2.4	Biologische Abluftreinigung .....	27
5.2.5	Katalytische Nachverbrennung.....	28
5.2.6	Nicht-thermisches Plasma bzw. Photokatalytische Oxidation.....	29
5.2.7	Aufkonzentration und Nachverbrennung .....	29

5.2.8	Thermische Nachverbrennung.....	31
5.2.9	Bewertung .....	32
6	Modellrechnungen .....	32
6.1	Modellgleichungen.....	33
6.1.1	Massenströme .....	33
6.1.2	Enthalpieströme .....	34
6.1.3	Wärmeverluste .....	34
6.1.4	Brenner .....	35
6.1.5	Wärmeübertrager .....	36
6.1.6	Trockner.....	37
6.2	Allgemeine Randbedingungen und Parameter .....	38
6.3	Bestehendes und untersuchtes Verfahrenskonzept (Beispiel: Trockenfixierung).....	40
6.3.1	Standard-Trockner .....	40
6.3.2	Trockner mit Umgebungsluftvorwärmung (PowerFrame Eco) .....	41
6.3.3	Trockner mit Umgebungsluftvorwärmung und Abluftrückführung.....	43
6.4	Neues Verfahrenskonzept (Beispiel: Trockenfixierung).....	44
6.5	Einfluss der Organik bei Fixierprozessen .....	51
6.6	Neues Verfahrenskonzept (Beispiel: Trocknung) .....	52
6.7	Einfluss der Grenzfeuchte bei Trocknungsprozessen .....	54
6.8	Einfluss der Wärmeübertragergröße .....	55
6.9	Erste Bewertung der Auslegungsbedingungen .....	56
6.10	Optimierter Trocknungsbetrieb.....	57
6.11	Verschiedene Baugrößen .....	59
6.12	Auslegungsdaten .....	60
6.13	Bewertung .....	61
7	Fazit und Ausblick.....	63
	Literaturverzeichnis .....	65

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	<i>Ansicht der energieeffizienten Spannmaschine Power Frame Eco</i> .....	4
Abb. 2:	<i>Verfahrensschema der untersuchten Spannmaschine</i> .....	6
Abb. 3:	<i>Abhängigkeit des Gesamtgasbedarfs vom Gesamtfrischluftstrom (Basis: alle Messwerte)</i> .....	7
Abb. 4:	<i>Abhängigkeit des Gesamtgasbedarfs vom Gesamtfrischluftstrom (Basis: Versuchsmittelwerte)</i> .....	8
Abb. 5:	<i>Angenommene Freisetzungskurven</i> .....	8
Abb. 6:	<i>Einfluss der Abluftverteilung auf die Verteilung der Organik (Basis: alle Messwerte)</i> .....	10
Abb. 7:	<i>Zeitverlauf der Massenströme (Zeitraum 20.08.2013 11:22-14:22 Uhr)</i> .....	10
Abb. 8:	<i>Einfluss der Abluftverteilung auf die Cges-Fracht in der Abluft aus der Fixierzone (Basis: alle Messwerte im Zeitraum 20.08.2013 11:22-14:22 Uhr)</i> .....	11
Abb. 9:	<i>Verlauf der Kohlenstoffkonzentration in den Thermozone mit Änderung des Abluftverhältnisses Trocknungs- und Fixierzone</i> .....	12
Abb. 10:	<i>Einfluss der Abluftrückführung auf den Gasbedarf (Basis: Versuchsmittelwerte)</i> 12	
Abb. 11:	<i>Einfluss der Abluftrückführung auf die mittlere Cges-Konzentration der Abluft (Basis: alle Messwerte)</i> .....	14
Abb. 12:	<i>Einfluss der Abluftrückführung auf die Cges-Fracht in der Abluft (Basis: alle Messwerte)</i> .....	15
Abb. 13:	<i>Einfluss der Abluftrückführung auf die CH<sub>4</sub>-Konzentration (Basis: alle Messwerte)</i> .....	15
Abb. 14:	<i>Abluftrückführung an der Technikumsanlage der Fa. Brückner</i> .....	16
Abb. 15:	<i>Versuche zur Abluftoxidation am Technikumstrockner</i> .....	17
Abb. 16:	<i>Auswirkung der Abluftrückführung auf den CH<sub>4</sub>-Schlupf des Brenners</i> .....	18
Abb. 17:	<i>Korrelation des gemessenen Weißgrades mit den Stickoxid-Konzentrationen</i> ....	19
Abb. 18:	<i>Korrelation des gemessenen Weißgrades mit der Verweilzeit bei verschiedenen Temperaturen</i> .....	20
Abb. 19:	<i>Korrelation des gemessenen Weißgrades mit der Cges-Konzentration in der Abluft</i> .....	21
Abb. 20:	<i>Vereinfachtes Verfahrensschema mit Zusammenfassung der Abluft, vollständiger Abluftrückführung, einem Zentralbrenner und Zuluftkreislauf</i> .....	26
Abb. 21:	<i>Verfahrenskonzept: Reinigung durch katalytische Nachverbrennung im Zentralbrenner</i> .....	28
Abb. 22:	<i>Verfahrenskonzept: Reinigung durch Niedertemperatur-Katalysator in der Fortluftleitung</i> .....	28
Abb. 23:	<i>Verfahrenskonzept: Adsorption-Desorption mit Verbrennung des Desorbatstroms im Zentralbrenner</i> .....	30
Abb. 24:	<i>Verfahrenskonzept: Thermische Nachverbrennung mit Abluftvorwärmung</i> .....	31
Abb. 25:	<i>Vereinfachtes Schema eines direktbeheizten Trockners</i> .....	40
Abb. 26:	<i>Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen bei einem direktbeheizten Trockner</i> .....	41
Abb. 27:	<i>Vereinfachtes Schema eines direktbeheizten Trockners mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft (System Power Frame Eco)</i> .....	42
Abb. 28:	<i>Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen bei einem direktbeheizten Trockner mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft</i> .....	42
Abb. 29:	<i>Vereinfachtes Schema eines direktbeheizten Trockners mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft und Abluftrückführung</i> .....	43
Abb. 30:	<i>Einfluss der Abluftrückführung auf die wesentlichen Prozessgrößen</i> .....	44
Abb. 31:	<i>Direktbeheizter Trockner mit thermischer Nachverbrennung und Wärmerückgewinnung aus der Fortluft (Schema I)</i> .....	45
Abb. 32:	<i>Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen beim TNV-System Schema I im Fall der Trockenfixierung (5-Felder-Trockner)</i> .....	46
Abb. 33:	<i>Einfluss des Abluftstroms auf die Temperaturen beim TNV-System Schema I im Fall der Trockenfixierung (5-Felder-Trockner)</i> .....	47

Abb. 34:	<i>Direktbeheizter Trockner mit thermischer Nachverbrennung und Wärmerückgewinnung aus der Fortluft (Schema II)</i> .....	47
Abb. 35:	<i>Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen beim TNV-System Schema II im Fall der Trockenfixierung (5-Felder-Trockner)</i> .....	48
Abb. 36:	<i>Direktbeheizter Trockner mit thermischer Nachverbrennung und Wärmerückgewinnung aus der Fortluft (Schema III)</i> .....	49
Abb. 37:	<i>Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen beim TNV-System Schema III im Fall der Trockenfixierung (5-Felder-Trockner)</i> .....	49
Abb. 38:	<i>Vergleich der Brennerleistung der verschiedenen Systeme im Fall der Trockenfixierung</i> .....	50
Abb. 39:	<i>Vergleich der verschiedenen Systeme im Fall der Trockenfixierung: (a) Fortluftfeuchte; (b) Fortluftstrom; (c) Fortlufttemperatur</i> .....	51
Abb. 40:	<i>Einfluss des Organik-Gehaltes der Warenbahn bei den verschiedenen Systemen: (a) Gesamtkohlenstoff-Konzentration in der Abluft; (b) Brennerleistung</i> .....	52
Abb. 41:	<i>Vergleich der Brennerleistung der verschiedenen Systeme im Fall der Trocknung</i> .....	53
Abb. 42:	<i>Vergleich der verschiedenen Systeme im Fall der Trocknung: (a) Fortluftfeuchte; (b) Fortluftstrom; (c) Fortlufttemperatur</i> .....	54
Abb. 43:	<i>Einfluss der Grenzfeuchte auf die Brennerleistung der verschiedenen Systeme im Fall der Trocknung</i> .....	55
Abb. 44:	<i>Einfluss der Wärmeübertragergröße bei den TNV-Systemen im Fall der Trocknung: (a) Fortluft-Wärmeübertrager; (b) TNV-Wärmeübertrager</i> .....	56
Abb. 45:	<i>Direktbeheizter Trockner mit thermischer Nachverbrennung und Wärmerückgewinnung aus der Fortluft (Schema IV)</i> .....	58
Abb. 46:	<i>Vergleich der Brennerleistung der verschiedenen Systeme im Fall der Trocknung</i> .....	58
Abb. 47:	<i>Vergleich der berechneten Brennerleistungen für verschiedene Baugrößen: (a) Trockenfixierung; (b) Trocknung</i> .....	59
Abb. 48:	<i>Verfahrenskonzept: Thermische Nachverbrennung mit Abluftvorwärmung, Fortluftabkühlung und Frischluftvorwärmung</i> .....	62

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	<i>Übersicht der eingesetzten Textilhilfsmittel (THM) mit ihren Hauptkomponenten, umweltschädlichen Inhaltsstoffen und Emissionsfaktoren</i> .....	9
Tab. 2:	<i>Leistungsbedarf der Anlage ohne Ware</i> .....	13
Tab. 3:	<i>Zusammenfassung der Messwerte zum Vergleich aktive/inaktive AL-Rückführung</i> .....	13
Tab. 4:	<i>Übersicht des Weißgrads nach Berger und des Präparationmittelgehalts als Methanolextrakt der einzelnen Proben nach Anzahl der Passagen in der Spannmaschine</i> .....	20
Tab. 5:	<i>Auslegungsbedingungen des 5-Felder-Trockners (TNV-Schema III) für die beiden Referenzfälle am berechneten Punkt der minimalen Brennerleistung</i> .....	57
Tab. 6:	<i>Zusammenfassung von Randbedingungen der wesentlichen Anlagenkomponenten für die berechneten Betriebspunkte</i> .....	60
Tab. 7:	<i>Gewählte Auslegungsdaten der wesentlichen Komponenten</i> .....	61



## Formelzeichen

$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/h]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[kW]
$\dot{H}$	Enthalpiestrom	[kW]
$T$	Temperatur	[K]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\eta$	Wirkungsgrad	[%]
$\lambda$	Luftüberschusszahl	[-]
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m <sup>2</sup> *K)]
$p$	Druck	[mbar] [Pa]
$St$	Stanton-Zahl	[-]
$C$	Konzentration	[g/kg]
$x$	Feuchtegehalt	[kg <sub>Wasser</sub> /kg <sub>Luft, tr</sub> ]
$c$	spez. Wärmekapazität	[kJ/(kg*K)]
$r$	spez. Verdampfungsenthalpie	[kJ/kg]
$f$	Flächengewicht	[g/m <sup>2</sup> ]
$w$	Geschwindigkeit	[m/min]
$b$	Breite Warenbahn	[m]
$A$	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
$L$	Länge	[m]
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m <sup>2</sup> *K)]

## Indizes

FL	Frischlufte
AL	Ablufte
AL-Reg	Abluftheregeneration
G1	Erdgasstrom Trocknungszone
G2	Erdgasstrom Fixierzone
FoL	Fortlufte
SL	Schlitzlufte
f	feuchte Luft
tr	trockene Luft
sens	sensibel
lat	latent
inf	inferior
V	Verluste

## Abkürzungen

VOC	flüchtige Kohlenwasserstoffe
$C_{ges}$	Gesamtkohlenstoffkonzentration
AL-Reg	Abluftheregeneration
TNV	Thermische Nachverbrennung
RNV	Regenerative Nachverbrennung
CO	Chemie: Kohlenmonoxid
	Ware: Baumwolle ( <u>C</u> otton)
PES	Polyester

## Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht befasst sich mit der Untersuchung einer Textilspanmaschine unter den umweltrelevanten Themen der Energieeffizienz, somit der Senkung des CO<sub>2</sub> - Ausstoßes und der Emissionsminderung. Die Arbeiten wurden innerhalb des Forschungsvorhabens 'Systemtechnische Entwicklung eines integrierten Konzeptes für die Wärmebereitstellung und Abluftbehandlung einer energieeffizienten Spannmaschine zur Textilveredelung – EnergyEffdryer' durchgeführt, welches durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen Az: 30609 gefördert wurde.

An einer Produktionsanlage wurden mehrere Versuchsreihen zur Evaluierung des Ist-Zustandes und zur Ermittlung des Energieeinsparpotentials einer Abluftrückführung durchgeführt. Die Messergebnisse wurden zudem zur Erstellung von Bilanzmodellen genutzt, um weitergehende Anlagenmodifikationen rechnerisch darstellen zu können. Ein weiterer Schwerpunkt des Forschungsvorhabens bestand in der Aufnahme der Emissionskonzentrationen. Hier war das Ziel, die umweltrelevanten Inhaltsstoffe des rückgeführten Abluftstroms durch thermische Behandlung in der Brennkammer zu reduzieren. Zu beachten war hierbei immer die Einhaltung der Prozessqualität, um die Warenbehandlung ohne Beeinträchtigungen gewährleisten zu können.

Das Forschungsvorhaben wurde von der Fa. Brückner Trockentechnik zusammen mit den Projektpartnern Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH – CUTEC und der Bergischen Universität Wuppertal – BUW ausgeführt. Die Projektpartner haben die Messreihen bei der Fa. Dolinschek GmbH als Anlagenbetreiber durchgeführt.

Das Ziel der Energieeinsparung wurde erreicht. Für die bereits energieeffizient ausgeführte Textilspanmaschine konnte eine weitere Verringerung des Energiebedarfs von 7 – 10 % erreicht werden. Als wichtiger Aspekt kann ebenso festgehalten werden, dass die Abluftrückführung keine negative Beeinflussung auf die Textilausrüstung verursacht.

Die Emissionsverringerung durch thermische Oxidation konnte in der realisierten Version an der Produktionsanlage unter Berücksichtigung der Messfehlergrenzen nicht nachgewiesen werden. An der Technikumsanlage im Technologiezentrum der Fa. Brückner erfolgten dann weitere Untersuchungen, die zu neuen Ansätzen der Lufteinbringung führten.

Ein weiteres Ergebnis des Forschungsvorhabens, welches nicht Bestandteil der Aufgabenstellung war, konnte ermittelt werden. So kann die weitläufige Vermutung in der Textilindustrie, dass Warenvergilbung durch NO<sub>x</sub> in der Prozessluft, erzeugt durch Gasgebläsebrenner im System, verursacht wird, für Polyestertextilien ausgeschlossen werden. Die hier ermittelten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass durch die Ware eingeschleppte Substanzen für die Vergilbung in erster Linie verantwortlich sind.

Die erfolgreich erzielte Effizienzsteigerung durch die Abluftrückführung und das von den Projektpartnern als wichtig erachtete, gewünschte Ziel der Emissionsminderung, führte zu weitergehenden Überlegungen, die Abluftrückführung zu realisieren. In Betracht kommen hier TNV- bzw. RNV-Systeme, die gleichzeitig als Wärmequelle für die Spannmaschine fungieren und in das System integriert werden müssen. Ein weiterer Ansatz besteht in der Modifikation der bestehenden Brennkammer mit Einsatz variierter Gasbrenner. Diese Entwicklungsarbeiten, mit Darstellung der Wirtschaftlichkeit, können innerhalb eines anschließenden und auf die bereits erzielten Ergebnisse aufbauenden Forschungsvorhabens, ausgeführt werden.

# 1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Auf dem Weg zur nachhaltigen und umweltverträglichen Prozessgestaltung in der Textilindustrie soll die Textilveredelung hinsichtlich verfahrenstechnischer Belange weiter verbessert werden.

Die Ausrüstung und Trocknung textiler Bahnen mit Aufheizung der Ware, Verdampfung von Wasser und teilweise aufgebracht chemischer Substanzen bedarf eines hohen Energieaufwands. Unter dem Aspekt der Umweltverträglichkeit, nicht zu vergessen der Produktions- bzw. Energiekosten, lohnt sich eine Betrachtung der Prozessausführung unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz. Dies begründet sich auch dadurch, dass eine höhere Energieeffizienz einen geringeren Brennstoffeinsatz bedeutet, wodurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen gesenkt werden können.

Zur Betrachtung der Umweltrelevanz im Ganzen ist der Blick auf die Thematik der freigesetzten Schadstoffe ebenso wichtig. Während des Textilveredelungsprozesses werden chemische Substanzen emittiert, wobei die Konzentrationen je nach Prozessart stark schwanken. Somit besteht ein weiterer konsequenter Schritt in Richtung Umweltverträglichkeit im Ansatz die Emissionen zu senken.

Die derzeitigen Anlagen sind zur Reduzierung des Energieeinsatzes mit Wärmerückgewinnungsaggregaten versehen, welche die Einbringung vorgewärmter Luft in den Prozess, oder eine Aufheizung von Wasser zur betrieblichen Weiternutzung, ermöglichen.

Schadstoffemissionen werden gegenwärtig durch nachgeschaltete Abluftreinigungsanlagen, wie Wäscher und Elektrofilter, verringert. In spezielleren Anwendungen, wie Beschichtungen textiler Bahnen, werden nachgeschaltete TNVs oder RNVs betrieben.

Unter Federführung der Fa. Brückner Trockentechnik und in Zusammenarbeit mit der Bergischen Universität Wuppertal und dem ITV Denkendorf wurde das Forschungsvorhaben 'Innovative Verfahren zur Energiereduzierung beim Trocknen und Fixieren von textilen Bahnen – InTroFix' [1] mit erfolgreicher Markteinführung einer neu konzeptionierten, energieeffizienten Spannmaschinenausführung durchgeführt und abgeschlossen.

Dieses Konzept zeichnet sich durch ein prozessbezogenes Luftmanagement und einer prozessintegrierten effizienten Nutzung der Abluft aus. Zudem wurde die dezentrale Beheizung der Thermozone durch zwei zentrale Brenneinheiten ersetzt, was zu Überlegungen zur weiteren Verbesserung hinsichtlich einer umweltverträglichen Produktion führte.

Diese Verfahrensweise erlaubt den Entwicklungsansatz zur Rückführung eines Abluftstroms ins System mit gleichzeitiger Regeneration durch eine integrierte oxidative Behandlung der Abluft. Dieses Prinzip soll innerhalb des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekts 'Systemtechnische Entwicklung eines integrierten Konzeptes für die Wärmebereitstellung und Abluftbehandlung einer energieeffizienten Spannmaschine zur Textilveredelung – EnergyEffdryer' untersucht und umgesetzt werden.

Das gesetzte Ziel besteht in der weiteren Senkung des Wärmeenergieeinsatzes durch Rückführung der bereits heißeren Abluft in das System und der Verringerung der Emissionen durch die integrierte thermische Behandlung eines Teilstroms der Abluft. Dieser prozessintegrierte Lösungsansatz ist aus energetischer Sicht anzustreben, da somit nachgeschaltete Abluftreinigungseinheiten entfallen bzw. kleiner dimensioniert ausgeführt werden können. Zudem könnten durch die thermische Reinigung auch gasförmige Schadstoffe besser minimiert werden.

Zur Durchführung des Forschungsvorhabens arbeitet die Fa. Brückner Trockentechnik mit den Kooperationspartnern Clausthaler Umwelttechnik-Institut (CUTEC) und Bergische Universität Wuppertal (BUW) zusammen.

Zu Beginn des Projektes steht die Aufnahme des IST-Zustands der Power-Frame-Eco-Anlage. Aus Feldmessungen gewonnene Daten dienen anschließend auch zur Aufstellung von Massen-, Energie- und Stoffbilanzen. Die Messungen umfassen im Wesentlichen die Aufzeichnung von Anlagen- und Prozessparametern, Temperatur- und Volumenstrommessungen sowie Konzentrationsmessungen von  $\text{NO}_x$ , CO, Feuchte, Gesamtkohlenstoff und einzelner C-H-Verbindungen wie Methanol und Formaldehyd. Zur Vervollständigung der Prozessdaten müssen auch die Warendaten mit spezifischem Gewicht, Eingangs- und Ausgangsfeuchte und chemischer Auftragssubstanzen festgehalten werden. Anschließend an diese Messreihen wird ein Teilstrom der Abluft aus der zweiten Hälfte, der sog. Fixierzone, der vorderen Brennkammer zugeführt, um dort wieder auf Prozesstemperatur aufgeheizt und erneut in den Prozess eingebracht zu werden. Diese Prozessführung wird gewählt, da anzunehmen ist, dass die Abluft der Fixierzone stärker mit Schadstoffen belastet ist. Im vorderen Anlagenteil, der Trocknungszone, wird der größere Anteil an Wasser verdampft, der mit der Abluft abgeführt werden soll. Die Messungen dienen zum einen dazu, Kenntnisse zum Einfluss auf den Energiebedarf zu erhalten. Des Weiteren werden die Schadstoffkonzentrationen in verschiedenen Luftströmen bestimmt. Untersucht wird hierbei die Möglichkeit einer Konzentrationsverringerung von VOC-Emissionen. Wie weit diese thermische Behandlung erfolgreich durchgeführt werden kann, muss immer im Augenmerk bleiben, da eine eventuelle Schadstoffaufkonzentration die Warenqualität beeinträchtigen könnte.

Aufbauend auf die gewonnenen Erkenntnisse folgen die nächsten Schritte zur Entwicklung möglicher Verfahrenskonzepte. Es ist hierbei zu beachten, ob eine Rückführung des Abluftvolumenstroms problemlos realisiert werden kann, ohne den Prozess negativ zu beeinflussen.

Neben der Koordination und Planung des Entwicklungsvorhabens ist die Fa. Brückner während der Feldmessungen für die Ermittlung der gesamten Prozessparameter und Warendaten zuständig. Die untersuchte Anlage, bei der es sich um die neueste Spannmaschinengeneration der Fa. Brückner handelt, wird dafür mit zusätzlicher, festinstallierter Messtechnik ausgestattet. Weiterführende Temperaturmessungen in der integrierten WRG und Messungen der Kohlenstoffkonzentrationen in den Thermozone werden messreihenspezifisch aufgezeichnet. Des Weiteren werden die konstruktiven Anpassungen durch die Fa. Brückner geplant und umgesetzt. Das CUTEC-Institut liefert die weitere Messtechnik zur Bestimmung der Luftinhaltsstoffe und führt am Institut die Analysen der Probenahmen durch. Die BUW

untersucht für die Feldmessungen die freigesetzten Stoffe, welche durch die Ware und auf-gebrachte Veredelungschemie in den Prozess mit eingebracht werden. Dies geschieht durch Heranziehen der Sicherheitsdatenblätter und Extraktionsversuche in den Labors der BUW. Die Aufbereitung und Analyse der Messdaten erfolgt entsprechend bei den jeweiligen Projektpartnern. Das CUTEC-Institut nutzt die gesammelten Daten zur Erstellung von Energie-, Massen und Stoffbilanzmodellen unter Informationseinbringung durch die Fa. Brückner. Als Projektabschluss werden vom CUTEC-Institut mögliche Verfahrenskonzepte aus dem Blickwinkel der Energieeinsparung und des weitestmöglichen VOC-Abbaus ausgearbeitet und von der Fa. Brückner und der BUW aus Sicht der Produktgestaltung sowie Realisierbarkeit bzw. der Produktverträglichkeit und Sicherheitstechnik bewertet.

## 2 Energieeffiziente Spannmaschine Power Frame Eco

Im vorausgegangenen Forschungsvorhaben der Fa. Brückner 'Innovative Verfahren zur Energiereduzierung beim Trocknen und Fixieren von textilen Bahnen' wurde durch ein neu gestaltetes Luftmanagement bereits eine herausragende Energieeinsparung erreicht. Innerhalb der zufällig analysierten Prozessvarianten in den Vergleichsunternehmen wurde eine Energieeinsparung von 20 % erlangt. Die erfolgreiche Umsetzung basiert unter anderem auf der prozessbezogenen Luftführung, die durch eine komplexe Regelung der Anlagen- und Prozessparameter realisiert werden konnte. Dabei wird die benötigte Prozessluft zentral erwärmt und durch eine kanalgeführte Einbringung ins System direkt an die Bedarfsstellen in den Thermozonen gelenkt. Hier wird durch sensorische Ermittlung des Wärmebedarfs nur das tatsächlich notwendige Luftvolumen dem Prozess zugeführt. Ein weiterer Baustein zur Steigerung der Energieeffizienz besteht in der realisierten Durchsaugzone als Eintrittsfeld. Entsprechend der Warenausführung wird die Abluft durch die Ware gesaugt oder bei sehr dichter Ware über die Ware geleitet. Dieses Prinzip ermöglicht eine weitere Nutzung der Abluft als Energieträger zur Vorwärmung der Ware und des Wassers bzw. der Appretur. Eine detaillierte Beschreibung der Anlage, der durchgeführten Messungen und erzielten Ergebnisse ist in [1] nachzulesen.

In Abb. 1 ist die aktuelle Ausführung der Anlage Power Frame Eco zu sehen. Sie zeigt die zwei zentralen Brennkammern der Anlage, die als Voraussetzung und Ansatz für das hier beschriebene Forschungsvorhaben dienen.

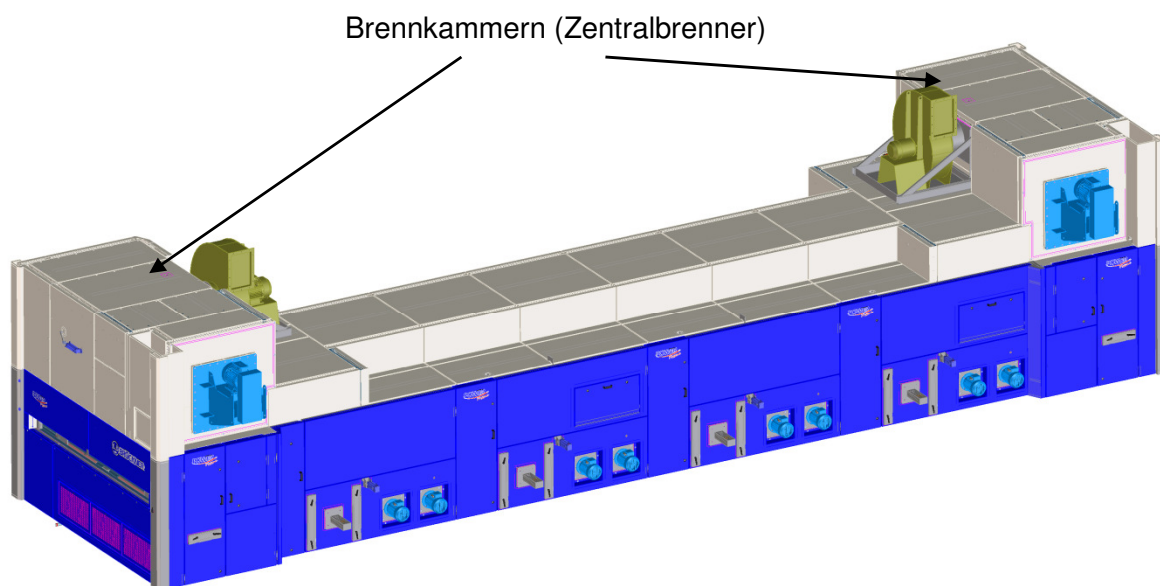


Abb. 1: Ansicht der energieeffizienten Spannmaschine Power Frame Eco

Die ausgeführte Luftführung bei der Power Frame Eco Anlage über zwei zentrale Brennkammern führte bei Überlegungen zur weiteren Effizienzsteigerung zum Ansatz der teilweisen Abluftrückführung in den Prozess. Die Energieeinsparung kann durch das höhere Tem-

peraturniveau des zurückgeführten Abluftvolumenstroms im Vergleich zur Zulufttemperatur erzielt werden.

Das zudem höhere Temperaturniveau der Prozessluft lässt auch in Richtung der Schadstoffverbrennung denken. Deshalb soll ein weiterer umweltrelevanter Aspekt der Emissionsminderung im zurückgeführten Abluftstrom zusätzlich untersucht werden.

## **3 Durchgeführte Arbeiten**

### **3.1 Messkampagnen**

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene mehrtätige Messreihen durchgeführt. Diese dienten zur Aufnahme des Produktionsbetriebs, wie auch zur Ermittlung der Anlagenparameter während speziell durchgeführter Messungen zum stationären Verhalten der Spanmaschine.

Dabei wurden von Brückner jeweils die Betriebsdaten des Trockners ermittelt und punktuelle  $C_{ges}$ -Messungen in den Trocknerfeldern vollzogen.

Folgende Messsysteme wurden verwendet:

- $C_{ges}$ : Bernath Atomic BA 3005
- Thermoelemente NiCr-Ni mit Datenlogger Almemo Ahlborn
- Flügelradanemometer

Das CUTEK Institut war mit der kontinuierlichen Messung von Gaskonzentrationen, Probenahme und Laboranalytik betraut. Zusätzlich wurden punktuell Volumenströme und andere Betriebsdaten gemessen und im Vergleich mit Brückner validiert.

Zur Gasanalyse wurden folgende Geräte eingesetzt:

- $C_{ges}$ : Bernath Atomic BA 3006-K
- CO: ABB Advance Optima Uras 14
- CO<sub>2</sub>: ABB Advance Optima Uras 14
- O<sub>2</sub>: ABB Advance Optima Magnos 16
- NO: ABB EasyLine Limas 11 UV
- NO<sub>2</sub>: ABB EasyLine Limas 11 UV
- H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> und andere: Ansyco Gasmet DX4000 FTIR
- Einzelstoffe: Shimadzu GC-MS QP 5050

Die BUW war für die Dokumentation der eingesetzten Chemikalien und für Untersuchungen des Schadstoffeintrags in den Prozess durch die Ware selbst und Warenauftragschemikalien zuständig.

### **3.2 Datenaufbereitung und Auswertung**

Die bei den Messkampagnen gewonnenen Daten wurden jeweils bei den Projektteilnehmern aufbereitet, ausgewertet und grafisch dargestellt. Die Zwischenergebnisse der Kooperationspartner wurden jeweils bewertet und an Brückner übermittelt. Darauf aufbauend wurde gemeinsam die weitere Vorgehensweise festgelegt.

### 3.3 Bilanzierung

Für die Spannmaschine wurde ein vereinfachtes Modell zur Bilanzierung des Prozesses entwickelt. Die dazu erforderlichen Anlagendaten (Abmessungen, Wärmedurchgangskoeffizienten, MSR-Schema, usw.) wurden von Brückner zur Verfügung gestellt. Mit diesem Modell wurden sämtliche Betriebsphasen nachgerechnet und die Qualität der Messungen überprüft. Weiter wurden anhand der Messungen unbekannte Trocknerparameter ermittelt bzw. angepasst.

### 3.4 Entwicklung von Verfahrenskonzepten

Basierend auf den Ergebnissen der Messungen, den vorhandenen Erfahrungen und durchgeführten Recherchen wurden verschiedene Verfahrenskonzepte entwickelt, evaluiert und bewertet.

### 3.5 Modellrechnungen

Auf dem Bilanzmodell aufbauend wurde ein vereinfachtes Modell entwickelt und an die Erfordernisse der Modellrechnungen angepasst. Um die interessierenden Zusammenhänge zu ermitteln, wurden mehrere Hundert Betriebspunkte teilautomatisiert durchgerechnet und dargestellt. Dabei wurden verschiedene charakteristische Betriebsfälle zugrunde gelegt und die wesentlichen Parameter variiert.

## 4 Messergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse der Messkampagnen dargestellt. Die Mehrzahl der Messungen wurde an einer Spannmaschine der Dolinschek GmbH, Burladingen, durchgeführt, deren Verfahrensschema in Abb. 2 gezeigt ist.

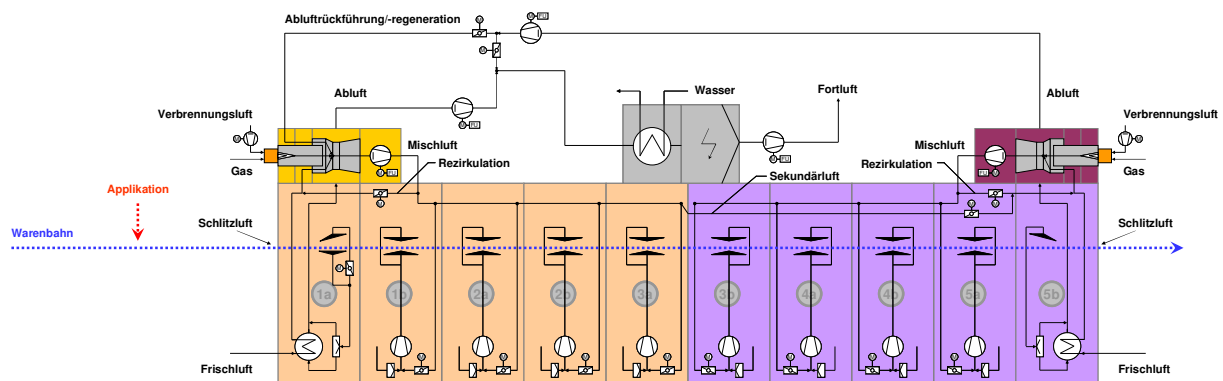


Abb. 2: Verfahrensschema der untersuchten Spannmaschine

### 4.1 Einfluss der Frischluftmenge

Ziel des Projektes ist die Senkung des Brennstoffbedarfs. Da die Transmissionswärmeverluste des Trockners nicht oder nur mit hohem Aufwand reduziert werden können, besteht die einzige Möglichkeit zur Minderung der Brennerleistung in einer Reduktion der Ab-/Fortluftverluste. Da die Ablufttemperatur durch die integrierten Wärmeübertrager (Vorwärmung der Frischluft) bereits stark abgesenkt wird, lassen sich diese Verluste nur durch eine



Verminderung des an die Umgebung abgeführten Abluftstroms reduzieren. Dies kann dadurch erreicht werden, dass ein Teil der Abluft innerhalb des Trockners zurückgeführt und erneut zum Beheizen des Trockners verwendet wird. Dieser zurückgeführte Anteil wird hier als Abluftregeneration bezeichnet, da ursprünglich vorgesehen war diesen Abluftteilstrom in die Brennkammer zu leiten und dort thermisch zu reinigen (bzw. zu regenerieren).

Durch die Rückführung eines Abluftteilstroms vermindert sich die für den Trocknerbetrieb benötigte Frischluftmenge, sodass weniger kalte Umgebungsluft auf die Zulufttemperatur aufgeheizt werden muss. Dies ist verbunden mit einer Minderung des Gasbedarfs.

Abb. 3 zeigt hierzu den gemessenen Gesamtgasbedarf der beiden Zentralbrenner in Abhängigkeit des rechnerischen Gesamtfrischluftstroms. Dieser ergibt sich aus der Gesamtbilanz um den Trockner zu

$$\dot{m}_{FL} = \dot{m}_{AL1} + (\dot{m}_{AL2} - \dot{m}_{ALREG}) - \dot{m}_{G1} - \dot{m}_{G2} - \Delta\dot{m}_{H_2O} - \Delta\dot{m}_{VOC},$$

also aus dem an die Umgebung abgeführten Gesamtabluftstrom abzüglich des Gesamtgasstroms und der im Trockner freigesetzten Mengen an Wasser und Organik.

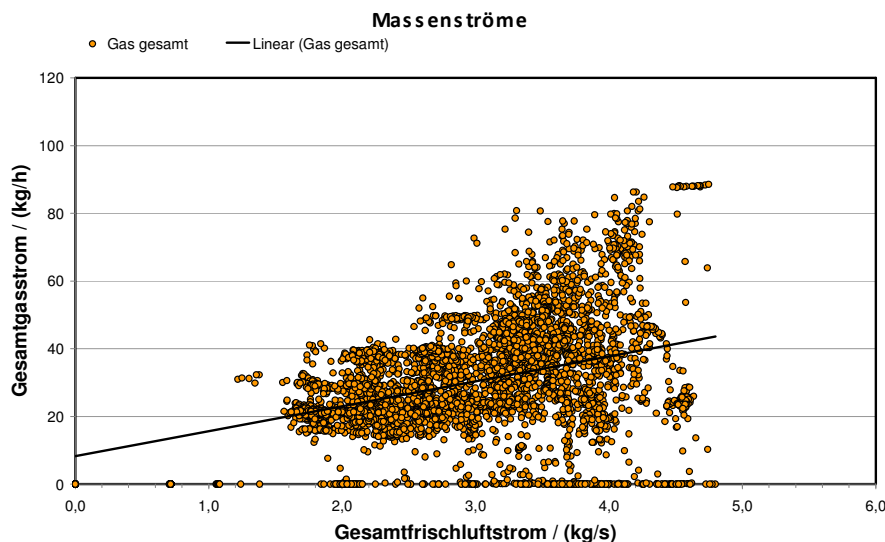


Abb. 3: Abhängigkeit des Gesamtgasbedarfs vom Gesamtfrischluftstrom (Basis: alle Messwerte)

Um den Zusammenhang hervorzuheben wurde eine Regressionsgerade eingezeichnet. Es lässt sich ablesen, dass bei einer Halbierung des Gesamtfrischluftstroms von 4,0 kg/s auf 2,0 kg/s sich der Gesamtgasbedarf ebenfalls etwa halbiert (von ca. 40 kg/h auf 20 kg/h). Der von Null verschiedene Gasbedarf ohne Umgebungsluftzufuhr ist theoretisch begründet durch die Transmissionswärmeverluste.

Die Basis des oben gezeigten Diagramms sind alle gemessenen Momentanwerte aller Messkampagnen. In Abb. 4 ist der gleiche Zusammenhang dargestellt, wobei jedoch die Mittelwerte der einzelnen Versuchsabschnitte zu Grunde gelegt wurden. Der grundsätzliche Zusammenhang bleibt dennoch erhalten.

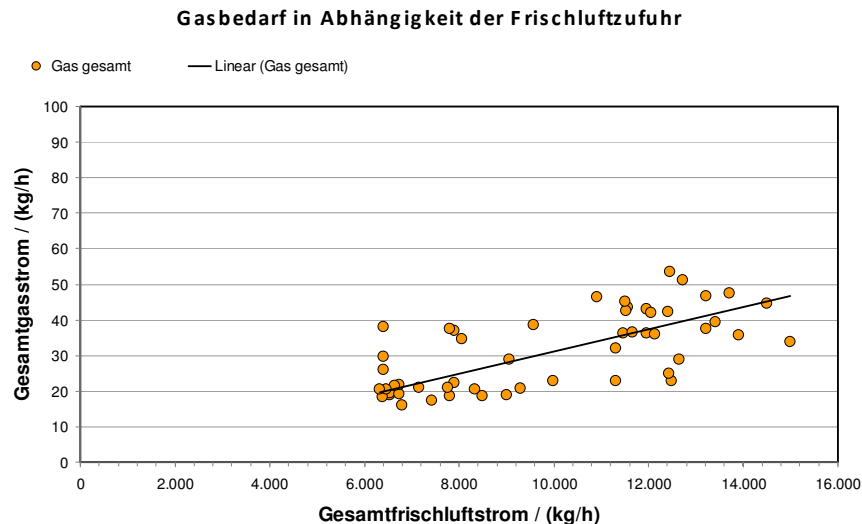


Abb. 4: Abhängigkeit des Gesamtgasbedarfs vom Gesamtfrischluftstrom (Basis: Versuchsmittelwerte)

## 4.2 Wirkung der Abluftverteilung

Die ursprüngliche Zielsetzung des Projektes, Abluft aus der Fixierzone zu regenerieren, ging von der Vermutung aus, dass dort der Hauptteil der Organik freigesetzt wird während in der Trocknungszone hauptsächlich Wasser entweicht (Abb. 5).

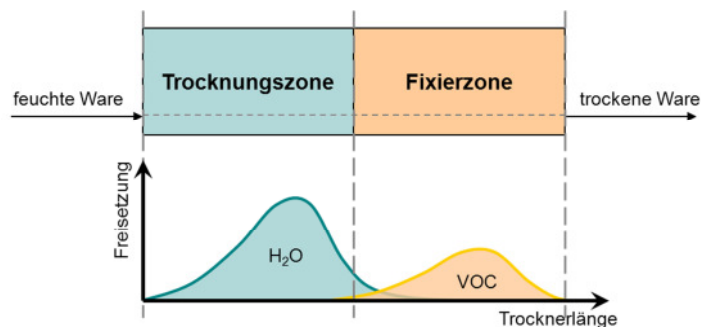


Abb. 5: Angenommene Freisetzungskurven

Diese Annahme wurde in der ersten Messkampagne überprüft, konnte aber für die während dieser Messkampagne nur thermofixierten Waren nicht bestätigt werden. Die  $C_{\text{ges}}$  - Konzentrationen in Abluft 1+2 wiesen kaum Unterschiede auf. Daher wurde zusätzlich untersucht, ob es durch andere Verteilungen der Abluftmengen möglich ist, in dieser Hinsicht eine deutlichere Trennung zwischen den Zonen zu realisieren. Wenn Appreturen durchgeführt werden, ist die Prozesstemperatur niedriger als die des Thermofixierprozesses. Im vorderen Teil der Spannmaschine erfolgt die Verdampfung des Wassers, dessen Anteil am Warengewicht beim Eintritt der Ware in die Spannmaschine in der Regel 60 bis 70 Gew.% bezogen auf das Warengewicht beträgt. Dabei können wasserdampfflüchtige Stoffe (Essigsäure, organische Amine, Lösevermittler wie Ethanol u.a.) mit verdampfen. Formaldehyd aus der Kunstharzausrüstung von cellulosischen Textilien wird jedoch erst bei der Vernetzungsreaktion freigesetzt und wird daher eher im hinteren Teil der Spannmaschine in der Abluft erwartet.

Die  $C_{ges}$ -Fracht ist als Summenwert  $f_C$  beispielsweise mit 20 g C/kg Textil im Sicherheitsdatenblatt des Lieferanten des Appreturmittels angegeben. Bei einer Konzentration von 30 g/L eines Appreturmittels mit  $f_C = 20$  g C/kg in der wässrigen Appreturflotte und einer Flottenaufnahme der Ware von 60% Appreturflotte sowie einem Abluftvolumen von  $9 \text{ m}^3_N/\text{kg}$  Ware wird zum Beispiel eine Konzentration von  $41 \text{ mg C/m}^3_N$  als  $Wf_C$  in der Gesamt-Abluft errechnet. Die oben geäußerte Annahme geht nun davon aus, dass erst nach dem Verdampfen des Wasseranteils der Ware und beim Erreichen der Prozesstemperatur durch die Ware diese C-Fracht in überwiegender Menge von der Ware in die Abluft abgegeben wird. Hierfür wurde ein Berechnungsmodul zur Anwendung gebracht. Danach entsprachen alle berechneten  $Wf_C$ -Werte der Appreturrezepte den gesetzlichen Vorgaben.

Tab. 1: *Übersicht der eingesetzten Textilhilfsmittel (THM) mit ihren Hauptkomponenten, umweltschädlichen Inhaltsstoffen und Emissionsfaktoren*

THM	Hauptkomponente	Gefährliche Inhaltsstoffe	fs(CO)	fc(CO)	fs(PES)	fc(PES)
A1	Wässrige Emulsion eines aminofunktionellen Polysiloxans	1) Siloxan und Silikon, {3-[(2-Aminoethyl)amino]propyl)methyl-, Dimethyl-, hydroxyterminiert 2) Isotridecanoethoxylat 3) Poly(oxy-1,2-ethandiyloxy)- $\alpha$ -(2propylheptyloxy)- $\omega$ -hydroxy[...]				
A2	Polyurethandispersion	Essigsäure				
A3	Polyestermischpolymerisat, wässrige Lösung	Polymer Fettkoholethoxylat				
K	Reaktantvernetzer auf Basis eines Dimethyloldihydroxyethylenhamstoffes	1) Diethylenglykol 2) Methanol 3) Formaldehyd	150 °C: Formaldehyd 2,1 g/kg	150 °C: 12 gC/kg	170 °C: Formaldehyd 4,1 g/kg Methanol 55g/kg	170 °C: 20 gC/kg
KK	Säurespender auf Basis Magnesiumchlorid	Keine			170 °C: Chlorwasserstoff 0,4 g/kg	
KO	Entlüfter auf Basis organomodifizierter Siloxane	1) 2-Propylheptan-1-ol 2) Isotridecanoethoxylat 3) 2-Ethylhexan-1-ol 4) (2-Methoxymethylethoxy)propanol				
N	Fluorpolymer	Alkohole, C16-20, ethoxyliert				
T1	Emulsion auf Basis eines modifizierten Silikonpolyethers	Keine				
T2	Emulsion eines Organosiloxans	1) Polydimethylsiloxan, diquaternär 2) Isotridecanoethoxylat 3) Isotridecanoethoxylat				

Abb. 6 zeigt hierzu den Anteil der  $C_{ges}$ -Fracht, die bei der Thermofixierung von Polyesterware auf einer Spannmaschine mit fünf Feldern als vorher nicht ausgewaschene Präparation verdampft wird, in der Abluft aus der Fixierzone in Abhängigkeit des Anteils des Abluftmassenstroms. Für diese Darstellung wurden wieder alle verfügbaren Messwerte zu Grunde gelegt. Es wird deutlich, dass unter den gegebenen Bedingungen die Abluftverteilung im Mittel kaum einen Einfluss auf die Verteilung der Organik besitzt.

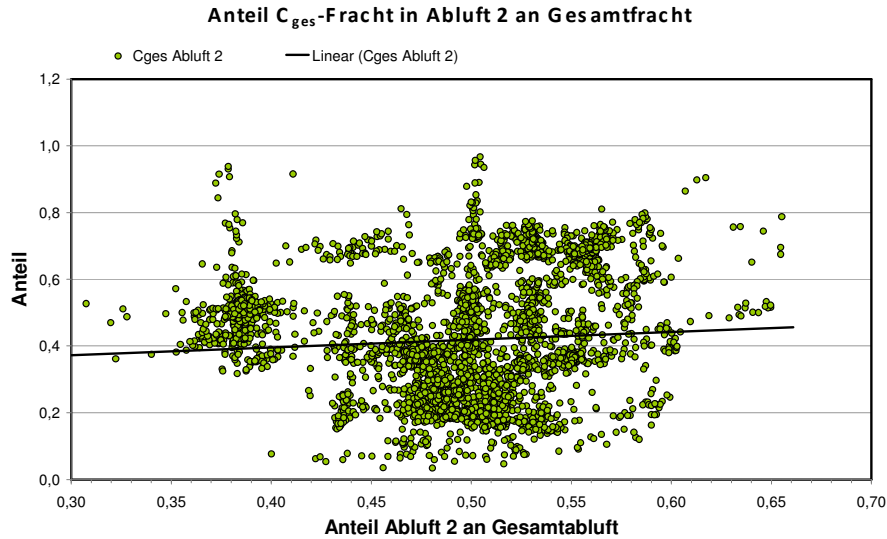


Abb. 6: Einfluss der Abluftverteilung auf die Verteilung der Organik (Basis: alle Messwerte)

Am 20.08.2013 zwischen 11:22 und 14:22 Uhr wurde dies genauer untersucht indem die Verteilung der Abluftmengen aus der Trocknungszone / Fixierzone versuchsweise umgekehrt (Abluft 2 von 35% auf 57%) wurde (Abb. 7). Der Anteil der  $C_{ges}$ -Fracht in Abluft 2 nahm dadurch von etwa 0,5 auf 0,7 zu (Abb. 8). Demnach lässt sich die Trennschärfe zwar geringfügig verbessern, allerdings nicht in einem Maße, dass es erlauben würde, auf eine Behandlung der Abluft aus der Trocknungszone zu verzichten.

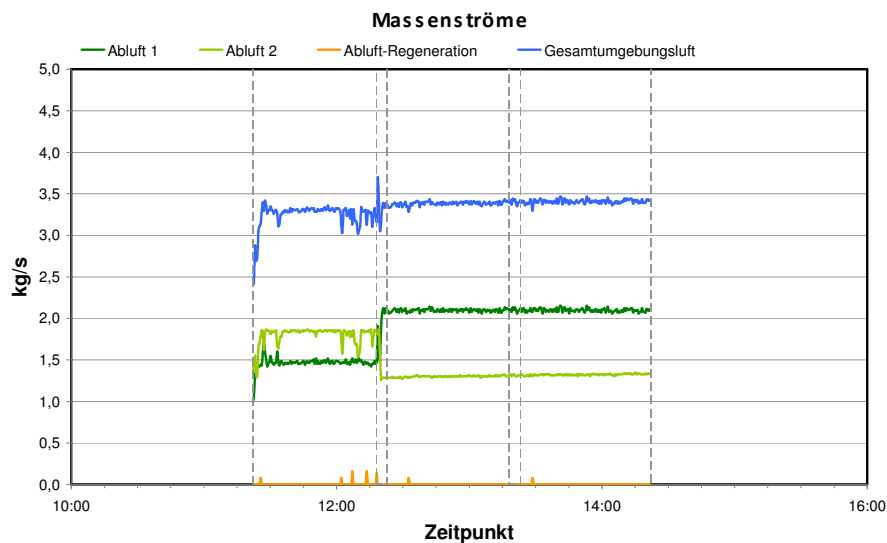


Abb. 7: Zeitverlauf der Massenströme (Zeitraum 20.08.2013 11:22-14:22 Uhr)

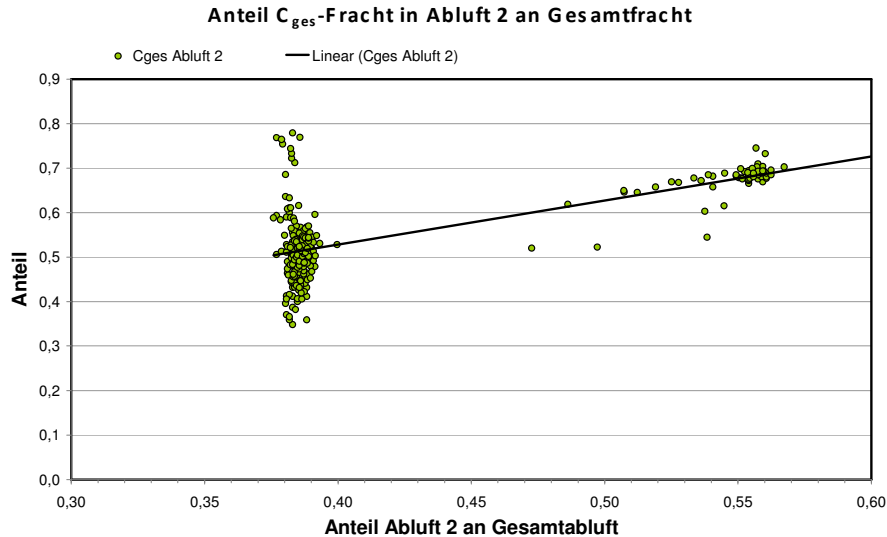
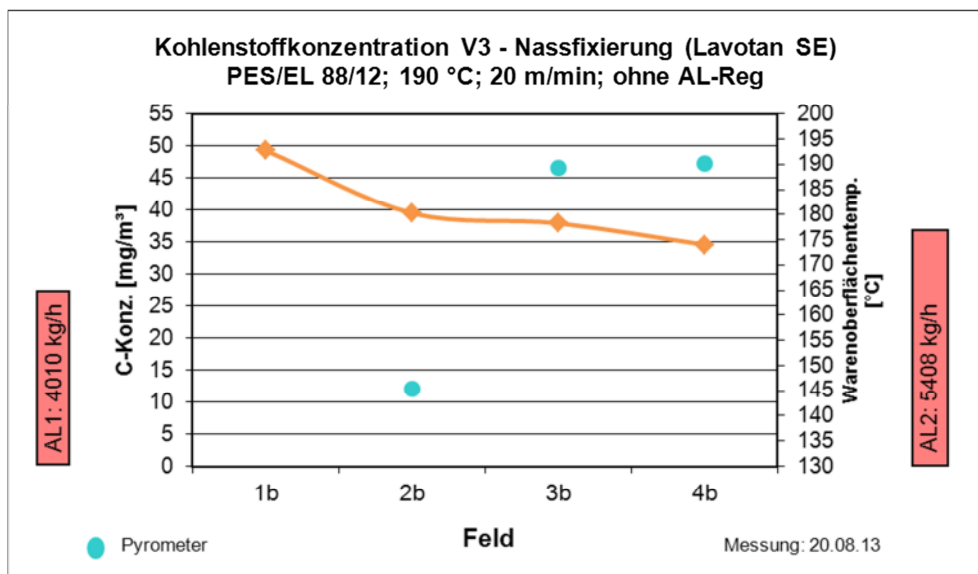


Abb. 8: Einfluss der Abluftverteilung auf die  $C_{ges}$ -Fracht in der Abluft aus der Fixierzone (Basis: alle Messwerte im Zeitraum 20.08.2013 11:22-14:22 Uhr)

Die  $C_{ges}$ -Konzentration wurde des Weiteren in den Thermozone ermittelt. Hier zeigt sich die gleiche Tendenz zur Konzentrationsverteilung in der Abluft und des Einflusses der Abluftverteilung (Abb. 9). Es wurde zwar ein veränderter Verlauf der  $C_{ges}$ -Konzentration gemessen, es ist jedoch keine signifikante Verschiebung innerhalb der Trocknungs- und Fixierzone zu erkennen. Eine beliebige Verschiebung der Abluftvolumenströme ist zudem nicht möglich, da hierrüber der Frischlufteintrag, die Prozessluftfeuchte und das Gleichgewicht zur Umgebung geregelt werden.

Insofern konnte die ursprüngliche Vermutung nicht in vollem Umfang bestätigt werden.



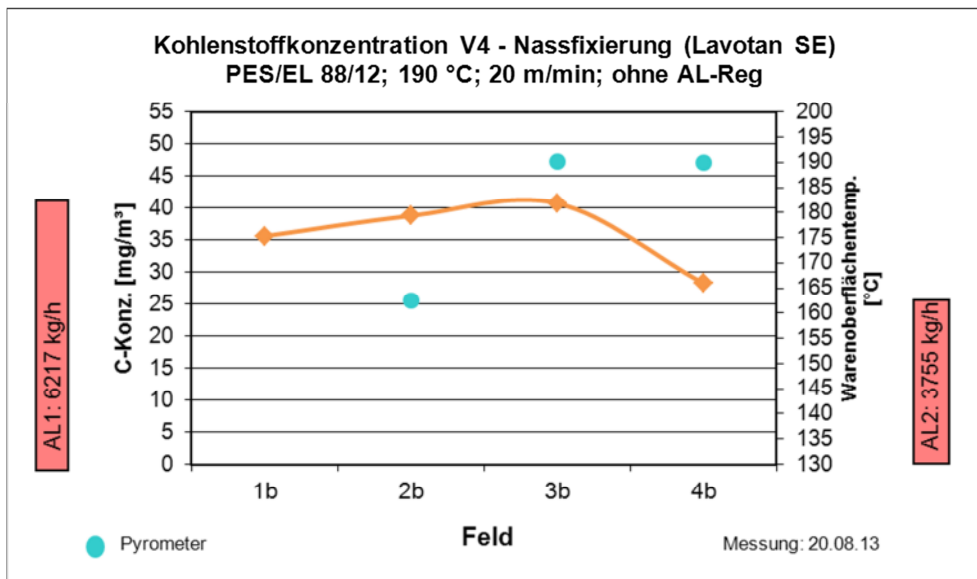


Abb. 9: Verlauf der Kohlenstoffkonzentration in den Thermozone mit Änderung des Abluftverhältnisses Trocknungs- und Fixierzone

Ursache für dieses Verhalten ist, dass die Trocknungs- und Fixierzone fluiddynamisch nicht voneinander getrennt sind und auch die Freisetzung von Wasser bzw. Organik räumlich nicht festgelegt ist. Sie hängt vielmehr von der Feuchte, der Auflage, den verwendeten Appreturen, den Umluftmengen und -temperaturen in den einzelnen Zonen und der Geschwindigkeit der Warenbahn ab.

### 4.3 Wirkung der Abluftrückführung

Obwohl es nicht ausreichend ist, nur die Abluft aus der Fixierzone zu regenerieren, bleibt der energetische Vorteil der Abluftrückführung dennoch erhalten. In Abb. 10 ist hierzu der Gesamtgasbedarf in Abhängigkeit des zurückgeführten Abluftmassenstroms dargestellt. Es ist erkennbar, dass eine deutliche Energieersparnis erzielt werden kann.

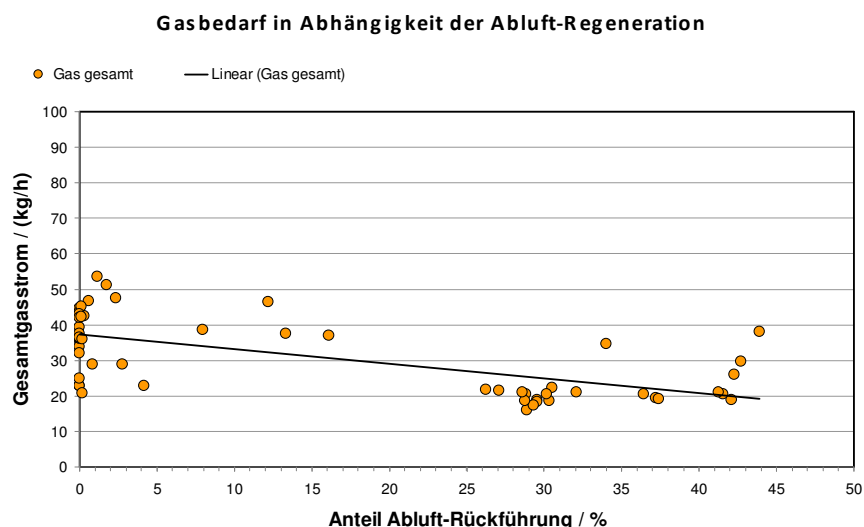


Abb. 10: Einfluss der Abluftrückführung auf den Gasbedarf (Basis: Versuchsmittelwerte)

Wie in Abb. 10 zu sehen, wurden bis zu 50 % der Abluft rückgeführt. Ein größerer Volumenstrom konnte im Versuchsstadium zum einen konstruktiv bedingt nicht eingespeist werden. Zum anderen mussten die Emissionswerte im Blick gehalten werden. Der in Abb. 10 ermittelte Zusammenhang wurde bei verschiedenen Betriebszuständen ermittelt. Zur Darstellung des reduzierten Energieeinsatzes wurden ergänzende Messungen unter gleichen Prozessbedingungen durchgeführt.

#### 4.3.1 Stationäre Anlagenzustände im Leerlaufbetrieb

Der ermittelte Wärmebedarf bei einem Anlagenbetrieb ohne Ware zeigt keinen signifikanten Unterschied bei Einstellungen mit aktiver oder inaktiver Abluftrückführung.

Dieses Ergebnis ist damit zu begründen, dass durch die fehlende Lastabnahme in den Thermozonen so gut wie keine Luftzumischung nötig ist. Dadurch erhöht sich der Rezirkulationsluftstrom und die zugeführte Raum- bzw. Abluft wird nur noch in einem sehr geringen Anteil benötigt.

Tab. 2: Leistungsbedarf der Anlage ohne Ware

Prozesseinstellung	Wärmeleistung [kW]
ohne AL-Reg	268
mit AL-Reg	275
mit AL-Reg; T_Vorl -20 °C	252
mit AL-Reg; WRG2 Bypass	266
<b>Mittelwert</b>	<b>265</b>

#### 4.3.2 Stationäre Anlagenzustände mit Ware

Die durchgeführten Vergleichsmessungen sind in Tab. 3 aufgelistet. Zur Darstellung der Leistungsbedarfe wird der Versuch 5 ohne AL-Rückführung mit den Versuchen 6 und 7, jeweils mit AL-Rückführung, verglichen. Ebenso wird mit den Versuchen 8/9 bzw. 10/11 verfahren.

Tab. 3: Zusammenfassung der Messwerte zum Vergleich aktive/inaktive AL-Rückführung

Versuchs-Nr.		Vorl.temp. 1 [°C]	Vorl.temp. 2 [°C]	T_ZL1 [°C]	T_ZL2 [°C]	T_AL1 [°C]	T_AL2 [°C]	Q_vorne [kW]	Q_hinten [kW]	Q_ges [kW]	Änderung Q_vorne [%]	Änderung Q_hinten [%]	Änderung Q_ges [%]
5	ohne AL-Reg	379,2	280,9	81,4	104,4	83,5	88,8	354,4	184,4	538,8			
6	mit AL-Reg	373,0	280,1	104,4	92,3	83,2	153,9	410,4	71,8	482,2	15,8	-61,1	10,5
7a	mit AL-Reg	376,2	281,6	86,1	91,7	81,2	152,9	391,4	86,9	478,3	10,5	-52,9	11,2
7b	mit AL-Reg	376,3	279,5	85,7	90,7	81,0	152,4	404,9	86,4	491,3	14,3	-53,1	8,8
8	ohne AL-Reg	385,8	286,0	83,4	106,2	83,8	93,8	426,4	216,4	642,7			
9	mit AL-Reg	337,0	285,8	97,1	118,2	77,7	144,8	522,1	106,1	628,2	22,5	-51,0	2,3
10	ohne AL-Reg	344,4	266,7	88,3	104,6	85,2	91,5	329,9	201,1	530,9			
11	mit AL-Reg	334,8	270,6	85,7	90,7	78,7	156,3	373,9	134,7	508,6	13,3	-33,0	4,2

Für den Leistungsbedarf im vorderen Anlagenabschnitt ergibt sich durch die Abluftrückführung eine Erhöhung des Gasverbrauchs von 10 – 15 %. Für den hinteren Anlagenteil wird

eine Reduzierung erzielt, die mehr als 50 % unter dem vorherigen Wert liegt. Bezogen auf das Gesamtsystem ergibt sich eine Einsparung zwischen 9 % und 11 %.

Die Vergleichsmessung 8/9 zeigt im Gesamten eine nur geringe Einsparung von 2 %, die im Bereich der Messfehlertoleranz liegt. Ein Blick auf die Vorlauftemperatur 1 zeigt jedoch bei Versuch 9 eine deutlich geringere Vorlauftemperatur. Dies wurde durch mehrere produktionsbestimmte Stopps der Anlage verursacht, weshalb die berechnete Vorlauftemperatur nicht erreicht wurde und der vordere Brenner somit auf Vollast lief. Wird hier die zuvor ermittelte Erhöhung des Gasverbrauchs vorne von 15 % angesetzt, ergibt sich hier eine Gesamteinsparung von 7 %.

Die letzte Vergleichsmessung 10/11 ergibt eine Gesamteinsparung von 4 %. Die erneut gemessene Erhöhung des Gasverbrauchs am vorderen Brenner von 13 % untermauert zusätzlich die Größenordnung, welche für die Versuche 8/9 angesetzt wurde.

Die unterschiedlichen Werte zur Energieeinsparung in der Fixierzone, sind bedingt durch Drehzahländerungen der Prozessluftventilatoren, welche die gesamten Luftvolumenströme und somit die erforderliche Mischtemperatur beeinflussen.

Die Messungen zeigen, dass durch die Abluftrückführung bei optimalen Einstellungen zur Luftstromregulierung eine Verringerung des Energiebedarfs zwischen 7 % und 10 % erreicht werden kann.

Neben der realisierbaren Brennstoffersparnis soll weiter untersucht werden, ob die zurückgeführte Abluft in der heißen Brennkammer gereinigt wird indem die enthaltene Organik oxidiert wird. Dies konnte so jedoch nicht bestätigt werden. Trägt man die gemessenen  $C_{ges}$ -Konzentrationen (hier die mittlere Konzentration aus der Mischung der beiden Teilströme) über dem zurückgeführten Abluftanteil auf (Abb. 11), stellt man sogar fest, dass der Gehalt an Organik durch die Abluftrückführung im Mittel zunimmt.

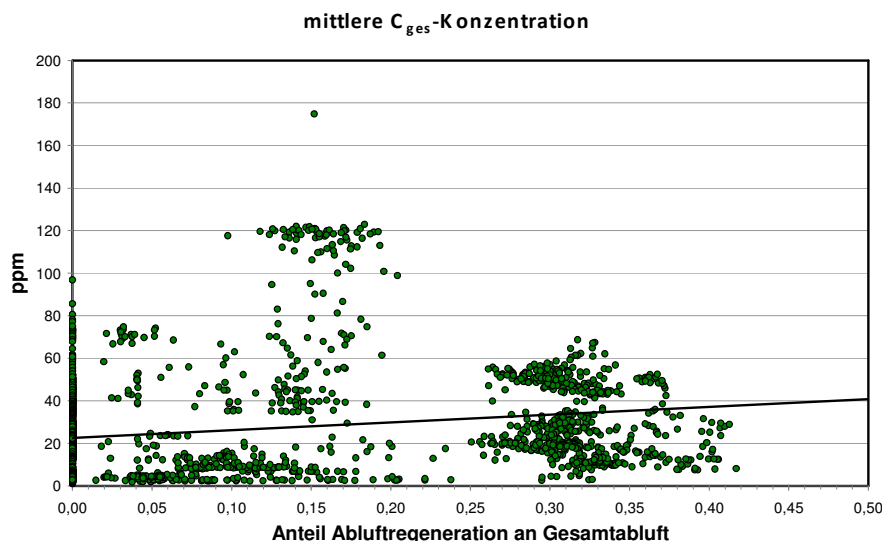


Abb. 11: Einfluss der Abluftrückführung auf die mittlere  $C_{ges}$ -Konzentration der Abluft (Basis: alle Messwerte)



Dies ist zum Teil dadurch begründet, dass die im Trockner insgesamt freigesetzte Menge an Organik nun mit einem geringeren Volumenstrom abtransportiert wird, wodurch die Konzentration ansteigt.

Wäre dies die alleinige Ursache müsste die abgeführte Fracht konstant sein. Im Mittel stellt man aber auch hier eine leichte Zunahme fest (Abb. 12).

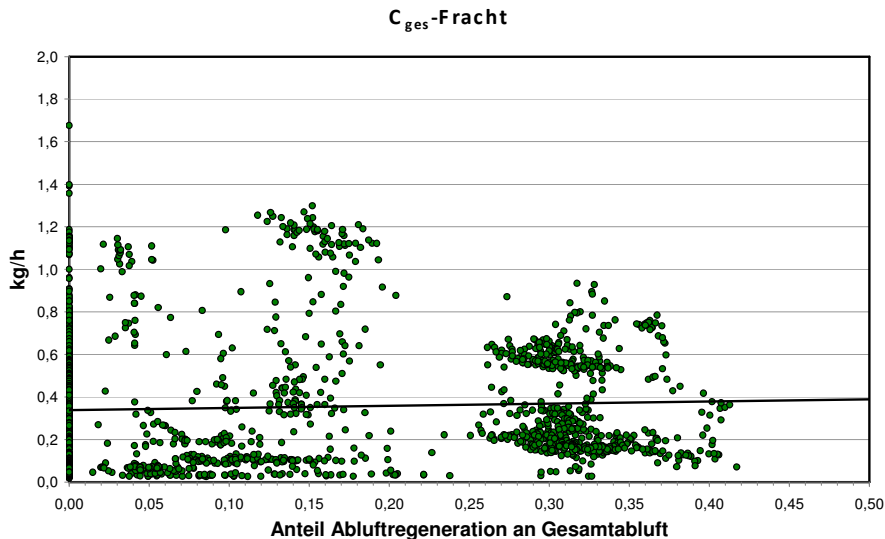


Abb. 12: Einfluss der Abluftrückführung auf die  $C_{ges}$ -Fracht in der Abluft (Basis: alle Messwerte)

Dies kommt dadurch zu Stande, dass, durch die Rückführung vergleichsweise kalter Abluft (ca. 85°C nach WRG) in die heiße Brennkammer (ca. 300°C) in einem sehr stark überstöchiometrischen Verhältnis, die Brennerflamme gekühlt wird. Dadurch wird der Ausbrand des Erdgases verschlechtert und der Methan-Schlupf des Brenners erhöht (Abb. 13). Insofern ist die Rückführung von Abluft in die Brennkammer mit dem Ziel der Emissionsminderung unter diesen Bedingungen nicht zweckmäßig.

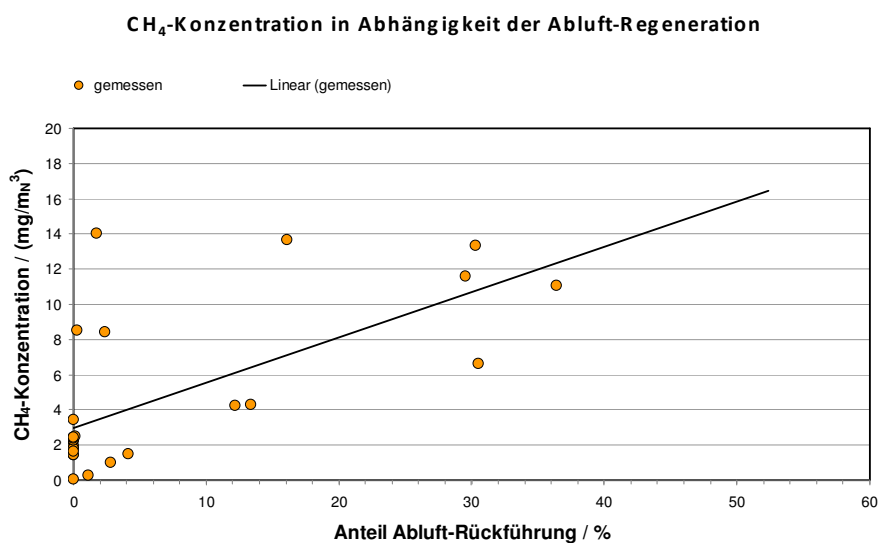


Abb. 13: Einfluss der Abluftrückführung auf die  $CH_4$ -Konzentration (Basis: alle Messwerte)

#### 4.4 Abluft als Verbrennungsluft

Eine geringfügige Minderung der Gesamtfracht an Organik kann jedoch dadurch realisiert werden, dass man mit den Verbrennungsluftgebläsen an den Brennern Abluft statt Umgebungsluft zuführt.

Da diese Untersuchungen an der Industrieanlage bei Dolinschek wegen des Umbaufwand und Risikos nicht vorgenommen werden konnten, wurden sie an der Technikumsanlage im Technologiezentrum der Fa. Brückner durchgeführt. Um evtl. den potentiellen Abbau genauer quantifizieren zu können, wurden drei Modellstoffe Methanol, n-Heptan und Formaldehyd (Merck) mit definierter Menge zudosiert. Zur Dosierung der Chemikalien wurde eine Schlauchpumpe von Cole Parmer verwendet. Die Konzentrationsmessungen wurden in der Abluft sowie der Zuluft durchgeführt.

Die Technikumsanlage wurde hierfür modifiziert, indem Abluft aus den Thermozone entweder in die Brennkammer oder über das Brennergebläse geleitet wurde. Die neu installierte Abluftrohrleitung wurde auf der Saugseite des Ventilators mit einer Zudosierung versehen. Druckseitig wurden die Messstellen vorgesehen (Abb. 14).

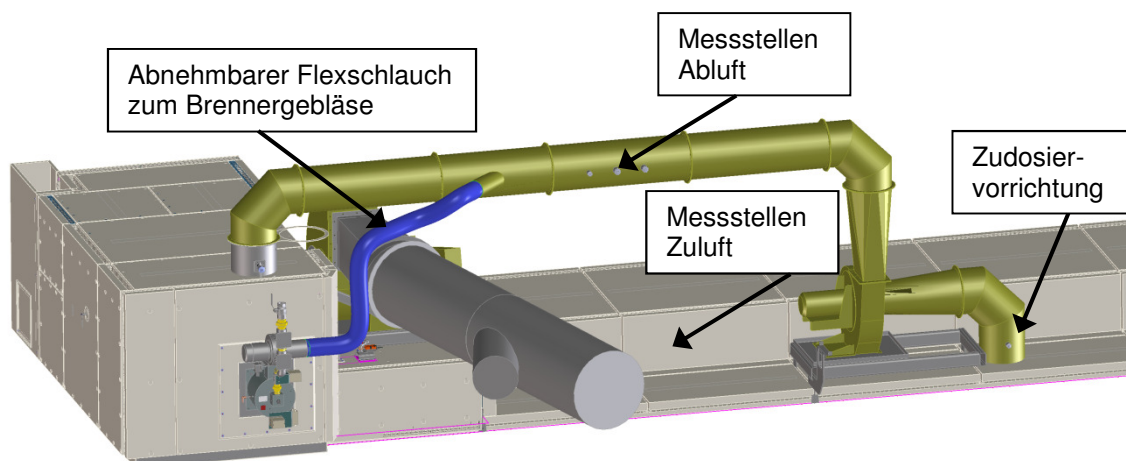


Abb. 14: Abluftrückführung an der Technikumsanlage der Fa. Brückner

In Abb. 15 sind die ermittelten Konzentrationsverläufe dargestellt. Der erste Teil dieser Messungen wurde im Kaltbetrieb durchgeführt, um die Dosiertechnik zu prüfen und in der Brennkammer auftretende Verdünnung zu ermitteln.

Im zweiten Teil wurde die Wirkung der Abluftregeneration evaluiert. Dazu wurden die Brenner mit Umgebungsluft betrieben und die zurückgeführte Abluft in die Brennkammer geleitet. Dies entspricht also der Vorgehensweise der Messungen bei Dolinschek.

Insgesamt wurde festgestellt, dass innerhalb der Brennkammer kein signifikanter Abbau an Organik stattfindet. Wegen der unvermeidbaren Messfehler in den Volumenströmen, kann der Abbau nicht exakt quantifiziert werden. Da bilanziell kein Umsatz nachweisbar war, kann aber angenommen werden, dass dieser maximal im Bereich der Volumenstrommessfehler liegen kann, also maximal bei etwa 10%.

Dass ein Teil der Organik in der Brennkammer reagiert, ist außerdem an den Änderungen der CO- und NO/NO<sub>2</sub>-Gehalte zu erkennen.

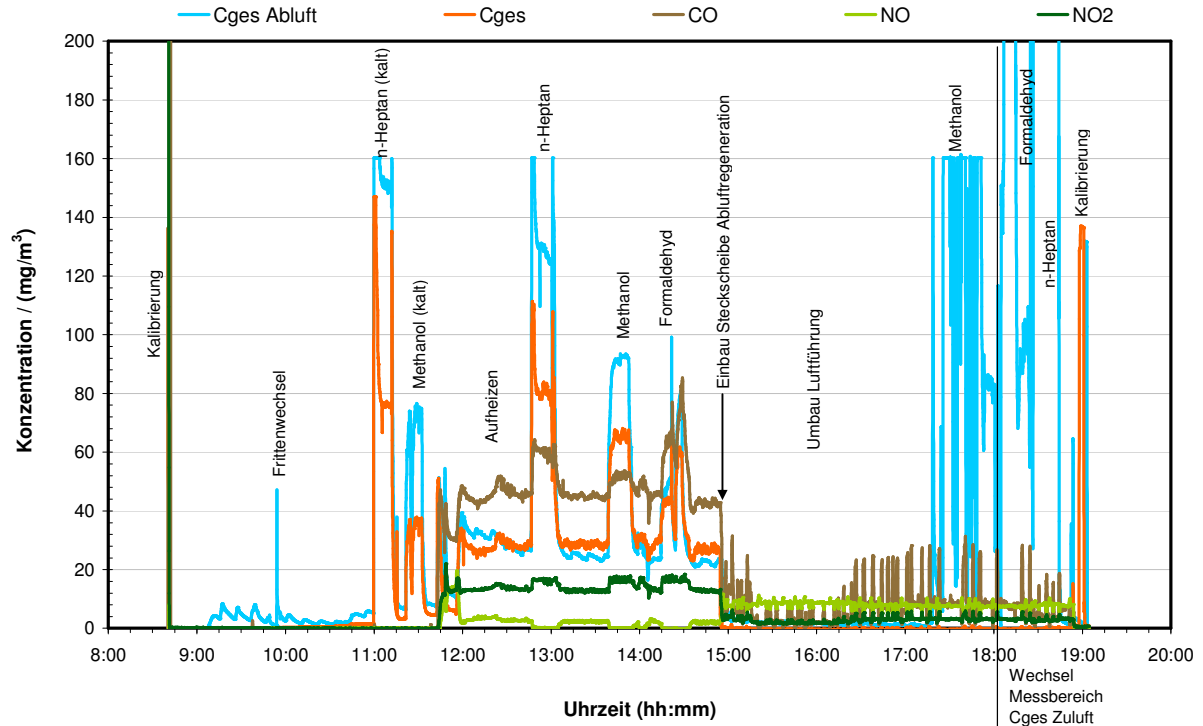


Abb. 15: Versuche zur Abluftoxidation am Technikumstrockner

Für den dritten Teil der Messungen wurde die Luftführung am Trockner umgebaut. Die Leitung zur Abluftregeneration wurde brennkammerseitig durch eine Steckscheibe verschlossen und stattdessen ein geringerer Abluftstrom dem Brenner als Verbrennungsluft zugeführt. Die Messergebnisse der anschließend vorgenommenen Dosiervorgänge (ab etwa 17:00 Uhr) zeigen, dass bei diesen Betriebsbedingungen die Organik in allen Fällen vollständig abgebaut wurde ( $C_{ges}\text{-Zuluft} = 0$ ).

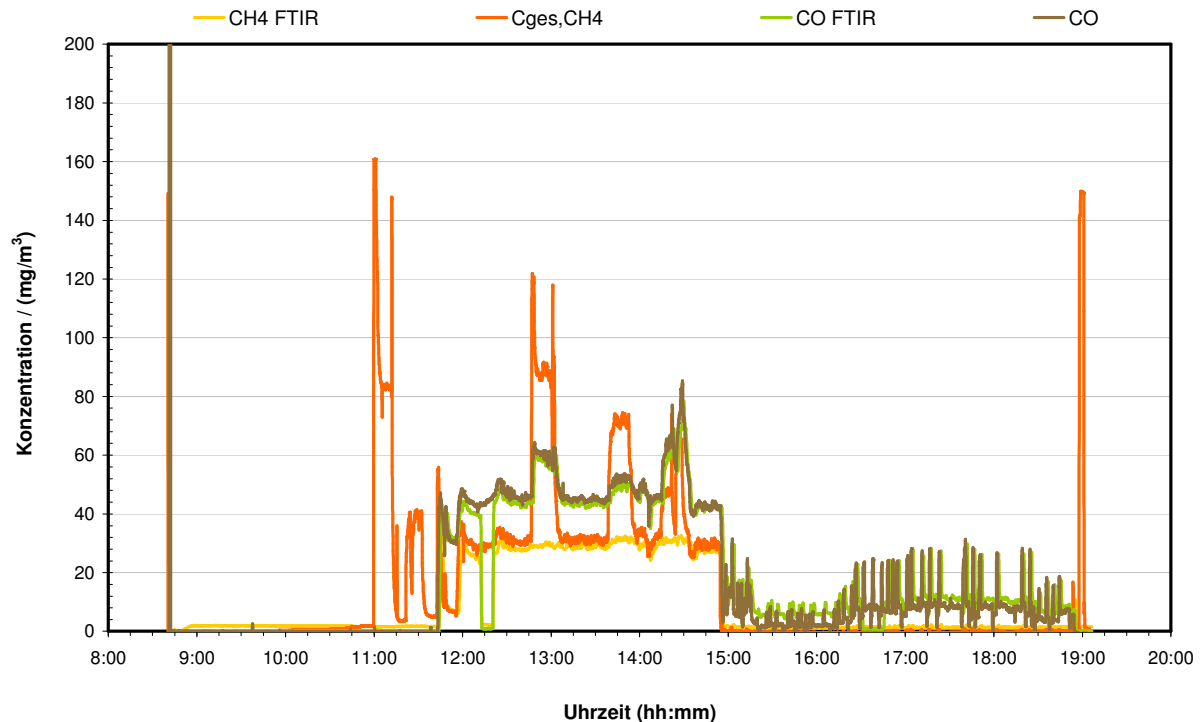


Abb. 16: Auswirkung der Abluftrückführung auf den  $CH_4$ -Schlupf des Brenners

In diesen Messungen wurde außerdem bestätigt, dass die Zuführung der Abluft in die Brennkammer zu erhöhten Konzentrationen von Methan und Kohlenmonoxid führt (kalte Flamme). Diese verschwinden unmittelbar bei Einbau der Steckscheibe in die Abluftleitung (Abb. 16).

## 4.5 Vergilbung

In der Praxis der Textilveredelung wird angenommen, dass bei direkt beheizten Trocknern die produzierten Waren eher vergilben als bei indirekter Beheizung. Es wird vermutet, dass die in der Zuluft enthaltenen Stickoxide hierbei eine Rolle spielen.

Um dies zu validieren, wurden während einer Messkampagne mehrere Stoffproben entnommen und anschließend durch die BUW der Weißgrad bestimmt. Diese Messwerte wurden in Abb. 17 über den gemessenen Stickoxid-Konzentrationen in der Zuluft bzw. der Fortluft aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Weißgrad stärker mit den  $NO_x$ -Werten in der Fortluft korreliert, als mit denen in der Zuluft. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Zuluftkonzentration der Stickoxide die Vergilbung nicht beeinflusst. Aufgrund der Messunsicherheiten und der geringen Anzahl von Messwerten ist die Korrelation jedoch mit großen Fehlern behaftet, sodass dies höchstens als Indiz nicht aber als Beweis angesehen werden kann.

Die bessere Korrelation mit den Fortluft-Konzentrationen legt außerdem die Vermutung nahe, dass Prozesse innerhalb des Trockners für die Vergilbung ausschlaggebend sind.

### Weißgrad in Abhängigkeit der $\text{NO}_{x(2)}$ -Konzentration

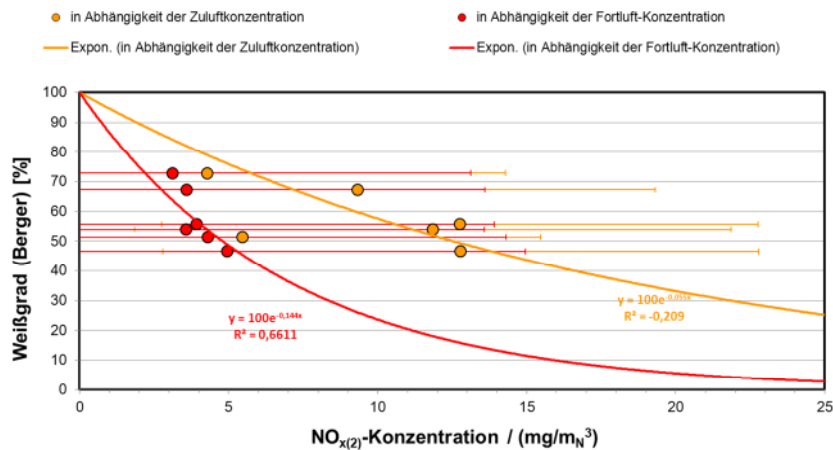


Abb. 17: Korrelation des gemessenen Weißgrades mit den Stickoxid-Konzentrationen

Die Projektteilnehmer gehen deshalb davon aus, dass nicht die Stickoxide ursächlich für die Vergilbung sind, sondern viel eher die auf der Warenbahn anhaftenden organischen Verbindungen, insbesondere die Öle und Wachse von den Präparationen der Spinnerei und Strickerei. Die für die Versuche vorgesehenen Maschenwaren aus Polyester/Lycra waren zuvor auf einer Kontinuwashmaschine gewaschen worden. Bei Beginn des Trocknungs- und Fixierprozesses betrug der Präparationsmittelgehalt 2,1% (Methanolextrakt). Nach der Passage durch die Spannmaschine hatte der Präparationsmittelgehalt um 0,7% abgenommen. Bei einem Warenstrom von 7,72 kg/min wurden demnach durch die thermische Behandlung ca. 54 g Präparationsmittelkomponenten pro Minute verdampft. Dieselbe Warenbahn wurde nacheinander viermal diesem thermischen Prozess bei gleichbleibenden Prozessbedingungen unterworfen und hierfür jedesmal wieder angefeuchtet. Beim zweiten und den nachfolgenden Passagen veränderte sich der Präparationsmittelgehalt der Ware nicht mehr und blieb bei 1,4%. Dadurch dass der Umluftmassenstrom in der Spannmaschine um den Faktor 20 höher ist als der Zuluftmassenstrom verweilen die von der Ware verdampften Stoffe entsprechend lange in der heißen Prozessluft. Hierbei können chemische Umwandlungsvorgänge stattfinden, allgemein als Kondensation bezeichnet, bei der aus den aliphatischen, fettartigen Stoffen cyclische bis hin zu polyaromatischen, teils aldehydische Verbindungen gebildet werden, die meist dunkel gefärbt und oft mit unangenehmem Geruch behaftet sind. Diese Stoffe kondensieren an den Innenwänden der Spannmaschinen und im Abluftsystem und bilden klebrige Beläge. Vergleichbare Vorgänge sind vermutlich dafür verantwortlich, dass die auf der Ware verbliebenen Präparationsmittel ebenfalls zu braunfarbenen Kondensationsprodukten führen und mit zunehmender Dauer des Textils in der heißen Prozessluft (resp. Anzahl Passagen) zu einer zunehmenden Vergilbung führen. Diese ändert sich ab einem bestimmten Vergilbungsgrad (4. Passage) jedoch nicht mehr.

Als Indiz für diese Vermutung sprechen die nachfolgenden beiden Diagramme. Im ersten (Abb. 18) wurde der Weißgrad in Abhängigkeit der Durchlaufzeit und der mittleren Umlufttemperatur aufgetragen. Demnach scheint der Weißgrad bei höheren Temperaturen und Einwirkzeiten abzunehmen, d. h. die Vergilbung nimmt zu. Der Verlauf des Weißgrades in

Abhängigkeit der Verweilzeit bei 180 °C wird als ähnlich dem bei einer Verweilzeit von 190 °C angenommen (gestrichelte Kurve)

Im zweiten Diagramm (Abb. 19) wurde der Weißgrad über der  $C_{ges}$ -Konzentration in der Abluft aufgetragen. Die Vergilbung nimmt zu, während der Gehalt an Organik in der Abluft abnimmt, da unter den gewählten Prozessbedingungen ab der zweiten Passage keine Präparationsmittel mehr verdampft sind. Die geringere  $C_{ges}$ -Konzentration in der Abluft kann als weiterer Hinweis dafür gesehen werden, dass ein bestimmter Teil der organischen Stoffe der Präparationsmittel auf der Warenbahn verblieben ist.

Tab. 4: Übersicht des Weißgrads nach Berger und des Präparationsmittelgehalts als Methanolextrakt der einzelnen Proben nach Anzahl der Passagen in der Spannmaschine

Versuchs- nr.	Probenbezeichnung	Probenzu- sammensetzung	Weißegrad nach Berger	Präparationsmittelgehalt (Methanol) [%]
1	gewaschene, luftgetrocknete Ware	88% Polyester + 12% Elasthan	76	2,1
2	1. Passage		73	1,6
3	2. Passage		67	1,5
4	3. Passage		54	1,5
5	4. Passage		56	1,4
6	gewaschene, luftgetrocknete Ware	85% Polyester + 15% Elasthan	78	1,6
7	1. Passage		59	1,7
8	2. Passage		47	1,7
9	4. Passage		51	1,6

Weißgrad in Abhängigkeit von Trocknertemperatur und Verweilzeit

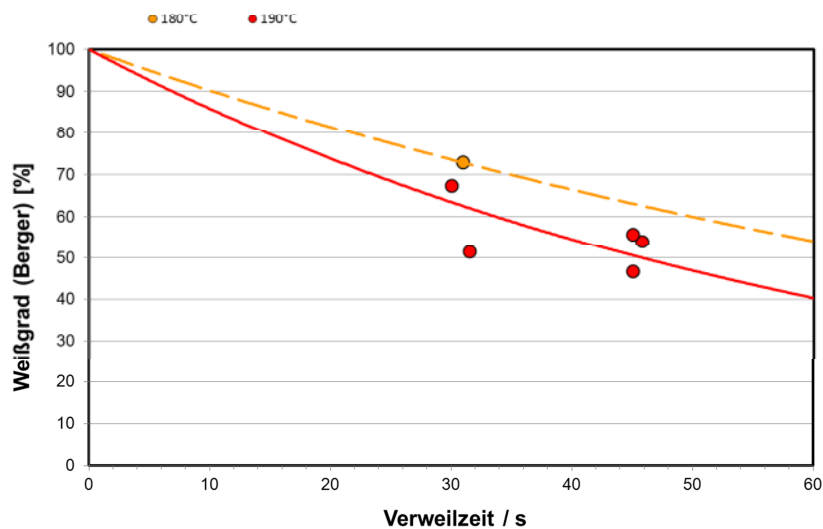


Abb. 18: Korrelation des gemessenen Weißgrades mit der Verweilzeit bei verschiedenen Temperaturen

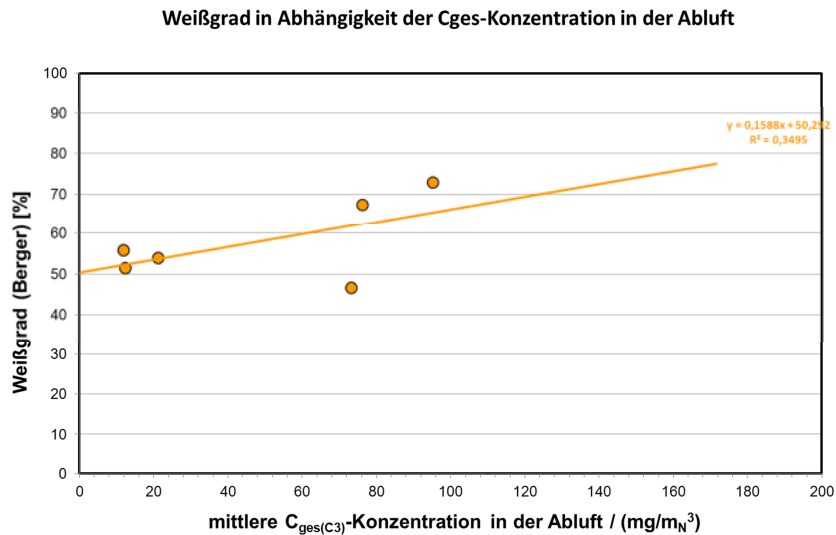


Abb. 19: Korrelation des gemessenen Weißgrades mit der C<sub>ges</sub>-Konzentration in der Abluft

## 4.6 Weitere Messergebnisse

Zusätzlich zu den kontinuierlichen Messungen wurden bei drei Messkampagnen verschiedene Luftströme durch Kondensation und Adsorption an Aktivkohle beprobt. Auch Flüssigproben einiger Einsatzstoffe wurden entnommen. Jedoch standen die Präparationsmittel, die in der Spinnerei eingesetzt wurden, nicht zur Verfügung. Anschließend wurden im Labor mittels Gaschromatografie (GS/MS) die Einzelverbindungen bestimmt. Im Wesentlichen handelt es sich um langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen. Es muss angemerkt werden, dass dieser Nachweis grundsätzlich mit einer Unsicherheit behaftet ist. Die Desorption dieser Stoffe von der A-Kohle kann unvollständig sein. Bedingt durch das Messverfahren können Stoffe mit sehr ähnlichen Retentionszeiten nicht exakt voneinander unterschieden werden.

Für das Projekt ergeben sich aus den analytischen Untersuchungen folgende Hauptaspekte:

Zum einen sind zahlreiche langkettige (öl- bzw. wachsartige) Verbindungen enthalten. Diese weisen an sich schon einen recht hohen Siedepunkt auf und neigen dazu, zu Verbindungen mit höherem Siedepunkt zu kondensieren. Es ist daher möglich, dass Stoffe, die innerhalb des Trockners bei Temperaturen zwischen 150 °C und 200 °C verdampfen, sich durch die Kondensation auch bei höheren Temperaturen an den Innenwänden der Spanmaschine, der Rohrleitungen und Wärmetauscher noch niederschlagen.

Zum anderen wurden siliziumorganische Verbindungen nachgewiesen. Diese bilden bei der Oxidation Siliziumdioxid (Quarzsand), das als Feststoff ausfällt und nachfolgende Anlagenteile belegt und ggf. zusetzen kann.

## 4.7 Bewertung der Messergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- 1.) Die Freisetzung der Organik erfolgt nicht nur in der Fixierzone sondern auch in der Trocknungszone.
- 2.) Die Abluftverteilung hat fast keinen Einfluss auf die Verteilung der Organik.
- 3.) Die Rückführung der Abluft in die Brennkammer bewirkt keinen Abbau der freigesetzten Organik, führt aber wegen der Kühlung der Brennerflamme zu erhöhten Methan und Kohlenmonoxid-Emissionen des Brenners.
- 4.) Die Rückführung der Abluft ist aus energetischer Sicht sehr sinnvoll. Die direkten Vergleichsmessungen ergaben eine Senkung des Brennstoffbedarfs von 7 – 10 %.
- 5.) Durch die Abluftrückführung wird bei gleicher Fracht an Organik die Abluftkonzentration erhöht.
- 6.) Dadurch wird der E-Filter alleine nicht in der Lage sein, den Grenzwert einzuhalten und ein anderes Abluftbehandlungskonzept wird erforderlich.
- 7.) Die in der Abluft enthaltenen Aerosole, Wachse und siliziumorganischen Verbindungen sind bei der Auswahl eines geeigneten Abluftbehandlungsverfahrens zu berücksichtigen.

## 5 Entwicklung von Verfahrenskonzepten

Die Optimierung des bestehenden Prozesses umfasst zwei Teilziele, die mit folgender Priorität verfolgt werden sollen:

- 1.) Minderung des Energiebedarfs
- 2.) Minderung der Emissionen.

Wie im Folgenden gezeigt wird sind diese jedoch nicht unabhängig voneinander erreichbar. Stattdessen geht das Erreichen des ersten Zieles mit der Notwendigkeit einher, auch bezüglich des zweiten Zieles Maßnahmen zu ergreifen.

### 5.1 Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs

Die grundsätzlichen Möglichkeiten zur energetischen Optimierung lassen sich aus der Gesamtbilanz ablesen:

$$\sum_{zu} \dot{m} \cdot (c_p \cdot T + \Delta H) = \sum_{ab} \dot{m} \cdot (c_p \cdot T + \Delta H) + \dot{Q}_V$$

Demnach stehen im stationären Betrieb die insgesamt zugeführten Enthalpieströme im Gleichgewicht mit den insgesamt abgeführten Enthalpieströmen und Transmissionswärmeverlusten.



### 5.1.1 Minderung der Transmissionswärmeverluste

Da die Betriebstemperatur des Trockners nicht angetastet werden kann, lassen sich die Wärmeverluste kaum beeinflussen. Denkbare Optimierungsmaßnahmen wären

- Isolierung unisolierter Anlagenteile,
- Verbesserung bereits isolierter Anlagenteile,
- Minderung von Wärmebrücken, z. B. an den Tragrahmen des Trockners.

Dies betrifft insbesondere die Anlagenteile auf der heißen Zuluftseite bzw. des Trockners selbst. Auf der Abluftseite würde eine Isolierung nur dazu führen, dass die Abluft mit einer höheren Temperatur über Dach abgeführt wird (gleiche Wärmeabnahme im Wasser-Luft-Wärmeübertrager vorausgesetzt). Gleichzeitig würde die Hallentemperatur gesenkt, sodass in den Zentralbrennern wieder mehr Energie zugeführt werden müsste, um die eintretenden Luftströme auf Zulufttemperatur aufzuheizen.

Die Transmissionswärmeverluste sind im Normalbetrieb des Trockners im Verhältnis zum Gesamtwärmebedarf sehr gering. Eine erkennbare Minderung der Wärmeverluste wäre nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand zu erreichen.

→ **In der Senkung der Transmissionswärmeverluste wird derzeit keine wirtschaftlich sinnvolle Maßnahme gesehen.**

Von dieser Feststellung ausgenommen sind selbstverständlich Stellen, an denen sich mit wenig Aufwand und einfachen konstruktiven Mitteln eine Minderung erreichen lässt. Solche sind im Rahmen dieses Projektes aber bisher nicht bekannt geworden.

### 5.1.2 Minderung der abgeführten Massenströme

Die zweite Alternative zur Minderung der Gesamtverluste besteht darin, die Massenströme der abgeführten Ströme zu minimieren. Da nur die Stoffbahn und die Fortluft aus dem System herausgeführt werden, ist die Minderung nur auf der Fortluftseite möglich.

Der Massenstrom der Fortluft ergibt sich aus der Bilanz um das Gesamtsystem

$$\dot{m}_{FoL} = \dot{m}_{FL} + \dot{m}_{SL} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{VOC} + \dot{m}_G + \dot{m}_{VL}$$

d. h. der Fortluftstrom ergibt sich aus der Summe von Frischluft, Schlitzluft, verdampftem Wasser, freigesetzter Organik, zugeführtem Brennstoff und Verbrennungsluft.

Die Ströme von Wasser, Organik, Gas und Verbrennungsluft sind relativ gering und die Schlitzluft kann nicht beliebig reduziert werden. Schließlich benötigt der Trockner Öffnungen zur Durchführung der Stoffbahn. Insofern wird die effektivste Maßnahme bei dieser Alternative darin gesehen, die Menge der zugeführten Frischluft so weit wie möglich zu reduzieren. Allerdings gibt es auch hier verfahrenstechnische Grenzen.

In jedem Fall muss Kondensation innerhalb des Trockners vermieden werden, da sonst herabtropfendes Kondensat zu Verunreinigungen der Stoffbahn führen könnte. Daher ist die Mindestfrischluftmenge einerseits durch den Taupunkt der Abluft an der kältesten Stelle des Trockners (Randbereiche der Ein- und Auslaufzonen) begrenzt. Da die Temperatur innerhalb des Trockners aber relativ hoch ist und damit auch der Sättigungsdampfdruck, wird dadurch

jedoch nicht der Mindestfrischluftstrom festgelegt. Dieser ergibt sich aus dem Sättigungsdampfdruck an der kältesten Stelle der Anlage an der Kondensation vermieden werden soll. Diese ist in der Abluft- bzw. Fortluftleitung zu suchen, sofern ein Ausfall von Feuchte und Organik dort nicht in Kauf genommen werden kann.

Es muss an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass der Taupunkt nicht allein durch den Wasserdampfgehalt festgelegt ist. Auch die Sättigungsdampfdrücke der freigesetzten Kohlenwasserstoffe müssen beachtet werden. Diese können teilweise höhere Siedepunkte als Wasser aufweisen. Auch kann sich der Siede- bzw. Taupunkt eines Vielstoffgemischs deutlich von dem der Einzelkomponenten unterscheiden, denn letztlich entscheidet die Mehrphasenthermodynamik des Gemischs wann dieses kondensiert.

Eine weitere Möglichkeit den Fortluftstrom zu vermindern besteht darin, entweder den Luftüberschuss der Zentralbrenner zu reduzieren, was nur einen sehr geringen Effekt zeigen dürfte, oder statt Frischluft Abluft als Verbrennungsluft einzusetzen. Allerdings muss dann zuvor überprüft werden, ob der Brenner für Abluft geeignet ist und die Maßnahme nicht, durch verschlechterte Bedingungen in der Brennerflamme (hoher Wasserdampfgehalt in der Luft), zu erhöhten Emissionen (vor allem CO, CH<sub>4</sub>) führt.

Die Messungen am Technikumstrockner bei Brückner haben bestätigt, dass eine ordentliche Verbrennung in der Brennkammer nur möglich ist, wenn die Abluft nicht zu stark überstöchiometrisch zugegeben wird. Daher ist die auf diese Weise vermeidbare Frischluftmenge relativ gering (ca. 1 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h pro kW Brennerleistung, also maximal etwa 400 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h). Verglichen mit der momentanen Gesamtzufuhr an Frischluft ließen sich maximal etwa 10% vermeiden.

→ **Die Minderung des Fortluftmassenstromes durch Abluftrückführung und Verzicht auf zusätzliche Verbrennungsluft stellt eine sinnvolle Maßnahme dar.**

### 5.1.3 Bewertung der Maßnahmen

Von den genannten Maßnahmen wird daher in der Verminderung der Frischluft- bzw. Schlitzluftmenge die effektivste Möglichkeit gesehen. Diese kann vergleichsweise einfach -- durch Rückführung von Abluft -- realisiert werden. Die Maßnahme wurde experimentell erprobt und ein energetisches Einsparpotential um 10 % identifiziert.

Wie bereits erläutert wurde, ist jedoch die Rückführung von Abluft mit einem Anstieg des Organik-Gehaltes in der Abluft-/ Fortluft verbunden. Die beiden Ziele stehen sich so in gewissem Sinne entgegen (Energieeffizienz ↔ Emissionsminderung).

## 5.2 Maßnahmen zur Minderung der Emissionen

### 5.2.1 Zusammenfassung der Gegebenheiten

Bei der Konzeption eines veränderten Verfahrens, das eine höhere Energieeffizienz bei gleichzeitiger Einhaltung der emissionsrechtlichen Grenzwerte erlaubt, sind zahlreiche Gegebenheiten zu beachten.

Der Prozess der Textilveredelung ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- diskontinuierlicher Prozess mit Durchlaufzeiten im Bereich (10...30) min,
- häufig wechselnde Veredelungsschritte und Appreturen,

- häufig wechselnde Textilchargen,
- häufig wechselnde Trocknereinstellungen,
- wechselnde Anlagenauslastung zwischen Stillstand, stundenweiser Produktion, Ein- und Mehrschichtbetrieb.

Die anfallende Abluft kann wie folgt charakterisiert werden:

- Temperatur am Trockneraustritt ca. 150 °C,
- Temperatur nach Wärmerückgewinnung ca. 85 °C,
- absolute Feuchte bis etwa 100 g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>tr.L.</sub>,
- Organik-Gehalt im bisherigen Betrieb zwischen (0...150) mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>
- aerosolhaltig,
- Zusammensetzung hängt von Prozess und verwendeter Appretur ab,
- kann siliziumorganische Verbindungen enthalten,
- kann potentiell andere besondere flüchtige Verbindungen enthalten (z. B. Schwefel- und Fluorverbindungen, Säurebildner etc.)

Außerdem haben die Messergebnisse zu nachfolgend genannten Feststellungen geführt:

- eine gezielt beeinflussbare Grenze zwischen Trocknungs- und Fixierzone ist nicht vorhanden,
- die Abluftteilströme aus beiden Zonen enthalten etwa gleiche Mengen an organischen Verbindungen,
- die Gesamtkohlenstoff-Gehalte der beiden Teilströme lassen sich durch veränderte Abluftverteilungen nicht nennenswert beeinflussen,
- eine getrennte Behandlung der Abluft aus der Fixierzone reicht nicht aus.

### 5.2.2 Vereinfachtes Grundschema

Wie bereits geschildert, ist eine Behandlung des gesamten Abluftstromes notwendig, um die Emissionen in nennenswertem Maße zu mindern. Daher sind in Abb. 20 beide Abluftströme zusammengefasst. Das derzeit recht komplexe Luftsystem wurde dadurch vereinfacht, dass es nur noch eine Zuluftleitung und eine Rezirkulationsleitung gibt, wobei die Rezirkulation am Ende der letzten Zone erfolgt. Durch die strömungstechnische Vereinfachung des Systems werden des Weiteren undefinierte Strömungszustände (Rückströmungen u.ä.) verhindert.

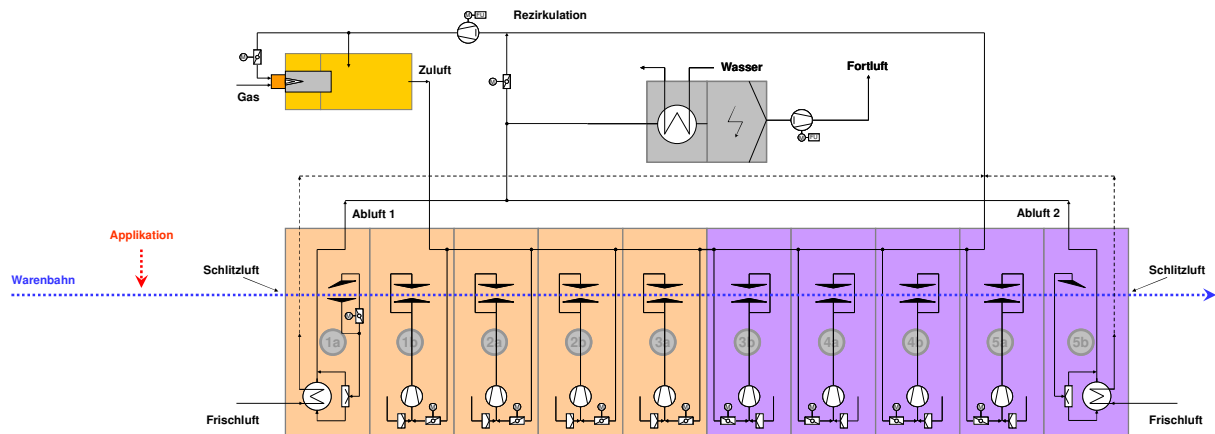


Abb. 20: Vereinfachtes Verfahrensschema mit Zusammenfassung der Abluft, vollständiger Abluft-rückführung, einem Zentralbrenner und Zuluftkreislauf

Aus Sicht der Energiebilanz ist es egal, ob die vorgewärmten Frischluftströme im Zentralbrenner oder danach zusammengefasst werden. Auch diesbezüglich wurde das System vereinfacht indem die Frischluft mit der Zuluft gemischt wird. Dies hat zudem den Vorteil, dass eine übermäßige Kühlung der Brennerflamme und die damit verbundenen Mehremissionen vermieden werden.

Zusätzlich eingezeichnet ist die Verwendung verunreinigter Luft als Verbrennungsluft am Zentralbrenner. Im Gegensatz zur gezeigten Variante könnte dieser Teilstrom auch unmittelbar aus der Abluftleitung entnommen werden.

Durch die Vereinfachungen können ggf. separate Zuluftgebläse und Verbrennungsluftgebläse eingespart werden. Dies ist jedoch anhand einer exakten Auslegung (Betriebsvolumenströme, Druckverluste, Drucklinien) genauer zu prüfen.

Mit diesem Grundschema lässt sich die Anforderung nach einem möglichst geringen Fortluftstrom bereits erfüllen. Da der Verbrennungsluftstrom innerhalb des Systems entnommen wird, folgt aus der Bilanz

$$\dot{m}_{FoL} = \dot{m}_{FL} + \dot{m}_{SL} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{VOC} + \dot{m}_G \Rightarrow \dot{m}_{FL} + \dot{m}_{SL} = \dot{m}_{FoL} - \dot{m}_{H_2O} - \dot{m}_{VOC} - \dot{m}_G$$

Die Menge an nachgeführter Umgebungsluft über die Schlitze und Wärmeübertrager ergibt sich somit aus dem eingestellten Fortluftstrom. Dieser sollte anhand der Fortluftfeuchte geregelt werden, damit jeweils nur die erforderliche Mindestmenge an Umgebungsluft zugeführt wird.

Da innerhalb des Systems die gleiche Menge an Organik freigesetzt wird wie im Ausgangszustand, ist mit dieser Schaltung noch keine zusätzliche Minderung der Emissionen verbunden. Darüber hinaus ist offensichtlich, dass gemäß

$$c_{VOC} = \frac{\dot{m}_{VOC}}{\dot{m}_{FoL} / \rho_{FoL}}$$

mit jeder Reduktion des Fortluftstromes die  $C_{ges}$ -Konzentration ansteigen wird.

Daher werden in den nachfolgenden Absätzen verschiedene Abluftreinigungsverfahren evaluiert.

### 5.2.3 Kondensation und Stofftrennung

In der Druck- und Lackierindustrie werden teilweise Verfahren eingesetzt, bei denen die organischen Abluftbestandteile (hauptsächlich Lösemittel) durch Kondensation und anschließende Stofftrennung abgeschieden werden. Bei hoher Reinheit der zurück gewonnenen Lösemittel können diese erneut im Produktionsprozess eingesetzt werden.

Um die Organik zu kondensieren, ist jedoch die Abkühlung des Abluftstroms bis unterhalb des Taupunktes erforderlich. Diese Temperatur ist umso niedriger, je geringer die Abluftkonzentration bzw. der Partialdruck der abzuscheidenden Substanzen ist. Daher wird dieses Verfahren nur bei sehr hohen Konzentrationen eingesetzt. Bei den hier vorliegenden Gehalten im Milligramm-Bereich ist lediglich eine Trennung der schwerflüchtigen Verbindungen und Aerosole zu erwarten. Selbst diese wird eine Abkühlung der Abluft bis auf schätzungsweise (40...50)°C erfordern, was wahrscheinlich unwirtschaftlich wäre. Die leichtflüchtigen Verbindungen werden die Kondensation zum größten Teil ungehindert passieren, sodass die Einhaltung des Grenzwertes nicht garantiert werden kann.

Weiter würde zusammen mit der Organik ein Großteil des im Abluftstrom enthaltenen Wassers kondensieren, sodass das anfallende Wasser-Organik-Gemisch zu trennen oder zu entsorgen wäre. Auch die Trennung von Wasser und Organik ist nie vollständig möglich bzw. nicht mit einem hier vertretbaren Aufwand. Grundsätzlich bestünde zwar die Möglichkeit einer stofflichen Verwertung durch einen externen Aufbereiter. Allerdings sind diese nur an Stoffgemischen interessiert, die sich mit geringem Aufwand in hoher Reinheit trennen lassen und zu Produkten mit hohem Marktwert führen. Dies wird hier als nicht gegeben angesehen.

Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die wachsartigen Abluftbestandteile die dauerhafte Funktion eines solchen Prozesses gefährden.

→ **Die Kondensation mit anschließender Stofftrennung scheidet wegen der benötigten tiefen Temperaturen, den zu erwartenden Betriebsproblemen und mangelnder stofflicher Verwertbarkeit aus.**

### 5.2.4 Biologische Abluftreinigung

Bei biologischen Abluftreinigungsverfahren werden bestimmte organische Verbindungen von Bakterien umgesetzt. Da diese Bakterien die Verbindungen in der wässrigen Phase abbauen, ist die Wasserlöslichkeit der organischen Verbindungen Voraussetzung für die Abbaubarkeit. Dies kann im vorliegenden Fall nicht gewährleistet werden. Auch hier ist, insbesondere bei den wachsartigen Verbindungen, davon auszugehen, dass diese nur bedingt wasserlöslich sind und somit höchstens geringfügig umgesetzt werden.

Darüber hinaus stellen die intermittierende Betriebsweise mit schwankenden Zusammensetzungen und Abluftgehalten, sowie das potentielle Vorhandensein von Stoffen, welche auf die Bakterien biozide Wirkung haben, Ausschlusskriterien dar.

→ **Biologische Abluftreinigungsverfahren sind unter den gegebenen Voraussetzungen nicht einsetzbar.**

## 5.2.5 Katalytische Nachverbrennung

Da sich im Zentralbrenner bei den derzeitigen Betriebstemperaturen von 250...300°C kein Abbau von Organik realisieren lässt, wurde in Abb. 21 ein Katalysator am Ende der Brennkammer nachgeschaltet. Für die katalytische Oxidation sind die Temperaturen ausreichend hoch, sodass ein weitgehend vollständiger Abbau erreicht werden kann.

Damit gereinigte Luft an die Umgebung abgegeben wird, muss ein Teilstrom der Zuluft als Fortluft abgeführt werden. Diese weist aber die höchste Temperatur im gesamten System auf, was der Energieoptimierung entgegenlaufen würde. Um dies auszugleichen, wurde ein Wärmeübertrager vorgesehen, welcher die Fortluft abkühlt und die benötigte Frischluft aufheizt. Im Gegenzug wurde auf die Wärmeübertrager in den Ein- und Austrittsfeldern verzichtet.

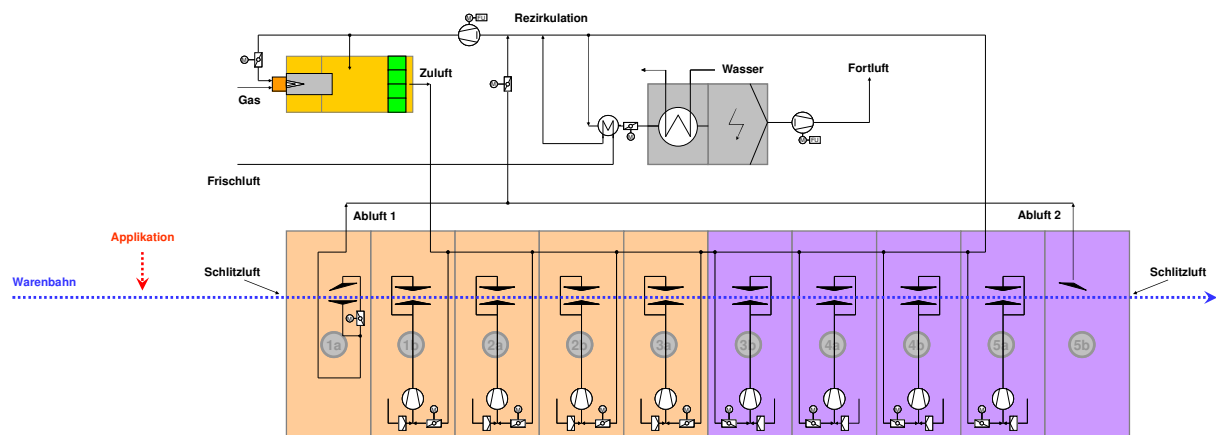


Abb. 21: Verfahrenskonzept: Reinigung durch katalytische Nachverbrennung im Zentralbrenner

Der Elektrofilter würde sehr wahrscheinlich nicht benötigt, da am Katalysatoraustritt kaum Aerosole zu erwarten sind. Dennoch wurde das Symbol in der Skizze belassen.

Eine andere Variante könnte darin bestehen, die Oxidation der Schadstoffe mit Hilfe eines Niedertemperatur-Katalysators in der Fortluftleitung durchzuführen (Abb. 22). Dies hätte den Vorteil, dass katalysatorschädliche Aerosole weitgehend ausgeschlossen sind und die Katalysatoren nicht der potentiellen Gefahr einer thermischen Schädigung durch den Brenner ausgesetzt wären. Da aber bei NT-Katalysatoren immer noch eine Temperatur im Bereich von 100°C benötigt wird, wäre ein WRG-System zum Zwischenheizen notwendig.

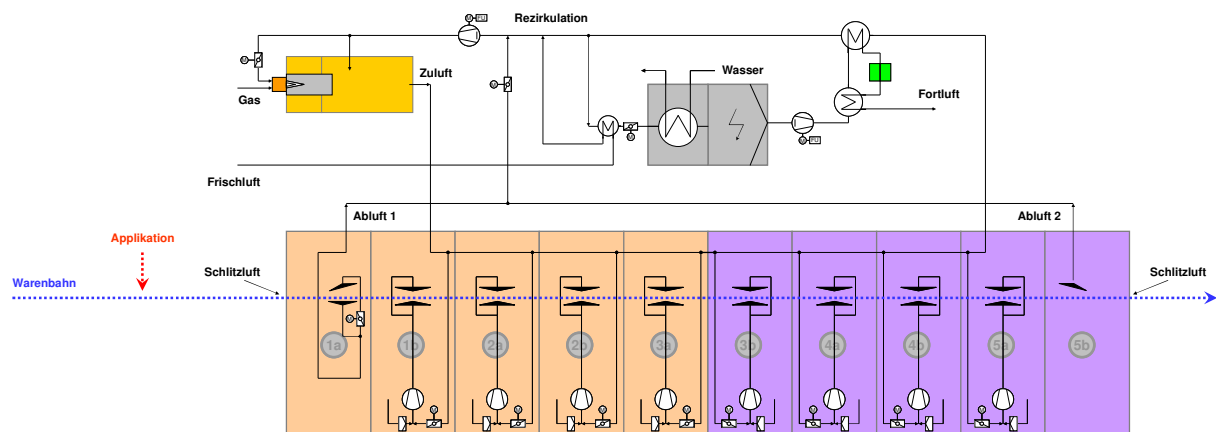


Abb. 22: Verfahrenskonzept: Reinigung durch Niedertemperatur-Katalysator in der Fortluftleitung

Aus Sicht des verfahrenstechnischen Aufwandes wären diese Konzepte eigentlich optimal, da sie ohne größere Umbauten in die bestehende Bauweise integriert und ggf. auch an vorhandenen Trockner nachgerüstet werden könnten.

Allerdings sollten Katalysatoren nicht eingesetzt werden, wenn Stoffe in der Abluft enthalten sind oder sein können, welche die katalytische Wirkung beeinträchtigen bzw. die Katalysatoren irreversibel schädigen (sog. Katalysatorgifte). Typische Vertreter hierfür sind Schwefel-, Chlor- und Siliziumverbindungen.

→ **Da bei der Einzelstoffbestimmung mittels GC/MS siliziumorganische Verbindungen in der Abluft nachgewiesen wurden und andere Katalysatorgifte auftreten können, scheidet die katalytische Nachverbrennung aus.**

### 5.2.6 Nicht-thermisches Plasma bzw. Photokatalytische Oxidation

Bei Plasmaverfahren werden mit Hilfe von Hochspannung ionisierte Gase generiert, die mit der Abluft und ihren Inhaltsstoffen wechselwirken. Dabei bilden sich Radikale, welche den Abbau der Schadstoffe beschleunigen. Auf diese Weise erfolgt bereits bei niedrigen Temperaturen ein Umsatz an Organik. Allerdings wird von den Plasmageneratoren in erheblichem Maße Ozon gebildet, das einen Luftschadstoff darstellt. Deshalb wird den Anlagen ein Katalysator nachgeschaltet, der Ozon entfernt, aber auch zum Schadstoffabbau beiträgt.

Die photokatalytische Oxidation basiert auf der Anregung von katalytischen Reaktionen durch UV-Licht. Auch bei diesem Verfahren sind Katalysatoren erforderlich.

Beiden Verfahren ist gemein, dass sie bei geringen Konzentrationen eingesetzt werden (wenige Hundert ppm), bei vergleichsweise niedrigen Ablufttemperaturen (ab ca. 150 °C) arbeiten und einen geringen Energiebedarf aufweisen. Die Einbaupositionen und Verfahrenskonzepte sind mit der Darstellung in Abb. 22 vergleichbar.

→ **Da bei diesen Verfahren ebenfalls Katalysatoren eingesetzt werden und Katalysatorgifte auftreten können, scheiden beide Verfahren aus.**

### 5.2.7 Aufkonzentration und Nachverbrennung

Abb. 23 zeigt schematisch ein System mit Adsorption/Desorption. Dieses hat ebenfalls den Vorteil, dass die bestehende Anlagenbauweise weitgehend beibehalten werden kann. Die Adsorption erfordert etwa Umgebungstemperatur, sodass hierfür die Position nach dem E-Filter am günstigsten ist. Zur Desorption wird im Beispiel heiße Zuluft eingesetzt, die danach dem Brenner zugeführt wird.

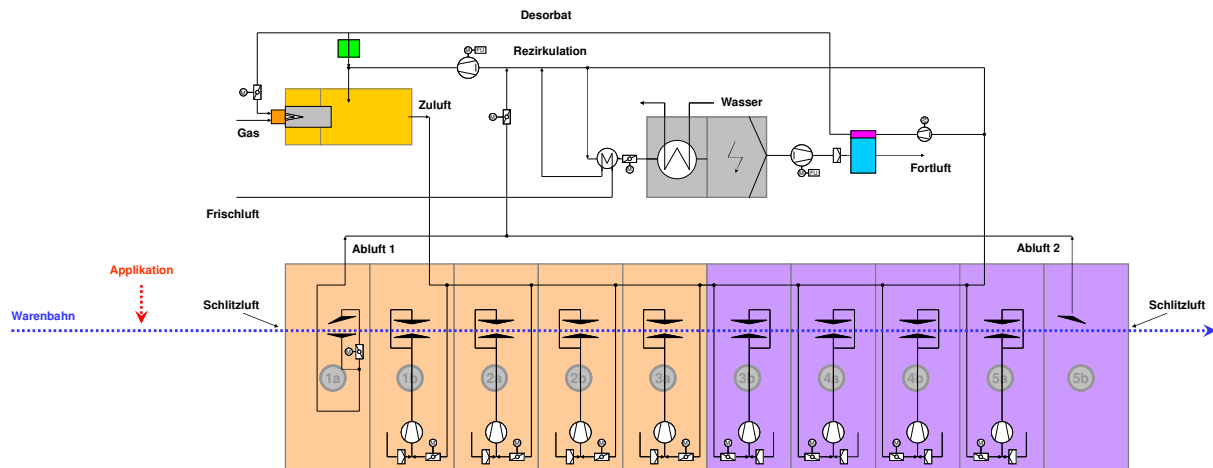


Abb. 23: Verfahrenskonzept: Adsorption-Desorption mit Verbrennung des Desorbatstroms im Zentralbrenner

Allerdings gilt es zu bedenken, dass Ad- und Desorptionsvorgänge durch den Stoffübergang zwischen der Gasphase und der Porenoberfläche des Adsorbens (Zeolithe, Aktivkohle u. ä.) bestimmt werden. Daher läuft die Adsorption umso besser ab, je höher die Konzentration der Fortluft ist. Im Umkehrschluss wird bei geringen Eintrittskonzentrationen eine sehr große Adsorberoberfläche benötigt.

Daher ist davon auszugehen, dass sich bei den vorliegenden Gehalten mit hohem Aufwand maximal eine Aufkonzentration von ca. 1:10 realisieren lässt. Da die Desorption mit Luft erfolgt, liegt ein ähnliches Verhältnis auch zwischen den Luftströmen auf der Desorptions- und Fortluftseite vor. Je nach Größe des Fortluftstroms und der aktuellen Brennerleistung, wäre somit nicht immer gewährleistet, dass das gesamte Desorbat dem Brenner zugeführt werden kann. In diesem Fall, könnte der verbleibende Reststrom über einen Katalysator (oder eine andere Nachverbrennung) geleitet, oxidiert und der Brennkammer zugeführt werden, was mit den genannten Betriebsrisiken verbunden sein kann.

Eine weitere Gefahr bei dieser Variante besteht im Aerosolschlupf des Elektrofilters und der unbekanntem Zusammensetzung der Abluft. Dadurch können sich Komponenten auf dem Adsorber niederschlagen, welche sich nicht wieder desorbieren lassen. Da sich die Adsorptionsmittel lokal nicht reinigen lassen, müssten diese nach Deaktivierung entweder dezentral regeneriert oder entsorgt werden.

Alternativ könnte eine Absorption in einem Waschmittel (z. B. Genosorb) mit anschließender Wasserdampfdesorption eingesetzt werden. Doch auch hier stellt sich die Frage, wie sich einmal abgeschiedene Wachse im Wäscher verhalten oder wie diese aus der Waschflüssigkeit entfernt werden können.

→ **Eine Aufkonzentration wäre wegen des potentiell niedrigen Aufkonzentrationsverhältnisses und der Gefahr von Deaktivierungserscheinungen aufwändig und mit hohen Betriebsrisiken behaftet.**

Dennoch scheint es sinnvoll, dieses Verfahren im Rahmen der Planung einer Hauptausführung vergleichend einzubeziehen.



## 5.2.8 Thermische Nachverbrennung

Abb. 24 zeigt ein kombiniertes Trockner-/Abluftreinigungssystem, wie es in der Praxis in anderen Anwendungsfällen (z. B. Lacktrocknung) üblicherweise implementiert wird. Es besteht aus einer thermischen Nachverbrennung (TNV) in der die Abluft thermisch behandelt wird (bei etwa 750°C). Das austretende Reingas wird über einen Rekuperator etwa auf Zulufttemperatur abgekühlt wobei die übertragene Wärme zur Abluftvorwärmung genutzt wird. Die Wärmeübertrager innerhalb der Ein- und Austrittsfelder wurden weggelassen. Diese würden die Temperatur der Abluft verringern und die der Umgebungsluft erhöhen. Da aber beide Ströme der TNV zugeführt werden, ergäbe sich mit und ohne diese WRG die gleiche Mischungstemperatur (Wärmeverluste der WRG vernachlässigt). Stattdessen ist bei dieser Variante eine Vorwärmung der Umgebungsluft mit einer Wärmerückgewinnung auf der Fortluftseite vorgesehen.

Je nach Temperatur der Trockner-Zuluft am Austritt der Wärmerückgewinnung kann es verfahrenstechnisch günstiger sein, die vorgewärmte Umgebungsluft ganz oder teilweise an dieser Stelle beizumischen, um darüber die Zulufttemperatur zu regeln.

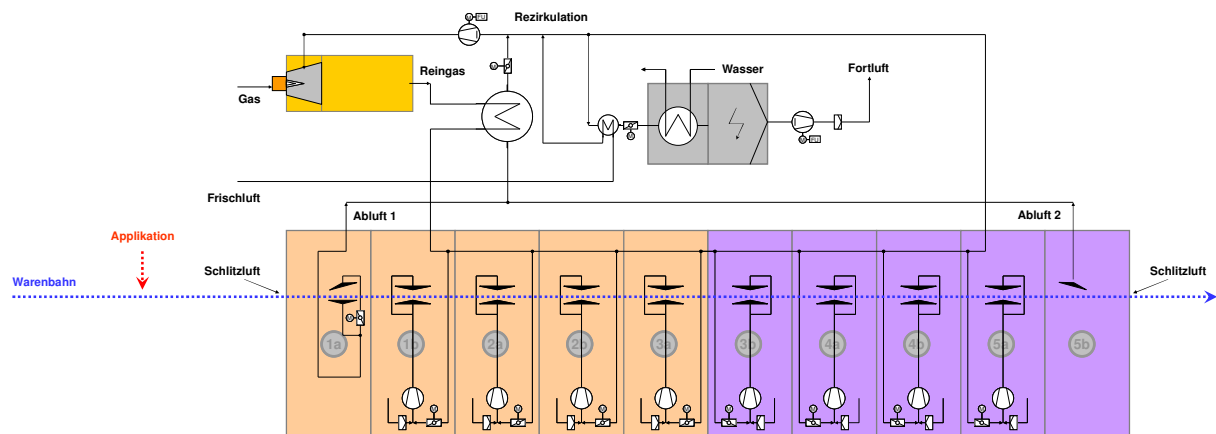


Abb. 24: Verfahrenskonzept: Thermische Nachverbrennung mit Abluftvorwärmung

Es kann davon ausgegangen werden, dass bei den geringen Abluftkonzentrationen an Organik und einer Auslegungstemperatur von 750°C ein annähernd vollständiger Abbau stattfindet (Die zum Abbau der Organik tatsächlich benötigte Betriebstemperatur, kann experimentell ermittelt werden). Allerdings ist hierzu ein spezieller TNV-Brenner erforderlich, der für hohe Luftüberschusszahlen geeignet ist (Korbbrenner, Drallobrenner, o. ä.). Da diese Brenner in der Regel ohne zusätzliche Verbrennungsluft arbeiten, kann auf diesen Luftstrom verzichtet werden.

Weiter ist davon auszugehen, dass der E-Filter ebenfalls nicht mehr benötigt wird. Die Beibehaltung der Warmwasserbereitung hängt von den erreichten Fortlufttemperaturen ab.

Grundsätzlich kann auch die regenerative Nachverbrennung (RNV) eingesetzt werden, da sich diese nur durch die Bauart des Wärmeübertragers von TNV-Anlagen unterscheidet. Bei RNV-Anlagen werden Regeneratoren verwendet, also keramische oder metallische Speichermassen, die wechselweise mit heißer Reingluft und kalter Abluft beaufschlagt werden. Aufgrund des hohen Gewichtes der Regeneratoren sind diese jedoch weniger für intermittierende

renden Betrieb geeignet, die Anlagen langsamer betriebsbereit und die Statik des tragenden Bauwerkes anspruchsvoller.

Dennoch ist denkbar, dass je nach benötigtem Wirkungsgrad und Größe des Abluftstroms ein Ljungström-Regenerator eingesetzt werden könnte. Entsprechende Hochtemperaturausführungen (nach Herstellerangaben bis etwa 650 °C) sind kommerziell verfügbar.

Es ist anzumerken, dass in der Abluft enthaltene siliziumorganische Verbindungen in der Brennkammer zu Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ , Quarzsand) oxidiert werden. Dieses unerwünschte Nebenprodukt der Nachverbrennung kann mit der Zeit den Wärmeübertrager verstopfen. In Anbetracht der geringen Anteile von Si-Verbindungen ist aber von einer ausreichend langen Betriebszeit auszugehen. Dennoch sollte der Wärmeübertrager so gestaltet werden, dass er sich leicht reinigen lässt.

→ **Die thermische Nachverbrennung ist grundsätzlich geeignet, die vorhandene Abluft zu behandeln und das Emissionsminderungsziel zu erreichen. Unter Umständen muss aber die Bildung von Belägen am Wärmeübertrager in Kauf genommen werden.**

### 5.2.9 Bewertung

Ausgehend von den vorliegenden Kenntnissen ist die thermische Nachverbrennung am besten geeignet, die Zielstellung zu erfüllen. Die meisten anderen Verfahren scheiden aus, weil diese Katalysatoren einsetzen, in der Abluft aber Katalysatorgifte auftreten können.

Eine unter Umständen mögliche Alternative könnte in der Aufkonzentration durch Adsorption mit anschließender Verbrennung des Desorbats bestehen. Dies sollte bei der Planung einer Hauptausführung vergleichend geprüft werden.

## 6 Modellrechnungen

Der Trocknungsprozess wurde durch ein vereinfachtes Bilanzmodell abgebildet, das die gekoppelten Massen- und Energiebilanzen der wesentlichen Teilkomponenten (Trockner, Brennkammern, Wärmeübertrager) iterativ löst.

Mit diesem Modell wurden nach jeder Messkampagne die aufgezeichneten Messdaten nachvollzogen. Dazu wurden die gemessenen Randbedingungen, als Mittelwerte über stationäre Zeiträume, vorgegeben und die Bilanzfehler bestimmt. Im Leerlaufbetrieb ohne Warenbahn konnte die Bilanz bis auf einen Fehler von 10% geschlossen werden, was für industrielle Anlagen einen recht guten Wert darstellt. Der Fehler resultiert im Wesentlichen aus den Messwerten der Massenströme, die wegen sehr kurzer Einlaufstrecken in den Kanälen vor den Messstellen mit großen Ungenauigkeiten behaftet sind. Als Länge der Einlaufstrecke wird normalerweise eine Strecke benötigt, die dem zehnfachen des hydraulischen Durchmesser entspricht. Nach der Messstelle sollen mindestens  $3 \cdot D$  Auslaufstrecke vorhanden sein. Bei einem hydraulischen Kanaldurchmesser in der Größenordnung von 0,5 m wären

also ein 5 m langer Kanal vor der Messstelle und 1,5 m danach erforderlich. Diese Vorgaben lassen sich in Produktionsanlagen aus Platz- und Kostengründen nicht realisieren.

Zusätzlich wurden die Randbedingungen mit Hilfe einer Zielwertsuche so variiert, dass die Bilanzgleichungen erfüllt wurden. Anhand dieser Werte wurde versucht nachträgliche Fehlerkorrekturen für die gemessenen Werte zu entwickeln. In der Tat zeigten sich bei einigen Messgrößen weitgehend lineare Zusammenhänge zwischen den Messwerten (mit Bilanzfehler) und den berechneten Werten (ohne Bilanzfehler). Allerdings führten diese Korrekturen nur in diesen Fällen zu einer Minderung des Bilanzfehlers, in anderen Fällen hingegen nicht. Daher musste davon ausgegangen werden, dass es sich um zufällige Fehler handelt, die nicht korrigierbar sind.

Im stationären Betrieb mit Warenbahn ergaben sich aus den Messdaten Bilanzfehler bis zu 40%. Das Ziel dieser Arbeiten, das Trocknermodell anhand der Messdaten anzupassen und zu validieren, konnte dennoch überwiegend erreicht werden, da sowohl die Berechnung der Wärmeverluste als auch der Wärmeübertrager anhand der Leerlauf-Messungen angepasst werden konnten.

Für die nachfolgenden Modellrechnungen wurde das entwickelte Modell vereinfacht (eine Brennkammer, jeweils zusammengefasste Betrachtung der Abluft-, Schlitzluft- und Frischluftströme) und für den Vergleich der Varianten angepasst. Die Berechnungen wurden auf Basis von vorgegebenen Randbedingungen und Auslegungsparametern durchgeführt.

## 6.1 Modellgleichungen

### 6.1.1 Massenströme

In den einzelnen Massenbilanzen werden jeweils die Gesamtmassenströme einschließlich Feuchte und Organik berücksichtigt.

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{tr} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{VOC} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Gehalte an Feuchte bzw. Organik werden in Bezug zum trockenen Massenstrom definiert. Demnach gilt

$$x_{H_2O} = \frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{tr}} \quad (\text{Gl. 2})$$

bzw.

$$x_{VOC} = \frac{\dot{m}_{VOC}}{\dot{m}_{tr}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Die eintretenden Luft- bzw. Gasströme werden durch Angabe des Gesamtmassenstroms und der beiden Gehalte definiert. Somit erhält man den trockenen Bezugsmassenstrom aus

$$\begin{aligned} \dot{m}_f &= \dot{m}_{tr} + \dot{m}_{H_2O} + \dot{m}_{VOC} && \Leftrightarrow \\ \dot{m}_f &= \dot{m}_{tr} + x_{H_2O} \cdot \dot{m}_{tr} + x_{VOC} \cdot \dot{m}_{tr} && \Leftrightarrow \quad (\text{Gl. 4}) \\ \dot{m}_{tr} &= \frac{\dot{m}_f}{1 + x_{H_2O} + x_{VOC}} \end{aligned}$$

Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die eintretenden Ströme Temperatur und Druck der Umgebung aufweisen.

Der trockene Massenstrom, der durch den Trockner geführten Warenbahn, ergibt sich aus der Transportgeschwindigkeit, der Bahnbreite und dem trockenen Flächengewicht

$$\dot{m}_{\text{Bahn,tr}} = w_{\text{Bahn}} \cdot b_{\text{Bahn}} \cdot f_{\text{Bahn,tr}} \quad (\text{Gl. 5})$$

Die Massenströme an Wasser und Organik, welche mit der Stoffbahn in den Trockner eintreten, sowie diejenigen, die nach der Behandlung am Trocknerende abgeführt werden, ergeben sich aus den vorgegebenen Gehalten.

### 6.1.2 Enthalpieströme

Die Gesamtenthalpieströme ergeben sich aus der Summe der einzelnen sensiblen und latenten Anteile

$$\dot{H}_f = \dot{H}_{\text{sens}} + \dot{H}_{\text{lat}} \quad (\text{Gl. 6})$$

Für die sensiblen Anteile gilt

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\text{sens}} &= \dot{H}_{\text{sens,tr}} + \dot{H}_{\text{sens,H}_2\text{O}} + \dot{H}_{\text{sens,VOC}} \\ \dot{H}_{\text{sens}} &= (\dot{m}_{\text{tr}} \cdot c_{p,L,\text{tr}} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p,\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{VOC}} \cdot c_{p,\text{VOC}}) \cdot T \end{aligned} \quad (\text{Gl. 7})$$

für die latenten Anteile

$$\begin{aligned} \dot{H}_{\text{lat}} &= \dot{H}_{\text{lat,H}_2\text{O}} + \dot{H}_{\text{lat,VOC}} \\ \dot{H}_{\text{lat}} &= \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{m}_{\text{VOC}} \cdot (r_{\text{VOC}} + H_{\text{inf,VOC}}) \end{aligned} \quad (\text{Gl. 8})$$

sodass sich insgesamt ergibt

$$\begin{aligned} \dot{H}_f &= \dot{m}_{\text{tr}} \cdot c_{p,L,\text{tr}} \cdot T + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (c_{p,\text{H}_2\text{O}} \cdot T + r_{\text{H}_2\text{O}}) + \dot{m}_{\text{VOC}} \cdot (c_{p,\text{VOC}} \cdot T + r_{\text{VOC}} + H_{\text{inf,VOC}}) \\ \dot{H}_f &= \dot{m}_{\text{tr}} \cdot [c_{p,L,\text{tr}} \cdot T + x_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (c_{p,\text{H}_2\text{O}} \cdot T + r_{\text{H}_2\text{O}}) + x_{\text{VOC}} \cdot (c_{p,\text{VOC}} \cdot T + r_{\text{VOC}} + H_{\text{inf,VOC}})] \end{aligned} \quad (\text{Gl. 9})$$

Da die Verdampfungsenthalpie der organischen Bestandteile nicht bekannt ist, ihr Massenstrom im Vergleich zu den anderen Strömen aber sehr gering ist (nur wenige Gramm Organik pro Liter Wasser), kann mit ausreichender Genauigkeit  $r_{\text{VOC}} = 0$  angenommen werden.

Die spezifischen Wärmekapazitäten für Luft und Wasserdampf werden mit Hilfe von Polynomen in Abhängigkeit der Temperatur berechnet.

### 6.1.3 Wärmeverluste

Die in den Energiebilanzen auftretenden Transmissionswärmeverluste an die Umgebung werden aus

$$\dot{Q}_{V,i} = k_{V,i} \cdot A_{V,i} \cdot (T_i - T_U) \quad (\text{Gl. 10})$$

berechnet. Dazu sind die jeweiligen Wärmedurchgangskoeffizienten und Flächen zu definieren.

Die Nadelkette mit der die Stoffbahn durch den Trockner transportiert wird, tritt in den Trocknungs- und Fixierzonen etwa mit der Feldtemperatur aus, kühlt sich ab, und läuft dann mit einer niedrigeren Temperatur wieder in den Trockner ein. Die dabei auftretenden Wärmeverluste werden aus

$$\dot{Q}_{V,Kette} = w_{Bahn} \cdot \bar{c}_{L,Kette} \cdot \Delta T_{Kette} \quad (\text{Gl. 11})$$

bestimmt, worin  $\bar{c}_{L,Kette}$  die längenspezifische Gesamtwärmekapazität der rechten und linken Kette darstellt.

Die Temperaturdifferenz ergibt sich aus einer vorgegebenen Abkühlgeschwindigkeit und der Verweilzeit außerhalb des Trockners

$$\Delta T_{Kette} = \frac{dT}{dt} \cdot \frac{L_{Kette}}{w_{Bahn}} \quad (\text{Gl. 12})$$

Die Abkühlrate wurde in früheren Messungen von Brückner zu 17 K/min bestimmt. Als Kettenlänge ist, jeweils für den Ein- und Auslauf, die Gesamtlänge einer Kette außerhalb des Trockners einzusetzen.

Die Wärmeverluste des Transportbandes werden mit

$$\dot{Q}_{V,Band} = f_{Band} \cdot b_{Band} \cdot w_{Bahn} \cdot \bar{c}_{F,Band} \cdot \frac{dT}{dL} \cdot L_{Band} \quad (\text{Gl. 13})$$

berechnet, also aus dem Flächengewicht, der Bandbreite ( $b_{Band} = b_{Bahn} + 0,2$ ), der Transportgeschwindigkeit, der flächenspezifischen Wärmekapazität, einem Temperaturgradienten und der Länge des Bandes außerhalb des Trockners. Der Temperaturgradient wurde ebenfalls zuvor von Brückner bestimmt und durch die Gleichung

$$\frac{dT}{dL} = 11,821 \cdot w_{Bahn}^{-0,566} \quad (\text{Gl. 14})$$

beschrieben.

Zusätzlich werden Wärmeverluste der Kettenschiene berücksichtigt, die aus

$$\dot{Q}_{V,Schiene} = \alpha_{Schiene} \cdot A_{Schiene} \cdot (T_{Schiene} - T_U) \quad (\text{Gl. 15})$$

bestimmt werden.

#### 6.1.4 Brenner

Die Bilanz des Brenners beinhaltet die im Rahmen der vorgenommenen Berechnung interessierende Größe, nämlich den im Betrieb erforderlichen Brennstoffmassenstrom. Dieser wird aus den gekoppelten Massen- und Energiebilanzen um die Brennkammer bestimmt. Dazu müssen die Randbedingungen der anderen ein- und austretenden Ströme bekannt sein.

Die Zustandsgrößen der eintretenden Ströme ergeben sich aus den Bilanzen der vorgelagerten Anlagenteile. Der Massenstrom und die Gehalte auf der Austrittsseite ergeben sich aus der Massenbilanz um die Brennkammer. Die Temperatur am Austritt ist entweder festgesetzt

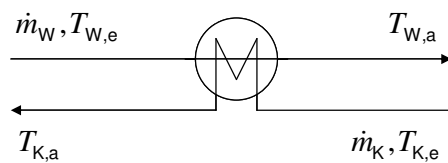
(im TNV-Betrieb) oder sie wird rückwärts aus der erforderlichen Zulufttemperatur am Trockner berechnet.

Der für die Verbrennung benötigte Verbrennungsluftmassenstrom wird mit dem Mindestluftbedarf und der Luftüberschusszahl aus dem Brennstoffmassenstrom berechnet

$$\dot{m}_{VL1} = \lambda_{VL} \cdot l_{VL,min} \cdot \frac{\dot{m}_G}{\rho_{N,G}} \cdot \rho_{N,L} \quad (\text{Gl. 16})$$

### 6.1.5 Wärmeübertrager

Die in den verschiedenen Schaltungen enthaltenen Wärmeübertrager werden, unabhängig von der tatsächlichen Stromführung, vereinfacht alle als Gegenstromwärmeübertrager betrachtet.



Mit der in der Skizze genannten Bezeichnungsweise (W=warm; K=kalt; e=ein, a=aus) lautet die Definition des Wirkungsgrades bezogen auf die warme Seite

$$\eta_W = \frac{T_{W,e} - T_{W,a}}{T_{W,e} - T_{K,e}} \quad (\text{Gl. 17})$$

Da der Wirkungsgrad nicht konstant ist, sondern von den Massenströmen abhängt, wird dieser mit der Gleichung

$$\eta_W = \frac{1 - e^{-\mu_K \cdot St_W}}{1 - (1 - \mu_K) \cdot e^{-\mu_K \cdot St_W}} \quad (\text{Gl. 18})$$

berechnet wobei die relative Wärmekapazitätsstromabweichung bezogen auf die kalte Seite

$$\mu_K = 1 - \frac{\dot{m}_W \cdot c_{p,W}}{\dot{m}_K \cdot c_{p,K}} \quad (\text{Gl. 19})$$

und die auf die warme Seite bezogene Stanton-Zahl

$$St_W = \frac{(k \cdot A)_{WRG}}{\dot{m}_W \cdot c_{p,W}} \quad (\text{Gl. 20})$$

einzusetzen sind.

Für die Berechnung der Wärmeübertrager innerhalb des Modells müssen jeweils die Eintrittsbedingungen bekannt sein. Der Wärmeübertragerkennwert  $(k \cdot A)_{WRG}$  ist vorzugeben und wird als Effektivwert einschließlich von Wärmeverlusten betrachtet. Somit ist es an diesen Stellen nicht notwendig, die Transmissionswärmeverluste gesondert zu berücksichtigen.

Aus der Bilanzierung ergeben sich dann die beiden Austrittstemperaturen.

### 6.1.6 Trockner

Die tatsächlichen Vorgänge innerhalb des Trockners können nur stark vereinfacht beschrieben werden. Wesentliches Ziel ist, dass durch das Modell der Gesamtenergiebedarf ausreichend genau beschrieben wird.

Für die Berechnung wird der Trockner in drei Abschnitte unterteilt, nämlich Ein- und Austrittsfeld sowie die Felder dazwischen. Aus der Bilanz der Innenfelder werden die erforderliche Zulufttemperatur und die Gehalte an Wasser bzw. Organik der Abluft berechnet. Dazu wird angenommen, dass die Temperatur der Innenfelder konstant ist und der Betriebstemperatur des Trockners entspricht. Die Transmissionswärmeverluste lassen sich dadurch unmittelbar berechnen. Weiter wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die gesamte Freisetzung von Wasser und Organik in den Innenfeldern erfolgt. Die entsprechenden Mengen ergeben sich aus dem Massenstrom der trockenen Warenbahn und den vorgegebenen Gehalten am Ein- und Austritt

$$\Delta \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{m}_{\text{Bahn,tr}} \cdot (x_{\text{H}_2\text{O,ein}} - x_{\text{H}_2\text{O,aus}}) \quad (\text{Gl. 21})$$

$$\Delta \dot{m}_{\text{VOC}} = \dot{m}_{\text{Bahn,tr}} \cdot (x_{\text{VOC,ein}} - x_{\text{VOC,aus}}). \quad (\text{Gl. 22})$$

Die für die Bilanz benötigte Wareneintrittstemperatur an den Innenfeldern ergibt sich aus der Bilanz des Eintrittsfeldes. Die Warenaustrittstemperatur wird auf die Trocknerbetriebs-temperatur gesetzt.

Der Gesamtabluftstrom aus den Innenfeldern wird gleichmäßig auf die Ein- und Austrittsfelder aufgeteilt und dort mit der eintretenden Schlitzluft gemischt. Die Schlitzluftmenge wird dazu als fester Anteil am Gesamtabluftstrom beschrieben.

Um die jeweiligen Warenaustrittstemperaturen berechnen zu können, wird die Wärmeübertragung zwischen der Warenbahn und den Luftströmen in Analogie zum Gegenstromrekupe- rator betrachtet. Die Wärmeübertragerkenngröße ergibt sich dabei aus der überströmten Warenfläche und einem angenommenen Wärmeübergangskoeffizienten von  $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Beim Eintrittsfeld wird angenommen, dass der vordere Anteil des Abluftstroms aus den Innenfeldern an der Warenbahn entlang streicht, Wärme an die Bahn abgibt und danach mit der einströmenden Schlitzluft gemischt wird. Aus dieser Bilanz ergibt sich somit gleichzeitig die Austrittstemperatur des vorderen Abluftstromes.

Beim Austrittsfeld erfolgt der Wärmeaustausch zwischen der Schlitzluft und der Warenbahn. Die vorgewärmte Schlitzluft wird anschließend mit dem hinteren Abluftanteil aus den Innenfeldern gemischt. Auch hier ergeben sich aus der Bilanz die Waren- und Abluftaustrittstemperaturen.

Zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste der Ein- und Austrittsfelder werden die Feldtemperaturen mit den Temperaturen der austretenden Abluftströme gleichgesetzt.

Aus der Gesamtbilanz des Trockners erhält man den Wärmebedarf, der sich aus den Transmissionswärmeverlusten, der benötigten Verdampfungswärme sowie der Differenz der sensiblen Enthalpieströme der aus- und eintretenden Stoffströme ergibt.

Die Bilanz ist jedoch nicht geschlossen, weil der Zuluftstrom, mit dem der Wärmebedarf gedeckt wird, zwei Freiheitsgrade aufweist, nämlich Temperatur *und* Massenstrom. Um dies zu beheben, wird der Gesamtabluftstrom des Trockners als Auslegungsgröße vorgegeben. Somit kann aus der Massenbilanz unmittelbar der benötigte Zuluftmassenstrom bestimmt werden und aus der Energiebilanz iterativ die erforderliche Zulufttemperatur.

## 6.2 Allgemeine Randbedingungen und Parameter

Für Umgebungsbedingungen werden folgende Daten angenommen

$$T_U = 25^\circ\text{C}; p_U = 978 \text{ mbar}; \varphi = 50\%$$

$$\Rightarrow x_{\text{H}_2\text{O},U} = 0,0102 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{L},\text{tr}}}$$

$$x_{\text{VOC},U} = 0 \frac{\text{kg}_{\text{VOC}}}{\text{kg}_{\text{L},\text{tr}}}$$

für den Brennstoff wurde eine Gasanalyse zugrunde gelegt, die von den Albstadtwerken (Versorger der Fa. Dolinschek) zur Verfügung gestellt wurde. Daraus ergaben sich folgende Randbedingungen und Stoffdaten

$$T_G = T_U$$

$$\rho_{N,G} = 0,779 \frac{\text{kg}}{\text{m}_N^3}$$

$$\lambda_G = 1,2$$

$$l_{G,\text{min}} = 9,7 \frac{\text{m}_L^3}{\text{m}_G^3}$$

$$w_{\text{H}_2\text{O},G} = 2,1 \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_G}$$

$$H_{\text{sup},G} = 11,3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}_{N,G}^3}$$

$$H_{\text{inf},G} = 10,2 \frac{\text{kWh}}{\text{m}_{N,G}^3}$$

$$c_{p,G} = 2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_G \text{K}}$$

Die Menge des bei der Verbrennung des Brennstoffes gebildeten Wassers wird durch die spezifische Wasserbildung  $w_{\text{H}_2\text{O},G}$  berücksichtigt.

Als Wärmedurchgangskoeffizient der Anlagenhülle wurde von Brückner ein Wert von  $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  angegeben, Breite, Höhe und Feldlänge des Trockners mit  $3,8 \text{ m} / 1,9 \text{ m} / 3 \text{ m}$ . Die Gesamtlänge des Trockners ergibt sich aus der Anzahl der Felder, die bei den Berechnungen variiert wurde.



Für die Transportketten wurde eine Länge von 2,7 m am Eintritt, 4,7 m am Austritt und eine längenspezifische Wärmekapazität von 2,915 kJ/(m\*K) angesetzt, für das Transportband eine Mehrbreite von 0,2 m ggü. der Warenbreite, ein Flächengewicht von 0,5 kg/m<sup>2</sup> und eine spezifische Wärmekapazität von 1 kJ/(kg\*K). Die Breite der Kettenschiene wurde auf 0,3 m festgelegt.

Die spezifische Wärmekapazität der Organik wurde mit 2 kJ/(kg\*K), ihr Heizwert mit 40 MJ/kg angenommen.

Für den Anteil der Schlitzluft am Gesamtabluftstrom wurden 10% angesetzt.

Als Grundlage für die Modellrechnungen wurden Randbedingungen für zwei charakteristische Vergleichsprozesse festgelegt:

### 1.) Trockenfixierung

Ware:	PES 100, Maschenware
Flächengewicht:	100 g/m <sup>2</sup>
Warenbreite:	1,5 m
Eingangsfeuchte:	10%
Ausgangsfeuchte:	0%
Organikanteil Eintritt:	2,5 g/L
Organikanteil Austritt:	0 g/L
Verweilzeit:	15 s
Trocknertemperatur:	190 °C

Die weiteren Auslegungsbedingungen hängen von der Trocknergröße ab. Als Baugrößen wurden 5-, 6- und 8-Felder-Trockner gewählt. Für diese wurden folgende Werte spezifiziert.

	5-Felder	6-Felder	8-Felder
Waregeschwindigkeit (m/min):	36	43	71
Abluftstrom (m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h):	3.510	4.200	5.590

### 2.) Trocknung

Ware:	CO 100, Maschenware
Flächengewicht:	240 g/m <sup>2</sup>
Warenbreite:	1,8 m
Eingangsfeuchte:	75%
Ausgangsfeuchte:	8%
Organikanteil Eintritt:	0 g/L
Organikanteil Austritt:	0 g/L
Trocknertemperatur:	150 °C

Die Waren- und Abluftströme für diesen Fall wurden wie folgt definiert.

	5-Felder	6-Felder	8-Felder
Warengeschwindigkeit (m/min):	44	53	71
Abluftstrom ( $m_N^3/h$ ):	13.440	16.260	21.910

## 6.3 Bestehendes und untersuchtes Verfahrenskonzept (Beispiel: Trockenfixierung)

### 6.3.1 Standard-Trockner

Als erster Fall wird ein einfacher Trockner (vgl. Abb. 25) betrachtet. Die angegebenen Temperaturen dienen nur zum Veranschaulichen der Niveaus und sind nicht als Vorgaben zu verstehen. Dem Trockner wird feuchte Ware zugeführt bzw. trockene Ware, welche mit Wasser und Appretur benetzt ist. Wasser und Organik verdampfen zum Großteil innerhalb des Trockners. Da im Trockner ein geringer Unterdruck aufrechterhalten werden muss und die Ware durch Ein- und Auslaufschlitze geführt wird, wird auf beiden Seiten Umgebungsluft angesaugt. Diese Ströme werden als Schlitzluft bezeichnet und zusammengefasst betrachtet, da auf beiden Seiten die gleichen Eintrittsbedingungen vorliegen.

Um innerhalb des Trockners die benötigte Verdampfungsenthalpie aufzubringen und die Wärmeverluste des Trockners zu decken, wird heiße Zuluft in den Trockner geführt. Gemeinsam mit der etwas kälteren Abluft werden die verdampften Stoffe abgeführt.

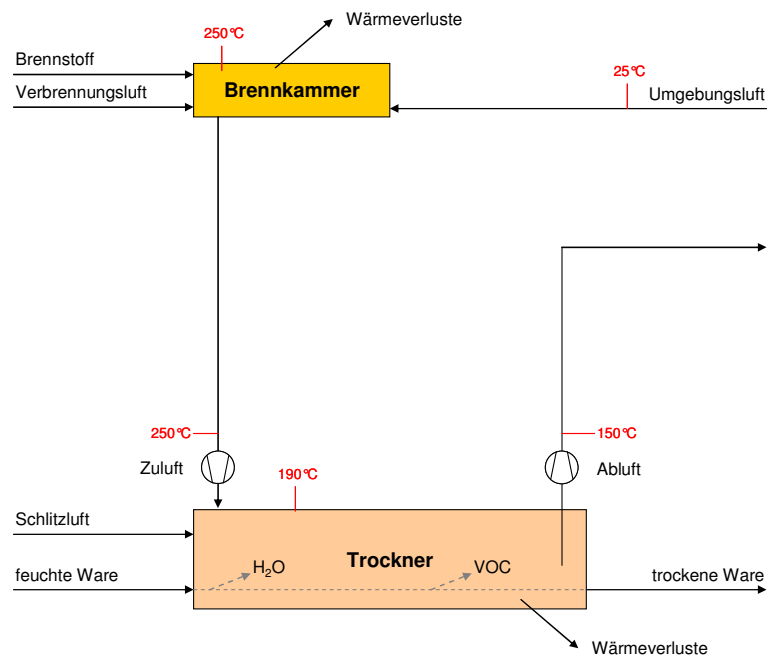


Abb. 25: Vereinfachtes Schema eines direktbeheizten Trockners

Die wesentlichen Prozessgrößen für einen 5-Felder-Trockner und den Prozess der Trockenfixierung sind in Abb. 26 dargestellt, wobei der aus dem Trockner abgeführte Abluftstrom zwischen 25 % und 150 % des Auslegungswertes ( $3.510 m_N^3/h$ ) variiert wurde.

Da die benötigte Verdampfungswärme, die Transmissionswärmeverluste und die Warenaustrittstemperatur nicht bzw. kaum vom Abluftstrom abhängen, nimmt die benötigte Brennerleistung nahezu linear von ca. 116 kW auf 376 kW zu.

Die (konstante) Last des Trockners muss durch den Enthalpiestrom der heißen Zuluft gedeckt werden. Da deren Massenstrom proportional zur Abluftmenge zunimmt und für ihren Enthalpiestrom näherungsweise die Beziehung

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot c_p \cdot T \quad (\text{Gl. 23})$$

gilt, wird bei zunehmendem Zuluftmassenstrom eine geringere Zulufttemperatur benötigt, um den gleichen Enthalpiestrom zu erreichen. Die erforderliche Temperatur nimmt daher von 323 °C auf 210 °C ab.

Im Gegensatz dazu nimmt die Fortlufttemperatur von 78 °C auf 158 °C zu. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wärmeübertragung zwischen Abluft und Warenbahn am Trockner-eintritt und -austritt bei größerem Abluftstrom weniger effizient abläuft.

Da die im Trockner freigesetzten Mengen an Wasser und Organik konstant sind, sich diese aber auf eine größere Luftmenge verteilen, werden die Fortluft-Konzentrationen (rechte Ordinate) geringer.

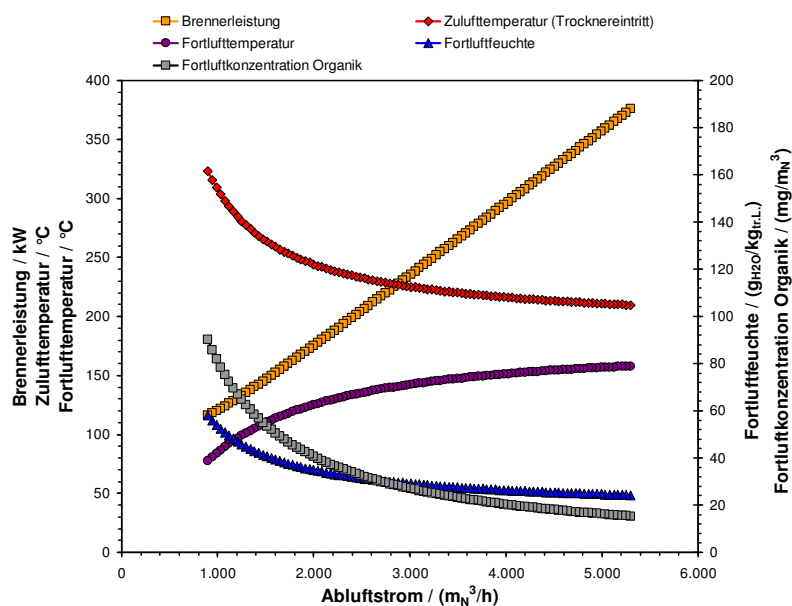


Abb. 26: Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen bei einem direktbeheizten Trockner

### 6.3.2 Trockner mit Umgebungsluftvorwärmung (PowerFrame Eco)

Das zuvor gezeigte System wurde von Brückner im vorangegangenen Projekt durch einige Verbesserungen im Luftmanagement u.a. mittels einer Durchsaugzone und integrierten Wärmeübertragern energieeffizienter gestaltet. Die zwei genannten Komponenten dienen zur Nutzung der Wärme der abgeführten Abluft zur Waren- und Umgebungsluftvorwärmung. Diese Reduzierung der Ablufttemperatur wurde basierend auf den Messungen für eine Wärmeübertragerkenngröße von  $k \cdot A = 2.600 \text{ W/K}$  angesetzt.

Die Berechnungen für dieses System zeigen die gleichen Tendenzen, wie im vorangegangenen Beispiel (Abb. 28). Durch die Wärmerückgewinnung ist die Fortlufttemperatur allerdings geringer (41 °C bis 86 °C). Weil dadurch gleichzeitig die stoffgebundenen Wärmeverluste reduziert werden, nimmt das Niveau der erforderlichen Brennerleistung ab (102 kW bis 217 kW). In diesem Fall wird demnach rechnerisch der Brennstoffbedarf durch die Wärmerückgewinnung um 12% bis 42% reduziert.

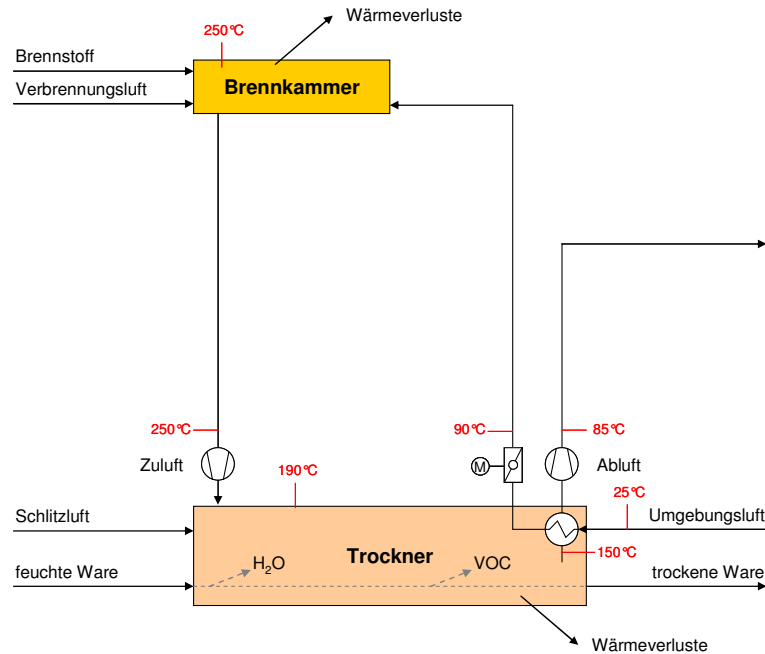


Abb. 27: Vereinfachtes Schema eines direktbeheizten Trockners mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft (System Power Frame Eco)

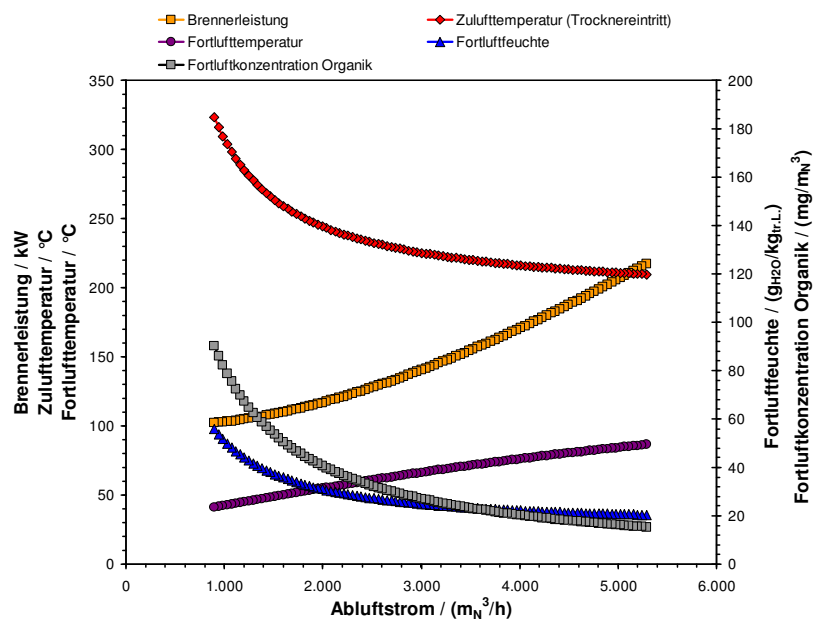


Abb. 28: Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen bei einem direktbeheizten Trockner mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft

### 6.3.3 Trockner mit Umgebungsluftvorwärmung und Abluftrückführung

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine weitere Energieoptimierung durch Rückführung von Abluft erprobt (Abb. 29). Die Hintergründe und grundsätzlichen Auswirkungen wurden bereits erläutert.

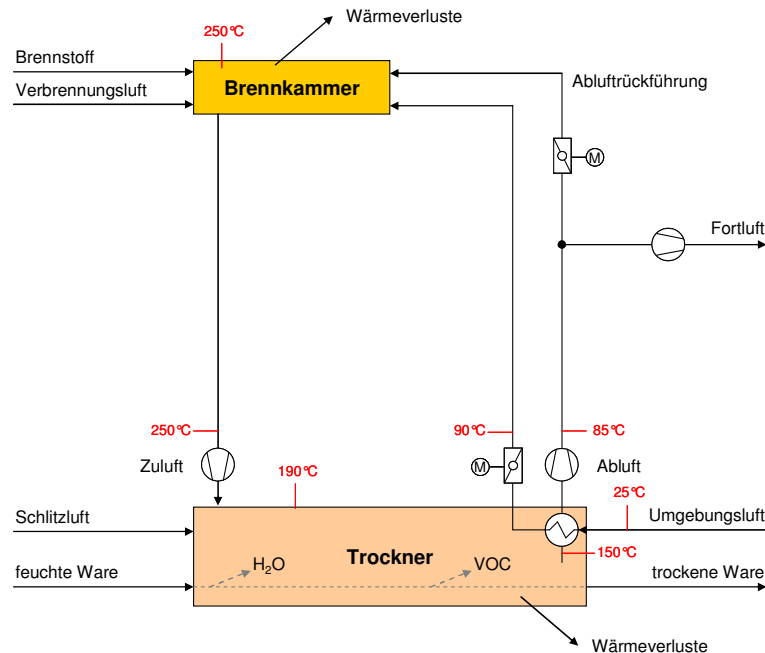


Abb. 29: Vereinfachtes Schema eines direktbeheizten Trockners mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft und Abluftrückführung

Um den Einfluss der Abluftrückführung zu untersuchen, wurde ausgehend vom Auslegungsfall der rückgeführte Abluftmassenstrom variiert. Die Ergebnisse zeigt Abb. 30.

Die erforderliche Brennerleistung kann von 156 kW im Auslegungsfall auf 124 kW bei 80% Abluftrückführung gesenkt werden. Dies entspricht einer Ersparnis von 20,5 %. Wie bereits in Kapitel 4.3 ausgeführt, wurden aus technischen Gründen nur bis ca. 50 % rückgeführt. Die jetzigen Ausführungen dienen der grundsätzlichen Betrachtung für weitergehende Entwicklungsschritte.

Durch die Kreislaufführung der Abluft wird die abgeführte Fortluftmenge vermindert. Bei gleichen Freisetzungsmengen von Wasser und Organik führt dies zu steigenden Konzentrationen. Hieran wird erneut die grundsätzliche Problematik des Projektes deutlich. Während im Betrieb ohne Abluftrückführung bzw. geringer Abluftrückführung der Gehalt an Organik unterhalb des Grenzwertes liegt (Luft-Waren-Verhältnis nicht berücksichtigt), wird er bei minimalem Energieeinsatz bzw. maximaler Rückführung um nahezu das Doppelte überschritten. Das Ziel der erhöhten Energieeffizienz zieht daher die Notwendigkeit von zusätzlichen Abluftreinigungsmaßnahmen nach sich.

Die zunehmende Fortlufttemperatur (nach der Wärmerückgewinnung) ist dadurch zu begründen, dass bei Kreislaufführung von Abluft die zugeführte Frischluftmenge abnimmt. Dadurch wird der Wärmekapazitätsstrom der Fortluft im Verhältnis zur Umgebungsluft größer und der Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung verschlechtert sich.

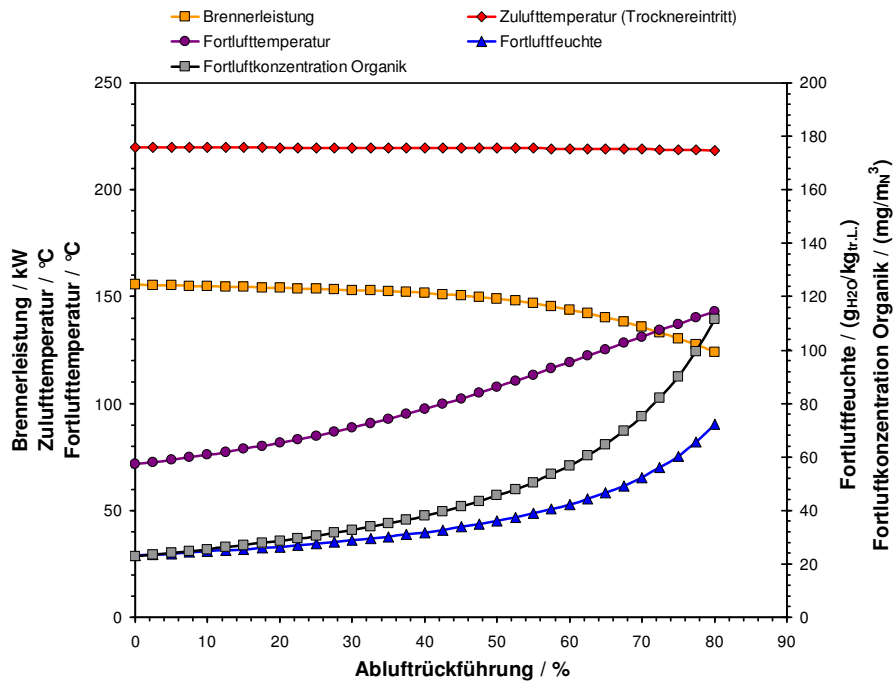


Abb. 30: Einfluss der Abluftrückführung auf die wesentlichen Prozessgrößen

## 6.4 Neues Verfahrenskonzept (Beispiel: Trockenfixierung)

Da bei den bisherigen Betriebstemperaturen der Brennkammer kein nachweisbarer Umsatz von Organik stattfindet, muss die Temperatur sehr weit angehoben werden (bis auf etwa 750 °C). Da dieses Temperaturniveau für die Zuluftkanäle und den Trockner zu hoch ist, und außerdem eine direkte Abfuhr unwirtschaftlich wäre, muss ein Wärmeübertrager nachgeschaltet werden, welcher den gereinigten Luftstrom (Reinluft) abkühlt und die Abluft vorwärmt. Zur Anhebung der Zulufttemperatur ist außerdem ein Bypass vorgesehen. Das Blockschema des Prozesses zeigt Abb. 31.

Eine Wärmerückgewinnung zwischen Abluft und Umgebungsluft wie beim System Power Frame Eco ist hier nicht sinnvoll. Zwar würde die Umgebungsluft erwärmt, die Abluft aber würde erst abgekühlt und müsste danach in der TNV um den gleichen Betrag wieder aufgeheizt werden. Stattdessen erfolgt das Vorwärmen der Umgebungsluft mit einer Wärmerückgewinnung aus der Fortluft. Auch dieser Wärmeübertrager ist mit einem Bypass ausgestattet.

Die Regelung der Zulufttemperatur mit Hilfe eines „heißen Bypass“ (am TNV-Wärmeübertrager) und eines „kalten Bypass“ (am Fortluft-Wärmeübertrager) ist erforderlich, weil die Brennkammertemperatur bei diesem System nur innerhalb enger Grenzen variiert werden kann. Nach Unten hin darf eine gewisse Mindesttemperatur nicht unterschritten werden, da sonst die Oxidation der Schadstoffe nicht mehr ausreichend ist, nach Oben hin ist die Temperatur durch die verwendeten Materialien begrenzt.

Die in den Berechnungen vorgegebenen Abluftmassenströme beziehen sich auf den Trockneraustritt. Während sich bei den bisherigen Systemen aus dieser Vorgabe unmittelbar der benötigte Umgebungsluftstrom ergab, ist dies hier nicht ohne weiteres möglich. Wie man

nach Analyse des Schemas feststellen wird, lässt sich der gleiche Abluftstrom bei geringen Umgebungsluftmengen und kleinen Fortluftströmen als auch bei großen Umgebungs- und Fortluftströmen erzielen (so lange der benötigte Zuluftmassenstrom eingehalten wird). Um die entsprechenden Mengen festzulegen, wird also noch eine weitere Vorgabe benötigt. Hierfür wurde die Fortluftfeuchte gewählt, die bereits bei bestehenden Anlagen zur effizienten Regelung des Abluftvolumenstroms gemessen wird. Eine weitere Zwangsbedingung für den benötigten Umgebungsluftstrom ergibt sich aus der erforderlichen Zulufttemperatur. Ist diese höher als erforderlich, muss zur Kühlung zunächst die Umgebungsluftvorwärmung umfahren und dann ggf. zusätzlich Umgebungsluft zugeführt werden.

Der Fortluft-Wärmeübertrager wurde im Beispiel mit  $k \cdot A = 3.000 \text{ W/K}$ , der TNV-Wärmeübertrager mit  $k \cdot A = 7.500 \text{ W/K}$  dimensioniert.

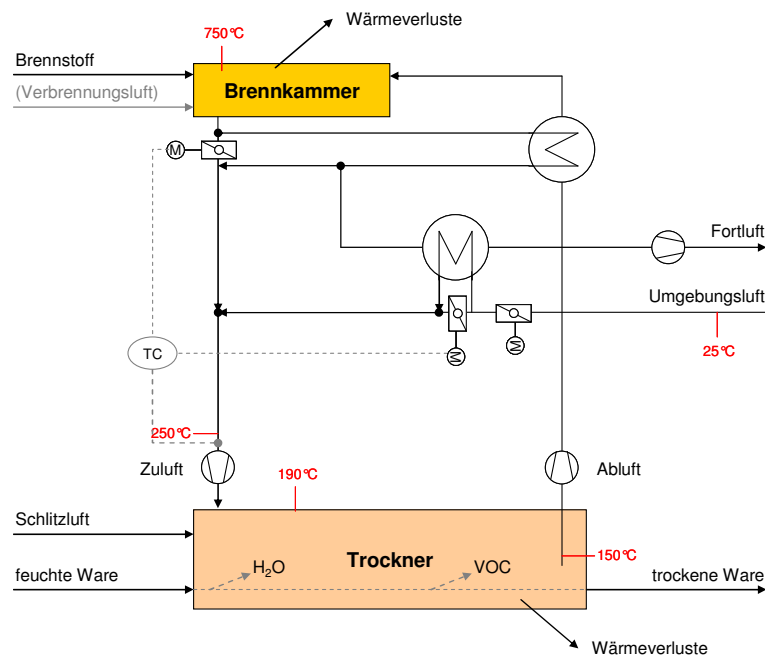


Abb. 31: Direktbeheizter Trockner mit thermischer Nachverbrennung und Wärmerückgewinnung aus der Fortluft (Schema I)

Die in Abhängigkeit des Abluftmassenstroms am Trockneraustritt berechneten Werte der wesentlichen Prozessgrößen sind in Abb. 32 gezeigt. Das wichtigste Merkmal dieses Systems ist, dass die Organik in der Brennkammer nahezu vollständig oxidiert wird, wodurch die Fortluftkonzentration etwa Null beträgt. Bei der technischen Ausführung kann dieser Wert nie ganz erreicht werden, weil zum einen die Oxidation nicht ganz vollständig abläuft und zum anderen kleinere Leckagen vorhanden sein können, durch die Abluft in die Reinluft übertritt.

Die Fortluftfeuchte bleibt bei geringen Abluftströmen konstant. In diesem Bereich wurde die zugeführte Umgebungsluftmenge gemäß der vorgegebenen Zielfeuchte von  $100 \text{ g/kg}_{\text{tr.L.}}$  angepasst. Im weiteren Verlauf nimmt die Fortluftfeuchte ab, weil entsprechend der Bilanz bzw. der benötigten Zulufttemperatur mehr Umgebungsluft zugeführt werden muss.

Der minimale Abluftstrom von 25% des Auslegungsfalls konnte hierbei nicht erreicht werden, weil bei sehr geringen Mengen der Taupunkt auf der Fortluftseite unterschritten wurde. Dieser Zustand wird bei etwa  $1.140 \text{ m}_N^3/\text{h}$  erreicht.

Da das Trocknerverhalten vom Beheizungssystem unabhängig ist, ist der Verlauf der Zulufttemperatur deckungsgleich zu den Verläufen der anderen Systeme. Die Fortlufttemperatur steigt durchgehend an. Dies liegt daran, dass der Wirkungsgrad der Abluftvorwärmung/Reinluftabkühlung kleiner wird je größer die durch den Wärmeübertrager strömenden Luftmengen sind. Die Diskontinuität im Verlauf wird durch den „kalten Bypass“ am Fortluftwärmeübertrager verursacht. Im vorderen, linearen Bereich wird der Wärmeübertrager teilweise, im anschließenden Bereich vollständig umfahren. Daher entspricht dort die Fortlufttemperatur auch der Zulufttemperatur am Austritt der TNV-WRG (vgl. Abb. 33). Die Größenordnung der Fortlufttemperatur ist mit bis zu 320 °C sehr viel höher, als im vorherigen Fall (um 100 °C). Das Niveau ließe sich zwar durch einen größeren TNV-Wärmeübertrager senken, allerdings ist dieser für diesen Fall schon sehr groß dimensioniert. Bei diesen kleinen Abluftströmen werden Abluftvorwärmtemperaturen um 650 °C erreicht. Sie sind somit etwa um 100 K größer als die übliche Auslegungstemperatur von TNV-Anlagen. Dies liegt daran, dass die Baugröße des Wärmeübertragers für den Referenzfall der Trocknung festgelegt wurde, bei dem ein sehr viel größerer Abluftstrom erforderlich ist.

Die erforderliche Brennerleistung beträgt im untersuchten Bereich etwa zwischen 104 kW und 401 kW und ist somit um 2% bis 85% größer als beim Vergleichssystem Power Frame Eco. Allerdings entsprechen die hier gezeigten Verläufe nicht der optimalen Betriebsweise des Systems.

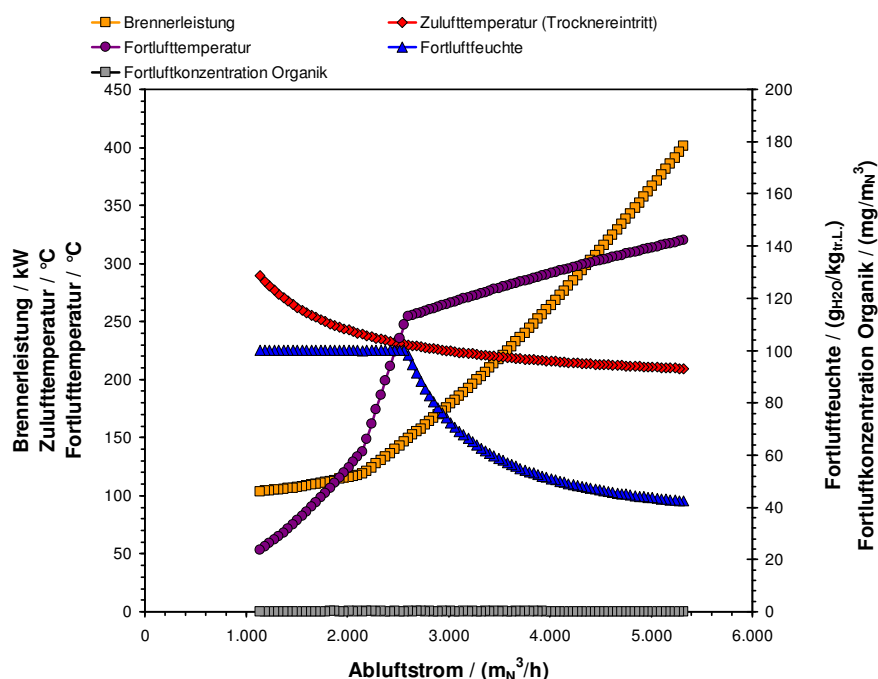


Abb. 32: Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen beim TNV-System Schema I im Fall der Trockenfixierung (5-Felder-Trockner)



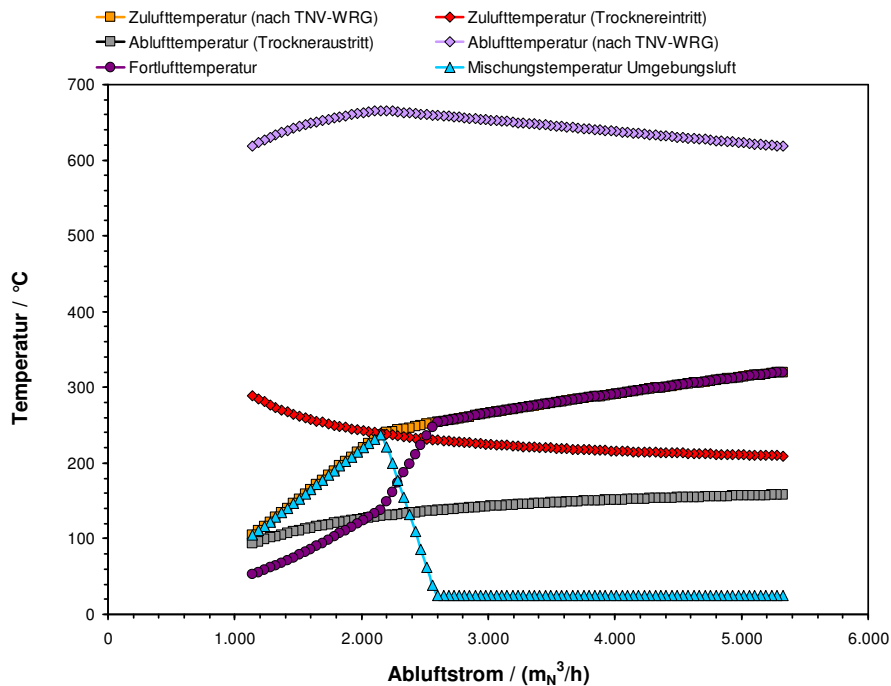


Abb. 33: Einfluss des Abluftstroms auf die Temperaturen beim TNV-System Schema I im Fall der Trockenfixierung (5-Felder-Trockner)

Die vorangegangenen Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass bei höheren Abluftströmen sehr viel Umgebungsluft zugeführt werden muss, nur um die benötigte Zulufttemperatur einzustellen. Der Fortluft-Umgebungsluft-Wärmeübertrager wird dann meist vollständig umfahren, sodass keine Wärmerückgewinnung erfolgt. Dieser Nachteil wurde im Schema II (Abb. 34) dadurch behoben, dass die Absenkung der Zulufttemperatur durch Beimischung von Abluft erfolgt.

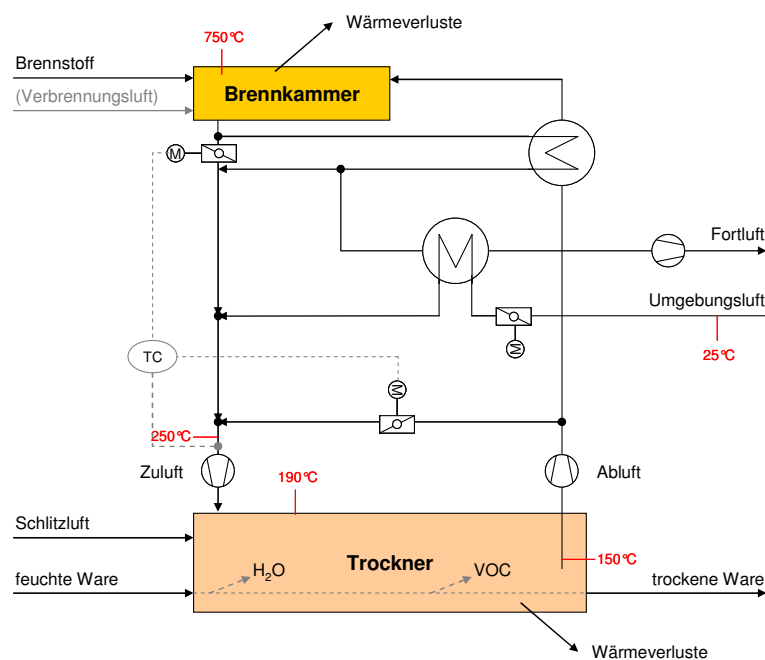


Abb. 34: Direktbeheizter Trockner mit thermischer Nachverbrennung und Wärmerückgewinnung aus der Fortluft (Schema II)

Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abb. 35 gezeigt. Die erforderliche Brennerleistung steigt nun bei höheren Abluftströmen sehr viel weniger an. Sie liegt zwischen 104 kW und 148 kW und ist somit bei niedrigen Volumenströmen mit dem System Power Frame Eco vergleichbar, bei hohen Volumenströmen jedoch um bis zu 32% effizienter.

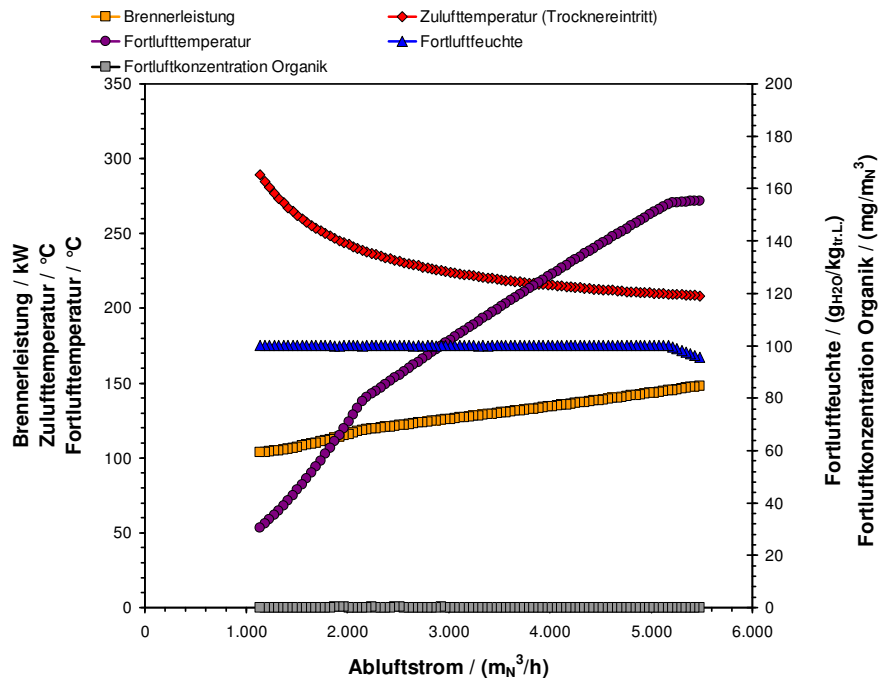


Abb. 35: Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen beim TNV-System Schema II im Fall der Trockenfixierung (5-Felder-Trockner)

Die Temperaturen der Zuluft am Austritt des TNV-Wärmeübertragers liegen beim TNV-System in der Größenordnung von 250°C bis 300°C und sind damit recht hoch. Durch den Fortluft-Umgebungsluft-Wärmeübertrager wird das Niveau zwar um 50 K bis 100 K gesenkt, dennoch sind die Fortlufttemperaturen deutlich höher, als beim System Power Frame Eco.

Es stellt sich daher die Frage, wie dem begegnet werden kann. Eine Alternative, welche sich technisch relativ einfach realisieren ließe, bestünde darin, den heißen Fortluftstrom vor dem Umgebungsluft-Wärmeübertrager zunächst durch den Trockner zu leiten. Somit wird der Trockner zum Teil indirekt beheizt. Das entsprechende Schema ist in Abb. 36 dargestellt. Da diese Stromführung nur sinnvoll ist, wenn die Fortlufttemperatur größer ist als die Trocknertemperatur, ist eine Klappe vorgesehen, mit welcher der Fortluftstrom am Trockner vorbeigeführt werden kann.

Für diese Schaltung wurden die Berechnungen wiederholt. Dabei wurde angenommen, dass in jedem der Innenfelder des Trockners eine Wärmeübertragende Kanalfäche von 2 m x 3 m vorhanden ist und der Übertragungskoeffizient 50 W/m²K beträgt. Da die Innentemperatur des Trockners etwa konstant ist, kann der abgegebene Wärmestrom wie bei einer überströmten Platte berechnet werden

$$\dot{Q} = \dot{W}_{\text{FoL}} \cdot (T_{\text{FoL,ein}} - T_{\text{Trockner}}) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{k \cdot A}{\dot{W}_{\text{FoL}}}} \right). \quad (\text{Gl. 24})$$

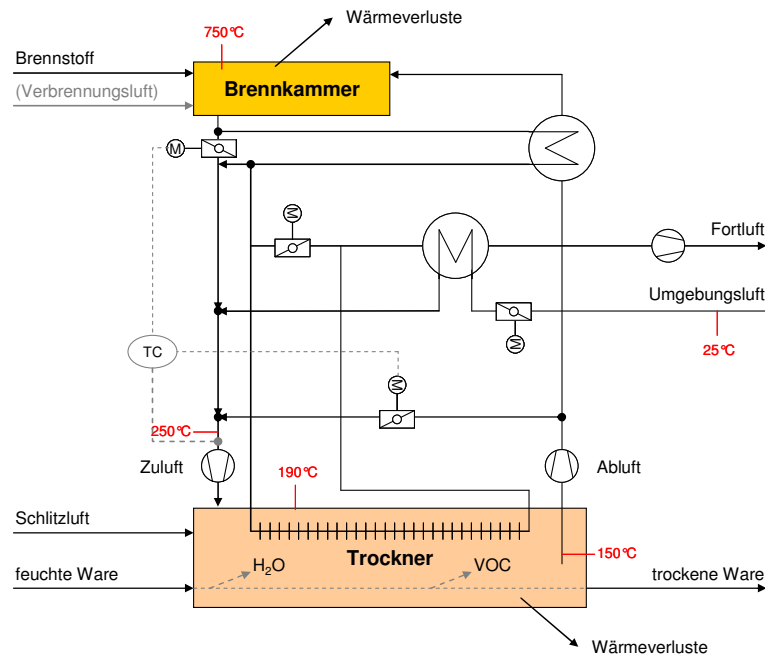


Abb. 36: Direktbeheizter Trockner mit thermischer Nachverbrennung und Wärmerückgewinnung aus der Fortluft (Schema III)

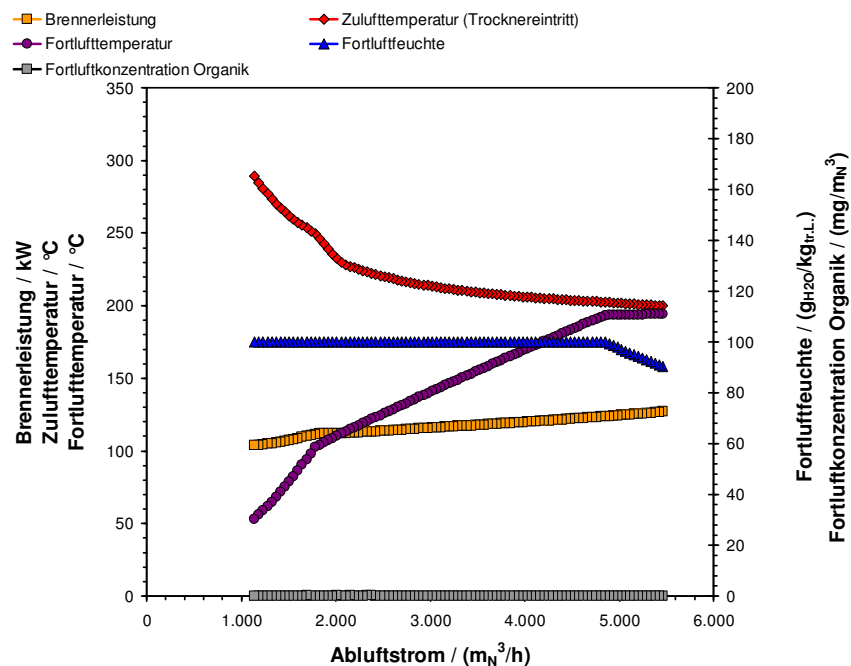


Abb. 37: Einfluss des Abluftstroms auf die wesentlichen Prozessgrößen beim TNV-System Schema III im Fall der Trockenfixierung (5-Felder-Trockner)

Wie aus Abb. 37 ersichtlich ist, werden die Fortlufttemperaturen und damit die benötigte Brennerleistung gegenüber dem Schema II noch einmal reduziert. Die Minimalleistung bei sehr kleinem Abluftstrom von 104 kW verändert sich nicht, weil in diesem Bereich die Fortlufttemperatur nach der TNV niedriger ist als die Trocknertemperatur (vgl. Abb. 35). Die Maximalleistung bei großem Abluftstrom verringert sich hingegen auf 127 kW und ist somit um 21 kW kleiner als bei Schema II.

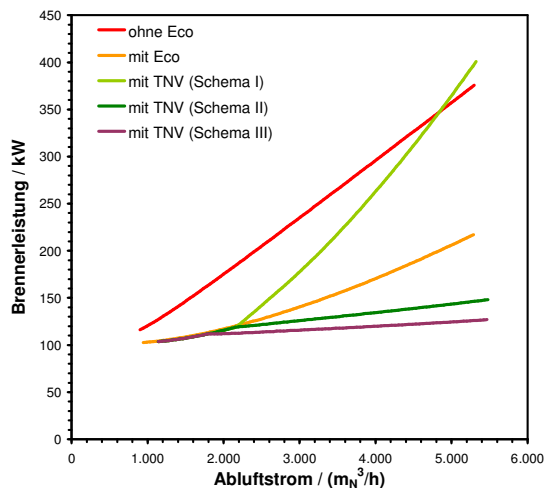


Abb. 38: Vergleich der Brennerleistung der verschiedenen Systeme im Fall der Trockenfixierung

Abb. 38 stellt die in Abhängigkeit des Abluftstroms berechneten Brennerleistungen der Vergleichssysteme einander gegenüber. Es wird deutlich, dass die Schaltung mit TNV ohne Abluftrückführung (Schema I) überwiegend sehr viel höhere Leistungen erfordert, als das System Power Frame Eco. Durch die Regelung der Zulufttemperatur mit Beimischung von Abluft (Schema II) ist das TNV-System jedoch bereits in einem breiten Bereich effizienter. Durch die indirekte Trocknerbeheizung mit Fortluft (Schema III) kann der Bereich noch einmal verbreitert und das Leistungsniveau verringert werden.

Vergleicht man den Auslegungsfall ergibt sich folgendes Bild:

- Standard Trockner: 268 kW
- Power Frame Eco: 156 kW
- TNV-Schema I: 225 kW (+44% ggü. PF Eco)
- TNV-Schema II: 131 kW (-16% ggü. PF Eco)
- TNV-Schema III: 119 kW (-24% ggü. PF Eco)

**Durch die TNV-Schaltungen II und III lassen sich somit in diesem Referenzfall beide Projektziele (höhere Energieeffizienz, geringere Emissionen) miteinander in Einklang bringen.**

Die berechneten Verläufe der Fortluftfeuchte zeigt Abb. 39 (a). Da beim TNV-System jeweils nur die minimal erforderliche Umgebungsluftmenge nachgeführt wird, ist die Fortluftfeuchte deutlich höher. Dies stellt jedoch keinen unmittelbaren Nachteil dar so lange der Taupunkt überall eingehalten wird, was im gezeigten Bereich der Fall ist. Mittelbar ergibt sich hieraus jedoch die Notwendigkeit, die Fortluftfeuchte messtechnisch genau zu erfassen, denn aus der Zielfeuchte ergibt sich die energieoptimale Anlageneinstellung. Wird diese zu ungenau gemessen, kann dies dazu führen, dass das TNV-System in einem Bereich betrieben wird, in dem es einen höheren Energiebedarf aufweist als die Vergleichssysteme.

Durch die geringere Umgebungsluftzufuhr ist beim TNV-System auch der jeweilige Fortluftstrom kleiner (b). Die verbesserte Effizienz bei gleicher Trocknerlast ist dadurch zu erklären, dass in diesen Bereichen die mit der Fortluft verbundenen Wärmeverluste geringer sind. Die Verringerung der Verluste durch Minderung des Fortluftmassenstroms überwiegt in diesen Bereichen die Steigerung aufgrund der höheren Fortlufttemperaturen (c).

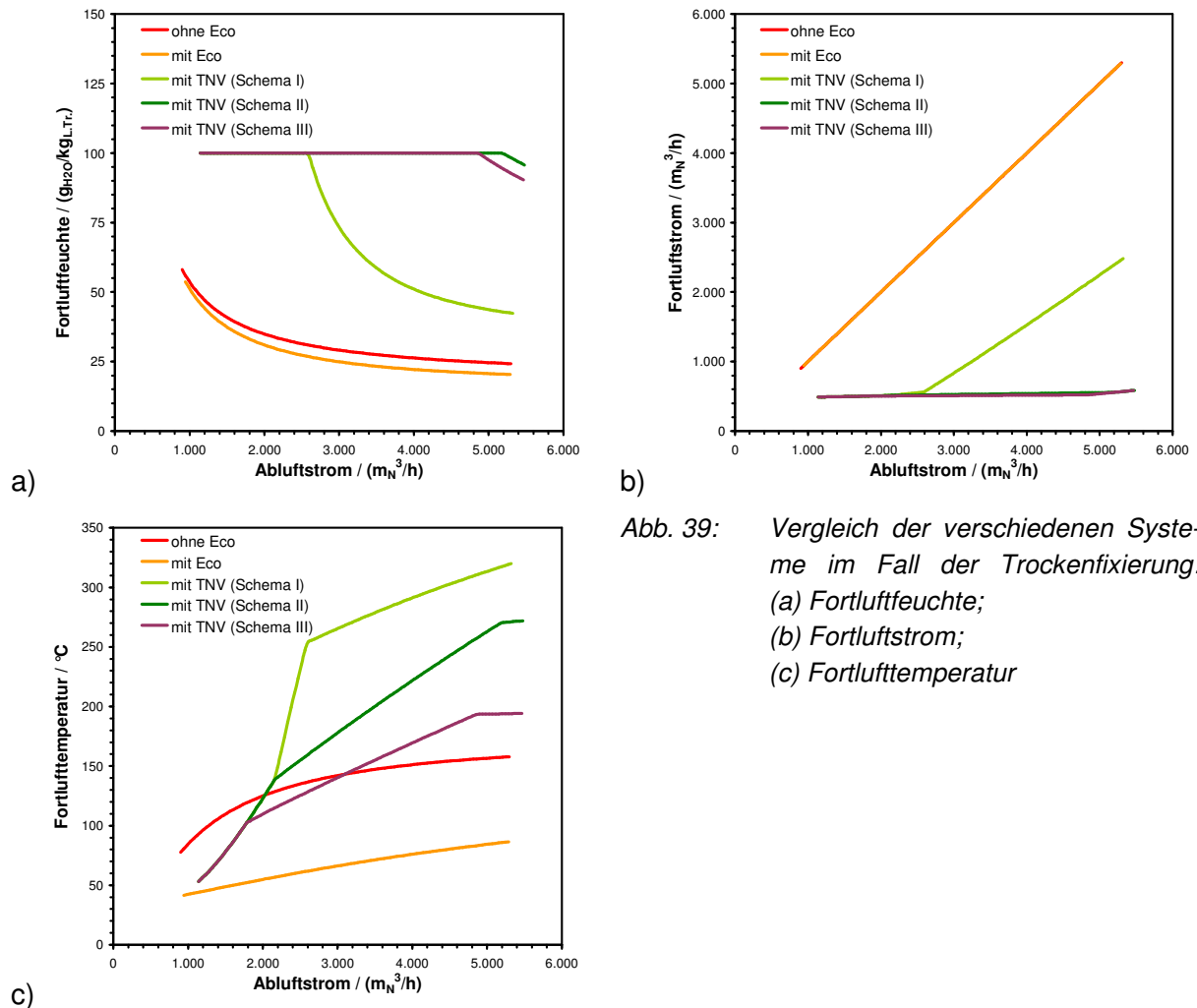


Abb. 39: Vergleich der verschiedenen Systeme im Fall der Trockenfixierung:  
 (a) Fortluftfeuchte;  
 (b) Fortluftstrom;  
 (c) Fortlufttemperatur

Insgesamt kann festgehalten werden, dass das TNV-System wegen der begrenzten Brennraumtemperatur, der aufwändigeren Schaltung zum Anpassen der Zulufttemperatur und der vorgesehenen Feuchteregelung erhöhte Anforderungen an die Regelung des Systems stellt.

## 6.5 Einfluss der Organik bei Fixierprozessen

Die zuvor gezeigten Ergebnisse des Referenz-Fixierprozesses wurden unter der Voraussetzung durchgeführt, dass ein konstanter Massenanteil an Organik zugeführt wird. Diese Menge hängt jedoch stark vom jeweiligen Ausrüstungsprozess und der verwendeten Rezeptur ab. Daher wurden ergänzende Berechnungen durchgeführt, in denen die Menge der Organik (angegeben als Masse der freigesetzten Organik bezogen auf den Massenstrom der trockenen Ware) variiert wurde. Für die anderen Randbedingungen wurden die Werte der Trockenfixierung zugrunde gelegt.

Die wesentlichen Unterschiede ergeben sich zum einen im Gesamtkohlenstoff-Gehalt der Abluft und in der benötigten Brennerleistung (Abb. 40). Da die Anlageneinstellung und damit der Abluftstrom konstant gehalten wurden, steigt die Abluftkonzentration linear mit der frei-

gesetzten Masse an Organik an. Je nach Auflage können Gehalte von  $2 \text{ g/m}_N^3$  und mehr erreicht werden.

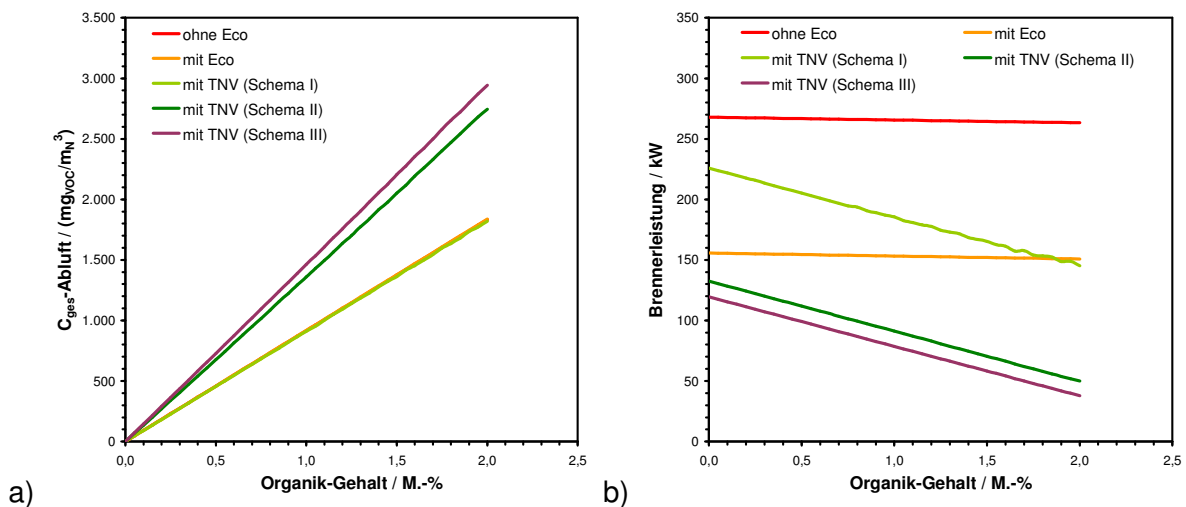


Abb. 40: Einfluss des Organik-Gehaltes der Warenbahn bei den verschiedenen Systemen: (a) Gesamtkohlenstoff-Konzentration in der Abluft; (b) Brennerleistung

Mit dem angenommenen Heizwert der Organik von  $40 \text{ MJ/kg}$  (vgl. Abschnitt 6.2) ergeben sich die in Diagramm (b) gezeigten Minderungen der Brennerleistung. Es ist zu erkennen, dass die Thermische Nachverbrennung nach Schema III ab einem freigesetzten Massenanteil an Organik von ca. 3 M.-% (bezogen auf den trockenen Warenstrom) autotherm arbeiten würde. Das heißt, die Verbrennungswärme der freigesetzten Organik reicht aus, um den Wärmebedarf des Systems zu decken.

Diese Darstellung soll vor allem veranschaulichen, dass je nach Rezeptur recht hohe Abluftkonzentrationen erreicht werden können. Dies resultiert, wie bereits erläutert, aus dem verringerten Frischluftbedarf des Systems. Die Minderung der Brennerleistung bzw. der autotherme Betriebspunkt hingegen hängen jeweils von der Verbrennungswärme der zugeführten organischen bzw. brennbaren Stoffe ab. Daher sind die Absolutwerte nicht aussagekräftig und es kann lediglich die Tendenz beurteilt werden.

## 6.6 Neues Verfahrenskonzept (Beispiel: Trocknung)

Im Fall der Trockenfixierung konnte gezeigt werden, dass das TNV-System bei richtiger Betriebsweise weniger Brennstoff benötigt als die Vergleichssysteme. Um dies weiter abzuschern, wurde ein zweiter charakteristischer Betriebsfall definiert, nämlich ein Trocknungsprozess mit sehr hoher Warenfeuchte (75%).

Auf die einzelnen Verläufe muss nicht im Detail eingegangen werden. Stattdessen wird nur der Systemvergleich durchgeführt.

Für die maximale Fortluftfeuchte wurde hierbei ein Wert von  $150 \text{ g/kg}_{\text{L.tr}}$  gewählt.

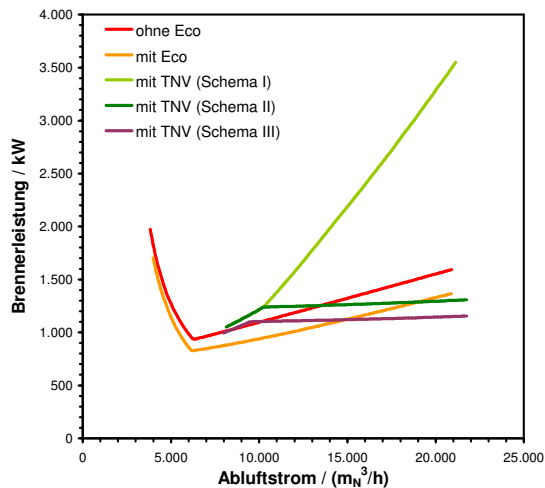


Abb. 41: Vergleich der Brennerleistung der verschiedenen Systeme im Fall der Trocknung

Abb. 41 stellt wieder die in Abhängigkeit des Abluftstroms berechneten Brennerleistungen der Vergleichssysteme einander gegenüber. Auch hier wird deutlich, dass die Schaltung mit TNV ohne Abluftrückführung (Schema I) überwiegend sehr viel höhere Leistungen erfordert, als das System Power Frame Eco. Durch die Regelung der Zulufttemperatur mit Beimischung von Abluft (Schema II) ist das TNV-System hingegen bei sehr hohen Abluftströmen effizienter. Durch die indirekte Trocknerbeheizung mit Fortluft (Schema III) kann das Leistungsniveau zwar weiter verringert werden, dennoch werden die Minimalwerte des PF Eco nicht überall erreicht.

Vergleicht man den Auslegungsfall ergeben sich folgende Leistungsdaten:

- Standard Trockner: 1.280 kW
- Power Frame Eco: 1.088 kW
- TNV-Schema I: 2.075 kW (+91% ggü. PF Eco)
- TNV-Schema II: 1.258 kW (+16% ggü. PF Eco)
- TNV-Schema III: 1.118 kW (+3% ggü. PF Eco)

**Durch die TNV-Schaltung lassen sich somit in diesem Referenzfall beide Projektziele (höhere Energieeffizienz, geringere Emissionen) nicht vollständig in Einklang bringen.**

Die berechneten Fortluftdaten sind in Abb. 42 gezeigt. Die Fortluftfeuchte der TNV-Systeme liegt wegen der eingeregelt Zielfeuchte durchgehend auf höherem Niveau (a). Dadurch sind die Fortluftströme (b) meist geringer als bei den Vergleichssystemen. Der höhere Energiebedarf ist also durch die Fortlufttemperaturen zu erklären (c), die bei den TNV-Systemen bei gleichem Abluftstrom deutlich höher sind als bei den Standard-Trocknern.

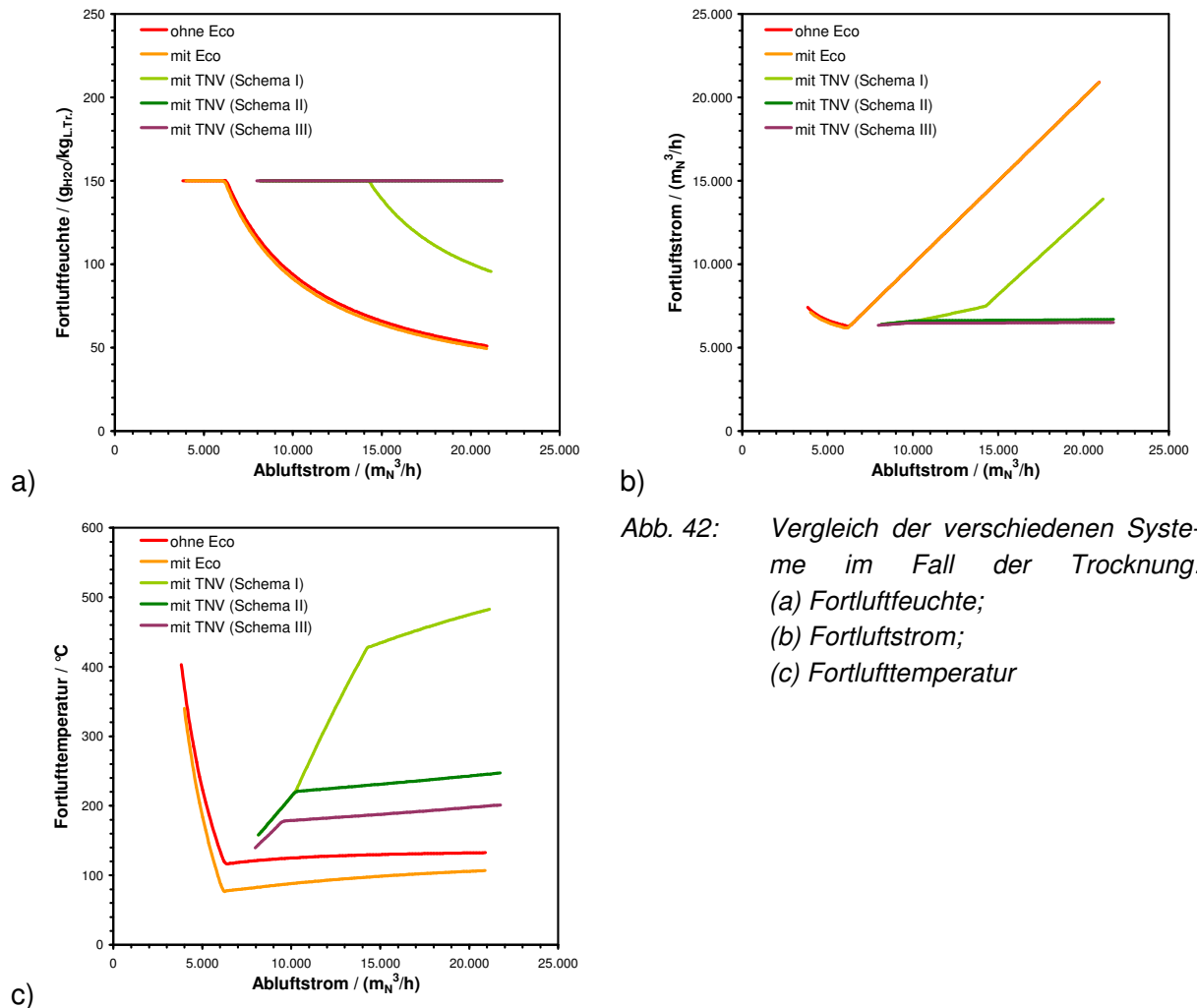


Abb. 42: Vergleich der verschiedenen Systeme im Fall der Trocknung:  
 (a) Fortluftfeuchte;  
 (b) Fortluftstrom;  
 (c) Fortlufttemperatur

## 6.7 Einfluss der Grenzfeuchte bei Trocknungsprozessen

Wie bereits deutlich wurde, hängt der Energiebedarf der TNV-Systeme vor allem von den Fortluftverlusten (Massenstrom, Temperatur) ab. Diese wiederum ergeben sich aus der vorgegeben Grenzfeuchte. Je niedriger die Grenzfeuchte gewählt wird, desto mehr Umgebungsluft muss zu- und umso mehr Fortluft abgeführt werden. Der Energiebedarf steigt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass der Leistungsbedarf verringert werden kann, wenn die Grenzfeuchte erhöht wird.

Dieser Zusammenhang wird durch die Berechnungsergebnisse in Abb. 43 bestätigt. Hierbei wurden wieder die Randbedingungen des Auslegungsfalls zugrunde gelegt. Es ist zu sehen, dass die erforderliche Brennerleistung für Werte der Grenzfeuchte zwischen 100 g<sub>H2O</sub>/kg<sub>L.tr.</sub> und etwa 250 g<sub>H2O</sub>/kg<sub>L.tr.</sub> sehr stark abnimmt, bei höheren Werten aber in geringerem Maße. Das Schema I zeigt dieses Verhalten jedoch nicht. Dies liegt daran, dass hier der benötigte Umgebungsluftstrom zum Einstellen der Zulufttemperatur größer ist, als derjenige zum Einhalten der Grenzfeuchte, sodass nur das erste Kriterium nicht aber das zweite wirksam ist.

Aus verfahrenstechnischer Sicht ist gegen die hohen Feuchtegehalte nichts einzuwenden, solange der Taupunkt überall eingehalten wird. Da in den betrachteten Fällen die Minimaltemperatur meist größer ist als 100 °C, wird das Nebelgebiet ohnehin nicht erreicht. Theore-



tisch könnte also die Grenzfeuchte auch unendlich hoch gewählt werden, was einer Trocknung mit überhitztem Dampf entsprechen würde.

Wird diese Thematik aus dem Blickwinkel der Produktionstechnik betrachtet, sind die hohen Feuchtegehalte nicht ausführbar. Zur Darstellung der anzustrebenden Luftfeuchte gibt es detaillierte Untersuchungen [3], [4] welche die Luftfeuchte aufgrund Trocknungsgeschw. und energetisch sinnvoller Fahrweise zwischen  $100 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{uft}}$  und  $130 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{uft}}$  begrenzt. Ein weiterer wichtiger Faktor liegt in der Einhaltung der Taupunktgrenze. Da es sich bei einer Spanmaschine um ein offenes System handelt, kann es am Trocknerein- und austritt leicht zur Kondensation kommen. Aus diesem Grund sind bereits bestehende Textilspanmaschinen mit einem Feuchtefühler in der Abluft ausgestattet, um die Abluft entsprechend der Feuchtevorgabe zu regeln.

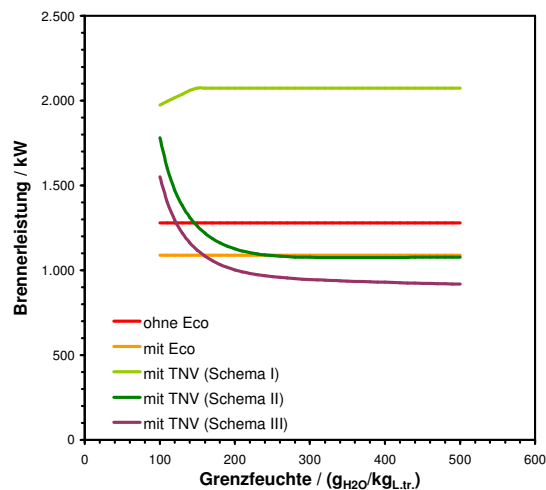


Abb. 43: Einfluss der Grenzfeuchte auf die Brennerleistung der verschiedenen Systeme im Fall der Trocknung

## 6.8 Einfluss der Wärmeübertragergröße

Unter diesen Auslegungsbedingungen lässt sich offenbar mit den festgelegten Anlagenparametern die Wirtschaftlichkeit des neuen Systems nicht durchgängig darstellen. Daher wurde zusätzlich überprüft, welchen Einfluss die Parametrierung der Wärmeübertrager auf den Energiebedarf aufweist. Dazu wurden für den Auslegungsfall die Wärmeübertragerkenngrößen  $k \cdot A$  der TNV-WRG bzw. der Fortluft-WRG variiert. Die berechneten Zusammenhänge zeigt Abb. 44.

Durch Vergrößerung des Fortluft-Wärmeübertragers bis zu  $k \cdot A = 10.000 \text{ W/K}$  ließe sich die benötigte Leistung auf  $1.089 \text{ kW}$  bei Schema I und  $997 \text{ kW}$  bei Schema II verringern (a). Würde stattdessen bei gleichbleibender Ausgangsgröße des Fortluft-Wärmeübertragers der TNV-Wärmeübertrager vergrößert (hier bis auf  $k \cdot A = 30.000 \text{ W/K}$ ) würde die Leistung auf  $1.022 \text{ kW}$  bzw.  $979 \text{ kW}$  gemindert.

Erst bei sehr hoher Abluftvorwärmung an der TNV ( $k \cdot A > 23.000 \text{ W/K}$  bei Fortluft-WRG mit  $k \cdot A > 3.000 \text{ W/K}$ ) existiert ein Bereich ab dem das TNV-Schema I energetisch günstiger ist

als die Vergleichssysteme. Die dazu benötigten Vorwärmgrade (Abluftvorwärmtemperatur 620 °C bei Ablufttemperatur 130 °C entspricht einem Wirkungsgrad von 79%) können mit den bei TNV-Anlagen üblichen Rekuperatoren (Rohrbündelwärmeübertrager) kaum realisiert werden. Stattdessen wären Regeneratoren einzusetzen, sodass in diesem Betriebsbereich RNV-Anlagen (thermische Nachverbrennungsanlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung) geeigneter wären.

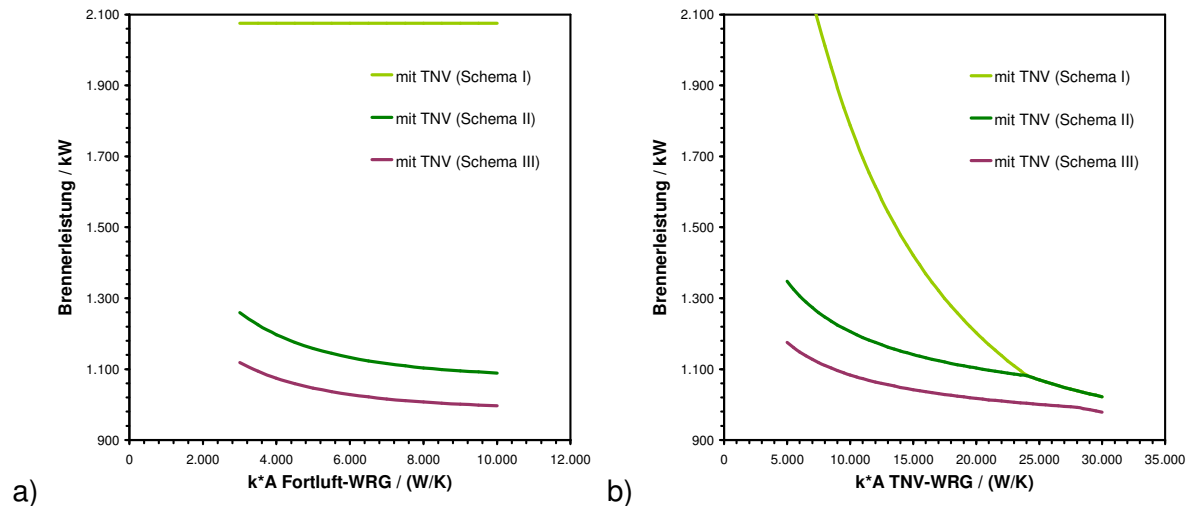


Abb. 44: Einfluss der Wärmeübertragergröße bei den TNV-Systemen im Fall der Trocknung:  
 (a) Fortluft-Wärmeübertrager; (b) TNV-Wärmeübertrager

Da bereits die Ausgangsgrößen der beiden Wärmeübertrager recht groß gewählt waren und sich nur bei sehr starker weiterer Vergrößerung ein deutlicher energetischer Vorteil ergibt, muss konstatiert werden, dass in diesem Auslegungsfall das TNV-System der bisherigen Schaltung bestenfalls gleichwertig ist.

## 6.9 Erste Bewertung der Auslegungsbedingungen

In Tab. 5 sind die wesentlichen Randbedingungen des TNV-Systems für die beiden Referenzfälle zusammengefasst (Schema III). Zugrunde gelegt wurde jeweils der Betriebspunkt mit der minimalen berechneten Leistung, sowie die zuvor genannten Parameter (Grenzfeuchte Trockenfixierung 100  $g_{H_2O}/kg_{L.tr.}$ , Grenzfeuchte Trocknung 150  $g_{H_2O}/kg_{L.tr.}$ ,  $k \cdot A$  TNV-WRG = 7.500 W/K;  $k \cdot A$  Fortluft-WRG = 3.000 W/K).

Für die technische Realisierung dieses Systems ist das Verhältnis der Abluftmassenströme ungünstig. TNV-Anlagen weisen üblicherweise ein Stellverhältnis des Abluftstroms von etwa 1:3 auf. Hier liegt aber ein Verhältnis von fast 1:7 vor. Durch eine Erhöhung der Grenzfeuchte auf 500  $g_{H_2O}/kg_{L.tr.}$  ließe sich zwar im Fall der Trocknung der Abluftmassenstrom auf 8.022 kg/h reduzieren, dies entspräche aber immer noch einem Verhältnis von nahezu 1:6.

Tab. 5: Auslegungsbedingungen des 5-Felder-Trockners (TNV-Schema III) für die beiden Referenzfälle am berechneten Punkt der minimalen Brennerleistung

		Trockenfixierung	Trocknung
Abluftstrom durch TNV	kg/h	1.406	9.625
Ablufttemperatur	°C	94	121
Abluftfeuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	87	130
Abluftvorwärmtemperatur	°C	619	535
Brennerleistung	kW	104	995

Wird der TNV-Wärmeübertrager so ausgelegt, dass beim maximalen Abluftstrom die gewählte Abluftvorwärmtemperatur erreicht wird (normalerweise 550°C hier bei der gewählten Größe etwas weniger), führt dies dazu, dass bei sehr kleinen Abluftströmen deutlich höhere Vorwärmtemperaturen erreicht werden (hier ca. 620°C je nach Auslegung und Massenstrom aber ggf. mehr). Dadurch müssen hochwertigere und entsprechend teure Stähle verwendet werden und die Gefahr von Spannungsrissen steigt.

Auch die Brennerleistung kann bei monovalentem Betrieb nicht beliebig moduliert werden, wengleich der hier vorliegende Bereich von 1:10 noch gut realisierbar ist.

Es stellt sich die Frage, ob durch andere Maßnahmen der Abluftstrom im Trocknungsbetrieb verringert und ggf. gleichzeitig die Energieeffizienz verbessert werden kann.

## 6.10 Optimierter Trocknungsbetrieb

Die bei Antragstellung geplante TNV-Schaltung sah vor, die Abluftteilströme aus der Trocknungszone und der Fixierzone getrennt abzuführen und nur den Teilstrom aus der Fixierzone thermisch zu reinigen. Die dazu notwendige Voraussetzung einer klaren Trennung zwischen Wasserverdampfung und Freisetzung von Organik hat sich jedoch nicht bestätigt (vgl. Abschnitt 4.2).

Wie bereits gezeigt werden konnte, ist bei reinen Fixierprozessen der energetische Vorteil dennoch vorhanden, bei reinen Trocknungsprozessen jedoch nicht.

Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Dilemmas könnte darin bestehen, dass bei der Trocknung - wie ursprünglich beabsichtigt - nur ein Teilstrom über die TNV geführt wird, der verbleibende Reststrom hingegen ohne weitere Behandlung als Fortluft abgeführt wird.

Bei reinem Trocknungsbetrieb (ohne Aufbringen organischer Appreturen) wäre diese Schaltung möglich, sofern keine verzögerten Freisetzungsmechanismen, z. B. Verschleppung von Organik zwischen Fixierprozessen und anschließenden Trockenvorgängen, vorhanden sind.

Abb. 45 zeigt ein entsprechend abgewandeltes Schema. Es entspricht Schema III, allerdings wurde vor dem TNV-Wärmeübertrager eine weitere Luftleitung vorgesehen, durch den ein Abluftteilstrom zur Fortluft gemischt wird. Dieser Teilstrom durchströmt somit nicht mehr die TNV, was zum einen den maximalen Auslegungsstrom der TNV verringert und zum anderen den Brennstoffbedarf senkt.

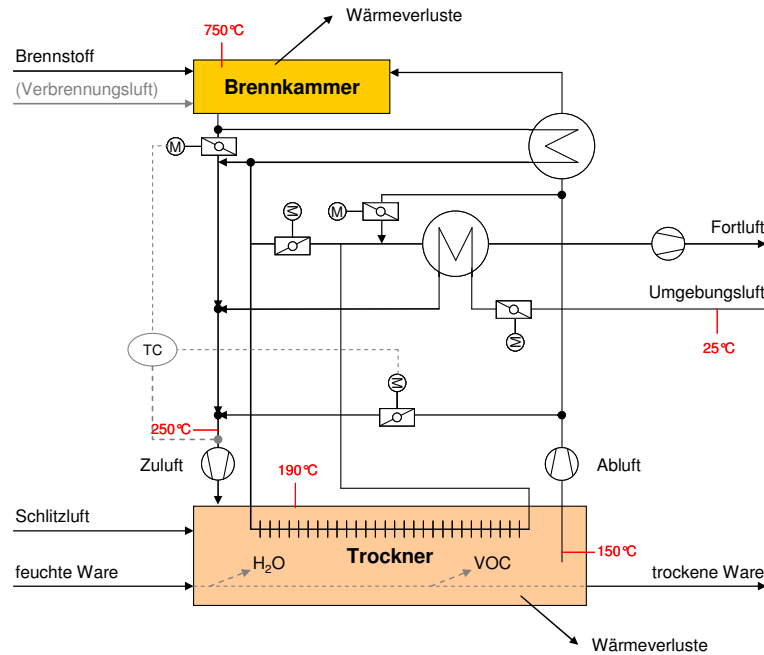


Abb. 45: Direktbeheizter Trockner mit thermischer Nachverbrennung und Wärmerückgewinnung aus der Fortluft (Schema IV)

In Abb. 46 ist ergänzend zu den bereits gezeigten Ergebnissen der anderen Systeme die berechnete Brennerleistung des Schemas IV angegeben. Dabei wurde angenommen, dass der Abluftstrom vor dem TNV-Wärmeübertrager jeweils zur Hälfte durch die TNV und zur Hälfte zur Fortluft geführt wird. Wie zu erkennen ist, wird dadurch der Energiebedarf weiter abgesenkt und durchgehend etwa auf das Niveau des Mindestbedarfs gebracht.

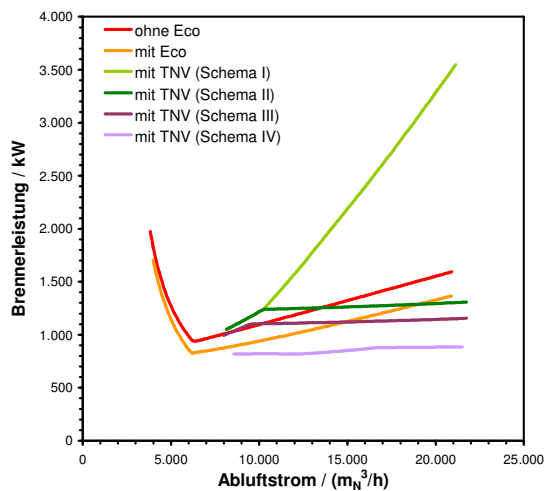


Abb. 46: Vergleich der Brennerleistung der verschiedenen Systeme im Fall der Trocknung

**Somit ist mit dieser Schaltung die Anforderung nach einer verbesserten Energieeffizienz auch im Fall der Trocknung erfüllt.**

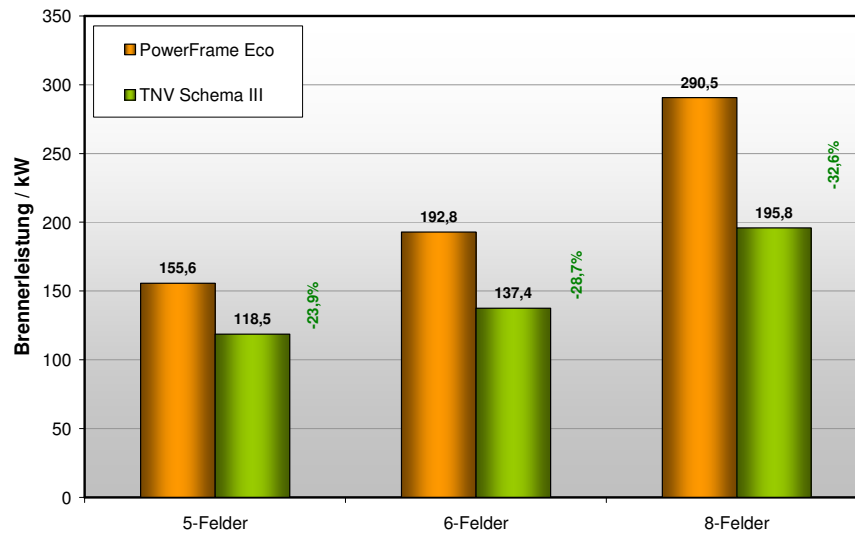
Zu beachten ist aber, dass die Schaltung nur bei reinen Trocknungsprozessen angewandt werden kann. Daher müsste am Bedienpanel des Trockners eine Auswahlmöglichkeit geschaffen werden, durch die der Bediener die Prozessführung zwischen Fixierbetrieb (Schema III) und reinem Trocknungsbetrieb (Schema IV) umschalten kann.

Weiter besteht, wie bereits genannt, hinsichtlich der grundsätzlichen Anwendbarkeit dieser Schaltung die Anforderung, dass keine Verschleppung organischer Bestandteile zwischen nachfolgenden Partien stattfindet.

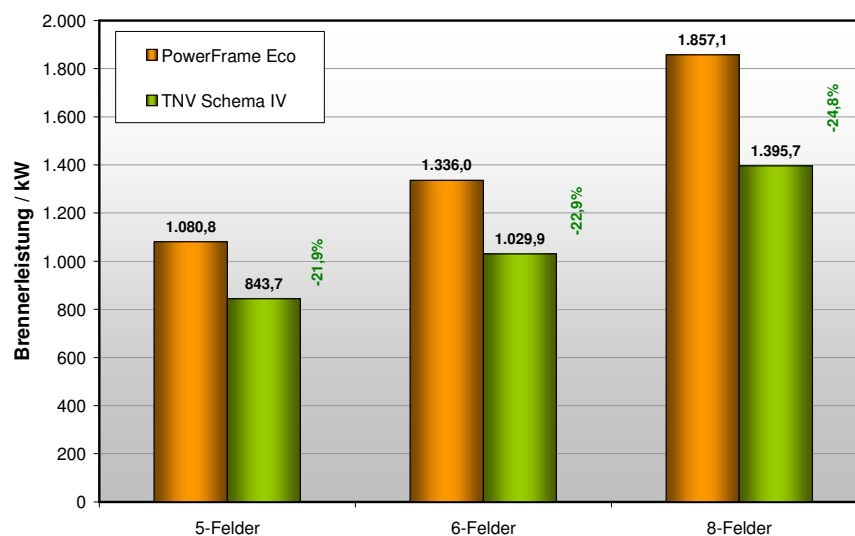
Weiter besteht, wie bereits genannt, hinsichtlich der grundsätzlichen Anwendbarkeit dieser Schaltung die Anforderung, dass keine Verschleppung organischer Bestandteile zwischen nachfolgenden Partien stattfindet.

## 6.11 Verschiedene Baugrößen

Mit den bereits genannten Randbedingungen und Parametern der Referenzfälle wurden Vergleichrechnungen für verschiedene Trocknerbaugrößen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Abb. 47. Dargestellt sind in den einzelnen Reihen die berechneten Brennerleistungen im Auslegungsfall des bisherigen Systems (PowerFrame Eco) sowie des TNV-Systems (Schema III bzw. IV).



a)



b)

Abb. 47: Vergleich der berechneten Brennerleistungen für verschiedene Baugrößen:  
 (a) Trockenfixierung; (b) Trocknung

Es zeigt sich, dass mit dem TNV-Schema III im Fall der Trockenfixierung je nach Baugröße eine Einsparung zwischen 20% und 30% realisiert werden kann. Bei der reinen Trocknung (TNV-Schema IV mit 50% Abluft zur Fortluft) liegt die Einsparung im Bereich 20% bis 25%.

In beiden Fällen nimmt die Effizienz bei größeren Trocknern zu.

## 6.12 Auslegungsdaten

In Tab. 6 sind die berechneten Randbedingungen der wesentlichen Anlagenkomponenten (Trockner, TNV, WRG) zusammengefasst, die sich für die einzelnen Referenzfälle beim neuen Verfahrenskonzept ergeben.

Tab. 6: Zusammenfassung von Randbedingungen der wesentlichen Anlagenkomponenten für die berechneten Betriebspunkte

			Trockenfixierung			Trocknung		
			TNV-Schema III			TNV-Schema IV		
			5-Felder	6-Felder	8-Felder	5-Felder	6-Felder	8-Felder
<b>Trockner</b>								
Zuluft am Trocknereintritt	Massenstrom feucht	kg/h	1.227,6	1.356,3	1.790,1	8.550,9	10.329,6	14.247,0
	Temperatur	°C	289,8	306,4	344,6	364,6	366,7	363,7
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	67,6	64,6	55,8	62,6	62,8	65,8
Schlitzluft	Massenstrom feucht	kg/h	140,0	155,0	206,0	1.035,0	1.250,0	1.720,0
	Temperatur	°C	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
Wareneintrag	Massenstrom feucht	kg/h	356,4	425,7	702,9	1.995,8	2.404,1	3.220,6
	freigesetztes Wasser	kg/h	32,3	38,6	63,7	764,1	920,4	1.233,0
	freigesetzte Organik	kg/h	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0
Abluft am Trockneraustritt	Massenstrom feucht	kg/h	1.400,0	1.550,0	2.060,0	10.350,0	12.500,0	17.200,0
	Temperatur	°C	93,6	96,0	103,4	122,7	125,4	129,3
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	86,5	85,8	84,5	140,9	140,9	141,4
	Konzentration Organik	mg <sub>VOC</sub> /m <sup>3</sup>	71,4	77,0	95,7	0,0	0,0	0,0
	Massenstrom feucht	kg/h	600,0	710,4	1.126,7	7.361,8	8.882,1	11.943,8
	Temperatur	°C	52,9	52,3	52,7	75,6	81,1	91,7
Fortluft	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	100,0	100,0	100,0	150,0	150,0	150,0
	Konzentration Organik	mg <sub>VOC</sub> /m <sup>3</sup>	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	Massenstrom feucht	kg/h	7,9	9,2	13,4	62,4	76,0	104,5
Erdgas	Brennerleistung	kW	103,6	120,6	175,5	817,3	995,4	1.367,9
	<b>Thermische Nachverbrennung</b>							
Abluft am Eintritt	Massenstrom feucht	kg/h	1.400,0	1.550,0	2.060,0	5.175,0	6.250,0	8.600,0
	Temperatur	°C	93,6	96,0	103,4	122,7	125,4	129,3
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	86,5	85,8	84,5	140,9	140,9	141,4
Abluft am WRG-Austritt	Massenstrom feucht	kg/h	1.400,0	1.550,0	2.060,0	5.175,0	6.250,0	8.600,0
	Temperatur	°C	618,4	608,6	587,0	420,8	415,8	413,8
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	86,5	85,8	84,5	140,9	140,9	141,4
Reinluft am WRG-Eintritt	Massenstrom feucht	kg/h	1.407,9	1.559,2	2.073,4	5.237,4	6.326,0	8.704,5
	Temperatur	°C	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	100,0	100,0	100,0	172,1	172,3	172,8
Reinluft WRG-Bypass	Massenstrom feucht	kg/h	310,5	372,6	574,4	2.979,1	3.649,0	5.004,4
	Temperatur	°C	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0	750,0
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	100,0	100,0	100,0	172,1	172,3	172,8
Reinluft am WRG-Austritt	Massenstrom feucht	kg/h	1.097,5	1.186,6	1.499,0	2.258,3	2.677,1	3.700,1
	Temperatur	°C	104,9	106,4	114,8	126,2	132,2	149,3
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	100,0	100,0	100,0	172,1	172,3	172,8
<b>Fortluft-Umgebungsluft-Wärmeübertrager</b>								
Fortluft am Eintritt	Massenstrom feucht	kg/h	600,0	710,4	1.126,7	7.361,8	8.882,1	11.943,8
	Temperatur	°C	104,9	106,4	114,8	123,7	127,5	135,0
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	100,0	100,0	100,0	150,0	150,0	150,0
Fortluft am Austritt	Massenstrom feucht	kg/h	600,0	710,4	1.126,7	7.361,8	8.882,1	11.943,8
	Temperatur	°C	52,9	52,3	52,7	75,6	81,1	91,7
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	100,0	100,0	100,0	150,0	150,0	150,0
Umgebungsluft gesamt am Eintritt	Massenstrom feucht	kg/h	419,7	507,5	843,4	5.500,3	6.635,6	8.886,3
	Temperatur	°C	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
Umgebungsluft am Austritt	Massenstrom feucht	kg/h	419,7	507,5	843,4	5.500,3	6.635,6	8.886,3
	Temperatur	°C	104,9	106,3	114,2	97,1	94,5	90,5
	Feuchte	g <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>L.tr.</sub>	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2

Anhand dieser Daten wurden die in Tab. 7 genannten Auslegungsbedingungen für die wesentlichen Komponenten des neuen Systems gewählt. Angegeben sind jeweils die für die Auslegung zugrunde zu legenden Schwankungsbreiten der einzelnen Größen. Diese sind nicht immer einander zugehörig. Vielmehr ergeben sich die Minimal- und Maximallast aus den jeweiligen Kombinationen der Minimal- und Maximalwerte.

Weiter ist zu berücksichtigen, dass das betrachtete Verfahrenskonzept die indirekte Wärmeübertragung zwischen Fortluft und Trockner beinhaltet. Dies kann dadurch realisiert werden, dass der Fortluftkanal durch den Trockner geführt wird. Dabei müsste über die Kanalfäche in jedem der Innenfelder eine Wärmeübertragergröße von  $k \cdot A = 300 \text{ W/K}$  ( $50 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \cdot 2 \text{ m} \cdot 3 \text{ m}$ ) gewährleistet werden (ggf. mit Rippen o. Ä.).

Die maximalen Abluftströme der TNV ergeben sich im Trocknungsprozess. Hierbei wurde, wie zuvor beschrieben, davon ausgegangen, dass nur die Hälfte des nach Abluftrückführung zum Trockner verbleibenden Abluftmassenstroms zur TNV geführt wird, die andere Hälfte zur Fortluft.

Tab. 7: Gewählte Auslegungsdaten der wesentlichen Komponenten

			Minimal			Maximal		
			5-Felder	6-Felder	8-Felder	5-Felder	6-Felder	8-Felder
<b>Thermische Nachverbrennung</b>								
Abluft	Massenstrom feucht	kg/h	1.400	1.550	2.060	5.175	6.250	8.600
	Eintrittstemperatur	°C		80			150	
	Feuchte	$g_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{L.tr.}}$		10			200	
	Organik-Gehalt	$g/\text{m}_\text{N}^3$		0			3	
WRG	Vorwärmtemperatur	°C	550			ergibt sich je nach Abluftstrom		
Brennraum	Temperatur	°C	600			800		
	Temperatur (eingeschränkt)	°C	650			750		
<b>Fortluft-Umgebungsluft-Wärmeübertrager</b>								
Fortluft	Massenstrom feucht	kg/h	nicht relevant			7.500	9.000	12.000
	Eintrittstemperatur	°C					150	
	Austrittstemperatur	°C					100	
	Feuchte	$g_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{L.tr.}}$					200	
Umgebungsluft	Massenstrom feucht	kg/h				5.500	6.650	8.900
	Temperatur	°C				25		
	Feuchte	$g_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{L.tr.}}$				10		

## 6.13 Bewertung

Insgesamt wurden mit dem vereinfachten Modell mehrere Hundert Parametervariationen teilautomatisiert durchgerechnet, wobei charakteristische Betriebsfälle, verschiedene Randbedingungen und wesentliche Anlagenparameter betrachtet wurden. Zusätzlich wurden unterschiedliche Anlagenschaltungen evaluiert.

Anhand der Berechnungsergebnisse wurde schrittweise ein Anlagenkonzept entwickelt, das die gesetzten Anforderungen erfüllt. Das in Abb. 45 gezeigte vereinfachte Blockschema ist in Abb. 48 als etwas genaueres Anlagenschema dargestellt.

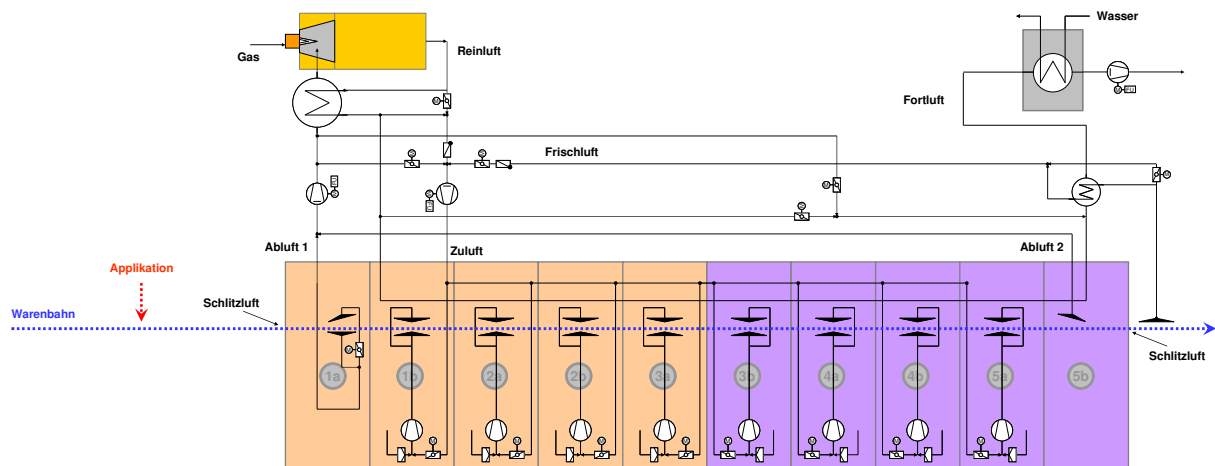


Abb. 48: Verfahrenskonzept: Thermische Nachverbrennung mit Abluftvorwärmung, Fortluftabkühlung und Frischluftvorwärmung

**Mit diesem Verfahrenskonzept lassen sich in allen betrachteten Referenzfällen die Projektziele (höhere Energieeffizienz, geringere Emissionen) miteinander in Einklang bringen. Die rechnerische Einsparung beträgt unter den zuvor genannten Voraussetzungen 20% bis 30%.**

Bei diesem Schema handelt es sich um einen Entwurf. Zahlreiche Details (Anordnung von Gebläsen und Klappen, genaue Leitungsführung, Auslegung der Komponenten, Kostenermittlung usw.) sollen in einem Folgeprojekt geklärt werden.

Ebenso ist im Weiteren ein Regelungskonzept zu entwickeln. Da die Schaltung komplexer ist als das bisherige Verfahren, der energieoptimale Betriebsbereich eingegrenzt ist und das Verfahren energetisch ineffizient arbeitet, wenn es außerhalb dieses Bereichs betrieben wird, muss die Prozessregelung deutlich höhere Anforderungen erfüllen als bisher. Dies betrifft auch die Messung der Fortluftfeuchte. Das Verfahrenskonzept sieht vor, den benötigten Umgebungsluftstrom anhand einer vorgegebenen Grenzfeuchte einzuregulieren. Dies erfordert eine genaue Messung der Ist-Feuchte. Ein punktuell durchgeführter Vergleich zwischen dem Trockner-Messwert und der mittels FTIR gemessenen Feuchte hat jedoch große Abweichungen ergeben. Insofern sollte auch der Feuchte-Messung in einem Nachfolgeprojekt besondere Beachtung geschenkt werden.

Zur Bewertung der Simulationsergebnisse ist anzumerken, dass ein vereinfachtes, idealisiertes Bilanzmodell verwendet wurde. Das tatsächliche Trocknungs- bzw. Freisetzungsverhalten, Wärmeverluste der Rohrleitungen, der elektrische Energiebedarf, Leakageströme an Klappen u. Ä. konnten hierbei nicht berücksichtigt werden. Auch in diesem Punkt sollten weitere Arbeiten durchgeführt werden, um die bisherigen Ergebnisse weiter abzusichern, weitere Betriebsfälle zu überprüfen und ggf. andere Schaltungsvarianten zu evaluieren.



## 7 Fazit und Ausblick

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass die Rückführung des Abluftteilstroms eine Reduzierung des Energieeinsatzes um 10 % ermöglicht. Weiterhin konnte unter dieser Betriebsweise eine gleichbleibende Warenqualität produziert werden. Eine gleichzeitige thermische Oxidation der in der Abluft enthaltenen VOCs war unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich.

Eine Möglichkeit der Schadstoffverbrennung konnte durch Nutzung der Abluft als vorgewärmte Verbrennungsluft am Gebläsebrenner nachgewiesen werden. Der zu reinigende Abluftmassenstrom ist jedoch wesentlich größer als der Verbrennungsluftbedarf. Daher kann nur ein Teilstrom über den Brenner geführt werden.

Die auf die Messergebnisse aufbauenden Arbeiten zur Modellierung und Entwicklung neuer Verfahrenskonzepte zeigen grundsätzlich die Möglichkeit auf, bei den untersuchten Spannmaschinen gleichzeitig eine Minderung der Emissionen und des Brennstoffbedarfs zu erzielen. Diese beziehen sich auf die Integration einer TNV, die gleichzeitig die notwendige Aufheizung der Prozessluft sicherstellen soll.

Zur Darstellung der Emissionsminderung wird bei der Fa. Brückner des Weiteren der Ansatz der Ressourceneffizienz durch minimalen Eintrag von Feuchte und Chemikalien verfolgt [5].

Eine in der Trocknungs- und Fixierzone weitgehend getrennte Freisetzung von Wasser und Organik, welche die Grundlage für das ursprüngliche geplante Anlagenkonzept darstellte, konnte anhand der Messdaten nicht bestätigt werden.

Dadurch wurde der Aufwand zur Entwicklung eines geeigneten Anlagenkonzepts erhöht. Beim ursprünglichen Konzept wäre es ausreichend gewesen nur etwa den halben Abluftstrom in einer thermischen Nachverbrennung zu reinigen. Die damit verbundene Wärmezufuhr (Temperaturerhöhung des halben Massenstroms) hätte gut mit dem Wärmebedarf des Trockners (Gesamtzuluftmassenstrom und –temperatur) in Einklang gestanden. Die Berechnungen zeigen, dass sich dies bei der Trockenfixierung relativ leicht durch Reduktion des Gesamtmassenstromes ebenso gewährleisten lässt. Im Fall der reinen Trocknung wird der erforderliche Zuluftmassenstrom primär durch die Wasseraufnahme (Feuchtelast) durch Verdunsten bestimmt und nur sekundär durch den Wärmebedarf des Trocknungsprozesses. Eine Reduzierung des Zuluft- bzw. Abluftmassenstroms ist deshalb nur begrenzt möglich und wird durch eine maximale Beladung von  $100 - 130 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{Luft, tr}}$  bestimmt. Bei gleichem Energiebedarf des Trockners und größerem Zuluftmassenstrom liegt die benötigte Zulufttemperatur niedriger. Wenn nun der gesamte Abluftstrom gereinigt wird, wird durch die TNV mehr Wärme zugeführt als für den Trocknungsprozess benötigt wird. Dadurch steigt die Fortlufttemperatur und somit die Wärmeverluste des Systems.

Die Berechnungen zeigen, dass das Missverhältnis durch zwei Erweiterungen weitgehend behoben werden kann. Zum einen dadurch, dass der Fortluftkanal durch den Trockner geführt wird und somit als indirekte Beheizung wirkt. Zum anderen dadurch, dass bei reinen Trocknungsvorgängen ein Teil des Abluftstroms unmittelbar als Fortluft abgeführt wird, wie es im ursprünglichen Konzept vorgesehen war.

Der apparative Aufwand, um dieses Verfahren zu realisieren, sowie die Anlagenkomplexität sind dadurch deutlich größer, was sich in einem erhöhten Investitionsaufwand niederschlägt und ein höheres Betriebsrisiko bewirken kann. Daher sind die Wirtschaftlichkeit und Realisierbarkeit unter diesen Gegebenheiten genau zu prüfen.

Andererseits können durch das entwickelte Verfahrenskonzept verschiedene Baugruppen (Elektrofilter, Luftvorwärmer innerhalb der Trockner, zweite Brennkammer einschließlich aller Komponenten, u. U. verschiedene Gebläse) entfallen, was der Wirtschaftlichkeit zugute kommt.

Eine weitere Überlegung zur Reduzierung der Anlagenkomplexität besteht im Einsatz anderer Brennervarianten, ähnlich einem TNV-Brenner, denen ein größerer Luftstrom zur Verbrennung zugeführt werden kann. Zur Abklärung dieser Möglichkeit muss noch mit diversen Brennerherstellern gesprochen werden.

Weiter kann aus den vorgenommenen Messungen geschlossen werden, dass das entwickelte Verfahrenskonzept im Wesentlichen zwei potentielle Betriebsrisiken aufweist. Diese ergeben sich daraus, dass in den Abluftkomponenten u. a. siliziumorganische Verbindungen gefunden wurden. Es ist bekannt, dass diese unter TNV-Verbrennungsbedingungen zu Siliziumdioxid umgesetzt werden, dass sich als sehr feiner Staub in den Anlagenkomponenten niederschlägt. Dadurch besteht zum einen die Gefahr, dass die Wärmeübertrager des Systems von Staub belegt werden und mit der Zeit verstopfen. Zum anderen ist nicht ausgeschlossen, dass geringe Staubanteile in den Trockner gelangen und sich auf der Warenbahn absetzen.

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass die „Systemtechnische Entwicklung eines integrierten Konzeptes für die Wärmebereitstellung und Abluftbehandlung einer energieeffizienten Spanmaschine zur Textilveredlung“ gelungen ist.

#### **Das Ziel des Vorhabens ist somit erreicht.**

Gleichzeitig wurde aber deutlich, dass die systemtechnische Implementierung mit einigen Risiken behaftet ist. Um diese vor dem Bau einer ersten Industrieanlage zu entkräften, wird deshalb ein Nachfolgeprojekt angestrebt (EnergyEffDryer – Phase B), das folgende Ziele beinhalten soll:

- Aufbau und Inbetriebnahme einer mobilen Klein-TNV (evtl. mit Überprüfung verschiedener Brennervarianten),
- Untersuchung des Abluft-Oxidationsverhaltens und der Bildung von  $\text{SiO}_2$ -Belägen während der Produktion,
- erweiterte Modellrechnungen und Optimierung der Anlagenkonfiguration,
- Planung und Dimensionierung einer Industriearbeit,
- Basic-Engineering von Vergleichsverfahren (Adsorption/Desorption, RNV),
- Kostenermittlung, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Vergleichsverfahren.

## Literaturverzeichnis

- [1] B. Rösch und M. Schmitt, „InTroFix - Innovative Verfahren zur Energiereduzierung beim Trocknen und Fixieren von textilen Bahnen,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Förderkennzeichen 0327455A, 2011. Erhältlich über TIB der Universität Hannover
- [2] „Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft; GMBL-Heft 25-29, S. 511 - 605,“ 2002.
- [3] R. Fischer, „Zur Beurteilung von Thermomaschinen und den entsprechenden thermischen Prozessen,“ Textil Praxis International 46, 468-472, 562-566, 1991.
- [4] G. Schellenberger, „Energieeinsparung beim Trocknen durch Regelung der Abluftfeuchte,“ ITB Färberei/Druckerei/Ausrüstung 3, 281-285, 1974.
- [5] Brückner Trockentechnik GmbH & Co. KG; Bergische Universität Wuppertal, „Entwicklung eines innovativen Applikationsverfahrens zur reststofffreien Imprägnierung von textilen Bahnen; Az 27110, DBU,“ 2011.