

**Wärme- und Stofftransport bei der Trocknung von
Farbempfangsschichten für Ink-Jet Fotoapplikationen**

**zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn**

**genehmigte
DISSERTATION**

von
Christoph Hunfeld
aus Sögel

Tag des Kolloquiums: 30.10.2007
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jovan Mitrovic
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Groß

An dieser Stelle möchte ich allen Danken, die durch ihre sowohl fachliche als auch moralische Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jovan Mitrovic - meinem Doktorvater - für die Unterstützung, die zahlreichen und interessanten Diskussionen sowie Anregungen und insbesondere für sein Vertrauen, das mir die freiheitliche Gestaltung und Umsetzung der wissenschaftlichen Ziele dieser Arbeit ermöglichte,

Herrn Dr.-Ing. Thomas Katzenmayer für seinen außerordentlichen Einsatz bei der Betreuung dieser Arbeit, sein offenes Ohr sowie für seine Ratschläge, nicht nur bei fachlichen Fragestellungen,

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Groß für die Übernahme des Korreferates sowie Prof. Dr. rer. nat. Thomas Tröster und Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan aus der Wiesche für die Mitwirkung in der Promotionskommission,

Herrn Dr. Alois B. Kerkhoff, Herrn Dipl.-Ing. Friedrich Schönheit, Herrn Dipl.-Ing. Burkhard Neumann und Herrn Dr. Andreas Overberg danke ich für die zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen und Anregungen zu meiner Arbeit

sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Firma Felix Schoeller und des Instituts für Thermische Verfahrenstechnik der Universität Paderborn, die durch die gute Zusammenarbeit und ihre Unterstützung zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

VORWORT

Den Mittelpunkt der vorliegenden Abhandlung stellt der

Wärme- und Stofftransport bei der Trocknung von Farbempfangsstrichen

dar. In der Arbeit wird die Trocknung von binderbasierten sowie mikroporösen Strichen am Beispiel von Farbempfangsschichten für Ink-Jet Photoapplikationen behandelt.

Nach einer kurzen Einführung in die Herstellung von Photopapieren für Ink-Jet Anwendungen folgt ein theoretischer Teil mit den grundsätzlichen Vorgängen der Trocknungsprozesse. Zur Erfassung der Wechselwirkung der einzelnen Teilprozesse sowie deren numerische Umsetzung in ein Simulationsmodell werden detaillierte Betrachtungen zum Wärme- und Stofftransport vorgenommen. Darüber hinaus wird die Anwendung eines eigenentwickelten Rechenprogramms vorgestellt und Optimierungsmöglichkeiten für den Betrieb von Beschichtungsanlagen illustriert. Abschließend werden die Ergebnisse zusammenfassend diskutiert und ein Ausblick gegeben.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Digital Imaging Papiere für Ink-Jet Anwendungen	1
1.2 Trocknungsprozess	3
2 AUFGABEN UND ZIELE	9
3 STAND DES WISSENS	11
BETRACHTUNGEN ZUM TROCKNUNGSPROZESS	14
4 BETRACHTUNGEN ZUM WÄRME- UND STOFFTRANSPORT	14
4.1 Wärmetransport im Trockner	15
4.1.1 Wärmetransport in der Gasphase	15
4.1.2 Wärmetransport an der Phasengrenze	18
4.1.3 Wärmetransport im Produkt	18
4.2 Stofftransport im Trockner	19
4.2.1 Stofftransport im Strich	19
4.2.2 Stofftransport an der Phasengrenze	21
4.2.3 Stofftransport in der Gasphase	22
4.3 Stoffbilanzen im Trockner	23
5 MODELLIERUNG DES WÄRME- UND STOFFTRANSPORTS	25
5.1 Simulation des Stofftransports im Strich	27
5.2 Validierung der numerischen Lösung für den Stofftransport im Strich . .	31
5.2.1 Validierung der Schrumpfung des Striches	31
5.2.2 Validierung der Beladungsverteilung im Strich	32
5.3 Simulation des Wärmetransports im Produkt	33
6 SENSITIVITÄTSANALYSE DES TROCKNUNGSPROZESSES	37
6.1 Wärmetransport im Trockner	37

6.1.1	Wärmeübergangskoeffizient	38
6.1.2	Energieeintrag ins Produkt	41
6.2	Stofftransport im Trockner	41
6.2.1	Stofftransport in der Gasphase	42
6.2.2	Stofftransport im Strich	43
7	KONVEKTION UND SPANNUNGEN	46
7.1	Modellierung des Verdunstungsmassenstromes	46
7.2	Modellierung der konvektiv induzierten Spannung	49
7.2.1	Konvektionsstrom	49
7.2.2	Modellierung des Druckwiderstandes	51
7.2.3	Ermittlung der Permeabilität	52
7.3	Ergebnisse und Diskussion	55
8	TROCKNUNGSINDUZIERTER SPANNUNGEN IM STRICH	58
8.1	Spannungen im Strich	59
8.2	Modellierung trocknungsinduzierter Spannungen	60
8.3	Ermittlung der Elastizitätseigenschaften	61
8.3.1	Der E-Modul	61
8.3.2	Bestimmung der Biegesteifigkeit	61
8.4	Implementierung der Gleichungen in das Trocknungsmodell	63
8.5	Berechnung trocknungsinduzierter Spannungen	65
8.5.1	Auswirkung der Trocknungsprozessparameter	67
8.5.2	Optimierung der Trocknungsgeschwindigkeit	68
8.5.3	Einfluss der Strichdicke	70
8.6	Möglichkeiten zur Reduktion der Spannung	71
	MODELLVALIDIERUNG	72
9	UNTERSUCHUNGEN AM LABORTROCKNER	72
9.1	Der Labortrockner	72
9.2	Experimente	74

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	V
9.3 Modellierung des Labortrockners	75
9.4 Ergebnisse und Diskussion	76
PROZESSOPTIMIERUNG	78
10 Binderbasiertes System auf PE-Papier	78
10.1 Prozessoptimierung	78
10.2 Simulation	80
10.3 Kritische Bereiche bei der Trocknung	87
10.4 Optimierung der Prozesskinetik	89
10.5 Auswirkungen der Prozessparameter	91
11 Mikroporöse Systeme auf PE-Papier	98
11.1 Simulation	100
11.2 Kritische Bereiche bei der Trocknung	101
11.3 Optimierung der Prozessparameter	102
11.4 Simulationsergebnisse des optimierten Prozesses	104
11.5 Ergebnisse und Diskussion	104
12 Mikroporöse Systeme auf bestrichenem Papier	106
12.1 Simulation	108
12.2 Kritische Bereiche bei der Trocknung	110
12.3 Optimierung der Prozessparameter	110
12.4 Simulationsergebnisse des optimierten Prozesses	111
12.5 Ergebnisse und Diskussion	113
13 ZUSAMMENFASSUNG	114
Tabellenverzeichnis	117
Abbildungsverzeichnis	119
ANHANG	126

A Stoffkonstanten	126
A.1 Gasphase	126
A.1.1 Dichte	126
A.1.2 Wärmeleitfähigkeit	126
A.1.3 Wärmekapazität	126
A.1.4 Dynamische Viskosität	127
A.1.5 Diffusionskoeffizient	127
A.2 Flüssigphase	128
A.2.1 Dichte	128
A.2.2 Wärmekapazität	128
A.2.3 Dampfdruck	128
A.2.4 Verdampfungsenthalpie	129

NOMENKLATUR

a	-	Temperaturleitfähigkeit
a	-	Aktivitätskoeffizient
A	-	Fläche
b	-	Schlitzbreite
b	-	Probenbreite
c	-	Konzentration
c_i	-	Wärmekapazität
d_p	-	Porendurchmesser
D	-	Diffusionskoeffizient
D_p	-	Porentransportkoeffizient
e	-	Abstand zum Flächenschwerpunkt
E	-	E-Modul
f/f_0	-	Geometriefaktoren Düse
f	-	Skalierungsfaktor Gitter
f	-	Auslenkung
F	-	Kraft
fbM	-	Flächenbezogene Masse
G	-	Gleitmodul
h	-	Vertikaler Abstand Düse
h	-	Höheninkrement Numerik
h	-	Probenhöhe
Δh_v	-	Verdunstungsenthalpie
I	-	Flächenmoment 2. Ordnung
J	-	Diffusionsstrom
k	-	Permeabilität
k_B	-	Boltzmannkonstante
l	-	Horizontaler Düsenabstand
Le	-	Lewis Zahl
\dot{m}	-	spez. Massenstrom
\dot{M}	-	Massenstrom
M_i	-	Molare Masse
\dot{n}	-	Stoffstromdichte
Nu	-	Nusselt Zahl
ν	-	Kinematische Viskosität
\dot{q}	-	Wärmestromdichte
\dot{Q}	-	Wärmestrom
P	-	Druck
P_i	-	Partialdruck
Pr	-	Prandtl Zahl
R	-	Universelle Gaskonstante

Re	-	Reynolds Zahl
s_{dry}	-	Abstand Phasengrenze-Strichoberfläche
s	-	Hydraulischer Durchmesser
S	-	Stabilitätsfaktor Berechnung
t	-	Zeit
T	-	Temperatur
u	-	Konvektionsgeschwindigkeit
v	-	Geschwindigkeit
w	-	Düsenaustrittsgeschwindigkeit
X	-	Beladung in der Flüssigphase
Y	-	Beladung in der Gasphase
z	-	Vertikale Koordinate

GRIECHISCH

α	-	Wärmeübergangskoeffizient
β	-	Stoffübergangskoeffizient
γ	-	Gleitwinkel
δ	-	Dicke
ε	-	Porosität
ε	-	Dehnung
η	-	Dynamische Viskosität
λ	-	Wärmeleitfähigkeit
μ	-	Diffusionswiderstanzzahl
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ_i	-	Dichte
σ	-	Spannung
τ	-	Schubspannung
τ	-	Tortusität

INDIZES

B	-	Bahn
d	-	Düse
g	-	Gas
i	-	Ortskoordinate
I	-	Phasengrenze
j	-	Zeitkoordinate
k	-	Schrittweite Ortskoordinate
L	-	Luft
m	-	Arithmetisches Mittel
m	-	Maschine
o	-	Oben

p	-	Druck
PE	-	Polyethylen
s	-	Sättigung
u	-	Unten
v	-	Dampf
w	-	Wasser
0	-	Startwert
1	-	Komponente 1
2	-	Komponente 2
∞	-	Unendlich

1 EINLEITUNG

1.1 Digital Imaging Papiere für Ink-Jet Anwendungen

Ink-Jet Papiere für Photoapplikationen bestehen aus mehreren Schichten (Papier, Kunststoff, Farbempfangsschicht) mit unterschiedlichen Eigenschaften, Abb. 1.

Die Herstellung solcher Papiere beginnt auf der Papiermaschine, an der zunächst das sogenannte "Raw Base" als der Kern des Ink-Jet-Papiers produziert wird. Produkteigenschaften wie Weißegrad, Opazität, Steifigkeit und Volumen werden weitgehend in diesem Prozessschritt festgelegt.

Die PE-Schicht auf der Bildseite bestimmt durch ihre Oberflächenstruktur den Glanz des Papiers. Mit einer rauen Oberfläche erreicht man ein mattes, mit einer glatten hingegen ein glänzendes Erscheinungsbild. Die PE-Schicht soll das Curlen (Biegen / Wölben) des Papiers unterbinden. Weitere wichtige Anforderungen an die Schicht sind Gleitfähigkeit, Antistatik und gute Beschriftbarkeit. Sie wird oft schon während der Herstellung mit Logos bedruckt. Durch die Kunststoffschichten auf beiden Seiten wird das Papier vor

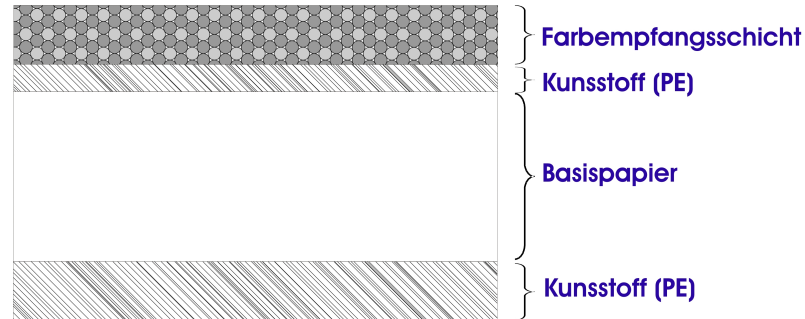


Abbildung 1: Produktaufbau Ink-Jet Photoimaging Papier

dem Eindringen von Feuchte geschützt, was ihm Dimensionsstabilität verleiht. Bis zu diesem Verfahrensschritt unterscheidet sich der Herstellungsprozess eines Ink-Jet Papiers kaum von der Herstellung eines Silbersalzphotopapiers.

Farbbempfangsschichten von Ink-Jet Papieren werden in zwei Kategorien eingeteilt: Binderbasierte und pigmentbasierte (mikroporöse). Wie bei den Farbbempfangsschichten gibt es auch bei den Ink-Jet Tinten zwei Gruppen: Lösungsmittelbasierte und pigmentierte. Binderbasierte Farbbempfangsschichten sind für den Gebrauch mit lösungsmittelbasierten Tinten geeignet. Die mit diesem System gedruckten Bilder haben in der Regel gute Eigenschaften bezüglich der Bildwiedergabe, -beständigkeit und -alterung. Der Nachteil dieser Kombination liegt in der zu langsamen Trocknung der aufgetragenen Tinte. Dies führt bei schnellem Drucken durch das Übereinanderlagern der frisch bedruckten Papiere zu Farbverschiebungen und -verschmierungen.

Ink-Jet Papiere mit einer mikroporösen Empfangsschicht sind eher für das Bedrucken mit pigmentierter Tinte geeignet. Sie bestehen neben Polymeren als Bindemittel aus Metalloxidpartikeln mit einer großen spezifischen Oberfläche. Die Partikel können durch Fumen oder Fällungen hergestellt werden. Abb. 2 illustriert den Fume-Prozess. Qualitativ sind die Bildeigenschaften bei dem derzeitigen Entwicklungsstand zwar noch nicht so gut wie bei den binderbasierten Papieren. Sie haben jedoch den entscheidenden Vorteil, dass die aufgetragene Tinte sehr schnell trocknet. Entgegen früheren Annahmen wird derzeit damit gerechnet, dass sich die mikroporösen Schichten am Markt durchsetzen werden.

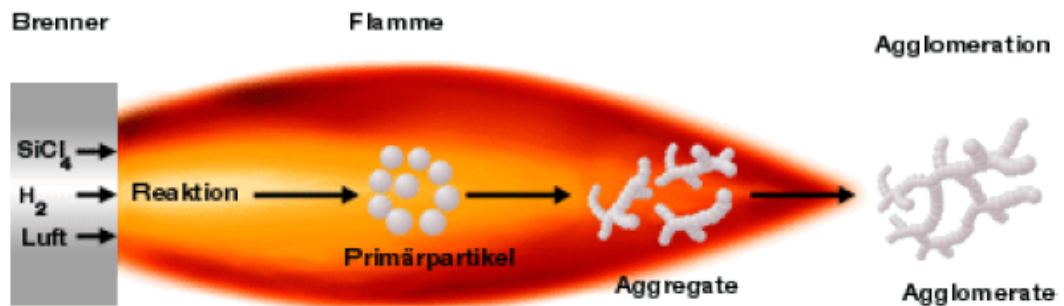


Abbildung 2: Metalloxidpartikel Herstellung

Aufgetragen werden die Farbbempfangsschichten an Coatern, Abb. 3. Das PE-beschichtete Papier wird in Rollen angeliefert, an der Abrollung des Coaters abgewickelt und durchläuft anschließend eine Reinigungseinheit, einen Messrahmen, Bestrahlungseinheiten und einen Gießer, bevor es in den Trockner eingeleitet wird, dem eine Kühleinheit und ein Messrahmen nachgeschaltet sind. Die Aufrollung des Papiers stellt den letzten Arbeitsschritt an der Maschine dar, vergl. [12]. An der Gießstation wird bei der Herstellung einer mikroporösen Farbbempfangsschicht eine Nanopartikelsuspension mit einem Feststoffgehalt von ca. 25 %, bei der Herstellung von binderbasierten Farbbempfangsschichten eine Lösung mit den wesentlichen Bestandteilen Polymere und Wasser bei einem Feststoffgehalt von ca. 11 % auf die Bahn aufgetragen. Diese durchläuft einen Schwebetrockner, in dem sie weitgehend konvektiv und zum Teil durch IR-Strahlung auf einen Restfeuchtegehalt getrocknet wird. Art und Geschwindigkeit der Trocknung entscheiden maßgeblich über die Produktqualität.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht der Trocknungsprozess der Farbbempfangsschichten am Coater. Im nächsten Abschnitt wird der Ablauf eines solchen Prozesses skizziert.

1.2 Trocknungsprozess

In Abb. 4 ist eine charakteristische Trocknungskinetik in einem Schwebetrockner illustriert. Diese Abbildung vermittelt einen Eindruck über die Änderung einiger Größen während der Trocknung. Dargestellt sind die Temperatur der Bahn, die Viskosität und

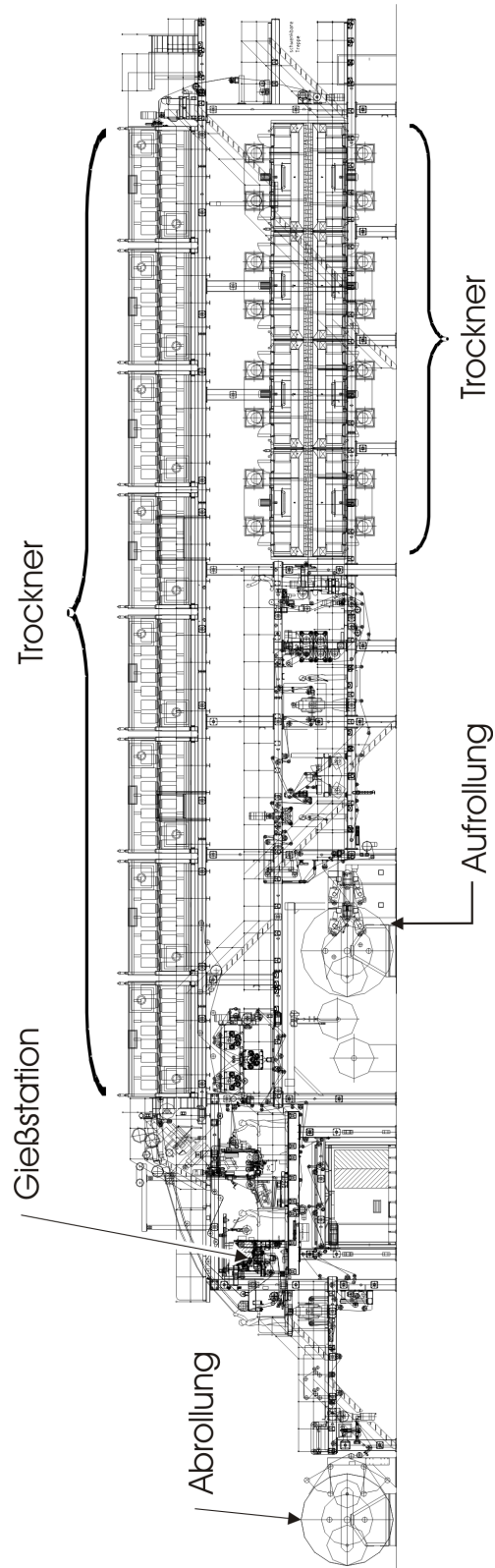


Abbildung 3: Streichmaschine (Coater) mit 12 Schwebetrocknermodulen

der Wassergehalt im Strich in allen Trocknerzonen. Wie den Verläufen entnommen werden kann, steigt die Viskosität des Striches spürbar während der Trocknung. Die Zunahme der Bahntemperatur entspricht einer nahezu spiegelsymmetrischen Abnahme des Wassergehalts. Ein solcher Trocknungsprozess kann allgemein in mehrere Phasen aufgeteilt werden. Auf die für den vorliegenden Fall auftretenden Phasen soll kurz eingegangen werden.

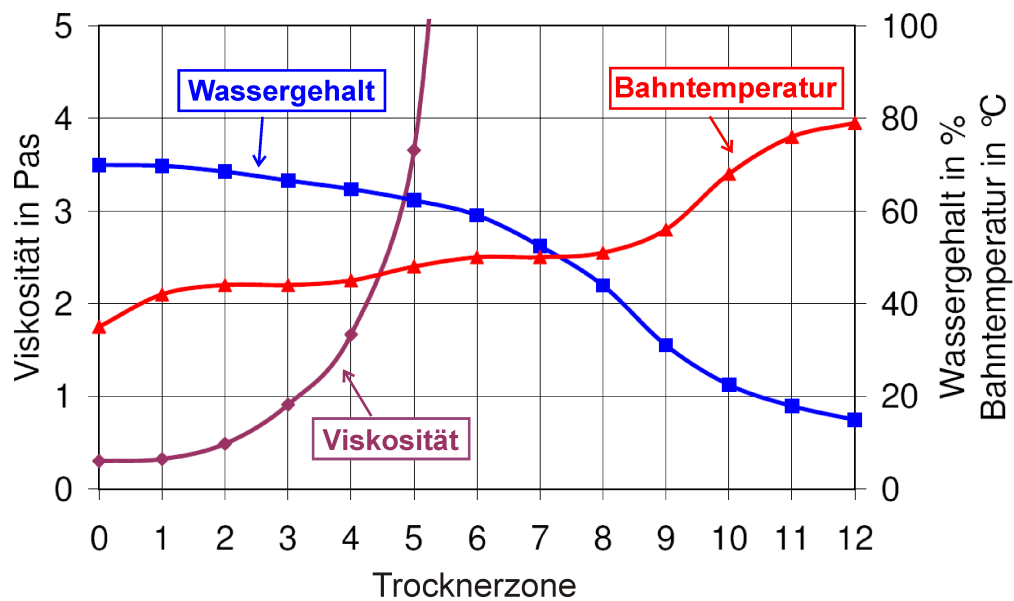


Abbildung 4: Trocknungskinetik in einem Schwebetrockner

Anfangszustand Unmittelbar nach dem Auftragen der Suspension kann näherungsweise von einem Gleichgewichtszustand im sich bildenden Film ausgegangen werden. In Abb. 5 ist dieser Anfangszustand bezüglich der Wasserbeladung und der Temperatur illustriert. Die Phasengrenze (grüne Linie) wurde zweckmäßigerweise zunächst als stoff- und durchlässig angenommen; die Verläufe entsprechen einem Gleichgewichtszustand. Die Aufteilung in Substrat und Strichschicht sei hier stellvertretend für die zu trocknende Lösung und den Träger dargestellt, der aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften besteht.

Mit dem Einlauf in den Trockner wird das Gleichgewicht durch den Wärmeeintrag von der Ober- und Unterseite gestört.

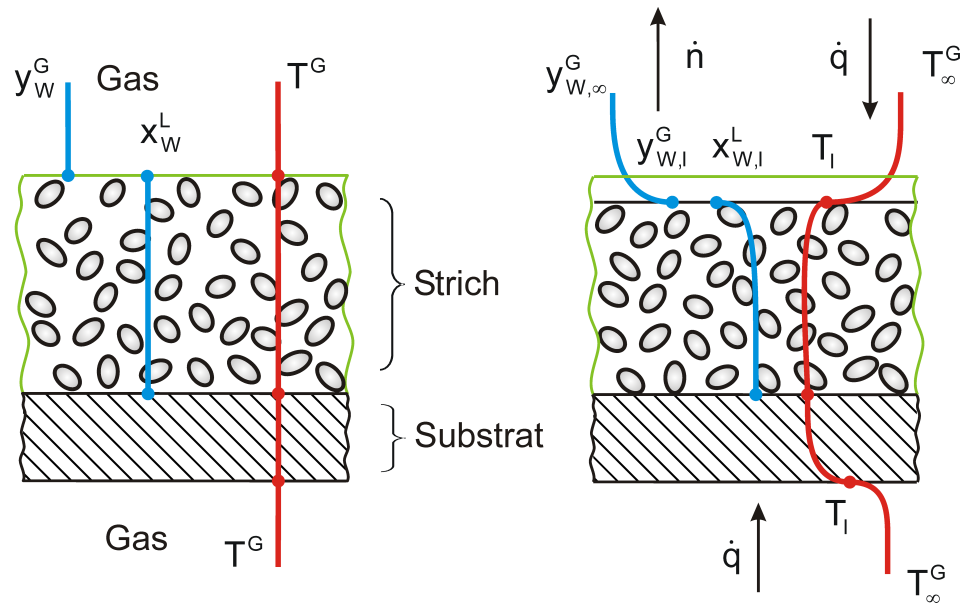


Abbildung 5: Stadien der Strichtrocknung 1

Erster Trocknungsabschnitt Der 1. Abschnitt der Trocknung ist durch die Aufwärmung der Bahn bis zu der Temperatur gekennzeichnet, bei der ein thermischer Gleichgewichtszustand zwischen der eingetragenen Energie und der durch die Verdunstung abgeführten Energie erreicht ist. In der zweiten Skizze der Abb. 5 ist dieser Zustand veranschaulicht. Der Wärmeeintrag ist durch die Wärmestromdichte \dot{q} gekennzeichnet, der Stoffstrom je Flächeneinheit infolge der Verdunstung durch \dot{n} . Während der Aufheizung wird der Anfangszustand aus seinem Konzentrations- und temperaturgradientenfreien Zustand gebracht. Bei einer konvektiven Trocknung wird die gesamte Energie an den beiden Oberflächen der Bahn aufgenommen. Von der Oberfläche aus wird diese durch Wärmeleitung ins Produkt transferiert, wobei die Wärmeleitfähigkeit des Materials eine wesentliche Rolle spielt. Ist diese niedrig, bildet sich ein stärkerer Temperaturgradient aus. Abgeschwächt werden kann der Temperaturgradient durch einen kombinierten Energieeintrag aus IR-Strahlung und Konvektion. Hierdurch würde man eine gleichmä-

figere Aufheizung des Produktes erreichen und damit eine kürzere Aufwärmzeit sowie eine Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit ermöglichen. Durch die Verdunstung an der freien Oberseite der Bahn kommt es zu einem Rückgang der Wasserbeladung nahe der Grenzfläche. Auf der Gasseite hingegen erhöht sich der Wasseranteil in der grenzflächennahen Luft. Damit der Verdunstungsprozess mit großer Geschwindigkeit stattfinden kann, wird die grenzflächennahe Luft konvektiv durch eine erzwungene Strömung abgeführt. Aus diesem Grund bewirkt auch eine Kombination von IR-Strahlung und Konvektion ausgesprochen hohe Verdunstungsraten. Durch die Verdunstung beginnt der Strich zu schrumpfen.

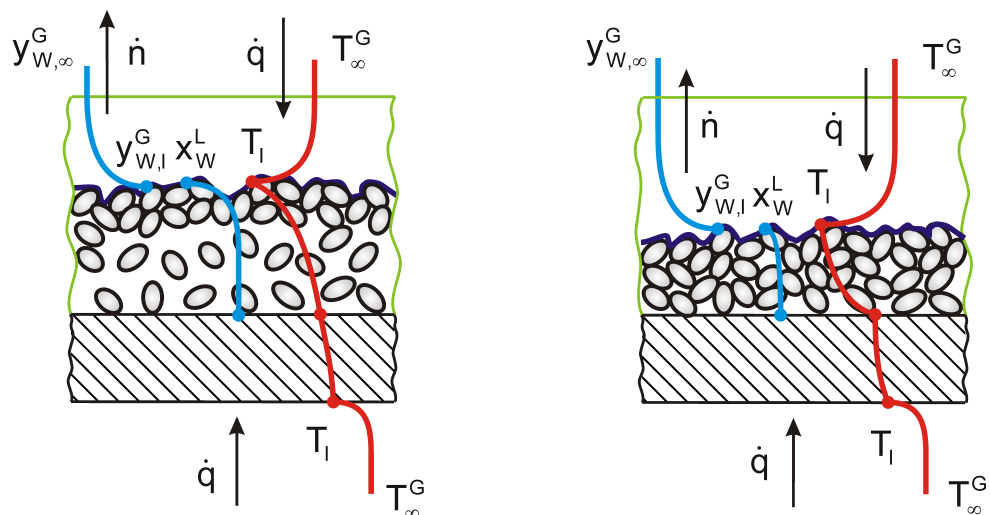


Abbildung 6: Stadien der Strichtrocknung 2

Zweiter Trocknungsabschnitt Der 2. Trocknungsabschnitt zeichnet sich durch eine hohe Verdunstungsgeschwindigkeit aus; die eingetragene Energie wird nahezu vollständig zur Verdunstung und nicht (wie im 1. Teil der Trocknung) zur Erwärmung des Produktes benötigt. Mit einer hohen Verdunstungsgeschwindigkeit ist auch eine schnelle Schrumpfung des Guts verbunden. Vorausgesetzt die Konzentrationsgradienten werden nicht durch Diffusion ausgeglichen, stellen sich in der Schicht stärkere Konzentrations- und Temperaturgradienten ein. Diese Zusammenhänge führen zu einer Anreicherung des Gelösten an der oberen Phasengrenze, wie in Abb. 6 (Skizze links) veranschaulicht.

Die Anlagerung der Teilchen aneinander stellt den Beginn der Strukturbildung des Striches dar und verändert die Eigenschaften der noch flüssigen, aber zunehmend viskos werdenden Schicht. Durch die erhöhte Festigkeit ist es nun möglich, den Strich einer größeren Geschwindigkeit der Trocknungsluft auszusetzen. Die Phasengrenze zieht sich in Richtung des Substrates zurück und wird durch die Haftung auf dem Substrat am Schrumpfen in x- und y-Richtung gehindert.

Das Lösungsmittel im Binder wird über die Phasengrenze vom Gas (Trocknungsluft) aufgenommen, wodurch der Binder die Feuchte verliert und der Strich schrumpft. Durch das Schrumpfen bauen sich Spannungen auf, die von der Schicht bzw. vom Binder kompensiert werden. Feuchte Trocknungsluft wirkt auf die Bahntemperatur erhöhend und fördert somit die Diffusion, die ja mit steigender Temperatur größer wird. Auch in diesem Bereich wäre eine Kopplung von IR-Strahlung und Konvektionstrocknung aus technologischer Sicht grundsätzlich zu empfehlen.

Dritter Trocknungsabschnitt Der 3. und letzte Abschnitt der Trocknung ist durch den rapiden Anstieg der Bahntemperatur zu erkennen, Abb. 7. Dieses Verhalten hängt mit der diffusions- bzw. desorptionslimitierten Verdunstungsgeschwindigkeit zusammen. Hier wird das Produkt bis auf die Restfeuchte getrocknet. Die Grenze für die Trocknungstemperatur ist hierbei materialbedingt und beträgt bei PE-beschichteten Papieren ca. 80 °C.

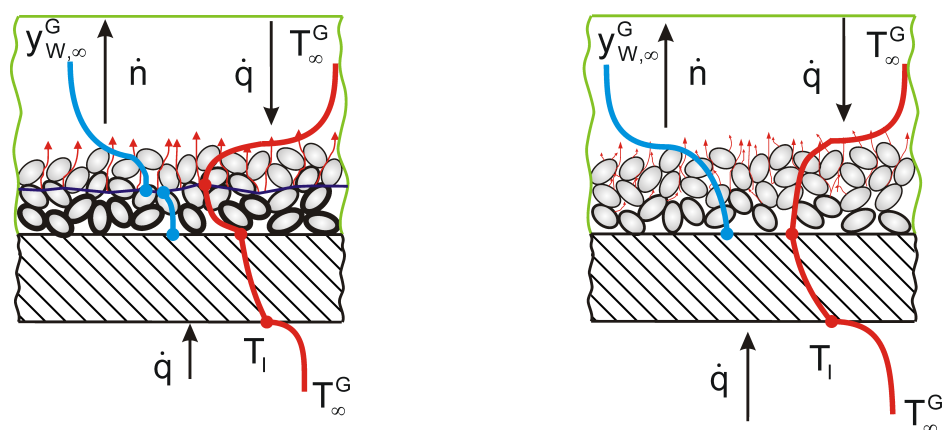


Abbildung 7: Stadien der Strichtrocknung 3

2 AUFGABEN UND ZIELE

Die Trocknung stellt in vielen Fällen den limitierenden Prozessschritt bei der Herstellung von Digital Imaging Papieren für Ink-Jet Photoapplikationen dar. Die gängige Herangehensweise zur Ermittlung von Prozessparametern beruht auf dem Trial-and-Error Prinzip. Durch die Komplexität der Vorgänge während der Trocknung ist es unwahrscheinlich, dass die in Versuchsläufen ermittelten Parameter dem optimalen Betriebszustand der Anlage entsprechen.

Das Ziel dieser Arbeit formuliert sich in der grundlegenden Untersuchung des Trocknungsprozesses industriell hergestellter Digital Imaging Farbempfangsschichten für Photo-Ink-Jet Anwendungen zur Optimierung der Produktionsgeschwindigkeit und -effizienz. Den Kern dieses Themas stellt unter anderem der Wärme- und Stofftransport im Produkt während der Trocknung dar. Dieser kann in einen externen, gasseitigen und einen internen, filmseitigen Wärme- und Stofftransport aufgeteilt werden. Des Weiteren soll ein Zusammenhang zwischen der Produktqualität und den Prozessbedingungen hergestellt werden.

Die Methodik zur Bearbeitung dieser Aufgaben gliedert sich in einen theoretischen und einen experimentellen Teil. Der theoretische Teil befasst sich mit der Entwicklung eines steuerbaren mathematischen Modells, das es erlaubt, die Prozessparameter zur Trocknung in den einzelnen Zonen der Maschine auf den Gesamtprozess abzubilden. Innerhalb der Schicht beinhaltet dies Transportphänomene, die Verdunstung des Lösungsmittels und damit die Schrumpfung des Striches sowie die Ausbildung von Spannungen. Die Prozesse während der Trocknung sollen simultan modelliert und eine geeignete Simulationssoftware entwickelt werden. Dies beinhaltet folgende Aufgaben: Identifizierung der relevanten physikalischen Effekte, Ableitung eines volldimensionalen Modells, Ableitung eines reduzierten Modells, Diskretisierung des Modells und Implementation eines numerischen Algorithmus, Analyse und Testen des Algorithmus, Validierung der Simulationsergebnisse, Vergleich mit experimentellen Daten und Einbettung in den Entwicklungsprozess für die Prozessdatenermittlung an Produktionsmaschinen.

Neben der Generierung von Stoffdaten durch Einzelmessungen im Labor sollen durch experimentelle Untersuchungen die Anwendung der Modelle und der Simulation an den Produktionsmaschinen zur weiteren Verbesserung der Runability von den Produkten und der Erhöhung der Produktionsleistung beitragen. Als Qualitätseinfluss soll beispielsweise das Entstehen von Cracks, das Aufreißen der Strichoberfläche, untersucht werden.

3 STAND DES WISSENS

In der Literatur veröffentlichte Arbeiten zur Trocknung dünner, bahnförmiger Schichten beziehen sich weitgehend auf nicht poröse Systeme. Es gibt eine Vielzahl von Arbeiten die sich mit der experimentellen und/oder mit der theoretischen Betrachtung dieser Aufgabenstellung befassen. Die Kernvorgänge stellen der Stoff- und Wärmetransport im Produkt und in der Gasphase sowie das Phasengleichgewicht dar. Die Ziele dieser Arbeiten sind vorrangig die Entwicklung von Messsystemen zur Bestimmung der Konzentrationsgradienten während der Trocknung, die Messung von Stoffeigenschaften wie Diffusionskoeffizienten oder der Modellierung des Trocknungsprozesses.

Der Stofftransport im Film findet durch Diffusion statt. Die Diffusionskoeffizienten von Polymerlösungen sind stark konzentrations- und temperaturabhängig. Sie können durch Messungen ermittelt oder durch die Anwendung von Modellvorstellungen errechnet werden. Messwerte von Diffusionskoeffizienten sind unter anderem in den Arbeiten von Ju [30], Okazaki [41] und Schabel [54] zu finden.

Allgemeine Modelle zur Vorhersage von Diffusionskoeffizienten in Flüssigkeiten wie die von Einstein sind lediglich in hoch verdünnten Polymerlösungen ausreichend genau und werden mit zunehmendem Feststoffgehalt ungenauer. Eine anerkannte Methode zur Beschreibung von binären Diffusionskoeffizienten in Polymerlösungen ist die Freie Volumen Theorie von Vrentas und Duda [58]. Diese wird unter anderem von Aust [2], Guerrier et al. [24], Price et al. [47], Saure [51], Schabel [54] und Wagner [59] angewandt.

Zur Beschreibung von Phasengleichgewichten wird vielfach das Aktivitätsmodell von Florry [19] und Huggins [28] herangezogen. In diesem wird die Polymerlösung als ein festes Gitter angenommen und das Phasengleichgewicht mit dem Aktivitätskoeffizientenmodell beschrieben. Bei diesem Modell werden aus experimentellen Untersuchungen Modelldaten korreliert. Zielinski und Hanley [60] verwenden hierbei konstante Florry Huggens Parameter, was aber zu großen Abweichungen führen kann. Aust [2], Saure [53] und Wagner [59] berücksichtigen die Konzentrationsabhängigkeit dieses Terms. Eine weitere Möglichkeit, ist die Polymerlösung als ein hochkomprimiertes Gas zu betrachten und deren Eigenschaften als Abweichungen zum idealen Gas zu beschreiben. Experimentelle Daten zum Phasengleichgewicht von binären Polymerlösungen sind in Ju et al. [30], Navarri [39], Saure [53] und Wagner [59] zu finden.

Ohne Experimentelle Daten kommen Methoden aus, die die Aktivitätskoeffizienten allein aus der Molekülstruktur ableiten. Hier ist die UNIFAC Methode zu nennen. Diese Methoden funktionieren gut, wenn die Polymerlösung mit anderen Lösungsmitteln als Wasser versetzt ist.

Ein linearer Ansatz von Fick wird zumeist für den Stofftransport im Gas verwendet. Aust [2], Saure [53] und Wagner [59] verwenden einen Ansatz, der sich aus den Maxwell Stefan Gleichungen ableitet. Zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten findet man zum Beispiel Korrelationen im VDI Wärmeatlas. In diesem sind Näherungen für unterschiedliche Strömungen aufgezeigt. Besonders interessant für industrielle Trocknungsanlagen ist das Modell für Schlitz- und Lochdüsenfelder aus den Arbeiten von Martin [36]. Der Stoffübergangskoeffizient wird aus der Analogie zwischen dem Wärme- und Stofftransport bestimmt.

Arbeiten, die sich auf die Trocknung von bestrichenem Papier in industriellem Mastab beziehen, stellen die Untersuchungen von Heikilä [26] und Kanzamar [31] dar. In diesen Arbeiten wird der Trocknungsprozess durch Energiebilanzen modelliert. Strich

und Substrat werden hier in eigene Bilanzgebiete aufgeteilt, der Stofftransport im Film wird aber nicht näher betrachtet. Beide betrachten die Papierbahn als Bulk und nehmen keine detaillierte Auflösung des produktinneren Stofftransportes vor. Wesentliche Ausgabewerte sind hier die mittlere Konzentration des Lösungsmittels in der Papierbahn über den Trocknungsprozess und die Papierbahntemperatur.

Experimentelle Untersuchungen zur Trocknung wurden von Gehrman [21], Guerier et al. [24] und Okazaki [41] mit einer gravimetrischen Bestimmung der Restfeuchte durchgeführt. Ein Problem sind die durch die Luftströmungen verursachten Fluktuationen, welche zu Wägefehlern führen können. Um die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen, wurden hierbei oftmals dickere Filme untersucht. Price [47] entwickelte eine Methode, bei der mit einfach zu ermittelnden Trocknungsverlaufskurven Parameter zur Charakterisierung von Diffusionskoeffizienten abgeleitet werden können. Gelinski und Saure [52] entwickelten eine Messmethode auf Basis der IR Spektroskopie mittels einer Totalreflexion am Substrat. Einen anderen Weg ist die Abluftzusammensetzung während des Trocknungsprozesses zu untersuchen und die Trocknungsdaten aus einer Bilanzbetrachtung über das gesamte System zu ermitteln.

Betrachtungen zum Trocknungsprozess, bei denen experimentelle Untersuchungen mit Simulationsrechnungen verglichen wurden, findet man z.B. die Arbeiten von Blandin [5], [6], Gehrman [21], [22], Krenn [32], Meier [37], Okazaki [41], Sano [49], [50], Saure [51], Schabel [54], Shojaie [56] und Wagner [59]. All diesen Arbeiten ist gemein, dass die Untersuchungen im Labormaßstab, bzw. bei sehr niedrigen Verdunstungsgeschwindigkeiten ablaufen.

Bezüglich der Beeinflussung der Produktqualität durch die Trocknung wurde bei Aust [2] und Powers [46] qualitativ auf die Ausbildung von Blasen und Oberflächenwellen eingegangen. Zur Entwicklung von Spannungen im Film während der Trocknung gibt es experimentelle Arbeiten, die sich mit den Messungen von Spannungen während der Trocknung befassen, Cairncross [10], Francis [20], Lei [34], [35], Payne [42], [43], Petersen [44]. Bei den experimentellen Untersuchungen werden die Trocknungsbedingungen in diesen Arbeiten über die Zeit konstant gehalten, bei den Modellierungen hingegen werden nur einzelne Partikel im Strich betrachtet.

4 BETRACHTUNGEN ZUM WÄRME- UND STOFFTRANSPORT

Mit dem Auftragen der Suspension beginnt der Coating-Prozess. Es bildet sich ein Film auf dem Substrat, in dem sich nach kurzer Zeit ein Gleichgewichtszustand einstellt. An die Unterseite des Films grenzt die PE-Oberfläche des Substrates.

An der Oberseite steht der Film mit der Luft in Wechselwirkung. Anfänglich, d.h. vor dem Einlauf in den Trockner, spielt diese Wechselwirkung für den Trocknungsprozess keine wesentliche Rolle, da die Luftströmung schwach ist. Der Zustand des Lösungsmittels im Film strebt dem Gleichgewicht mit der Gasphase zu. Beschrieben werden kann dieses Gleichgewicht durch die Invarianz des chemischen Potentials im System, was aber in der Praxis vielfach mit Hilfe des Partialdrucks des Lösungsmittels in der Gasphase und seinem Dampfdruck an der Phasengrenzfläche vorgenommen wird.

Die Betrachtungen zum Wärme- und Stofftransport lassen sich in Bereiche aufteilen: Transport in der Gasphase, Übergang an der Phasengrenze und Transport im Produkt.

4.1 Wärmetransport im Trockner

In diesem Kapitel werden Gleichungen und Zusammenhänge vorgestellt, die das Transportverhalten in den einzelnen Bereichen beschreiben. Diese Betrachtungen stellen die Grundlagen für das weiter unten beschriebene Simulationsmodell dar.

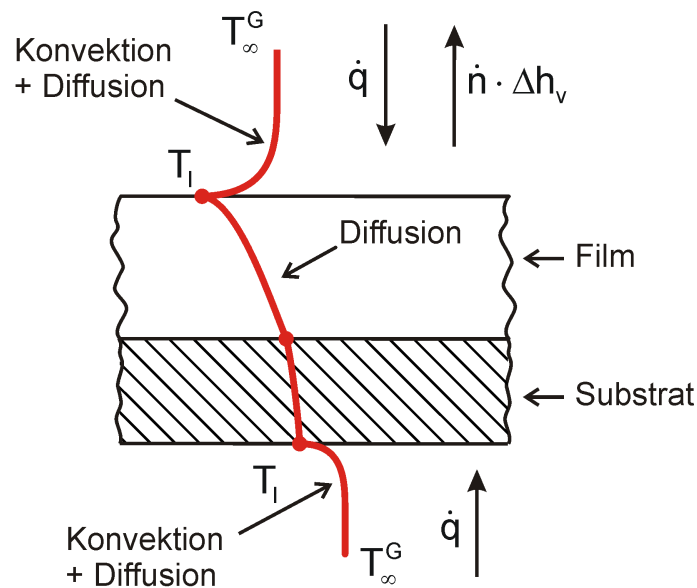


Abbildung 8: Illustration des Wärmetransports

4.1.1 Wärmetransport in der Gasphase

Das Trocknungsgas wird im Vorraum der Düsen auf einer vorgegebene Temperatur gehalten. In diesem herrscht Überdruck, sodass die erhitzte Luft durch die Düse austritt. Der konvektive Wärmestrom trifft auf die Bahn und gibt aufgrund der Temperaturdifferenz, von der Trocknungsluft zum Produkt, Energie an das Produkt ab. Der eingetragene Wärmestrom berechnet sich aus

$$\dot{Q} = \alpha A (T_L - T_B), \quad (4.1)$$

mit A als der wärmeübertragenden Oberfläche der Bahn, α dem Wärmeübergangskoeffizienten und $T_L - T_P$ der Differenz zwischen der Trocknungsluft- und der Produkttempe-

ratur. Der Wärmetransport wird durch die Temperaturdifferenz und dem Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt. Die Bahntemperatur stellt sich durch die Lufttemperatur und die Lösungsmittelbeladung der Trocknungsluft ein. Der Wärmeübergangskoeffizient im Schwebetrockner wird im Wesentlichen durch die Strömungsgeschwindigkeit der Trocknungsluft vorgegeben. Er kann mit Hilfe der Nusselt-Zahl beschrieben werden. Untersuchungen zum Wärmeübergang sind z.B. in [7], [36], [45] und [48] zu finden.

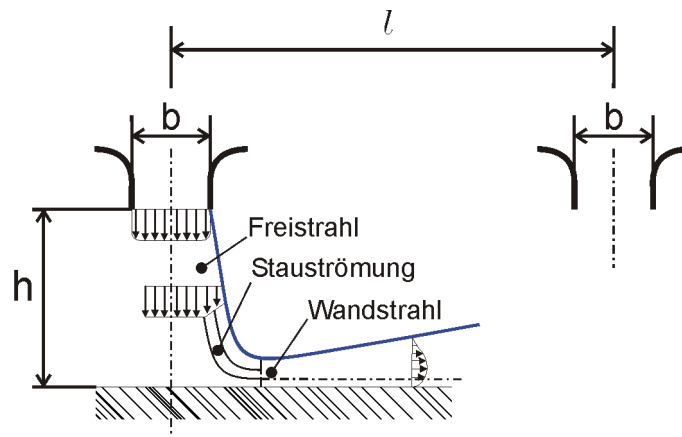


Abbildung 9: Geometrie Schlitzdüsenfeld

Für Schlitzdüsenfelder gilt nach Martin [36] der Zusammenhang

$$\overline{Nu} = \frac{2}{3} \left(\frac{2Re}{f/f_0 + f_0/f} \right)^{2/3} Pr^{0.42} f_0^{3/4}. \quad (4.2)$$

In dieser Gleichung stellt f die relative Düsenfläche dar und berechnet sich aus

$$f = \frac{b}{l}, \quad (4.3)$$

wobei b die Schlitzbreite und l den horizontalen Abstand der Düsen zueinander bezeichnen; f_0 ist ein düsenspezifischer Geometriefaktor,

$$f_0 = \left(60 + 4(h/s - 2)^2 \right)^{-1/2}, \quad (4.4)$$

mit h als dem vertikalen Abstand vom Düsenaustritt bis zur Bahn und s dem hydraulischen Durchmesser der Schlitzdüse. Da die Länge der Schlitzdüse im Vergleich zur Breite

sehr viel größer ist, berechnet sich der hydraulische Durchmesser aus

$$s = 2b. \quad (4.5)$$

Gl. (4.2) gilt für,

$$1500 \leq Re \leq 40000 \quad (4.6)$$

$$0.008 \leq f \leq 2.5f_0 \quad (4.7)$$

$$1 \leq h/s \leq 40 \quad (4.8)$$

Mit den Kennzahlen

$$Nu = \alpha s / \lambda, \quad (4.9)$$

$$Re = ws / \nu, \quad (4.10)$$

$$Pr = \nu / a, \quad (4.11)$$

lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient für die zu modellierenden Prallstrahlrockner bestimmen. Die für die Kennzahlen notwendigen Stoffparameter der feuchten Luft werden nach den Gleichungen für feuchte Luft berechnet [33]:

$$c_{p,m} = \frac{P_L M_L c_{p,L} + P_w M_w c_{p,w}}{P_L M_L + P_w M_w} \quad (4.12)$$

$$\eta_m = \frac{P_L \sqrt{M_L} \eta_{p,L} + P_w \sqrt{M_w} \eta_{p,w}}{P_L \sqrt{M_L} + P_w \sqrt{M_w}} \quad (4.13)$$

$$\lambda_m = y_L \lambda_L + y_w \lambda_w \quad (4.14)$$

$$\rho_m = \frac{P}{RT} (y_L M_L + y_w M_w) \quad (4.15)$$

An der Phasengrenze wirkt dem Wärmestrom der Stoffstrom des verdunstenden Lösungsmittels entgegen. Dieser mindert den Wärmeeintrag von der Oberseite, sodass Gl. (4.1) hier nicht angewendet werden sollte. Für den Wärmeeintrag an der oberen Phasengrenze mit dem Stofftransport eignet sich eher die Beziehung aus [23]

$$\dot{Q} = A \frac{\alpha \Delta h_v}{c_{p,v}} \ln \left(1 + \frac{c_{p,v}}{\Delta h_v} (T_L - T_B) \right), \quad (4.16)$$

in der Δh_v die Verdunstungsenthalpie darstellt.

4.1.2 Wärmetransport an der Phasengrenze

An der Phasengrenze findet der Wärmeübergang von der Gasphase an das Produkt statt. Gasseitig wird der Wärmestrom durch Gl. (4.1) oder Gl. (4.16) erfasst. Zur Wahrung der Kontinuität muss dieser ins Produkt geleitet bzw. durch Verdunstung abgeführt werden. An der oberen Phasengrenze ergibt sich somit die Randbedingung.

$$-\lambda_{P,o} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\alpha_o h_v}{c_{p,v}} \ln \left(1 + \frac{c_{p,v}}{h_v} (T_{L,o} - T_{P,o}) \right) - \dot{m}_v \cdot \Delta h_v \quad (4.17)$$

An der unteren, stoffundurchlässigen Phasengrenze gilt

$$-\lambda_{P,u} \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_u (T_{L,u} - T_{P,u}) \quad (4.18)$$

4.1.3 Wärmetransport im Produkt

Der in das Produkt eintretende Wärmestrom wird von der Phasengrenzfläche in das Produkt transportiert. Dieser Vorgang kann mit Hilfe der Energiegleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (a \nabla T) - u \nabla T \quad (4.19)$$

beschrieben werden, worin T die Temperatur, t die Zeit und a die Temperaturleitfähigkeit bezeichnen. Da es sich in diesem speziellen Fall um ein bahnförmiges Produkt handelt, bei dem die Länge und die Breite im Verhältnis zur Dicke sehr groß sind, und die Konvektionsgeschwindigkeit sehr klein ist, kann die Gl. (4.19) zu

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.20)$$

vereinfacht werden. Die Temperaturleitfähigkeit a ist wie folgt definiert:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (4.21)$$

Das Produkt besteht aus Materialschichten mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften, Abb. 1. An den Grenzen dieser Schichten sind die Randbedingungen durch die Kontinuität des Wärmestroms und der Gleichheit der Temperatur gegeben:

$$\lambda_{S1} \frac{\partial T}{\partial z} = \lambda_{S2} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (4.22)$$

$$T_{S1} = T_{S2}. \quad (4.23)$$

Mit den vorgestellten Randbedingungen kann die Wärmeleitungsgleichung mittels Finite-Differenzen Verfahren numerisch gelöst werden.

4.2 Stofftransport im Trockner

Die Gleichungen zur Beschreibung des Stofftransports im Trockner sind wie beim Wärmetransport in Transport in der Gasphase, über die Phasengrenze und im Film aufgeteilt worden. Bei der Beschichtung stoffundurchlässiger Substrate findet der Stofftransport nur an der beschichteten Seite statt. Abb. 10 illustriert die Vorgänge für diesen Fall.

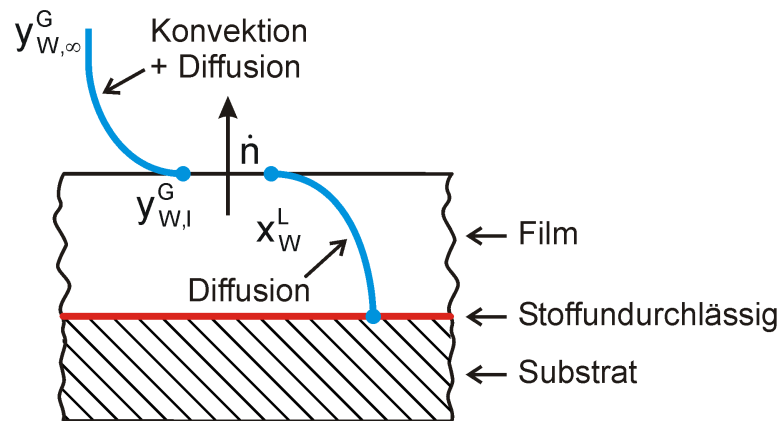


Abbildung 10: Illustration einseitiger Stofftransport

4.2.1 Stofftransport im Strich

Wie die Wärmeleitung kann auch der Stofftransport im Film durch eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung [4] [38] beschrieben werden,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla X) - u \nabla X, \quad (4.24)$$

die auf eine Dimension reduziert wird,

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial X}{\partial z} \right) - u \frac{\partial X}{\partial z}. \quad (4.25)$$

X bezeichnet die Beladung des Feststoffes mit Lösungsmittel, t die Zeit, z die Ortskoordinate, D den Diffusionskoeffizienten und u die Konvektionsgeschwindigkeit. Die Konvektionsgeschwindigkeit u ist in der Regel so klein, dass der konvektive Beitrag vernachlässigt werden kann, wodurch sich Gl. (4.25) zu

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (4.26)$$

vereinfacht. Der Diffusionskoeffizient D in Gl. (4.26) ist stark temperatur- und konzentrationsabhängig. Insbesondere diese nicht-lineare Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten sowie die Volumenänderung des betrachteten Raumes während des Prozesses erschweren außerordentlich die Lösung der Transportgleichungen. Für den Fall eines konstanten Diffusionskoeffizienten D ließe sich Gl. (4.26) relativ einfach mit Hilfe von Reihen integrieren.

Die Unterseite des Films ist stoffdicht, daher

$$\frac{\partial X}{\partial z} = 0. \quad (4.27)$$

An der freien Oberseite des Films findet die Verdunstung des Lösungsmittels statt, wobei der gebildete Dampf vom Luftstrom aufgenommen wird. An der Phasengrenze wird das thermodynamische Gleichgewicht angenommen und die Randbedingung durch die Kontinuität des Stoffstromes formuliert:

$$\varrho_{p,2} D \frac{\partial X}{\partial z} = \dot{m}_v, \quad (4.28)$$

worin \dot{m}_v die Stoffstromdichte bezeichnet.

4.2.2 Stofftransport an der Phasengrenze

Der Dampfdruck des Lösungsmittels an der Phasengrenzfläche kann mit der Gl. (A.8) beschrieben werden. Der Partialdruck des Lösungsmittels in der Trocknungsluft ergibt sich aus der Wasserbeladung der Luft,

$$Y = \frac{M_v}{M_g}. \quad (4.29)$$

Unter der Annahme eines idealen Gases,

$$M_{v/g} = \frac{p_{v/g} V \tilde{M}_{v/g}}{\tilde{R} T}, \quad (4.30)$$

erhält man für den Dampfpartialdruck

$$p_{v,d} = P \frac{Y_{v,d}}{0.622 + Y_{v,d}}. \quad (4.31)$$

Zudem muss die Aktivität des Lösungsmittels berücksichtigt werden. Sie beschreibt das Verhältnis des Lösungsmittelpartialdruckes p_L über der Polymerlösung zum Satttdampfdruck $p_{L,s}$ des reinen Lösungsmittels.

$$\frac{p_1}{p_{1,s}} = a_1. \quad (4.32)$$

Zahlenwerte der Aktivität können durch theoretische Modelle wie z.B. der UNIFAC, der Flory Huggins oder der UNIFAP [1] ermittelt werden. Für die UNIFAC und die Flory Huggins Theorie sind Messdaten notwendig. Die UNIFAP, eine speziell für Polymere entwickelte Methode, kommt ohne zusätzliche Daten aus, versagt aber, wenn Wasser als Lösungsmittel eingesetzt wird oder es sich um Block-Copolymere und vernetzte Polymere handelt. Dies ist in der zu untersuchenden Beschichtung der Fall.

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten für die Aktivität wurden aus den Untersuchungen von [39] übernommen. Für ein Wasser/Polymer System wurde der in Gl. (4.33) dargestellte Zusammenhang gefunden,

$$X = \frac{0.103a}{(1 - 0.969a)(1 + 1.56a)}. \quad (4.33)$$

Der Verlauf der Aktivität ist in Abb. 11 illustriert. Anhand der Grafik kann man erkennen, dass sich die Aktivität mit abnehmender Beladung für $X < 0,3$ stark verkleinert.

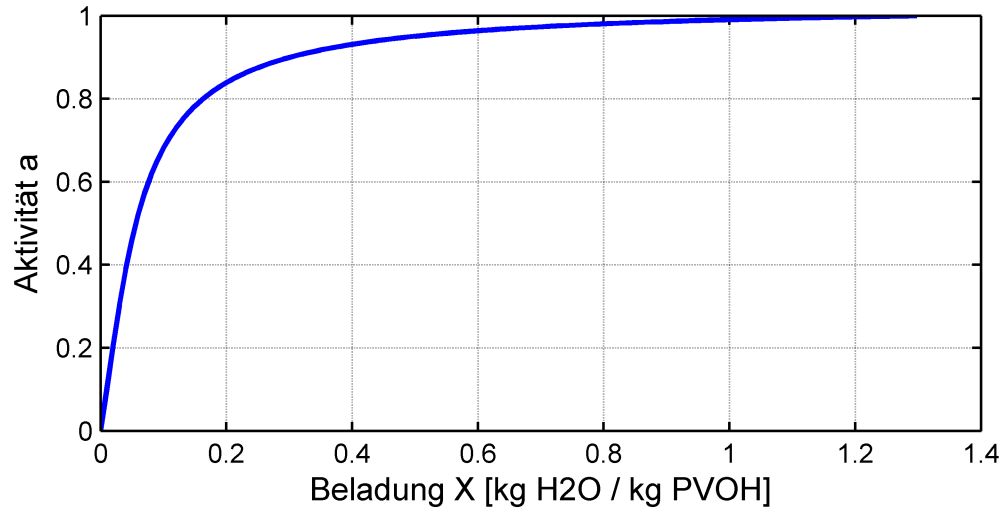


Abbildung 11: Verlauf der Aktivität einer Wasser/PVOH Lösung

Dieses Verhalten könnte z.B. eine wesentliche Rolle bei der Ausbildung einer Diffusionsperre für den Lösungsmitteltransport darstellen. Nicht nur die Aktivität nimmt mit dem Lösungsmittelgehalt ab, sondern auch der Diffusionskoeffizient, was diesen Effekt zusätzlich verstärkt.

4.2.3 Stofftransport in der Gasphase

Der Stoffstrom in der Gasphase wird im Wesentlichen durch den Stoffübergangskoeffizient β und die Lösungsmittelpartialdruckgefälle zwischen der Phasengrenzfläche und der Luft bestimmt. Der Dampfdruck an der Phasengrenze ist eine Funktion der Temperatur und der Aktivität, wie im vorherigen Abschnitt gezeigt. Erhöht sich die Bahntemperatur, so steigt auch der Lösungsmittelpartialdruck an der Phasengrenze. Für den Verdunstungsmassenstrom \dot{m}_v gilt der Zusammenhang:

$$\dot{m}_v = \frac{P\tilde{M}_v}{\tilde{R}T_m}\beta \ln \left(\frac{P - p_{v,d}}{P - p_{v,l}} \right), \quad (4.34)$$

worin P den Gesamtdruck, \tilde{M}_v die molare Masse des Lösungsmittels, \tilde{R} die universelle Gaskonstante, β den Stoffübergangskoeffizienten, $p_{v,d}$ den Partialdruck des Lösungsmittels

tels in der Trocknungsluft und $p_{v,I}$ den Partialdruck an der Phasengrenze bezeichnen. T_m ist das arithmetische Mittel aus Trocknungslufttemperatur und Oberflächentemperatur der Bahn,

$$T_m = \frac{T_B + T_d}{2}. \quad (4.35)$$

Die Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten erfolgt aus der Analogie zum Wärmeübergang:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \rho c_p Le^{(1-n)} \quad (4.36)$$

In dieser Gleichung stellt ρ die Dichte, c_p die spez. Wärmekapazität und Le die Lewis-Zahl des Wasserdampf-Luft-Gemisches dar.

$$Le = \frac{a}{D_{v,Luft}} = \frac{\lambda}{(\rho c_p D_{v,Luft})} \quad (4.37)$$

Die Lewis Zahl liegt für Wasserdampf-Luft-Gemische nahe 1, sodass der Exponent n in Gl. (4.36) eine untergeordnete Rolle spielt; dieser wird für laminare Strömungen zu $1/3$, für turbulente zu 0.4 gesetzt.

4.3 Stoffbilanzen im Trockner

Die hier formulierten Stoffbilanzen beziehen sich auf die Trocknungsluft. Im betrachteten Fall wird Wasser als Lösungsmittel verwendet. Anhand dieses Systems werden die Massenbilanzen aufgestellt und ausgewertet. Die Lösungsmittelbeladung der Trocknungsluft, hat wie in der vorhergehenden Betrachtung zum Stofftransport gezeigt, eine direkte Auswirkung auf den Verdunstungsstoffstrom. Somit ist die Kenntnis des Lösungsmittelpartialdrucks unerlässlich für die Berechnungen des Trocknungsprozesses. In Abb. 12 ist ein Trocknungsmodul illustriert.

Die Stoffströme \dot{M}_I und \dot{M}_{II} bezeichnen die Ströme in den Zuständen vor bzw. nach dem Kontakt mit dem Produkt; \dot{M}_V stellt den Verdunstungsstoffstrom dar. Es gilt

$$\dot{M}_{II} = \dot{M}_I + \dot{M}_V \quad (4.38)$$

Des Weiteren lässt sich der Stoffstrom I aus

$$\dot{M}_I = \dot{M}_{II} + \dot{M}_{Zu} - \dot{M}_{Ab} \quad (4.39)$$

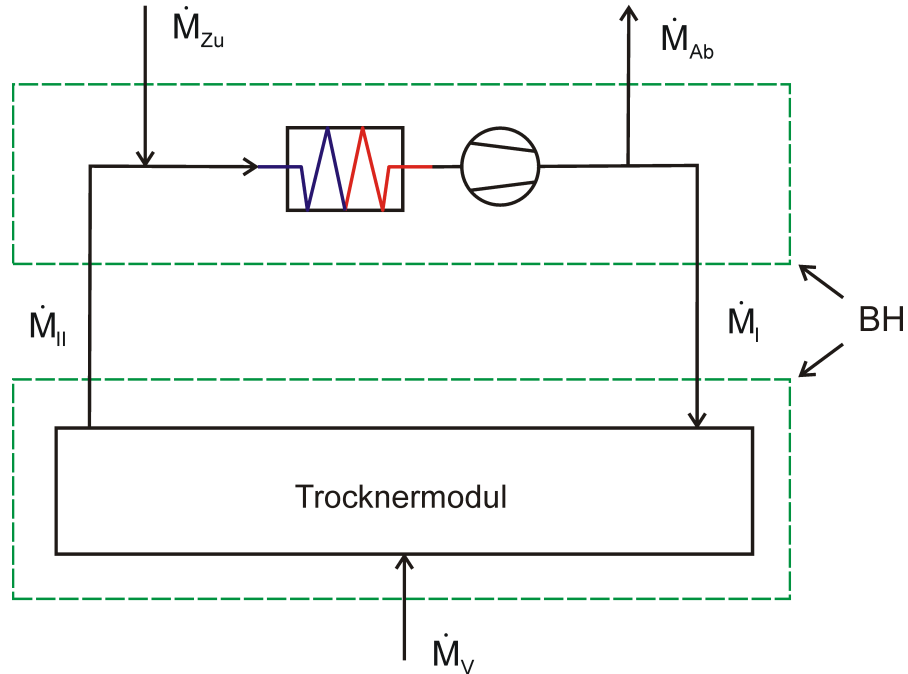


Abbildung 12: Luftsystem eines Schwebetrockners, BH-Bilanzhülle

berechnen.

Der Abluftstrom ergibt sich aus der verdunsteten Wassermenge und dem Zuluftstrom,

$$\dot{M}_{Ab} = \dot{M}_{Zu} + \dot{M}_V. \quad (4.40)$$

Gleichungen (4.38) bis (4.40) können in der Form für jede Komponente aufgestellt werden. Neben diesen Gleichungen wird es je nach Bauart des Trockners notwendig sein, Falschlufströme für den Ein- und Auslauf des Trockners zu berücksichtigen.

Mit diesen Gleichungen sind die Stoffströme vollständig erfasst. Zur Berechnung des Energieverbrauchs können ergänzend Enthalpiebilanzen aufgestellt werden.

5 MODELLIERUNG DES WÄRME- UND STOFFTRANSPORTS

Simulationsmodelle zur Trocknung bahnförmiger Güter lassen sich in 4 Gruppen einteilen [9], Abb. 13. Je nach Auflösungsart erhält man aus diesen Informationen über die Trocknungskinetik, wobei mit steigendem Informationsgehalt der Berechnungsaufwand überproportional zunimmt. So lässt sich zum Beispiel ein Produktionsprozess an einer Maschine mit der Kenntnis von Referenzproduktionen durch die Anwendung relativ einfacher Mittel abschätzen. Werte wie zum Beispiel der Verlauf der Feststoffkonzentration über die Zeit können so grob angenähert werden. Diese Modelle bilden die Gruppe der "Constant Rate Modelle". Es wird eine über den gesamten Trocknungsprozess konstante Verdunstungsrate angenommen.

Eine weitere Gruppe der Trocknungsmodelle stellen die "Lumped Parameter Modelle" dar. Bei dieser Art von Modellierung wird keine Unterscheidung zwischen den einzelnen Schichten des Produktes vorgenommen. Die Materialwerte der einzelnen Bestandteile werden zu sogenannten "Lumped Parameter" für das gesamte Produkt gemittelt. Es erfolgt keine Ortsauflösung der Komponenten oder Temperaturen. Die Änderung der

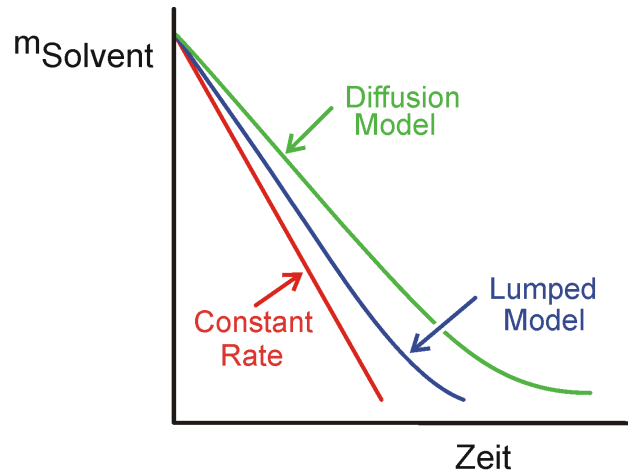


Abbildung 13: Massenabnahme in den Trocknungsmodellen

Produkttemperatur gleicht bei dieser Betrachtungsweise der Differenz der eingehenden und abgehenden Wärmeströme dividiert durch die Wärmekapazität des Produktes.

$$c_{p,m}\rho_m\delta\frac{\partial T}{\partial t} = \dot{q}_o + \dot{q}_u - \dot{n}\Delta h \quad (5.1)$$

Diffusionsmodelle lösen die produktinneren Vorgänge während der Trocknung räumlich und zeitlich auf. Bei sehr dünnen Schichten wird oft eine Kombination aus einem Lumped Parameter Modell für den Wärmetransport und einem Diffusionsmodell für den Stofftransport angewandt. Mit den zusätzlichen Daten über die Stoffverteilung im Produkt können weitere Informationen über den Prozess gewonnen werden. Diese Daten sind für die Optimierung der Produktionseigenschaften oder der Trocknungskinetik sehr hilfreich und können zur erheblichen Beschleunigung des Optimierungsprozesses führen.

In diesem Abschnitt wird die numerische Realisierung des Diffusionsmodells mit der Lösung der Gleichungen für den Wärme- und Stofftransport im Produkt vorgestellt. Auf die Modellierung mathematisch einfacher Zusammenhänge, wie z.B. die Korrelationen zum Wärmeübergang oder der Berechnung der Stoffeigenschaften, wie sie im Abschnitt 4 vorgestellt wurden, wird nicht näher eingegangen. Zur Berechnung der dynamischen Verteilung der Bahntemperatur sowie der Stofftransportvorgänge müssen partielle Differentialgleichungen 2. Ordnung, Gl. (4.20) und Gl. (4.26), mit variablen Transportkoeff-

fizienten gelöst werden. Besonders die starke Nichtlinearität des Diffusionskoeffizienten, das Schrumpfen des Berechnungsgebietes (Film) und die nicht äquidistante Verteilung der Stützstellen erschweren die Lösung dieser Gleichungen.

5.1 Simulation des Stofftransports im Strich

Zur numerischen Lösung der Differentialgleichung des Stofftransports im Film bieten sich einige Verfahren an. In kommerziellen Bereichen wird am häufigsten auf **Finite Elemente Methoden** zurückgegriffen. Der Vorteil dieser Methoden liegt in der einfachen Anwendung bei komplizierten Geometrien. Ein Nachteil ist der hohe Programmieraufwand. Eine weitere Möglichkeit ist die Diskretisierung der Gleichungen mittels der **Finite Differenzen Methoden**. Diese sind in der Programmierung in der Regel leichter zu handhaben und bietet bei einfachen Geometrien, wie es bei bahnförmigen Gütern der Fall ist, ebenfalls gute Ergebnisse. Zur Berechnung des Transports im Film wird deshalb eine Finite Differenzen Methode angewandt.

Zur Diskretisierung der Differentialgleichung für den Stofftransport wird in der Literatur häufig das Crank-Nicholson Verfahren angewandt. Autoren wie Gehrman [21] und Navarri [40] berichten, dass sie mit expliziten Verfahren bessere Ergebnisse erzielt hätten. Aust [2] erreichte mit einem Diskretisierungsschema nach Smith [57] gute Resultate. In diesem werden die Informationen von 3 aufeinanderfolgenden Zeitschritten verwendet, was dem Verfahren zusätzliche Stabilität verleiht. Schabel [54] griff für die Berechnung des Stofftransports auf einen kommerziell vertriebenen Solver der Numerical Algorithms Group zurück. Zudem wird die mathematische Behandlung der Diffusionsgleichung bei Crank [14], [13], [15] sowie bei Cussler [16] beschrieben. In dieser Arbeit wird das Crank-Nicholson Verfahren angewandt [3], [15], [18], [55]. Die Vorgehensweise ist den halb-impliziten Verfahren zuzuordnen. Die Ableitung nach der Zeit wird hierbei durch einen Vorwärtsdifferenzenquotienten angenähert und die örtliche Ableitung durch die zweifache Anwendung des zentralen Differenzenquotienten. Unter der Berücksichtigung der Konzentrationsabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten ergeben sich für den Stofftransport im Film folgende Beziehungen:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{X_{i,j+1} - X_{i,j}}{k}, \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{(X,T)} \frac{\partial X}{\partial z} \right) &= \frac{1}{2h^2} \left(D_{i,+\frac{1}{2}} (X_{i+1,j+1} - X_{i,j+1}) - D_{i,-\frac{1}{2}} (X_{i,j+1} - X_{i-1,j+1}) \right) \\ &+ \frac{1}{2h^2} \left(D_{i,+\frac{1}{2}} (X_{i+1,j} - X_{i,j}) - D_{i,-\frac{1}{2}} (X_{i,j} - X_{i-1,j}) \right), \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$D_{(i-\frac{1}{2})} = \frac{1}{2} (D_{(i-1,j)} + D_{(i,j)}), \quad (5.4)$$

$$D_{(i+\frac{1}{2})} = \frac{1}{2} (D_{(i,j)} + D_{(i+1,j)}). \quad (5.5)$$

Zur Berechnung im sich mitbewegenden Gitternetz wurde der Diffusionskoeffizient in ein auf das trockenmassenbezogene Koordinatensystem transformiert. Danach gilt:

$$D_{(i)} = \frac{D_V}{\left(\varrho_{2,p} * \hat{V}_2 \right)^2} \quad (5.6)$$

Dieser Zusammenhang wurde von Hartley und Crank [25] hergeleitet und bietet den Vorteil, dass die Gitterabstände des Bezugssystems (trockene Masse) während der Berechnung unverändert bleiben. Dies erhöht die Stabilität der Algorithmusses erheblich. Die Dauer einer Berechnung hängt von den Gitterabständen und dem Diffusionskoeffizienten sowie von der Diffusionszeit ab. Die maximal zulässige Zeitschrittweite wird nach der Stabilitätsbedingung

$$\Delta t = \frac{\Delta z^2}{S * D} \quad (5.7)$$

berechnet, wobei Δt die maximal zulässige Zeitschrittweite, Δz den Abstand von Gitterlinie zu Gitterlinie, D den Diffusionskoeffizienten und S das Stabilitätskriterium darstellt. Für das Crank Nicolson Verfahren wird $S=1$ empfohlen. Wie in der Literatur berichtet wird, werden gute Ergebnisse auch bei erheblich kleineren Werten S erzielt, z.B. $S = 0,2$.

Wird $S > 1$ gewählt, werden die Zeitschritte kleiner und die Dauer der Berechnung größer. Bei $S < 1$ steigt die Berechnungsgeschwindigkeit auf Kosten der Genauigkeit der Ergebnisse.

Um den hohen Anforderungen dieses Systems, speziell im Bereich der oberen Phasengrenze, gerecht zu werden, wurde die Möglichkeit einer Gitterverfeinerung mit einem exponentiellen Faktor von der unteren bis zur oberen Phasengrenze programmiert. Durch diese Verfeinerung im kritischen Bereich ist es möglich die Gesamtzahl der Stützstellen zu reduzieren. Somit sind weniger Rechenoperationen pro Zeitschritt notwendig. Abb. 14 illustriert ein Gitter mit konstanten Gitterabständen in Orts- und Zeitrichtung.

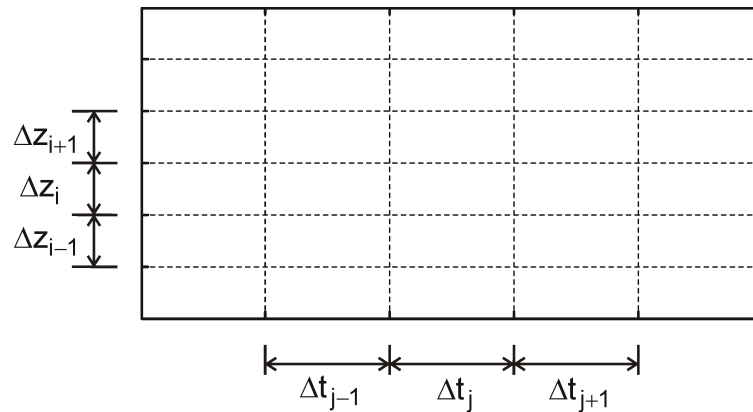


Abbildung 14: Gitter definiert durch Orts- und Zeitschritte

Der Abstand von Gitterpunkt zu Gitterpunkt berechnet sich aus

$$\frac{\Delta X_{k+1}}{\Delta X_k} = f, \quad (5.8)$$

wobei f den Verteilungsfaktor darstellt.

In Abb. 15 ist die Struktur des Programmmoduls für den Stofftransport illustriert. Dem Berechnungsverfahren kann durch die Überprüfung der Lösung nach jedem Zeitschritt in einer Kontrollschleife zusätzliche Stabilität und Genauigkeit eingebracht werden. Bei Unterschreiten einer festgelegten Toleranzgrenze endet der aktuelle Zeitschritt und der Algorithmus geht in den Nächsten über.

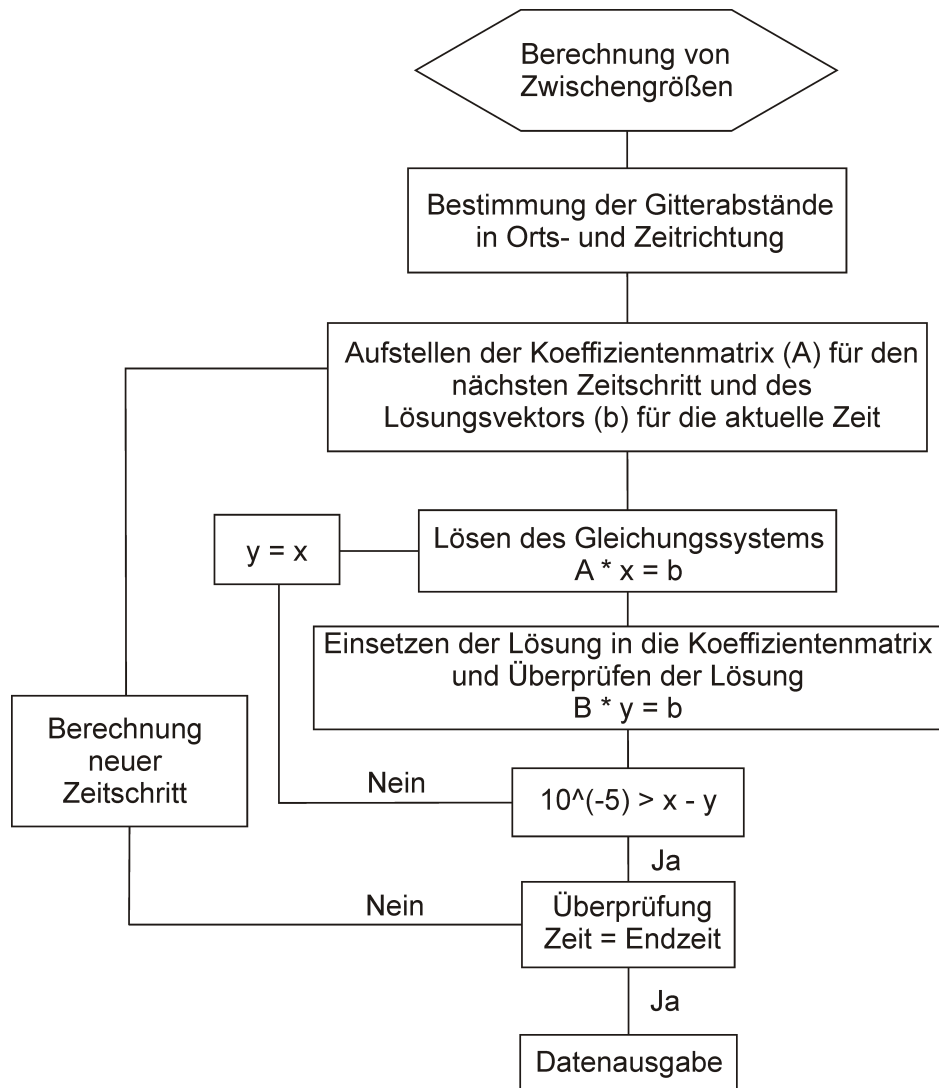


Abbildung 15: Struktur des Rechenmoduls zum Stofftransport durch Diffusion

5.2 Validierung der numerischen Lösung für den Stofftransport im Strich

Zur Überprüfung der numerischen Lösung wurden die Rechenergebnisse mit den analytischen Ergebnissen verglichen. Die Schrumpfung des Koordinatensystems wurde durch eine Massenbilanz kontrolliert, die Verteilung der Konzentration des Lösungsmittels durch die analytische Lösung der Diffusionsgleichung unter Verwendung eines konstanten Diffusionskoeffizienten und eines ortsgebundenen Koordinatensystems.

5.2.1 Validierung der Schrumpfung des Striches

Die Validierung der Schrumpfung des Films wird durch eine Massenbilanz überprüft. Die Gesamtmasse besteht aus Lösungsmittel und nicht flüchtigem Stoff. Als Anfangsbedingung ist die Konzentration in der Lösung vorgegeben. Als Randbedingung wird an der Oberseite des Films eine konstante Verdunstungsrate angenommen. Die Dicke δ zur Zeit t berechnet sich wie folgt.

$$\delta = \frac{V}{A} = \frac{V_1 + V_2}{A} = \frac{M_1/\varrho_1 + M_2/\varrho_2}{A} \quad (5.9)$$

$$M_1 = M_2 \left(\frac{1}{c} - 1 \right) \quad (5.10)$$

$$\delta(t) = \delta_0 - \Delta\delta_v(t) \quad (5.11)$$

$$\delta(t) = \frac{M_2 \left[\varrho_2 \left(\frac{1}{c} - 1 \right) + \varrho_1 \right] - \dot{M}_v \varrho_2 \Delta t}{A \varrho_1 \varrho_2} \quad (5.12)$$

Mit gleichen Parametern werden Rechnungen mit dem Diffusionsmodul gemacht. Stabilitätsfaktor und die Anzahl der Stützstellen wurden bei der Berechnung im numerischen Teil variiert. In Tabelle 1 sind einige Ergebnisse dieser Varianten zusammengestellt, bei denen sich Rechenzeit und Fehler in akzeptablen Grenzen halten. Die rechte Spalte $\Delta_{analytisch}$ zeigt die Differenz zwischen der analytischen Lösung und dem numerischen Ergebnis. Mit zunehmender Diffusionszeit steigt diese Differenz. Für das Programmmodul Diffusion wurden die in Tabelle 1 Nr. 1 - 5 ausgewiesenen Daten gewählt.

Tabelle 1: Überprüfung der numerischen Lösung auf Massenerhaltung

Nr.	Variablen		Rechenzeit s	Dicke μm	$\Delta_{analytisch}$ μm
	t / s	S n			
1	10	0,2 50	1,9	88,19	0,186
2	20	0,2 50	2,4	69,13	0,26
3	30	0,2 50	3,4	49,99	0,41
4	40	0,2 50	9,1	30,84	0,56
5	48	0,2 50	16,0	15,53	0,68
6	48	0,1 50	8,6	15,53	0,68
7	48	0,05 50	4,8	15,48	0,73
8	48	0,05 70	12,5	15,77	0,44

5.2.2 Validierung der Beladungsverteilung im Strich

Zur Überprüfung des numerischen Verlaufes der Beladung im Film wurde die analytische Lösung der Diffusionsgleichung mit der numerischen Lösung verglichen. Die Berücksichtigung der Schrumpfung des Films ist mit der analytischen Lösung nicht möglich, daher wurden die Vergleichsrechnungen ohne Volumenänderung und mit einem konstanten Koordinatensystem vorgenommen.

Die analytische Lösung der Diffusionsgleichung mit konstantem Diffusionskoeffizienten wurde aus der Lösung für ein analoges Wärmeleitproblem [11] übernommen:

$$X(t, z) = X_0 - \frac{\dot{m}_v h}{\rho_2 D} \left[\frac{Dt}{h^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{z}{h} \right)^2 - \frac{1}{6} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2 \pi^2} \exp \left(\frac{-Dt}{h^2} n^2 \pi^2 \right) \cos \left(n \pi \frac{z}{h} \right) \right] \quad (5.13)$$

Für den Vergleich der beiden Lösungen wurden die Prozessgrößen wie folgt gewählt:

Verdunstungsstoffstrom	$5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
Diffusionskoeffizient	$10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
Filmdicke	$100 \mu\text{m}$

Die Abb. 16 illustriert die Ergebnisse der beiden Berechnungen. Die Linien im Diagramm veranschaulichten die numerische Lösung, die Kreise die analytische Lösung. Von Linie zu Linie besteht ein zeitliches Intervall von 2 Sekunden.

Die Werte der Lösungen stimmen gut miteinander überein. Dies kann zwar nur eine

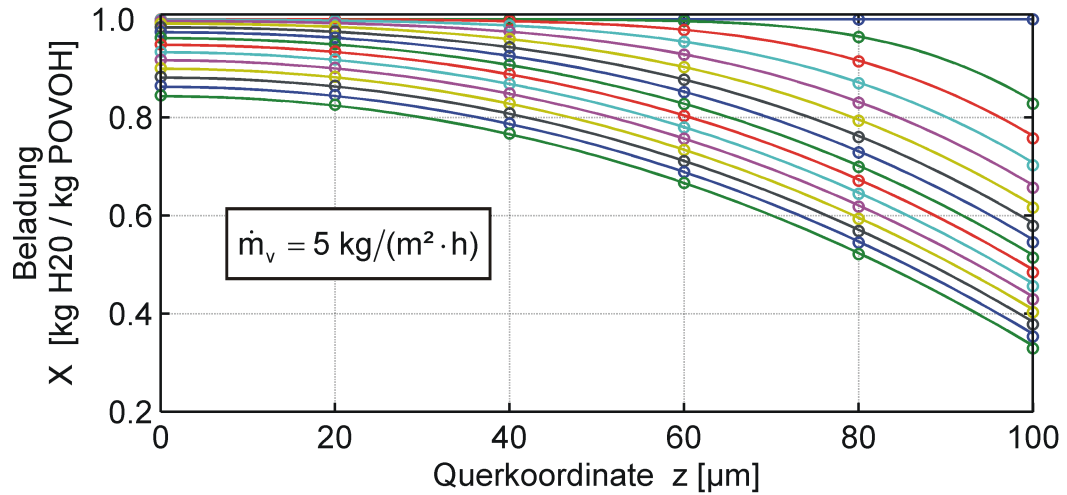


Abbildung 16: Vergleich der numerischen mit der analytischen Lösung der Diffusionsgleichung bei konst. Diffusionskoeffizienten

grobe Kontrolle der numerischen Lösung bedeuten, zeigt aber, dass die numerische Behandlung der Differentialgleichung zuverlässige Werte liefert.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die physikalischen Zusammenhänge bezüglich des Stofftransports im Film mit den vorgestellten numerischen Lösungsmethoden hinreichend genau gelöst werden können. Die Gleichungen wurden in einem Modell implementiert und mittels Finite Differenzen numerisch gelöst. Zur Kontrolle wurde das Modell mit analytischen Gleichungen verglichen und eine ausreichende Genauigkeit festgestellt.

5.3 Simulation des Wärmetransports im Produkt

Die Gleichungen zum Wärme- und Stofftransport sind einander ähnlich. Entgegen dem Stofftransport ist bei dem Wärmetransport die Einschränkung auf die Beschichtung nicht möglich. Der Wärmetransport muss im gesamten Produkt berechnet werden. Hierbei gilt es für jede Schicht die entsprechenden Stoffparameter zu bestimmen und im Modell umzusetzen. Für die unteren 3 Produktschichten sind die Stoffparameter nur von der Temperatur abhängig, die Zusammensetzung ändert sich nicht. Im Film hingegen

findet durch die Verdunstung des Lösungsmittels eine stetige Veränderung der thermophysikalischen Eigenschaften statt. Zudem bewirkt die Verdunstung eine Verkleinerung des Kontrollvolumens, was, wie beim Stofftransport, zusätzlich beachtet werden muss.

Für den Wärmeeintrag von der Unterseite gilt Gl. (4.1). Der Wärmeeintrag von der Oberseite kann durch die Gl. (4.16) beschrieben werden. An der oberen Phasengrenze wird die ins Produkt eingetragene Wärme zum Teil als Verdunstungsstrom wieder abgeführt. Dieser Vorgang kann mit dem Produkt aus dem Verdunstungsstoffstrom, Gl. (4.37), und der Verdunstungsenthalpie Δh_v beschrieben werden. Im 2. Trocknungsabschnitt, in dem Teil des Trocknungsprozesses, indem die Widerstände in der Gasphase die Trocknungsgeschwindigkeit bestimmen, stellt sich eine nahezu konstante Temperatur des Produktes ein. Die eingetragene Energie wird vollständig in Verdunstungsenergie umgesetzt. In diesem Abschnitt der Trocknung stellt sich die minimale Temperatur an der oberen Phasengrenze ein. Der 1. sowie der 3. Trocknungsabschnitt sind durch die starke Aufheizung der Bahn gekennzeichnet. In diesen Abschnitten wird ein Teil der eingetragenen Energie in die Erwärmung des Produktes und der andere in die Verdunstungsenergie des Lösungsmittels umgesetzt.

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung wurde ebenfalls mit Finiten Differenzen realisiert. Ausführungen zum mathematischen Verfahren können dem Abschnitt 5.1 entnommen werden. Zur Lösung der Gleichung werden die Anfangs- und Randbedingungen wie folgt formuliert:

$$-\lambda_{I,o} \frac{\partial T_{I,o}}{\partial z} = \dot{q}_o - \dot{n}_v \Delta h_v, \quad (5.14)$$

$$-\lambda_{I,u} \frac{\partial T_{I,u}}{\partial z} = \dot{q}_u. \quad (5.15)$$

Als Anfangsbedingung wird das Produkt isotherm beim Einlauf in den Trockner angenommen,

$$T_z = \text{const.} \quad (5.16)$$

Zwischen den einzelnen Schichten des Produktes gilt die Bedingung der Kontinuität des Wärmestroms und der Temperatur,

$$\lambda_{PE} \frac{\partial T_{PE}}{\partial z} = \lambda_{Papier} \frac{\partial T_{Papier}}{\partial z}, \quad (5.17)$$

$$T_{I,PE} = T_{I,Papier}. \quad (5.18)$$

Die folgende Darstellung zeigt die Temperaturverteilung im 2. Abschnitt der Trocknung. Für die Berechnungen werden die Stoffparameter entsprechend Tab. 5.3 verwendet, [26] und [27].

Tabelle 2: Parameter Wärmeleitungsrechnung

		Strich	PE-Oberseite	Papier	PE-Unterseite
spez. Masse	g/m^2	42	18	178	39
Dichte	kg/m^3	1003	920	1065	960
c_p	$J/(kgK)$	1611	2100	1500	2260
λ	$mW/(mK)$	210	330	106	330

Die Prozessparameter wurden wie folgt angenommen:

Bahntemperatur obere Phasengrenze	T_O	48	$^{\circ}C$
Wärmeübergangskoeffizient an der Unterseite	α_u	90	W/m^2K
Temperatur der Trocknungsluft	T_{Luft}	120	$^{\circ}C$

Die Bahntemperatur an der oberen Phasengrenze entspricht den in vielen industriellen Anwendungen von Schwebetrocknern herrschenden Bahntemperaturen. Aust [2], Cairncross [8] und Shojaie et al. [56] stellten fest, dass sich Temperaturprofile erst bei großen Schichtdicken ausbilden würden.

Wie die Abb. 17 zeigt, bilden sich trotz der geringen Schichtdicken erhebliche Temperaturdifferenzen in der Schicht aus. Der Temperaturgradient im dargestellten Bereich beträgt ca. $30.000 K/m$, was die Produktqualität durchaus beeinflussen könnte.

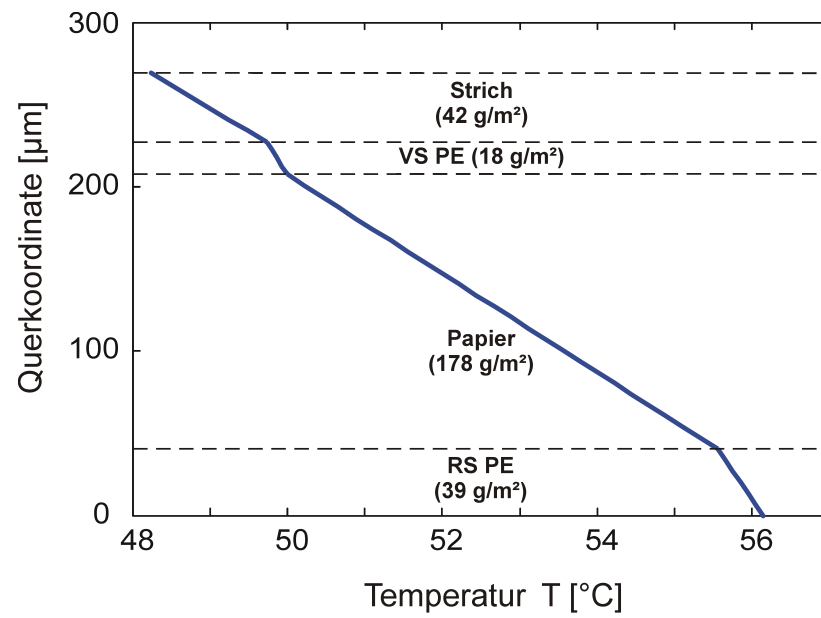


Abbildung 17: Beispielhafter Verlauf der Bahntemperatur im 2. Trocknungsabschnitt

6 SENSITIVITÄTSANALYSE DES TROCKNUNGSPROZESSES

In diesem Kapitel werden die grundsätzlichen Zusammenhänge bei der Trocknung und die Relevanz einzelner Parameter bezüglich des Trocknungsprozesses veranschaulicht. Hierbei werden die Ergebnisse zum Wärmetransport und zum Stofftransport voneinander getrennt vorgestellt.

6.1 Wärmetransport im Trockner

Der Energieeintrag in die zu trocknende Schicht ist ein wesentlicher Parameter zur Kontrolle der Verdunstungsgeschwindigkeit. An dieser Stelle soll die Abhängigkeit des Energieeintrags von den Prozessbedingungen dargestellt werden. Der Energieeintrag ohne Stofftransport kann durch Gl. (4.1) beschrieben werden, der Energieeintrag mit entgegengesetztem Stofftransport durch Gl. (4.16). Die Temperaturdifferenz ergibt sich aus der eingestellten Trocknungslufttemperatur und der entsprechend der Feuchtebeladung der Trocknungsluft resultierenden Bahntemperatur. Neben der Temperaturdifferenz bestimmt der Wärmeübergangskoeffizient maßgeblich die eingetragene Wärmeenergie.

6.1.1 Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient hängt von der Temperatur, der Feuchtebeladung der Trocknungsluft sowie von der Luftgeschwindigkeit am Düsenaustritt ab. Zur Modellierung des Wärmeübergangskoeffizienten wurden die in Kapitel 4.1 vorgestellten Gleichungen herangezogen. Den im Folgenden vorgestellten Berechnungen sind die Daten von den an einer Produktionsmaschine eingesetzten Düsen zugrundegelegt. Die Kennzahlen zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten sind in Tab. 3 aufgezeigt.

Tabelle 3: Kennzahlen der verwendeten Düsen

Kennzahlen		
s	m	$16 \cdot 10^{-3}$
h	m	$20 \cdot 10^{-3}$
f	–	0,004
f_0	–	0,1217 – 0,1290
Re_{min}	–	$9,4313 \cdot 10^3$
Re_{max}	–	$4,7157 \cdot 10^4$

Feuchtebeladung der Trocknungsluft Der Einfluss der Feuchtebeladung der Trocknungsluft auf den Wärmeübergangskoeffizienten ist in der Abb. 18 illustriert. Auf der Abszisse ist die mittlere Lufttemperatur aufgetragen. Die Luftgeschwindigkeit am Düsenaustritt ist konstant. Die Linien stellen den Wärmeübergangskoeffizienten bei unterschiedlichen Feuchtebeladungen der Trocknungsluft dar. Diese verlaufen fast parallel zu einander und fallen mit steigender Lufttemperatur ab. Im untersuchten Bereich mit einer Feuchtebeladung von 20 g/kg bis 340 g/kg ergibt sich für den Wärmeübergangskoeffizienten eine maximale Differenz von ca. $6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Die in den Produktionsanlagen gemessenen Werte für die Feuchtebeladung liegen in einem Bereich von 40 g/kg bis 80 g/kg. Die Trocknungsluftfeuchte spielt in Bezug auf den Wärmeübergangskoeffizienten folglich nur eine untergeordnete Rolle.

Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Trocknungsluft Die Variation der Düsenaustrittsgeschwindigkeit ist in Abb. 19 illustriert. Sie hat einen größeren Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten als die Luftfeuchte. Auch in diesem Diagramm wird

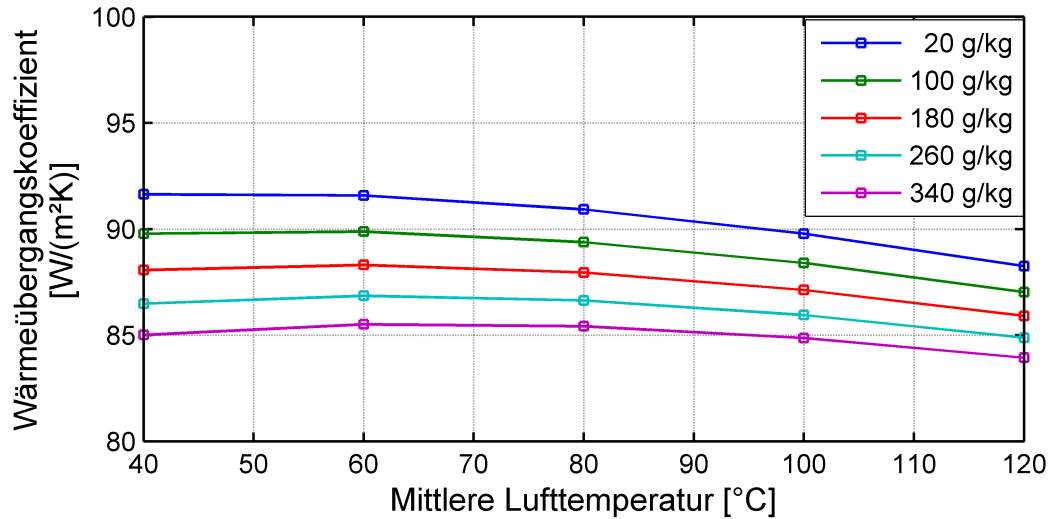


Abbildung 18: Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Feuchtebelastung der Trocknungsluft; $v_{Duese} = 35 \text{ m/s}$

der leichte Abfall des Wärmeübergangskoeffizienten mit der Lufttemperatur deutlich. Die erreichte Differenz des Wärmeübergangskoeffizienten beträgt bei der Variation der Geschwindigkeit zwischen 10 m/s und 40 m/s ca. $60 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, was dem 10-fachen der Auswirkung der Trocknungsluftfeuchte entspricht. Die Luftgeschwindigkeit hat folglich einen erheblichen Einfluss auf den Wärmeübergang und die Trocknungskinetik.

Abstand Düsenaustritt - Produkt Abb. 20 illustriert den Einfluss des vertikalen Abstandes vom Düsenaustritt bis zur Bahnoberfläche auf den Wärmeübergang. Wie der Abbildung entnommen werden kann, nimmt der Wärmeübergangskoeffizient mit zunehmenden Düsenabstand bei konstanter Temperatur um ca. $4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ab. Der Abstand zwischen Düse und der Bahn zeigt im untersuchten Bereich ebenfalls nur einen geringen Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten. Der Winkel der Düsenaustrittsöffnung zur Bahn hat nach [36] keinen Einfluss auf den mittleren Wärmeübergang, sofern die Distanz senkrecht vom Düsen Schlitz zur Bahn unverändert bleibt.

Wie die Ergebnisse zeigen, kann der Wärmeübergangskoeffizient zwar durch die Düsengeometrie und die Anordnung Düse zur Bahn beeinflusst werden, diese Daten liegen

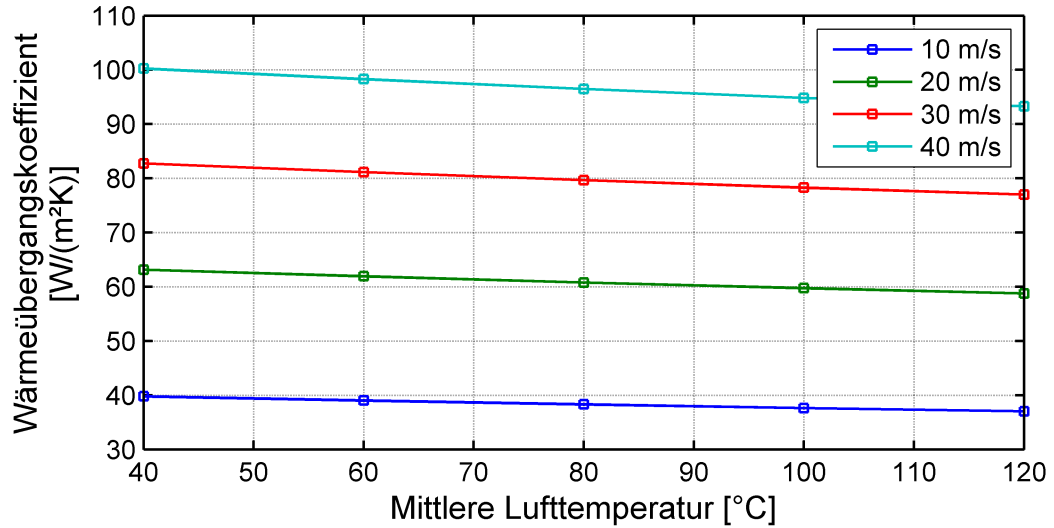


Abbildung 19: Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit am Düsenaustritt; $X = 60 \text{ g/kg}$

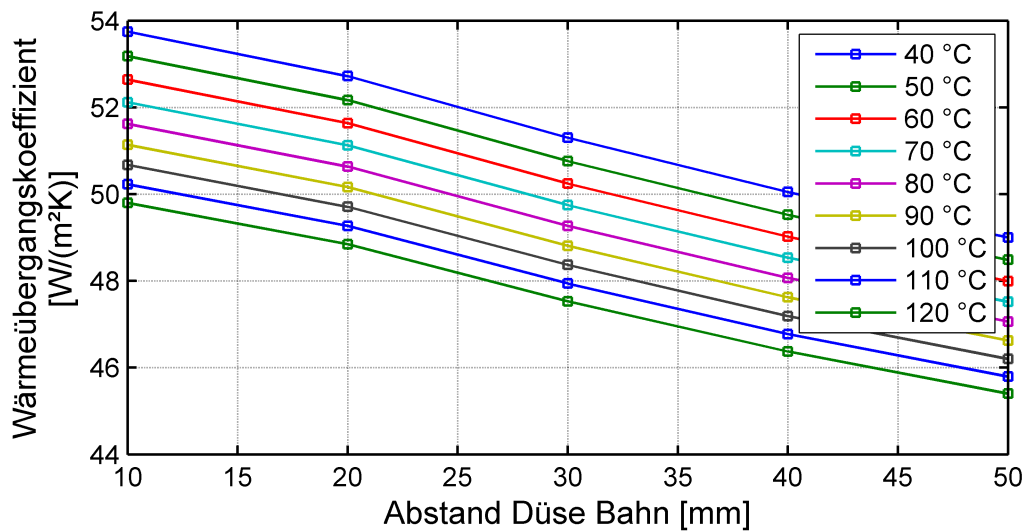


Abbildung 20: Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit des Abstandes Düsenaustritt / Bahn und der Lufttemperatur

aber im Allgemeinen bereits fest und stellen somit keine Variationsparameter dar. Bei den Prozessparametern zeigten die Luftfeuchte und die Lufttemperatur nur einen geringen Einfluss. Die Haupteinflussgröße auf den Wärmeübergangskoeffizienten stellt die Luftgeschwindigkeit am Düsenaustritt dar.

6.1.2 Energieeintrag ins Produkt

Der Energieeintrag ist eine Funktion von Temperaturdifferenz und Wärmeübergangskoeffizient. Die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von den Prozessbedingungen wurde im vorhergehendem Kapitel ausführlich behandelt. Die Temperaturdifferenz zwischen Produkt und Trocknungsluft wird in diesem Abschnitt erläutert.

Feuchtebeladung - Energieeintrag Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass die Trocknungsluftfeuchte nur einen geringen Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten hat. Auf den Energieeintrag bei simultaner Verdunstung hat sie jedoch einen nennenswerten Einfluss. Durch die Trocknungsluftfeuchte, insbesondere im 2. Trocknungsabschnitt, wird die adiabatische Verdunstungstemperatur festgelegt. Mit steigendem Feuchtegehalt steigt auch die Gleichgewichtstemperatur an, womit sich bei einer konstanten Trocknungslufttemperatur eine geringere Temperaturdifferenz zwischen der Trocknungsluft und der Bahn ergibt. Dementsprechend vermindert sich der Wärmeeintrag, Abb. 21.

Bei entgegengesetztem Wärme- und Stofftransport fällt bei konstanter Trocknungslufttemperatur die eingetragene Energie mit steigender Feuchtebeladung der Trocknungsluft ab.

6.2 Stofftransport im Trockner

Zur Analyse des Stofftransports wird eine differenzierte Betrachtung der Gasphase und der Flüssigphase vorgenommen. Der Stoffübergang von der flüssigen zur gasförmigen Phase stellt die Kopplung der beiden Vorgänge dar.

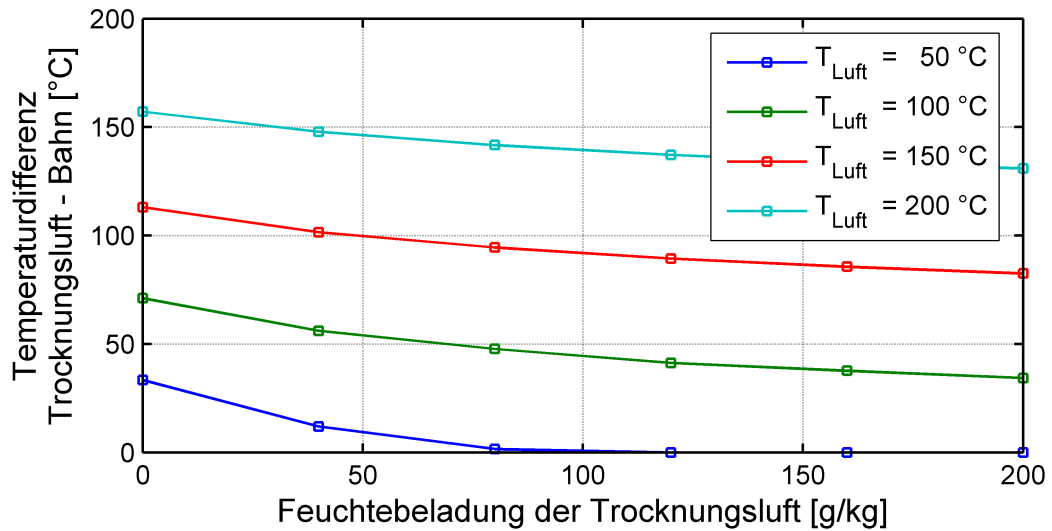


Abbildung 21: Feuchtebelastung - Temperaturdifferenz

6.2.1 Stofftransport in der Gasphase

Der gaseitige Stofftransport wird im Wesentlichen durch den Stoffübergangskoeffizienten β und das Partialdruckgefälle des Lösungsmittels von der Phasengrenze zur Trocknungsluft bestimmt, siehe Kapitel 4.2.3. Der Stoffübergangskoeffizient β lässt sich aus der Analogie zwischen dem Wärme- und Stofftransport berechnen. Hieraus lassen sich auch die Einflussgrößen auf den Stofftransport bestimmen. Steigt der Wärmeübergangskoeffizient, so steigt auch der Stoffübergangskoeffizient. Die Haupteinflussgröße auf den Stoffübergangskoeffizienten stellt, wie beim Wärmeübergang, die Düsenaustrittsgeschwindigkeit der Trocknungsluft dar.

Das Partialdruckgefälle in der Trocknungsluft wird durch die Trocknungsluftfeuchte bestimmt. Mit steigender Trocknungsluftfeuchte fällt dies ab, Abb. 22. Zwar steigt die Temperatur der Phasengrenze (adiabatische Verdunstungstemperatur) mit steigender Trocknungsluftfeuchte und somit auch der Dampfdruck an der Phasengrenze, die Partialdruckdifferenz jedoch sinkt.

In Abb. 22 ist dieser Zusammenhang illustriert. Dabei wurde bei konstanter Trocknungslufttemperatur, $T_{Luft} = 120\text{ °C}$, die Feuchtebelastung der Trocknungsluft sukzessive er-

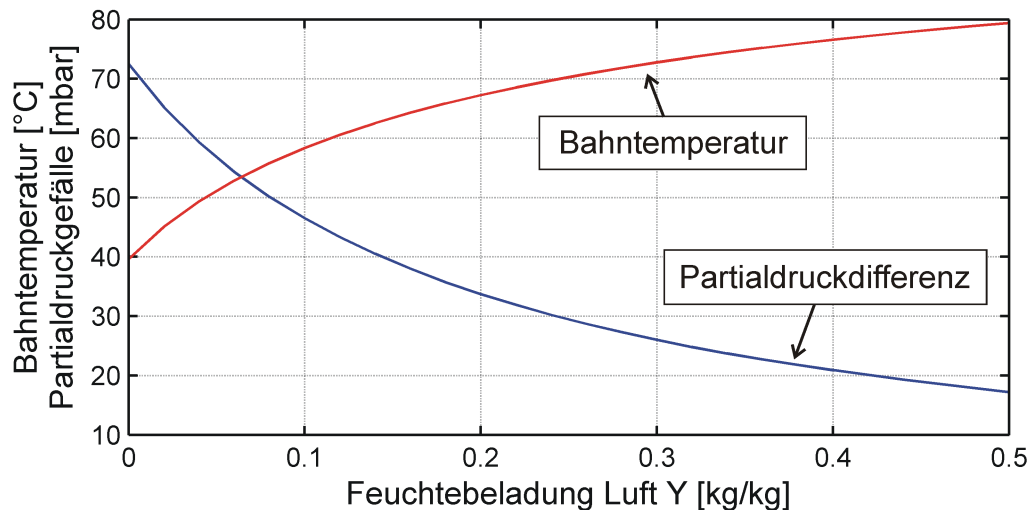


Abbildung 22: Feuchtebelastung - Partialdruckgefälle

hört. Anhand des Diagramms ist zu erkennen, dass die Erhöhung des Dampfdruckes durch die Bahntemperatur den zusätzlichen Dampfpartialdruck in der Trocknungsluft nicht ausgleichen kann, was zu einer Verringerung der Partialdruckdifferenz führt. Da das Partialdruckgefälle die Triebkraft für die Verdunstung darstellt, folgt somit auch ein Abfall der Verdunstungsgeschwindigkeit mit der Feuchtebelastung.

Diese Betrachtung gilt für den 2. Trocknungsabschnitt, da in diesem die Gasphase die Trocknungskinetik dominiert. Die Betrachtungen für den 3. und 4. Trocknungsabschnitt werden im nächsten Kapitel vorgenommen.

6.2.2 Stofftransport im Strich

Durch die Verdunstung an der oberen Phasengrenze bilden sich Konzentrationsgradienten im Film mit einem Stofftransport in Richtung der Phasengrenze aus. Der Diffusionskoeffizient ist hierbei örtlich und zeitlich aufgrund der Abhängigkeit von der Konzentration und Temperatur unterschiedlich. Das sogenannte Skinning (Hautbildung) ist zum Beispiel durch den starken konzentrationsbedingten Abfall des Diffusionskoeffizienten an der oberen Phasengrenze bedingt. Hierdurch ist ein ausreichender Lösungsmitteltransport zur Phasengrenze nicht mehr gewährleistet, der Verdunstungsmassenstrom

verringert sich. Die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von Lösungsmittelgehalt und Temperatur ist in Abb. 23 illustriert [41].

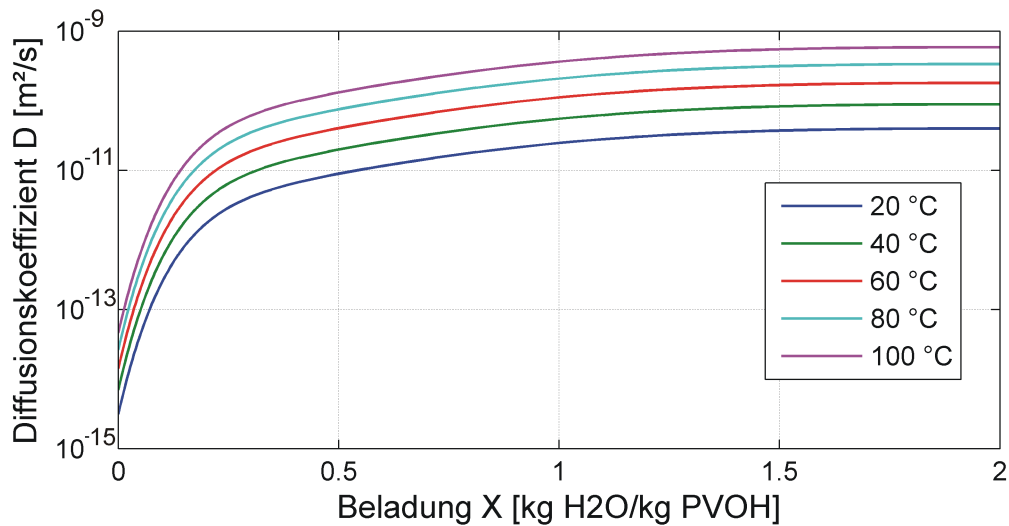


Abbildung 23: Diffusionskoeffizient von Polivinylalkohol in Wasser

Deutlich ist der starke Abfall des Diffusionskoeffizienten bei Lösungsmittelbeladungen kleiner 0,2 kg/kg zu erkennen. Wird diese Konzentration in den phasengrenzennahen Volumenelementen unterschritten, baut sich eine diffusionsbehindernde Schicht auf. Mit kleiner werdender Verdunstungsrate erhöht sich die Bahntemperatur, wodurch der Diffusionskoeffizient steigt. Dieser Effekt wird jedoch mit sinkender Lösungsmittelbeladung geringer und reicht nicht aus, um den konzentrationsbedingten Abfall auszugleichen.

Betrachtet man den üblichen Trocknungsverlauf einer PVOH-Wasser-Lösung und stellt die Bahntemperatur sowie die Beladung übereinander dar, so kann man den Zustand der beginnenden Hautbildung erkennen, Abb. 24. Im Diagramm ist der Trocknungsverlauf in einem 48 m langem Schwebetrockner illustriert. Der für die Hautbildung interessante Bereich befindet sich in den hinteren 8 m des Trockners. Die Bahntemperatur steigt in diesem Bereich stark an und strebt der Umlufttemperatur entgegen. Bei den Verläufen der Beladung erkennt man, dass sich diese an der oberen Phasengrenze ab dem Meter 42 kaum noch ändert. Sie verharrt auf einem fast konstant niedrigem Niveau und stellt für den Lösungsmitteltransport eine Behinderung dar. Anhand der Abb. 23 kann man

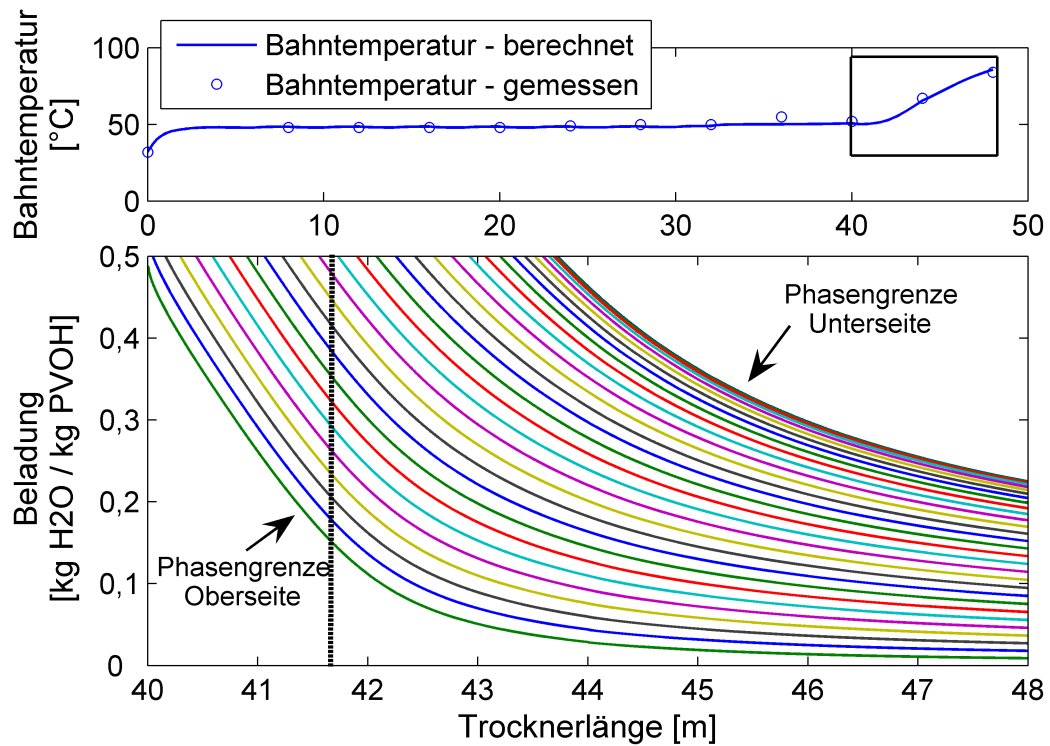


Abbildung 24: Verlauf der Trocknung einer Wasser-PVOH-Lösung

erkennen, dass der Diffusionskoeffizient in diesem Bereich der Beladung weit abgefallen ist. Auch die Erhöhung der Bahntemperatur reicht nicht aus, um den Abfall des Diffusionskoeffizienten auszugleichen. Bei Produkten mit geringen Schichtdicken wird hier der Trocknungsvorgang als abgeschlossen betrachtet.

Bei dickeren Strichen jedoch kann es vorkommen, dass der Trocknungsvorgang vorzeitig beendet wird, wenn zur Steuerung des Trocknungsprozesses ausschließlich die Bahntemperatur herangezogen wird. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, dass aufgrund des hohen Diffusionswiderstandes im Inneren des Striches noch zu viel Lösungsmittel zurück bleibt. Wird das Produkt aufgerollt und so gelagert, werden sich die Konzentrationsgradienten mit der Zeit ausgleichen und die Oberflächenstruktur unerwünscht beeinflussen.

7 KONVEKTION UND SPANNUNGEN

Der 4. Trocknungsabschnitt ist durch das Absinken der Phasengrenze flüssig-gas in den Strich gekennzeichnet. Das verdunstende Wasser muss in diesem Abschnitt der Trocknung durch den schon getrockneten Strich bevor es mit dem Luftstrom des Trocknungsgases abgeführt wird. Dem Verdunstungsstrom entgegen diffundiert Luft in das System hinein. Der konvektive Stofftransport bewirkt einen Druckgradienten in der trockenen Matrix, der die Strukturbildung beeinflussen kann.

7.1 Modellierung des Verdunstungsmassenstromes

Die Berechnung des Verdunstungsmassenstroms kann in diesem Abschnitt nicht mehr durch die Gl. (4.37) erfasst werden. Dem Transport des Lösemittels von der Phasengrenze flüssig-gas wirkt ein zusätzlicher Transportwiderstand in der porösen Strichschicht entgegen, sodass sich für die Stoffstromdichte ergibt:

$$\dot{m}_v = \frac{P \tilde{M}_v}{\tilde{R} T_m} \frac{D_P}{s_{dry}} \ln \left(\frac{P - p_{v,s}}{P - p_{v,I}} \right) \quad (7.1)$$

Der Term D_P/s_{dry} , mit s_{dry} als der Schichtdicke des getrockneten Striches und D_P als den Porentransportkoeffizient, beachtet diesen Widerstand. Bei der Ermittlung von D_P muss zwischen dem molaren Transport und dem Knudsentransport unterschieden werden. Das treibende Partialdruckgefälle ergibt sich aus dem Dampfdruck von der Phasengrenze zum Partialdruck an der Strichoberfläche.

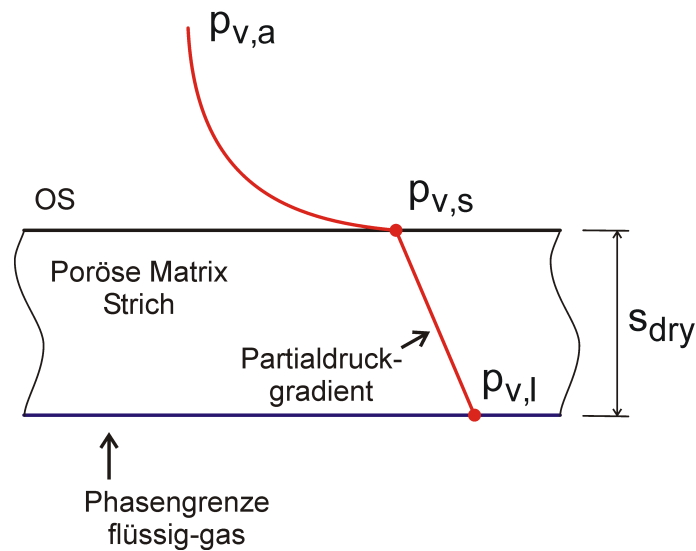


Abbildung 25: Stofftransport im 4. Trocknungsabschnitt

Von der Strichoberfläche aus kann der Verdunstungsstrom wieder mit Gl. (4.37) beschrieben werden. Zur Berechnung des Verdunstungsstroms ist somit die Kombination der Gl. (4.37) und Gl. (7.2) erforderlich. Der Dampfdruck an der Strichoberfläche ist unbekannt und wird in diesem Schritt eliminiert.

$$\dot{m}_v = \frac{P\tilde{M}_v}{\tilde{R}T_m} \frac{1}{\beta} \cdot \frac{D_P}{s_{dry}} \ln \left(\frac{P - p_{v,a}}{P - p_{v,I}} \right) \quad (7.2)$$

Liegt ein molarer Transport vor, kann mit dem Diffusionskoeffizienten von Dampf-Luft gerechnet werden. Der Porentransportkoeffizient wird mit der Diffusionswiderstandszahl μ erfasst. Die Diffusionswiderstandszahl setzt sich aus der Porosität ε und der Tortosität τ zusammen,

$$\mu = \frac{\tau}{\varepsilon}, \quad (7.3)$$

wobei τ die Wegzunahme durch die Verzweigungen des Systems und ε die Porosität beschreibt.

Der Knudsentransport tritt ein, wenn die freie Weglänge der Moleküle größer als die Kapillaren des porösen Systems ist. Der Widerstand für diesen Fall ist in der Regel größer als beim molaren Transport. Der Porentransportkoeffizient im Knudsen-Bereich berechnet sich aus

$$D_P = \frac{d_p}{3} \sqrt{\frac{8 \cdot \mathcal{R} \cdot T}{\pi \cdot \tilde{M}_v}}. \quad (7.4)$$

Zur Unterscheidung zwischen den beiden Transportmechanismen dient die Knudsenzahl Kn . Sie ist definiert als der Quotient der mittleren freien Weglänge der Moleküle und der charakteristischen Länge des durchquerten Mediums,

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{k_B \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot P \cdot L}. \quad (7.5)$$

Die mittlere freie Weglänge von Wassermolekülen bei 10^5 Pa beträgt 42 nm . Mittels Quecksilberporosemitrie wurden die Porenvolumenverteilungen einiger Striche bestimmt. Für den untersuchten Strich zeigt sich ein mittlerer Porendurchmesser von 30 nm , Abb. 26. Mit diesen Werten ergibt sich eine Knudsenzahl von 1,4. Der Knudsentransport wird folglich der dominierende Transportmechanismus sein. Für den Transportkoeffizienten gilt Gl. (7.4) aus der sich bei einer Temperatur von 50 °C ein Porentransportkoeffizient von $6,15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ergibt.

In einem Vergleich zwischen einer Simulation mit und ohne Knudsentransport ist der Effekt der porösen Strichschicht zu erkennen, Abb. 27. Im betrachteten Fall ist die Trocknung des Striches unter konstanten Bedingungen gerechnet worden. Das Absinken der Phasengrenze setzt bei dem untersuchten Strich ab 60 % Feststoffkonzentration ein.

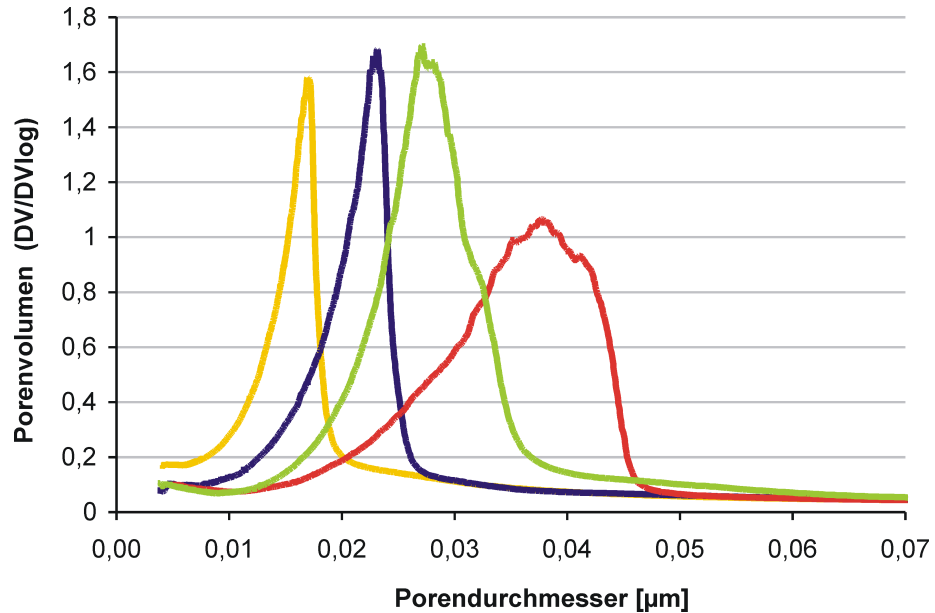


Abbildung 26: Porenvolumenverteilung unterschiedlicher Striche

7.2 Modellierung der konvektiv induzierten Spannung

7.2.1 Konvektionsstrom

Die Transportvorgänge in der porösen Schicht sind in Abb. 28 illustriert. Der Stoffstrom \dot{n}_j vom Wasser setzt sich aus einem diffusiven und einem konvektiven Anteil zusammen.

$$\dot{n}_j = J_j + y_j \dot{n}, \quad (7.6)$$

J stellt den diffusiven Teil, das Produkt aus y_j und dem Stoffstrom \dot{n} den konvektiven Teil darstellt.

Der Gesamtstrom der Luft (Komponente k) setzt sich, wie der des Wassers, aus Diffusions- und Konvektionsanteilen zusammen. Nimmt man die Phasengrenze als undurchlässig für die Luft, gilt

$$\dot{n}_k = J_k + y_k \dot{n} = 0. \quad (7.7)$$

Unter der Annahme einer langsamen Bewegung der Phasengrenze kann Gl. (7.7) in der gesamten Schicht als gültig betrachtet werden, sodass sich im Diffusionsraum die beiden

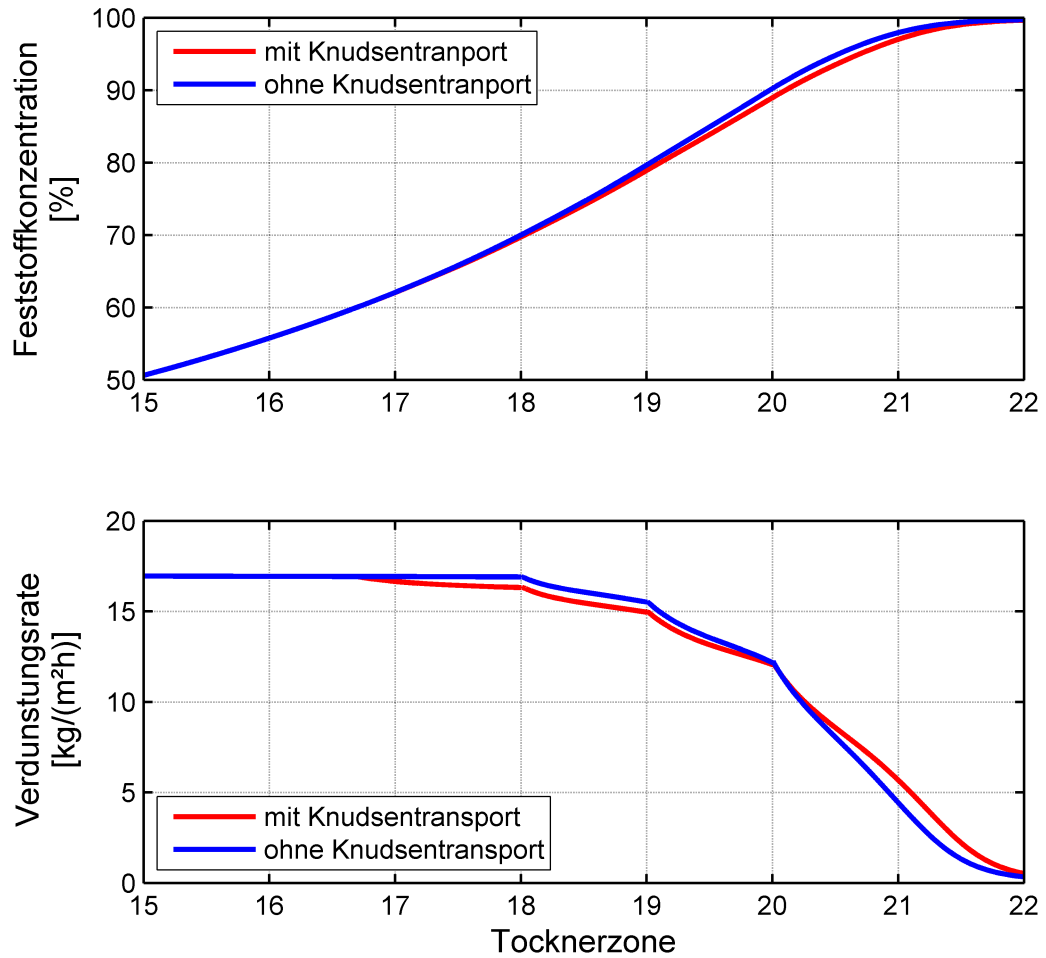


Abbildung 27: Knudsendiffusion mit - ohne

Teilströme gegenseitig aufheben. Der konvektive Teil muss daher vom Betrag genau so groß wie der diffusive Teil sein,

$$\dot{n}_{k,konv.} = -J_k. \quad (7.8)$$

Der Konvektionsstrom der Komponente k kann durch das Produkt aus der mittleren Geschwindigkeit des Systems und ihrer Partialkonzentration beschrieben werden,

$$w_* c_k = \dot{n}_{k,konv.}. \quad (7.9)$$

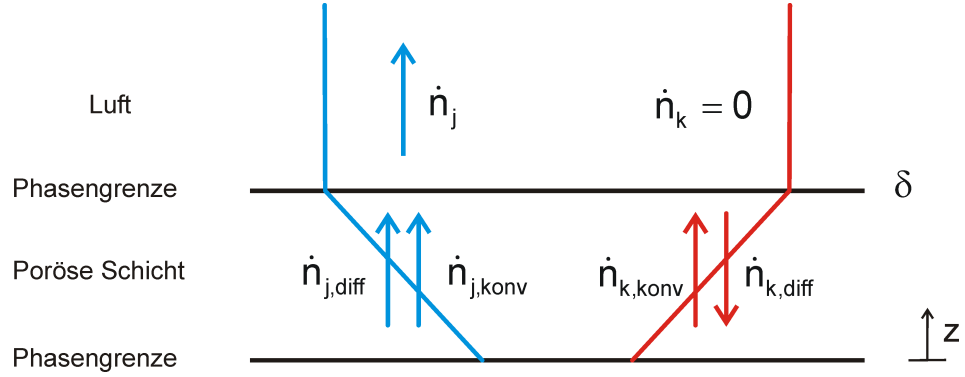


Abbildung 28: Vorgänge in der Diffusionsschicht

Aus Gln. (7.6) - (7.9) folgt:

$$w_* = -\frac{D_{j,k}}{(1-y_j)} \frac{dy_j}{dz}, \quad (7.10)$$

woraus sich durch Integration ergibt:

$$w_* = \dot{n}_j \frac{1}{c} \frac{1-y_{jI}}{1-y_j} \exp\left(\frac{\dot{n}_j}{cD_{jk}} z\right) = \frac{\dot{n}_j}{c}, \quad (7.11)$$

oder

$$w_* = \frac{\dot{n}_{k,konv.}}{c_k} = -\frac{J_k}{c_k} = \frac{y_k \dot{n}}{c_k} = \frac{y_k \dot{n}}{y_k c} = \frac{\dot{n}}{c} = \frac{\dot{n}_j}{c}. \quad (7.12)$$

Der gesamte konvektive Stoffstrom beträgt:

$$\dot{n}_{konv} = \frac{\dot{n}_j}{c} (c_k + c_j) = \dot{n}_j \quad (7.13)$$

7.2.2 Modellierung des Druckwiderstandes

Die Beschreibung des Transportwiderstands in einer porösen Schicht kann mit Hilfe von Darcy's Gesetz vorgenommen werden, der Volumenstrom in der Schicht ist dem Druckgradienten proportional,

$$\dot{V} = \frac{kA}{\eta_L} \left(-\frac{dp}{dx}\right). \quad (7.14)$$

Hierin stellt k die Permeabilität, A den Strömungsquerschnitt und η_L die dynamische Viskosität des Gases dar; dp/dx ist der Druckgradient.

Gl. (7.14) stellt die Definitionsgleichung für die Permeabilität k dar und wird zur Bestimmung dieser Größe herangezogen.

7.2.3 Ermittlung der Permeabilität

Die Permeabilität des getrockneten Striches kann über Volumenstrommessungen bei einem definierten Differenzdruck in Strömungsrichtung ermittelt werden. Die Empfindlichkeit der Farbempfangsschichten erfordert im Experiment einen Träger, der im vorliegenden Fall in Form von perforierten Kunststofffolien mit Dicken zwischen $60 \mu m$ und $80 \mu m$ realisiert wurde.¹ Um den Einfluss der Folie auf die Messergebnisse zu quantifizieren wurden zwei Folientypen mit unterschiedlichen Dicken, Flächenporositäten und Porendurchmessern verwendet, Tab. 4.

Tabelle 4: Folienparameter

Typ	Porendurchmesser μm	Porendichte cm^{-2}	Dicke μm	Porosität %
A401	4.3	$1.2 \cdot 10^6$	74	18
A419	8.4	$5.6 \cdot 10^5$	64	31

Die Beschichtung der Folien erfolgte an einer Pilotanlage als Durchschussmuster, die perforierten Folien werden auf einer zu beschichtenden Papierbahn aufgeklebt und durchlaufen anschließend den Produktionsprozess. Gegenüber den Labormustern hat diese Art der Beschichtung den Vorteil, dass sehr gleichmäßige Verteilung des Striches gewährleistet ist. Die Pigmentpartikel in der Suspension haben einen Durchmesser von ca. $100 nm$. Die Porendurchmesser der Folie hingegen sind sehr viel größer. Die Kapillarkräfte bewirken ein Eindringen der Suspension in die Poren. Um nun eine konstante Bezugsporeabilität zu erhalten, muss die Folie mit einer Grundsicht versehen werden, bevor sie vermessen wird. Die so ermittelte Permeabilität kann als Referenzpermeabilität betrachtet werden. Durch weitere Messungen mit verschiedenen Schichtdicken kann die Strichpermeabilität bestimmt werden. In Abb. 29 sind beschichtete Folien für die Ermittlung der Permeabilität illustriert.

¹Die Folien wurden von der SDK-Technik, Quedlinburg, freundlicherweise bereitgestellt.

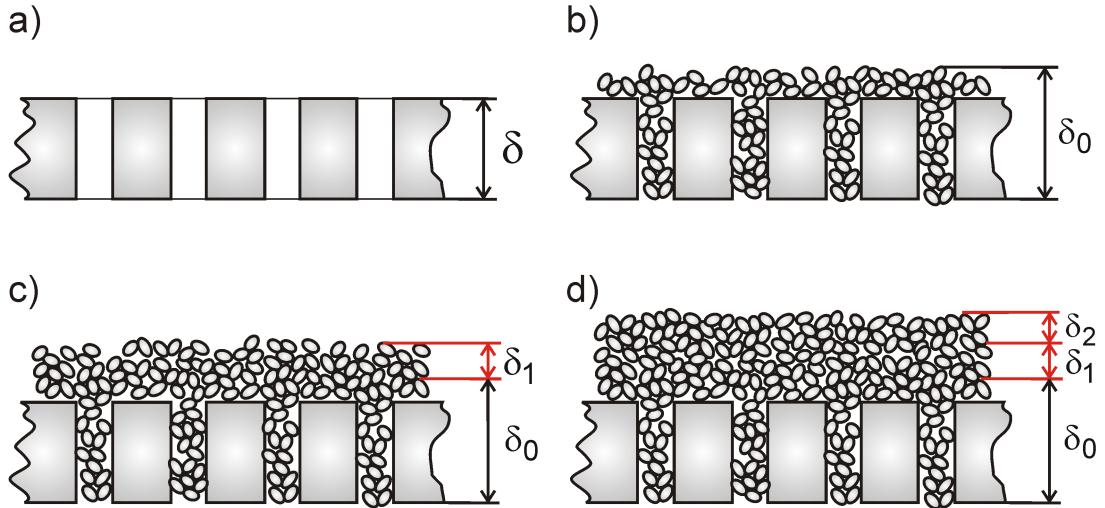


Abbildung 29: Illustration der bestrichenen Folien: a - perforierte Folie, b - bestrichene Basisfolie für die Messung, c - Probe für den ersten Messwert im Strich, d - Probe für den zweiten Messwert im Strich

Bei der Ermittlung der Permeabilität wird eine Serienschaltung der Transportwiderstände angenommen, Abb. 30. Als Grundgleichung wird wie oben beschrieben das Gesetz von Darcy herangezogen,

$$\dot{V} = \frac{kA}{\eta_L} \left(-\frac{dp}{dx} \right), \quad (7.15)$$

woraus sich für die Bulkpermeabilität,

$$k = \frac{\dot{V}\eta_L}{A} \cdot \frac{x_2 - x_0}{p_0 - p_2}, \quad (7.16)$$

ergibt. Für den Volumenstrom in der $x_0 - x_1$ dicken Schicht gilt nach Darcy:

$$\dot{V} = \frac{k_1 A}{\eta_L} \left(-\frac{dp}{dx} \right)_1 \quad (7.17)$$

Analog lässt sich die Gleichung für den zweiten Bereich x_1 bis x_2 schreiben:

$$\dot{V} = \frac{k_2 A}{\eta_L} \left(-\frac{dp}{dx} \right)_2 \quad (7.18)$$

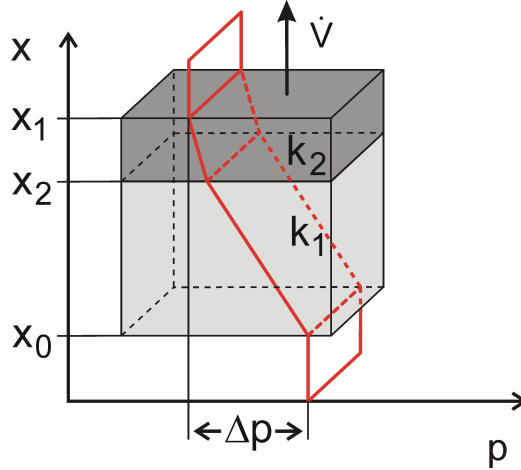


Abbildung 30: Druckverlauf in der Meßprobe

Durch Kopplung der Gleichungen (7.17) und (7.18) und Integration erhält man:

$$p_0 - p_2 = \frac{\dot{V}\eta_L}{A} \left(\frac{x_1 - x_0}{k_1} + \frac{x_2 - x_1}{k_2} \right) \quad (7.19)$$

woraus mit $\Delta p = p_0 - p_2$ die Permeabilität k_2 des Striches folgt.

$$k_2 = \frac{x_2 - x_1}{\left(\frac{\Delta p A}{\dot{V}\eta_L} - \frac{x_1 - x_0}{k_1} \right)} \quad (7.20)$$

Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Unter k_1 ist die Referenzpermeabilität der mit 25 g/m^2 beschichteten Folie zu verstehen; $x_1 - x_2$ stellen die Dicke des zusätzlichen Strichauftrags, $x_1 - x_0$ die Dicke der bestrichenen Folie (Substrat) dar. A ist die durchströmte Fläche, \dot{V} der Volumenstrom beim Druck Δp und η_L die dynamische Viskosität der Luft.

Die Experimente wurden mit Luft ausgeführt, einige Details hierzu können Tabelle 5 entnommen werden. Wie die Experimente zeigen ist die Permeabilität des Striches unabhängig von seiner Dicke ($\Delta x = x_2 - x_1$) und vom Folientyp. Die Abweichungen sind auf die Messunsicherheit zurückzuführen.

Tabelle 5: Randbedingungen Permeabilitätsmessung

Messfläche A	10	cm^2
dynamische Viskosität Luft η_L	18,24	$10^{-6} Pa s$
Druckdifferenz Δp	1,47	kPa

Tabelle 6: Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen

Folie	spez. Masse	Volumen-	Strich-	Permeabilität	
	Strich	strom	dicke	Bulk	Strich
	g/m^2	\dot{V} ml/min	Δx μm	k m^2	k_2 m^2
A401	25	25,2	86	$4.48 \cdot 10^{-16}$	—
	35	21,02	96	$4.17 \cdot 10^{-16}$	$2.62 \cdot 10^{-16}$
	45	17,92	106	$3.93 \cdot 10^{-16}$	$2.57 \cdot 10^{-16}$
A419	25	49,8	69	$7.11 \cdot 10^{-16}$	—
	35	35,65	79	$5.82 \cdot 10^{-16}$	$2.59 \cdot 10^{-16}$

7.3 Ergebnisse und Diskussion

In einem Vergleich wurde der Einfluss der Poren auf den Verdunstungsmassenstrom verdeutlicht. An einem Beispiel sollen nun die durch den Verdunstungsmassenstrom entstehenden Spannungen betrachtet werden. Hierzu wurde ein Prozess aus der Produktion simuliert, Abb. 31. Das simulierte Produkt hat im trockenen Zustand eine spezifische Strichmasse von $39 g/m^2$. Die Länge des simulierten Trockners beträgt 48 m.

Im oberen Diagramm der Simulationsergebnisse ist der Verdunstungsmassenstrom, im unteren Diagramm der Verlauf der konvektiv induzierten Spannung über die Trocknerlänge illustriert. Der Bereich in dem sich die konvektiven Spannungen ausbilden, befindet sich im hinteren Abschnitt des Trocknungsprozesses. Der Verdunstungsmassenstrom in den vorderen Trocknungsabschnitten hat somit keinen Einfluss auf die konvektiv induzierten Spannungen. Wie schon in dem Vergleich zum Einfluss der Porenstruktur auf die Verdunstungsgeschwindigkeit gezeigt wurde, hat das Ansteigen des konvektiven Widerstandes in diesem Prozess kaum einen Einfluss auf die Verdunstungsrate. Der Anstieg der konvektiven Spannung ist somit nahezu linear, was bei konstanter Verdun-

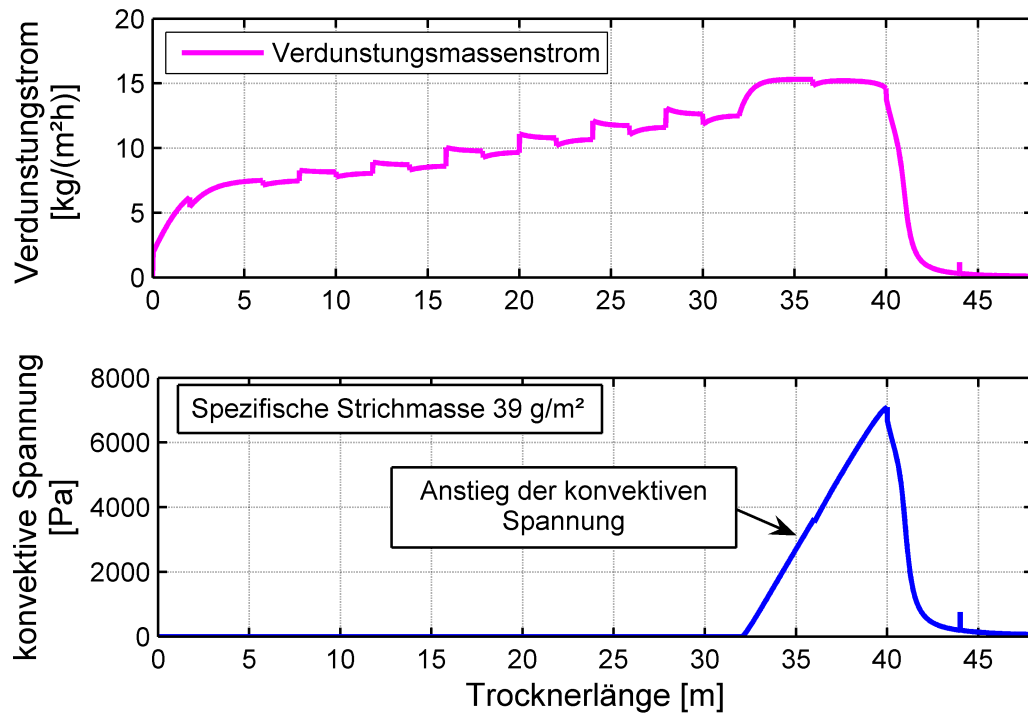


Abbildung 31: Konvektive Spannung im Trocknungsprozess

stungsgeschwindigkeit durch die lineare Verlängerung des zu durchströmenden Bereiches zu erklären ist. Die maximalen Spannungen treten kurz vor dem Abfallen des Verdunstungsmassenstroms auf und erreichen in diesem Prozess einen Wert von 7000 Pa. Die konvektiv induzierten Spannungen hängen von der

- Permeabilität des Striches,
- Strichdicke und
- vom Verdunstungsstrom

ab.

Sie entstehen nahezu gleichzeitig mit der Ausbildung der Festigkeit des Striches. Dadurch bewirken die konvektiven Spannungen bleibende Veränderungen in der Porenstruktur des mikroporösen Systems. Bezüglich der Ausbildung von Qualitätsdefekten

ist ihr Einfluss eher gering im Vergleich zu den im nächsten Kapitel behandelten Schubspannungen.

8 TROCKNUNGSINDUZIERTE SPANNUNGEN IM STRICH

In Abhängigkeit der Trocknungskinetik werden im Produkt unterschiedliche Fehler in Form von Cracks und Rissen beobachtet, Abb. 32. Diese treten in verschiedenen Formen auf. Sie werden unterteilt in micro und makro Cracks. Mikro Cracks sind mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen und treten gleichmäßig über die Fläche verteilt auf. Makro Cracks können vereinzelt oder flächig auftreten. Je nach Produktanforderung sind Grenzwerte für die Anzahl Fehler vorgeschrieben. Bisherige Erfahrungen zeigen, dass eine sanftere Trocknung weniger Cracking zur Folge hat und vice versa. Cracking, als eine Folge von Spannungen im Strich, kann durch die Trocknung beeinflusst werden. Die Modellbildung und Untersuchung dieses Zusammenhangs stellen den Kern dieses Kapitels dar.

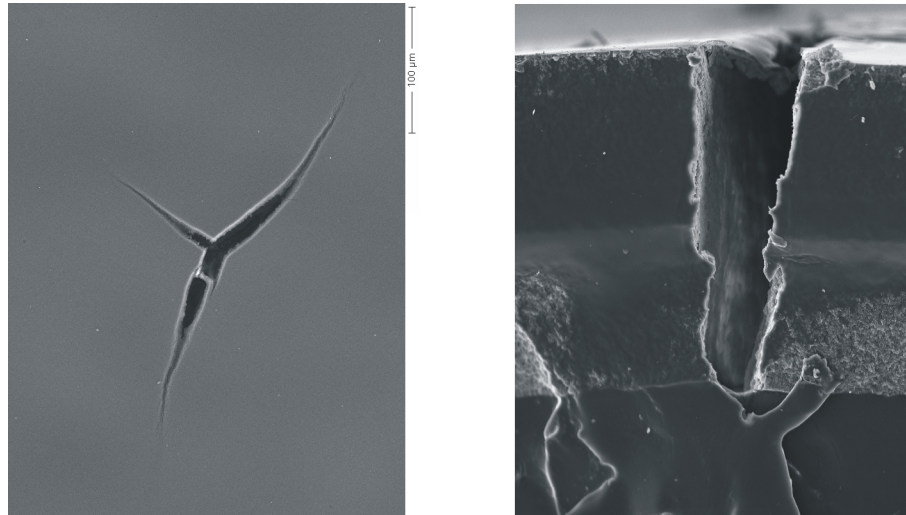


Abbildung 32: Illustration eines Cracks

8.1 Spannungen im Strich

Zunächst soll die Frage nach dem Mechanismus des Spannungsaufbaus erörtert werden. Damit sich Spannungen aufbauen können, muss der Strich elastische Eigenschaften besitzen. Beim Gießen ist dies aufgrund des hohen Lösungsmittelgehalts nicht gegeben. Mit fortschreitender Trocknung schwindet das Lösungsmittel und der Strich geht von einem viskosen Fluid über in ein visko-elastisches Gel, bis er am Ende der Trocknung zu einem Festkörper wird. Der Übergang ist von der Zeit und von der lokalen Position im Strich abhängig. Der Strich beginnt zuerst an der Oberseite, die sich direkt mit dem Trocknungsgas in Wechselwirkung befindet, Festigkeitseigenschaften zu entwickeln. Mit der Trocknung schreitet die Zone mit Spannungen weiter ins Produkt vor. Der E-Modul ist zur Charakterisierung der Spannungen nicht hinreichend. Die Auslenkung des Striches ist die zweite Bedingung. Diese ist durch den Feuchtegradient über die Strichdicke bestimmt. Wird der Feuchtegradient größer, so steigt die Spannung, Abb. 33.

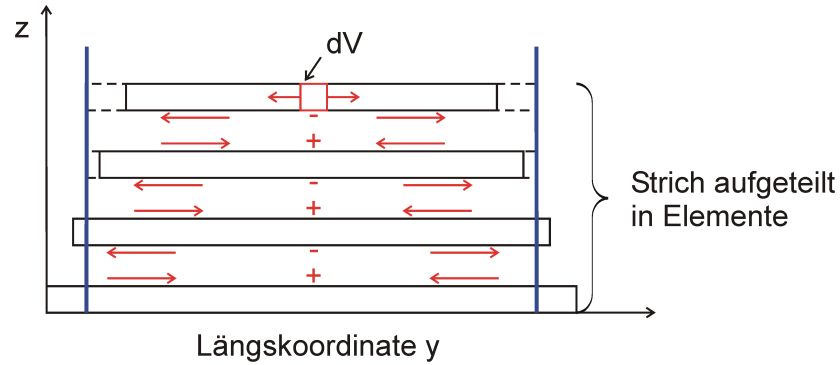


Abbildung 33: Spannungsaufbau

8.2 Modellierung trocknungsinduzierter Spannungen

Normalspannungen können im elastischem Bereich aus dem Produkt des E-Moduls und der Dehnung berechnet werden,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (8.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (8.2)$$

Schubspannungen werden aus dem Produkt von Gleitmodul G und dem Auslenkungswinkel γ berechnet,

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (8.3)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}. \quad (8.4)$$

E-Modul und Gleitmodul sind Materialeigenschaften. Der Gleitmodul lässt sich aus dem E-Modul und der Querkontraktionszahl berechnen. Die Querkontraktionszahl beschreibt das Verhältnis von Quer- zur Längsänderung und stellt somit den Gleitwinkel der Scherschicht dar. In vielen Fällen ist der E-Modul konstant und die Spannung hängt nur von der Auslenkung ab. Bei Strichtrocknung hingegen verändert sich der E-Modul in Abhängigkeit des Trocknungsfortschritts und ist über die Strichdicke verschieden. Er ist eine Funktion der Temperatur und der Feuchte des Produktes.

8.3 Ermittlung der Elastizitätseigenschaften

8.3.1 Der E-Modul

Die Materialeigenschaften des Striches als Funktion der Temperatur und des Feuchtegehaltes haben eine Schlüsselrolle bei der Berechnung der trocknungsinduzierten Spannungen. Zur Ermittlung der Eigenschaften wird der Strich auf definierte Zustände gebracht. Die Konditionierung des Striches kann in einer Klimakammer vorgenommen werden. Die hier herrschende Lufttemperatur wird von der Probe angenommen und über den Feuchtegehalt in der Luft wird sich über das sorptive Gleichgewicht ein konstanter Feuchtegehalt in der Strichschicht einstellen.

Die Stabilität und Schichtdicke der zu messenden Proben erfordert eine besondere experimentelle Sorgfalt. Aufgrund der Instabilität des Striches kann dieser nicht ohne Träger hergestellt werden. Es muss folglich eine Messmethode entwickelt werden, bei der der Einfluss des Trägers quantifiziert und genaue Messwerte erzielt werden können. Die hier gewählte Methode beruht auf Biegesteifigkeitsmessungen, da der Strich aufgrund seines hohen Flächenmomentes sehr empfindlich auf Belastungen antwortet.

8.3.2 Bestimmung der Biegesteifigkeit

Die Bestimmung des E-Moduls aus der Biegesteifigkeit wird anhand von zwei Messungen vorgenommen. In der einen Messung wird das Substrat ohne den Strich untersucht, Abb. 34.



Abbildung 34: Biegeversuch an einem homogenen Träger

Aus dieser Messung lässt sich nach der Gleichung für die Biegelinie eines homogenen Stabes der E-Modul des Substrates bestimmen,

$$E = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot f \cdot I}, \quad (8.5)$$

worin F die zur Auslenkung benötigte Kraft, L die Probenlänge, f den Auslenkungsweg und I das Flächenmoment 2. Ordnung darstellt. Eine weitere Biegesteifigkeitsmessung am bestrichenen Substrat ermöglicht die Ermittlung des E-Moduls des Striches, Abb. 35. Für die Phasengrenze zwischen Substrat und Strich ist ideale Haftung als Randbedingung angenommen worden.



Abbildung 35: Biegeversuch an einem heterogenen Träger

Mit den Messwerten des Composites aus Substrat und Strich lässt sich nach Gl. (8.5) der E-Modul für das Composite ermitteln. Die Kraft F bei der Auslenkung f , setzt sich in diesem Fall aus der Kraft F_1 , die das Substrat aufnimmt, und der Kraft F_2 , die der Strich aufnimmt, zusammen,

$$F = F_1 + F_2. \quad (8.6)$$

Unter der Berücksichtigung der Entfernung vom Flächenschwerpunkt bei der Berechnung des Flächenmomentes, lässt sich der E-Modul E_1 des Striches berechnen:

$$E_1 = \frac{E_g \cdot I_g - E_2 \cdot I_2}{I_1} \quad (8.7)$$

Mit den Indizes: 1 - Strich, 2 - Substrat und g - Gesamtprodukt

$$I_{1,2} = \frac{b \cdot h_{1,2}^3}{12} + b \cdot h_{1,2} \cdot e_{1,2}^2 \quad (8.8)$$

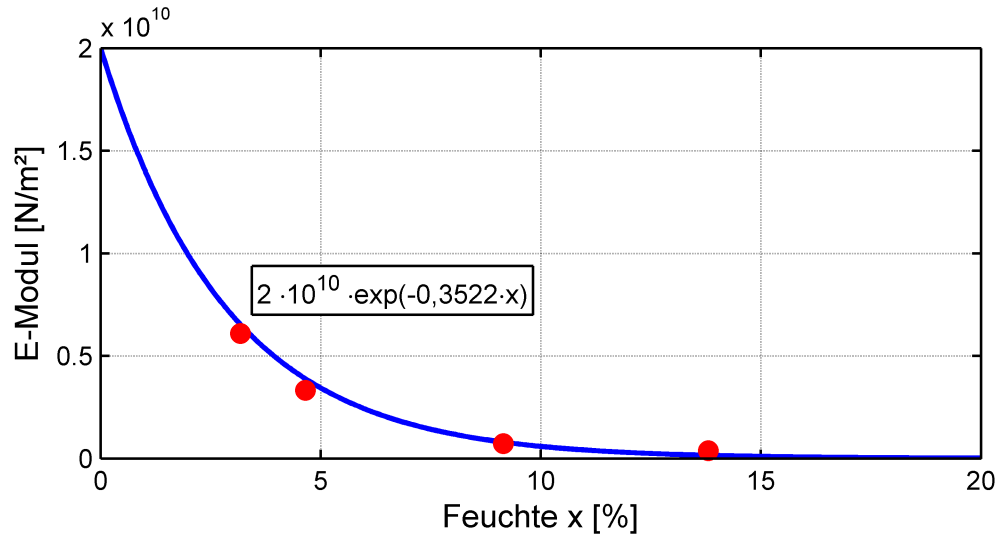


Abbildung 36: Experimentelle Werte des E-Moduls

In der Abb. 36 sind beispielhaft Messwerte für den E-Modul über den Strichfeuchtegehalt aufgetragen. Erwartungsgemäß nimmt dieser mit zunehmendem Feuchtegehalt ab.

Im hinteren Teil des Trocknungsprozesses wird die sogenannte Glastemperatur unterschritten, sodass die Temperaturabhängigkeit des E-Moduls vernachlässigt werden kann.

In Abb. 37 ist ein herkömmliches Spannungs-Dehnungs Diagramm illustriert. Der kritische Spannungszustand σ_{max} , den der Strich ohne zu Cracken verträgt, kann mit diesen Messdaten und einem in dem Trocknungssimulationsmodell integrierten Spannungsmodell für die Produktion ermittelt werden.

8.4 Implementierung der Gleichungen in das Trocknungsmodell

Der E-Modul und die Auslenkung über die Strichdicke beschreiben die Spannung. Unterschiedliche Feuchtekonzentrationen bewirken unterschiedliche Volumen des Striches. Die Berechnung der Schubspannung ist somit unter Vernachlässigung von Randeffekten eindimensional und veränderlich in der Zeit, mit Fortschritt der Trocknung. Differentiell

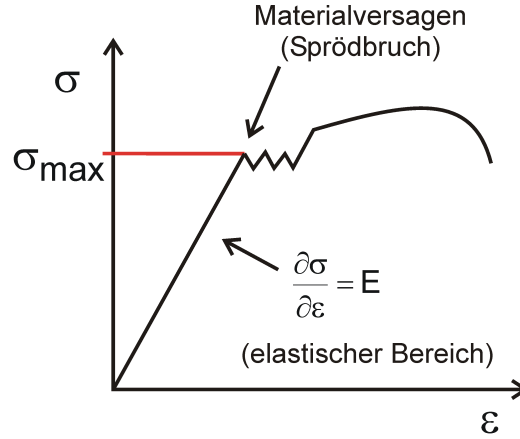


Abbildung 37: Spannungs-Dehnungs Diagramm sprödes Material

betrachten lautet die Gleichung für die Schubspannung

$$\tau(i) = \tau(i-1) + \frac{E_m}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \Delta\gamma \quad (8.9)$$

mit

$$m = \left(\frac{X(i) + X(i-1)}{2} \right) \quad (8.10)$$

und

$$\Delta\gamma = \left(\frac{\delta(i, k-1) - 2 \cdot \delta(i, k) + \delta(i, k+1)}{\delta(i, k)} \right) - \left(\frac{\delta(i-1, k-1) - 2 \cdot \delta(i-1, k) + \delta(i-1, k+1)}{\delta(i-1, k)} \right). \quad (8.11)$$

Die Schubspannung τ zur Zeit i berechnet sich aus der Schubspannung zur Zeit $i-1$ und dem Gleitmodul, der letztere ermittelt aus dem E-Modul als arithmetischem Mittelwert zur Zeit i und $i-1$, multipliziert mit der Veränderung des Auslenkungswinkels $\Delta\gamma$. Diese Gleichung gilt in der Form für jede Ortskoordinate in der Schicht. An der Oberseite des Striches wird $\tau = 0$ gesetzt, an der Unterseite des Striches ist die Dimensionsstabilität des Substrates als Randbedingung eingeführt worden.

Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung von trocknungsinduzierten Spannungen wurden unter anderem von [20] und [44] an Systemen ähnlicher Beschaffenheit vorgenommen.

8.5 Berechnung trocknungsinduzierter Spannungen

In diesem Abschnitt sollen einige Beispiele mit den oben vorgestellten Gleichungen berechnet werden. Hierbei wird die grundsätzliche Abhängigkeit der trocknungsinduzierten Spannung bei den folgenden Prozessparametern untersucht:

Lufttemperatur	100	°C
Luftgeschwindigkeit	31	m/s
Feuchtebeladung Luft	20	g/kg
Spezifische Strichmasse	15	g/m ²
Beladung Strich Start	8,5	kg H ₂ O/kg Strich _{trocken}
Beladung Strich Ende	0,12	kg H ₂ O/kg Strich _{trocken}

Mit diesen Parametern wurde eine Spannungsanalyse durchgeführt. Sie dienen als Vergleichsbasis für weitere Variantenrechnungen. Der differentielle Spannungsverlauf zu diesen Parametern ist in Abb. 38 illustriert.

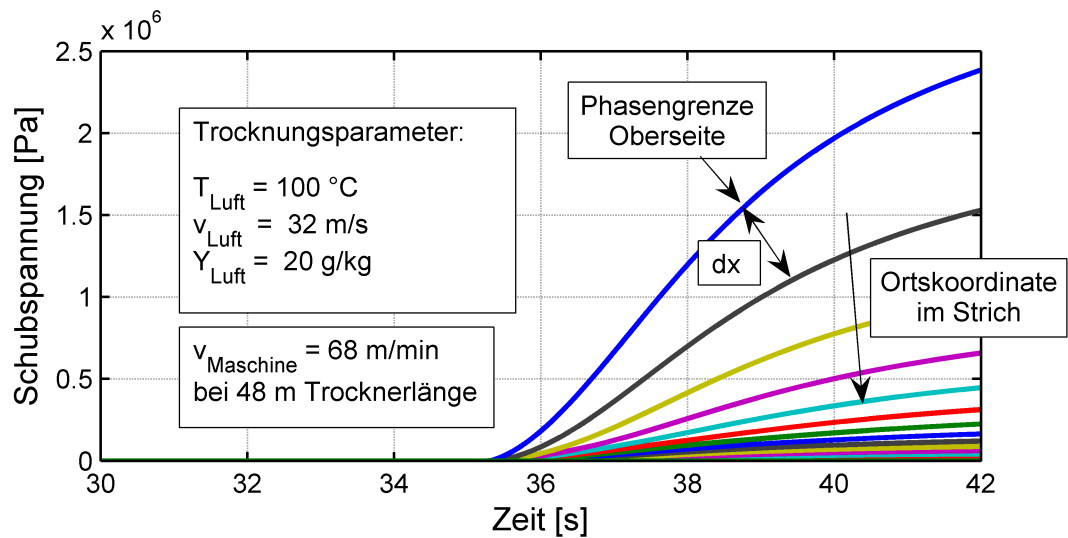


Abbildung 38: Spannungsverlauf im Strich

Es ist ein starker Gradient der Spannungen zu erkennen. Beginnend vom oberen Verlauf stellen die Linien einzelne Schichtelemente im Strich dar. Der obere Verlauf entspricht

der Oberseite des Striches. Wie erwartet beginnt die Ausbildung der Spannungen an der Oberseite des Striches, zu dieser Zeit sind in den unteren Bereichen des Films noch nicht die notwendigen Festigkeitseigenschaften ausgeprägt. Erst bei fortgeschrittener Trocknung bauen sich Spannungen im Filmmitteln auf. In der Abb. 39 ist der integrale Mittelwert des Spannungsverlaufes sowie der Verlauf des Wassergehalts der Schicht aufgetragen.

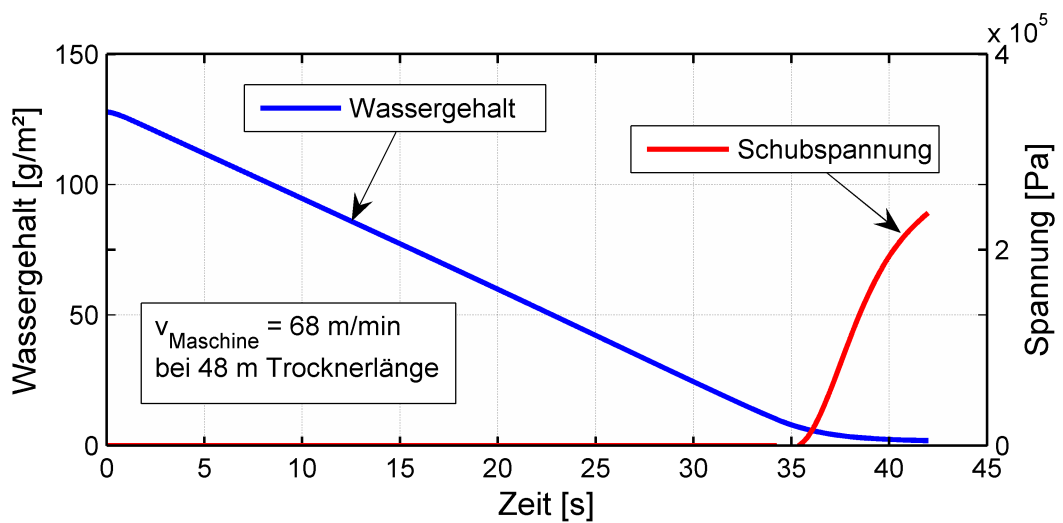


Abbildung 39: Integraler Mittelwert der Spannung

In dieser Betrachtung wird der schon in Abb. 38 deutlich gewordene Spannungsanstieg wiederholt dargestellt. Erst wenn nahezu kein Wasser mehr in der Schicht vorhanden ist, beginnt sich ein Spannungszustand auszubilden. Die Spannungen liegen im illustrierten Beispiel im Bereich von $0,3 \text{ MPa}$. Die Schicht wurde im dargestellten Fall bis auf eine Restfeuchte von 11 % getrocknet.

Bei dieser Betrachtungsweise wird zwar der Maximalwert der Spannungen nicht ersichtlich. Sie wird aber im Folgenden zur Untersuchung der auf die Spannungen wirkenden Parameter herangezogen.

8.5.1 Auswirkung der Trocknungsprozessparameter

Einfluss der Luftfeuchte Die Auswirkung der Luftfeuchte auf den Spannungszustand ist in der Abb. 40 für die oben gewählten Prozessparameter dargestellt. Die Luftfeuchte wurde in einem Bereich von 10 g/kg bis 50 g/kg variiert.

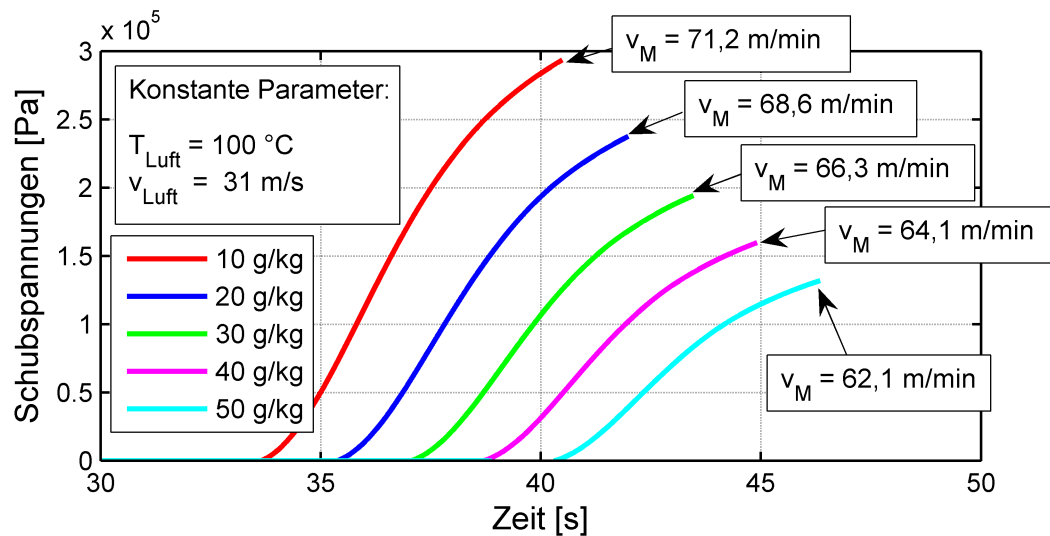


Abbildung 40: Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen Feuchtebelastungen der Trocknungsluft

Mit steigender Luftfeuchte sinkt die resultierende Spannung in der Schicht. Dieser Zusammenhang stimmt mit den experimentellen Untersuchungen von [20] überein. Im angeführten Beispiel konnte die Spannung im System um den Faktor 2 mit der Luftfeuchte verändert werden, was je nach Prozess einen erheblichen Einfluss auf die Ausbildung von Cracks während der Trocknung haben kann.

Einfluss der Lufttemperatur Analog zu den Varianten der Luftfeuchte wird in diesem Abschnitt der Einfluss der Lufttemperatur auf den Spannungszustand im Strich veranschaulicht. Wie Abb. 41 entnommen werden kann, wirkt sich die Lufttemperatur erheblich auf die Schubspannung aus. Dabei entspricht einer niedrigeren Temperatur ein kleinere Schubspannung.

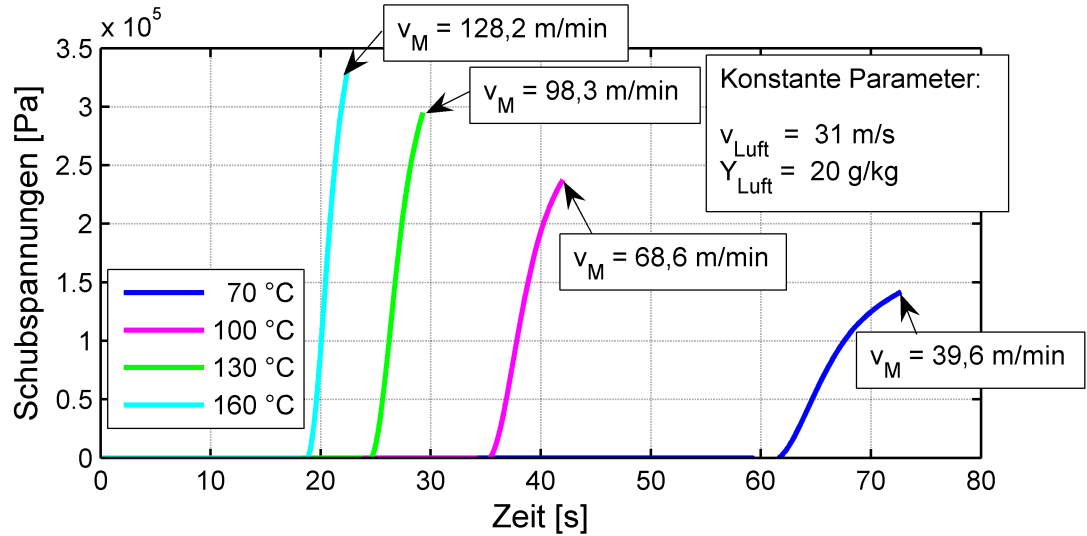


Abbildung 41: Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen Lufttemperaturen

Einfluss der Luftgeschwindigkeit Die Luftgeschwindigkeit wirkt sich auf die Spannung ähnlich der Temperatur, Abb. 42. Ursächlich hierfür ist in erster Linie der Stofftransport, der bei einer größeren Lufttemperatur intensiver stattfindet und zu stärkeren Spannungen führt.

8.5.2 Optimierung der Trocknungsgeschwindigkeit

In Abb. 40 bis Abb. 42 stieg mit der Trocknungsgeschwindigkeit die Spannung im System. In diesem Zusammenhang ist es interessant zu klären, ob die Trocknungsgeschwindigkeit erhöht werden kann, ohne das Spannungsniveau in der trocknenden Schicht zu beeinflussen. Zu diesem Zweck wurden weitere Untersuchungen zur Spannung gemacht.

In der Abb. 43 ist der Spannungsverlauf von zwei dieser Varianten illustriert. Es wurden hohe Trocknungslufttemperaturen sowie Luftgeschwindigkeiten verwendet. Diese zeigten in den vorhergehenden Untersuchungen das größte Geschwindigkeitspotential auf. Die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit zeigte in den Versuchen im Verhältnis einen geringen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit, ermöglicht jedoch eine Minimierung der Spannung. Auf diesem Weg konnten Trocknungszeiten von 26 s erreicht werden,

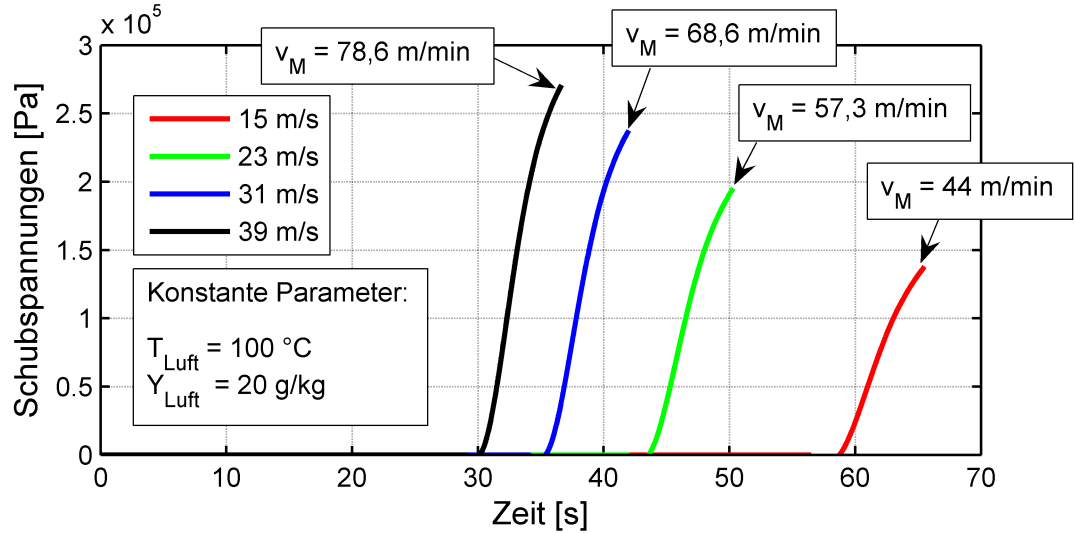


Abbildung 42: Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten

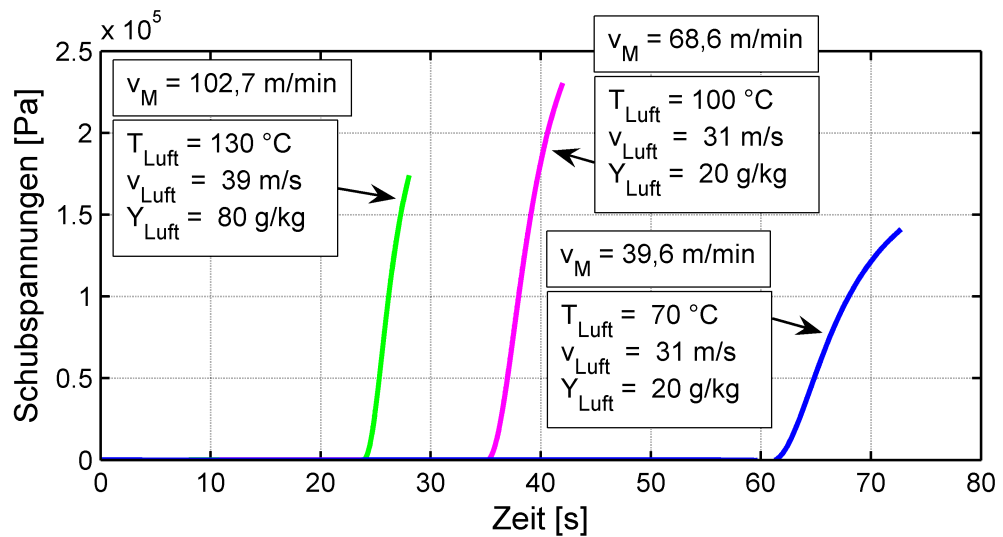


Abbildung 43: Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen

wohingegen der Mittelwert der Spannungen auf einem Niveau von $0,18 \text{ MPa}$ gehalten werden konnte. Der Einfluss der Trocknungsbedingungen auf die Spannung ist nicht nur bezüglich der Geschwindigkeitssteigerungen interessant.

8.5.3 Einfluss der Strichdicke

Einen weiteren Einfluss auf die Spannung im Strich stellt das Auftragsgewicht dar. Erfahrungswerte aus der Praxis zeigen, dass mit geringerem Strichauftrag das Fehlerniveau abnimmt. In Abb. 44 sind die Spannungsverläufe zweier Trocknungskurven aufgezeigt. Die Trocknungsbedingungen sind in beiden Fällen gleich. Sie entsprechen einer Trocknungslufttemperatur von 100 °C , einer Luftgeschwindigkeit von 31 m/s und einer Feuchtebelastung der Trocknungsluft von 20 g/kg . Die Verläufe unterscheiden sich durch die flächenspezifischen Massen des Striches, 10 g/m^2 und 15 g/m^2 .

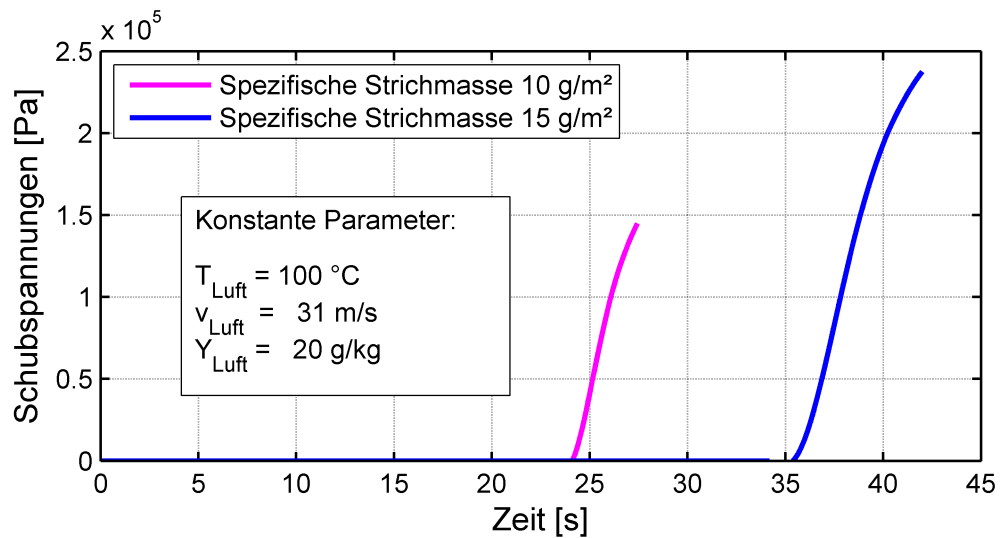


Abbildung 44: Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen spez. Strichauftragsgewichten

Beide Proben wurden, wie auch in den vorhergehenden Untersuchungen, auf einen Restfeuchtegehalt von 11% getrocknet. Die Trocknungszeiten resultieren aus den Strichgewichten, die Suspensionen sind mit dem gleichem Feststoffgehalt aufgetragen worden. Deutlich ist der Unterschied der Spannungen in den beiden Fällen zu erkennen. Die Reduzierung des Auftragsgewichtes um $1/3$ führt zu einer Verminderung der Spannungen um 60% . Die Ergebnisse dieser Rechnung spiegeln die Vorgänge in der Praxis wieder, was einen zusätzlichen Plausibilitätsabgleich darstellt.

8.6 Möglichkeiten zur Reduktion der Spannung

Grundsätzlich lassen sich 2 Wege zur Reduktion der Spannung erkennen. Diese können nach Prozessbedingungen und Materialeigenschaften unterschieden werden. Die Möglichkeiten der Prozessbedingungen wurden in diesem Kapitel ausführlich behandelt. Es konnte gezeigt werden, dass durch geeignete Wahl der Trocknungsbedingungen die Prozessgeschwindigkeit erhöht und die Spannungen im System reduziert werden können.

Die Materialeigenschaften beziehen sich auf das Schrumpfverhalten und den E-Modul des Binders in der Suspension. Vorteilhaft wäre ein Binder, der während der Strukturbildung nur noch geringes Schrumpfen aufweist. Des Weiteren wäre von Vorteil, wenn sich der E-Modul erst bei sehr geringen Feuchtigkeitsgehalten ausbildet. Die maximale Bruchspannung kann durch die Zugabe eines geeigneten Härterers erhöht werden.

9 UNTERSUCHUNGEN AM LABORTROCKNER

Die Untersuchungen am Labortrockner ermöglichen einen detaillierten Einblick in das Trocknungsverhalten der Striche unter stationären Bedingungen. Neben dem Vorteil der visuellen Betrachtung, kann die Gewichtsabnahme während der Trocknung gemessen werden. Ein interessanter Zusammenhang bei der Trocknung ist der Umschlag vom gaseitig zum filmseitig kontrollierten Verdunstungsprozess. Dieser ist durch den Anstieg der Bahntemperatur zu erkennen. Die Messung der Gewichtsabnahme ermöglicht so die Bestimmung der mittleren Konzentration, bei der sich der Wechsel vollzieht.

9.1 Der Labortrockner

Der Trocknungsprozess wird im gaseitig kontrollierten Teil durch die Lufttemperatur, die Geschwindigkeit der Trocknungsluft und dem Lösungsmittelpartialdruck in der Gasphase bestimmt. Diese Größen werden im Labortrockner durch ein Heizgitter zur Erwärmung der Trocknungsluft, durch einen drehzahlgeregelten Ventilator zur Geschwindigkeitsregulierung der Luft und durch eine Lösungsmitteldampfeindüsung sowie eine Ver-

hältnisregelung zwischen der Zu- und Abluft, zur Lösungsmittelpartialdruckkontrolle, geregelt. Turbulenzen in der Luftströmung werden durch einen Gleichrichter egalisiert, was die Genauigkeit der Gewichtsmessung erhöht. Der Probenraum ist mit Sichtfenstern zu den Seiten und nach oben versehen. Dies ermöglicht die visuelle Beurteilung der Probe während des Trocknungsprozesses. Durch das Fenster an der Oberseite besteht die Möglichkeit, Aufnahmen mit einer Videokamera durchzuführen und so die Veränderung der Strichoberfläche zu beobachten.

Ein IR-Thermometer misst die Strichtemperatur während der Versuche. Wie bereits erwähnt wird der Gewichtsverlust mit einer Waage bestimmt. Die Messdaten werden in einem PC mit der Software LabView in digitaler Form gespeichert. In Abb. 45 ist der Probenraum der Laboranlage illustriert.

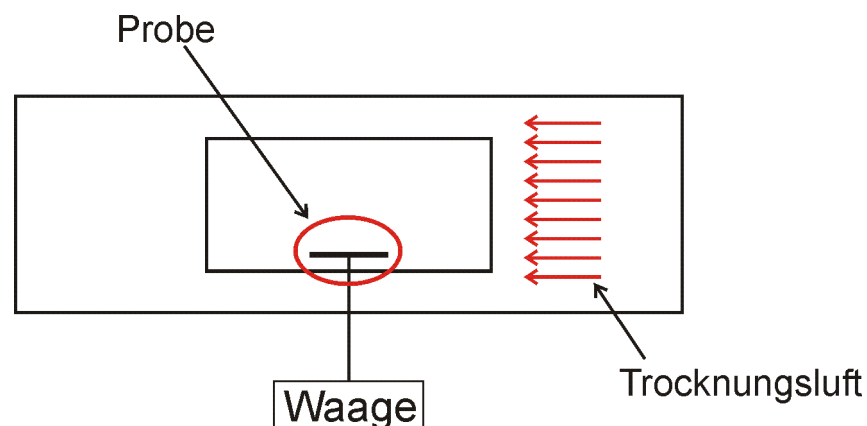


Abbildung 45: Probenraum Labortrockner

Der Betriebsbereich des Labortrockners ist in der Tab. 7 aufgeführt. Die Grenzwerte für die Lufttemperatur und die Luftfeuchte decken den Bereich, der in den Produktionsmaschinen realisiert wird, ab. Die Luftgeschwindigkeit ist kleiner als in der Produktion. Sie ist im Labortrockner zum Einen durch die Genauigkeit der Gewichtsmessung und zum Andern durch das Verblasen des Striches limitiert.

Tabelle 7: Betriebsbereich Labortrockner

	Lufttemperatur °C	Strömungsgeschwindigkeit <i>m/s</i>	Feuchtebeladung Luft <i>g/kg</i>
min.	65,5	1,25	14,6
max.	190	5,0	37

9.2 Experimente

Beispielhaft wird an dieser Stelle der Ablauf und die Auswertung eines Experimentes beschrieben. In diesem Fall wird eine quadratische PET Folie mit einer Kantenlänge von 10 cm als Strichunterlage verwendet. Das flächenspezifische Gewicht der PET Folie beträgt 140 g/m^2 . Im Gegensatz zu einem Papiersubstrat verlieren PET-Folien kein Lösungsmittel im Trocknungsprozess. Der gemessene Gewichtsverlust bezieht sich somit ausschließlich auf den Strich. Der in diesem Versuch verwendete Strich wurde mit einer Beladung von 4,5 kg Wasser je kg Feststoff aufgetragen. Die Trocknungsbedingungen sind in Tab. 8 aufgeführt. Im diesem Versuch sind die minimal möglichen Trocknungsbedingungen der Laboranlage verwendet worden.

Tabelle 8: Versuchsbedingungen

Lufttemperatur °C	Strömungsgeschwindigkeit <i>m/s</i>	Feuchtebeladung Luft <i>g/kg</i>
65,5	1,25	14,6

Nach einer kurzen Aufwärmungsphase verharrt die Temperatur der Probe im thermischen Gleichgewichtszustand, Abb. 46. Nach ca. 320 s erreicht sie nahezu die Lufttemperatur. An diesem Punkt vollzieht sich der Wechsel vom gaseitig zum filmseitig kontrollierten Verdunstungsprozess. Dieser Umschlag geht einher mit einer geringeren Verdunstungsrate, wodurch der abgeführte Enthalpiestrom sinkt und letztendlich zur Erhöhung der Proben temperatur führt.

Visuelle Beobachtungen an der Probe zeigten, dass sich beim Wechsel des begrenzenden Transportmechanismus vereinzelt Cracks gebildet haben. Diese Beobachtungen stüt-

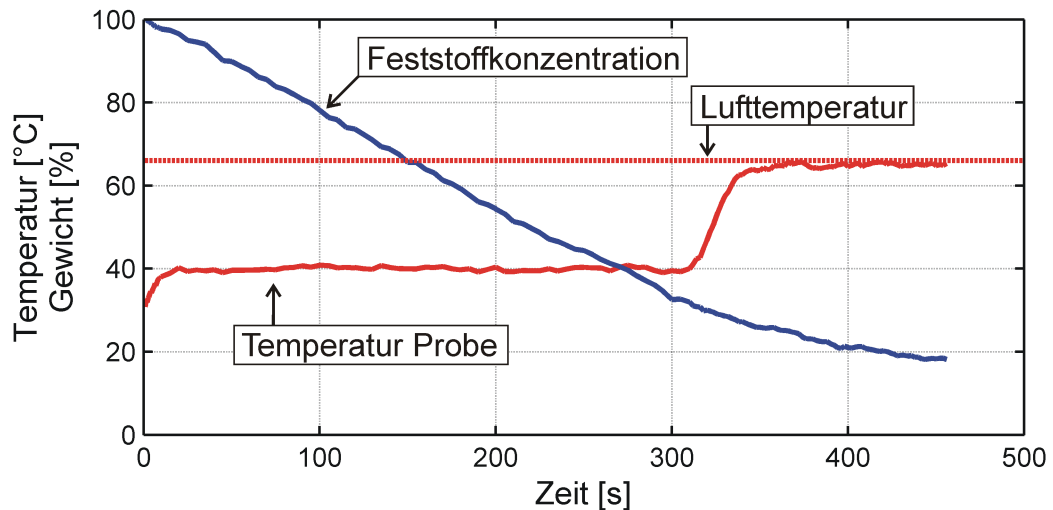


Abbildung 46: Experimentelle Daten Lab Dryer Untersuchung

zen die Spannungstheorie des vorhergehenden Abschnittes, wodurch sich nennenswerte Spannungen erst im hinteren Trocknungsabschnitt ausbilden. Auffällig bei den Beobachtungen war ein Umschlag der Transparenz der Farbempfangsschicht, welcher kurz vor dem Cracken auftrat. Dieser Umschlag in den optischen Eigenschaften kann als zusätzliches Indiez für das Absinken der flüssigen Phasengrenze ins Strichinnere gedeutet werden. An diesem Punkt entstehen die größten Spannungen im System.

9.3 Modellierung des Labortrockners

Die Modellierung des Labortrockners konnte mit dem entwickelten Simulationsmodell zur Trocknung vorgenommen werden. Es waren lediglich Änderungen bei der Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten notwendig. Dieser wurde in Analogie zu einer längsüberströmten Platte modelliert [1]. Bei der Betrachtung wurde aufgrund der Kantenströmungen ein laminar/turbulenter Mischansatz verwendet.

Demnach gilt für die mittlere Nusselt-Zahl bei einer Platte der Länge l und laminarer Grenzschicht

$$Nu_{lam} = 0.664Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (9.1)$$

und bei turbulenter Grenzschicht

$$Nu_{turb} = \frac{0.037Re^{0.8}Pr}{1 + 2.443Re^{-0.1}(Pr^{2/3} - 1)}. \quad (9.2)$$

Die mittlere Nusselt-Zahl für den laminar/turbulenten Bereich errechnet sich aus

$$Nu_{l,0} = (Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2)^{1/2}. \quad (9.3)$$

Die Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte wird durch

$$Nu_l = Nu_{l,0} \left(\frac{Pr}{Pr_W} \right)^{0.25} \quad (9.4)$$

berücksichtigt. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde aus der Definitionsgleichung für die Nusselt-Zahl errechnet.

$$Nu_l = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (9.5)$$

9.4 Ergebnisse und Diskussion

Die Abb. 47 zeigt den Vergleich des gemessenen und des simulierten Gewichtsverlaufs. Die Messdatendichte wurde zum Ende des Trocknungsprozesses erhöht, da die Änderungen im Gewicht hier kleiner werden. Zwischen den Werten der Simulation und den Messdaten herrscht gute Übereinstimmung.

Die experimentellen Untersuchungen am Labortrockner erlaubten die Messung der Gewichtsabnahme während des Trocknungsprozesses. Mit diesen Daten konnte ein Abgleich zwischen Simulation und Experiment vorgenommen werden. Der Umschlagspunkt vom gaseitig zum filmseitig kontrollierten Trocknungsprozess wurde somit verifiziert. Des Weiteren konnte die Entstehung von Cracks beobachtet werden. Die experimentellen Ergebnisse stützen das Spannungsmodell, wonach diese erst im hinteren Teil der Trocknung, nach dem Absinken der flüssigen Phasengrenze in den Strich, entstehen.

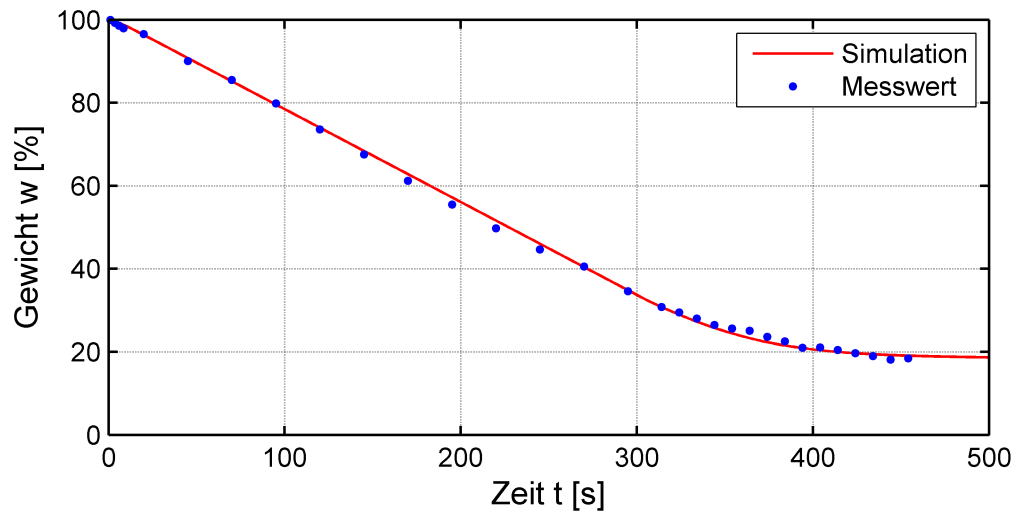


Abbildung 47: Vergleich des Probengewichtes von Simulation und Experiment

10 Binderbasiertes System auf PE-Papier

10.1 Prozessoptimierung

Das vorgestellte Modell bietet eine Möglichkeit zur Optimierung von Produktionsprozessen. In den folgenden Beispielen wird für 3 Produkte gezeigt, wie das Modell zur Prozessoptimierung beitragen kann. Für Vergleichszwecke wird zunächst der jeweilige Standardprozess untersucht. Die Simulationsergebnisse werden mit den Daten aus der Produktion verglichen. Dies erlaubt eine Modellvalidierung unter Produktionsbedingungen. Aus den numerischen Experimenten werden Schlüsse hinsichtlich des Optimierungspotentials der untersuchten Prozesse gezogen. Diese werden experimentell an den Produktionsanlagen überprüft bzw. realisiert.

Prozessbedingungen Die Produktionsbedingungen zur Trocknung der zu untersuchenden Polyvinylalkohol-Wasser-Lösung sind in Tab. 9 zusammengefasst. Sie zeigen den derzeitigen Standardprozess bei der Herstellung eines solchen Produktes. Die Trocknungslufttemperatur wird hierbei zunächst bei 105 °C konstant gehalten. In der Trock-

nungszone 12 beträgt die Lufttemperatur 100 °C. Die Ventilator Drehzahlen werden im Prozessleitsystem in Prozent-Drehzahl angegeben. Hierbei entsprechen 100 % der Frequenz von 50 Hz. Zur Umrechnung von Ventilator Drehzahl in die Luftgeschwindigkeit an der Düse sind an den Düsen die dynamischen Drücke gemessen und daraus über die Bernoulli-Beziehungen die Geschwindigkeiten ermittelt worden. Unmittelbar am Düsenaustritt ist die Austrittsgeschwindigkeit kleiner als 50 m/s. Die in diesem Produktionsprozess eingestellten Drehzahlen stellen eine Spanne von 50 % - 100 % dar. Im vorderen Bereich, mit einem noch niedrigviskosem Strich und einem ungleichmäßigen Druckquerprofil, werden niedrigere Lüfterdrehzahlen eingestellt. Im hinteren Teil des Trockners hingegen weist der Strich solche Festigkeitseigenschaften auf, dass er einem höheren Druck ausgesetzt werden kann.

Tabelle 9: Trocknungsbedingungen binderbasiertes System

US - Unterseite, OS - Oberseite												
Trocknerzone												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Trocknungslufttemperaturen in °C												
OS	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	100
US	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	100
Lüfterdrehzahlen in %												
OS	50	50	50	50	65	75	75	75	100	100	100	90
US	50	55	55	55	70	80	80	85	100	100	100	90
Resultierende Bahntemperaturen (Messwerte)												
OS		48	48	48	48	49	50	50	55	52	67	84

Die letzte Reihe in Tab. 9 enthält die gemessenen Bahntemperaturen am Austritt der Trocknerzone. Die Werte werden mittels IR-Messeinheiten aufgenommen und dienen als Informationsgröße zur Prozessüberwachung.

Weitere prozessrelevante Parameter sind in Tab. 10 zusammengestellt. Die spezifische Strichmasse und die Konzentration bezeichnen den Zustand am Eintritt in die erste Trocknerzone. Unter Konzentration ist der prozentuale Anteil des Feststoffes in der Lösung zu verstehen.

Tabelle 10: Prozessparameter

Bahngeschwindigkeit	v_{Bahn}	85	m/min
Spezifische Strichmasse	m_{Strich}	15	g/m^2
Beladung Strich	X_{Strich}	8	$kgH_2O/kgPVOH$
Spezifische Substratmasse	$m_{Subs.}$	158	g/m^2

10.2 Simulation

Die oben zusammengestellten Daten wurden in das Modell implementiert und die Berechnung des Trocknungsprozesses vorgenommen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationsrechnung vorgestellt.

Energieeintrag Der Trocknungsprozess hängt entscheidend vom Energieeintrag in das zu trocknende Gut ab. Dieser verhält sich nahezu über den gesamten Trocknungsprozess analog zu den Einstellungen am Trockner.

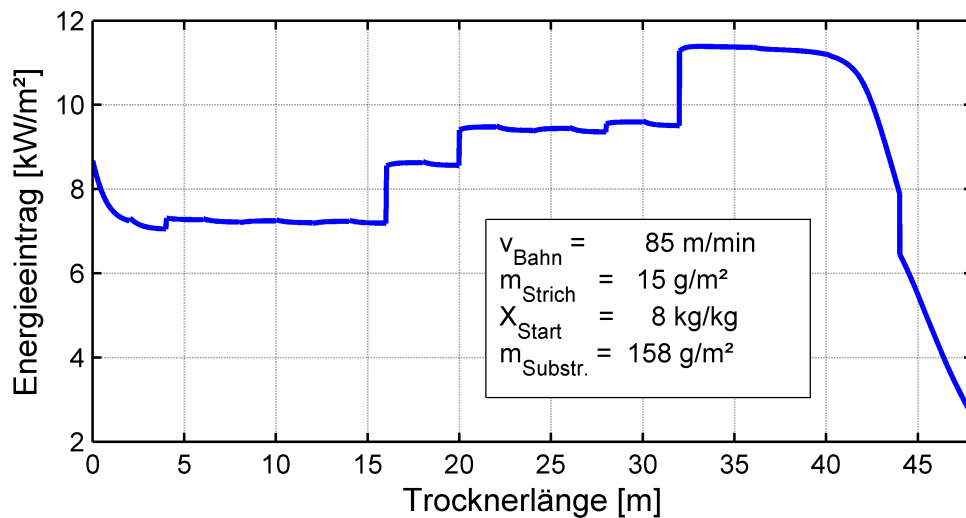


Abbildung 48: Energieeintrag in einem Trocknungsprozess in Abhängigkeit der Trocknerlänge

Zwei Bereiche jedoch zeigen zusätzliche Effekte. Zum Einen fällt der höhere Energieeintrag zu Beginn der Trocknung auf, zum Anderen der am Ende der Trocknung stark

abfallende Energieeintrag, Abb. 48. Ursächlich für diese Abweichungen ist die Bahntemperatur. In der Aufwärmphase ist diese niedrig, und die Differenz zwischen der Trocknungslufttemperatur und der Bahntemperatur entsprechend hoch. Im letzten Bereich der Trocknung steigt die Bahntemperatur stark an, was zu einer kleineren der Differenz zwischen der Trocknungslufttemperatur und der Bahntemperatur führt und somit den Energieeintrag vermindert. Der Energieeintrag im übrigen Trocknerbereich, in dem die Bahntemperatur nahezu konstant ist, verhält sich analog den Einstellungen der Prozessparameter. Im dargestellten Beispiel steigt der Energieeintrag mit fortschreitender Trocknung. Dies wird durch die Erhöhung der Lüftergeschwindigkeiten in den hinteren Zonen bewirkt. Die Bahntemperatur ist für einen großen Bereich konstant. Der Einfluss ist erst ab der Trocknerlänge von 40 m zu erkennen.

Bahntemperatur Der in Abb. 49 gezeigte Verlauf stellt die Bahntemperatur über die Lauflänge des Trockners dar. Die Kreise repräsentieren die gemessenen Werte, die durchgezogene Linie zeigt die berechnete Bahntemperatur.

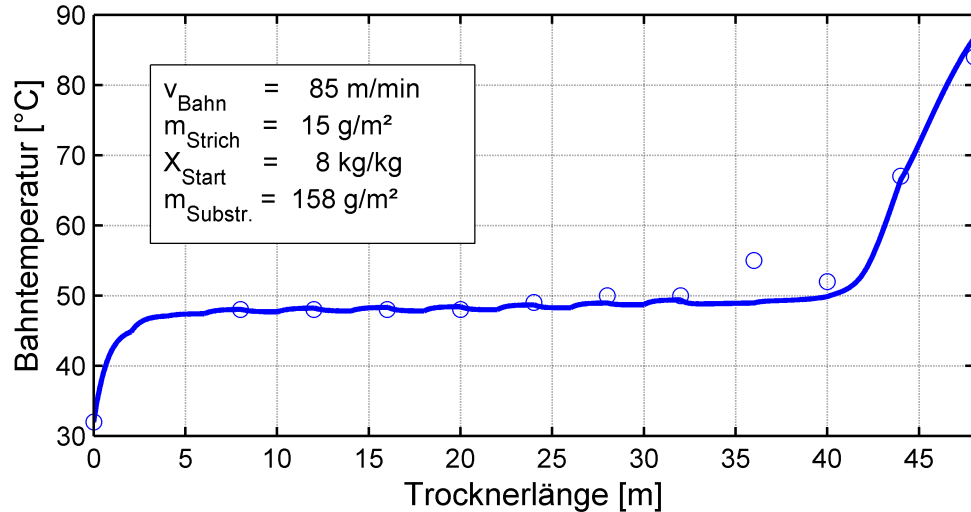


Abbildung 49: Verlauf der Bahntemperatur

Die gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten zeigt, dass das Modell sehr zuverlässig den Produktionsprozess beschreibt. In diesem Zusammenhang ist allerdings die Messgenauigkeit zu beachten, die bei den verwendeten IR-Temperatursensoren

1 K bis 2 K betragen kann. Die Bahntemperatur ist die einzige Größe, mit der der Trocknungsprozess geführt werden kann. Im Verlauf zeigt sich nach einem Aufwärmabschnitt, von ca. 2 m Trocknerlänge, dass das Produkt den "steady state evaporation" erreicht hat und sich seine Bahntemperatur nur noch unwesentlich ändert. Eingetragene und abgeführte Energien sind hier gleich groß, die eingetragene Energie wird direkt in Verdunstung umgesetzt. In dieser Phase lassen sich prinzipiell die höchsten Verdunstungsraten erzielen. Sehr gut zu erkennen ist ebenfalls der 3. Abschnitt, der durch den starken Anstieg der Bahntemperatur nach ca. 40 m Trocknerlänge beginnt. In diesem Teil übersteigt die eingetragene Energie die durch Verdunstung abgeführte. Die Differenz der beiden Energieströme wird nahezu vollständig in die Aufheizung des Produktes umgesetzt.

Verdunstungsmassenstrom Analog zum Energieeintrag ist der Verlauf der Verdunstungsrate, Abb. 50. Anfänglich noch gering, nähert sich der Verdunstungsstrom schnell seinem zum Energieeintrag analogen Gleichgewichtsniveau. Eine Ausnahme bildet auch hier die Verdunstungsrate in der Aufwärmphase des Trocknungsprozesses. In diesem Bereich ist der Energieeintrag hoch und die Verdunstungsrate niedrig. Der Energieeintrag nimmt dann ab, aber der Verdunstungsmassenstrom nimmt zu. Dieses umgekehrte Verhalten lässt sich mit dem Verlauf der Bahntemperatur erklären. Der hohe Energieeintrag resultiert aus einem großem Unterschied zwischen der Lufttemperatur und der Bahntemperatur. Die Bahn ist jedoch noch in der Aufwärmphase, wofür Energie benötigt wird. Bis zum Erreichen der adiabatischen Verdunstungstemperatur wird die eingetragene Energie teilweise in einen Verdunstungsstrom umgewandelt und teilweise als innere Energie vom Gut aufgenommen.

Auffällig sind die in 2 Meter Abständen auftretenden Fluktuationen des Verdunstungsmassenstromes. Bei genauerer Analyse sind diese auch beim Energieeintrag festzustellen. Diese Variationen im Energietransfer sind durch die komplexe Führung der Trocknungsluft verursacht, was unterschiedliche Feuchtegehalte in 2 trocknungsaktiven Bilanzräumen bedingt. Im vorderen Modul ist die Luftfeuchtigkeit niedrig, unmittelbar vor diesem wird die Zuluft eingeblasen. Für die Trocknung bedeutet dies, dass innerhalb eines Moduls unterschiedliche Dampfpartialdrücke vorliegen, was sich unmittelbar auf die Verdunstungsrate auswirkt.

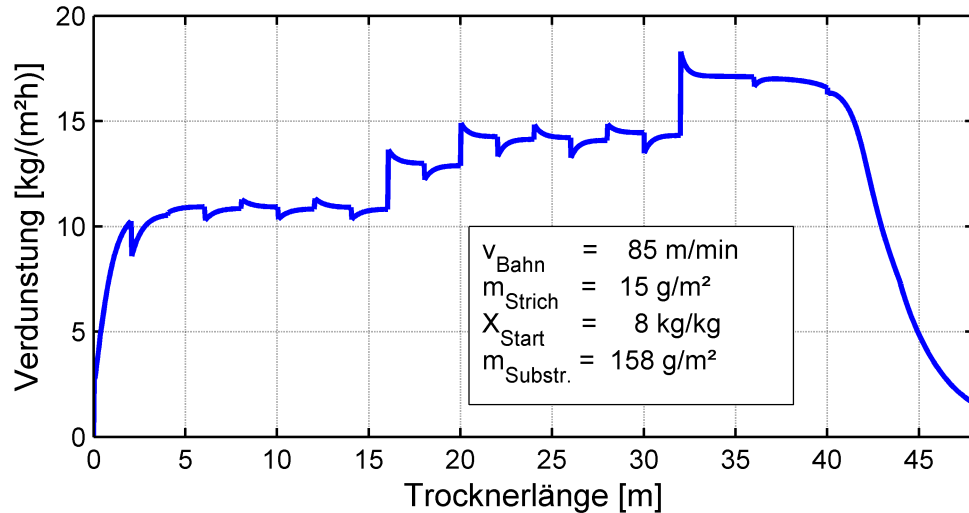


Abbildung 50: Verlauf des Verdunstungsmassenstroms

Am Ende des Trockners fällt die Verdunstungsrate stark ab. Hier bildet sich ein hoher Diffusionswiderstand für den Wassertransport in der Schicht aus und die eingetragene Energie wird in die Aufheizung des Produktes umgesetzt. Der Prozess wird in der Regel hier beendet.

Mittlerer Wassergehalt Der mittlere Wassergehalt im Film nimmt vom einem anfänglich durch den Feststoffgehalt der Lösung vorgegebenen Wert kontinuierlich ab, Abb. 51. Die Veränderung der Steigung ist hierbei direkt mit der Verdunstungsrate gekoppelt.

Konzentrationsprofil im Film Beim Auftrag hat die Lösung eine Feststoffkonzentration von 11,1 %, was ungefähr einer Beladung von 8 kg Wasser je kg PVOH entspricht. Jede der in Abb. 52 dargestellten Verläufe zeigt die Verteilung der Beladung von der oberen Phasengrenze des Striches bis zur Unterseite. Der Abstand zwischen den Linien entspricht einem Längenabschnitt von 2 m längs des Trockners.

Schon unmittelbar nach Beginn der Trocknung ändert sich die Konzentration an der oberen Phasengrenze. Nach 2 m vom Trocknereintritt hat sich die Beladung von 8 kg/kg auf 6 kg/kg verringert. In größeren Entfernungen von der freien Filmoberfläche ist die

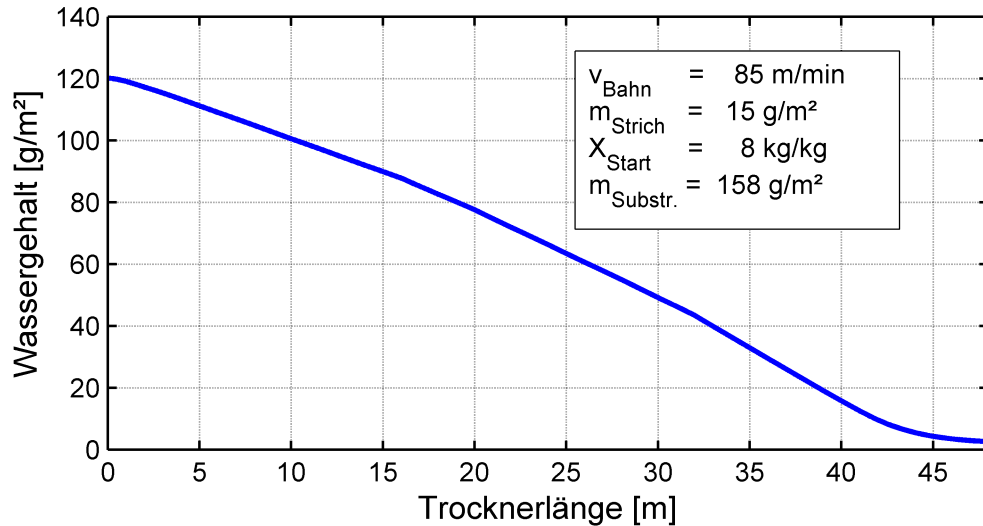


Abbildung 51: Wassergehalt im Strich

Beladung noch unverändert. Mit größerer Entfernung vom Eintritt wandert die Beladungsfront immer weiter in Richtung Substrat. Erst nach ca. 16 m nimmt die Beladung an der Substratschicht ab. Die sich über alle Verläufe erstreckende schwarze Linie stellt die Lagen der oberen Phasengrenze und somit die Dicke des Striches dar. Die Steigung dieser Linie ist ein Maß für die Verdunstungsrate, je steiler die Linie, desto größer die Verdunstung.

Der Verlauf der Beladung zum Ende der Trocknung ist von besonderem Interesse. Da sich hier der Diffusionswiderstand enorm erhöht. Um dies zu veranschaulichen wird die Beladung über die Trocknerlänge aufgetragen, Abb. 54.

Schon nach einer Trocknerstrecke von 42 m macht sich der erhöhte Diffusionswiderstand deutlich bemerkbar. Der Gradient der Beladung an der oberen Phasengrenze wird rapide kleiner. Bis zu diesem Zustand ist der Trocknungsprozess gaseitig kontrolliert. Im weiteren Prozessverlauf ist nicht der Widerstand in der Gasphase bestimmend für die Verdunstungsgeschwindigkeit, sondern der Stofftransport in der Schicht. Wenn die Änderung der Konzentration gegen null geht beginnt der Temperaturanstieg der Bahn. Wasser gelangt nur noch durch langsame Diffusion an die Phasengrenze. Anhand der Abb. 23, in der der Verlauf des Diffusionskoeffizienten über die Beladung und als Funktion der Temperatur dargestellt ist, kann man erkennen, dass der Diffusionskoeffizient mit

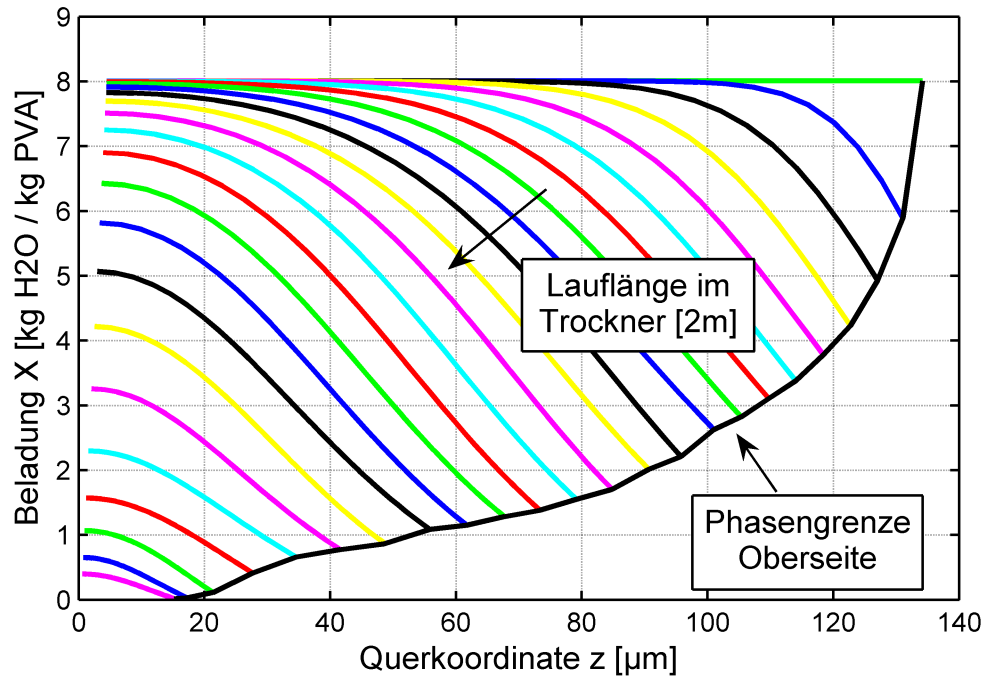


Abbildung 52: Beladungsverläufe im Strich in verschiedenen Abständen vom Trocknerreinlauf

abnehmendem Wassergehalt stark abnimmt. Prinzipiell wirkt die Erhöhung der Bahntemperatur diesem Effekt entgegen, kann ihn jedoch nicht vollständig aufwiegen. Bei dünnen Schichten hat dies keinen Einfluss auf die Qualität. Bei größeren Schichtdicken besteht jedoch die Gefahr, dass der Verdunstungsprozess durch das rapide Abfallen des Diffusionskoeffizienten zum Erliegen kommt und somit die Trocknung nur noch sehr langsam fortschreitet. Dieser Vorgang ist als Hautbildung bekannt.

Viskosität des Striches Analog der Verteilung der Beladung kann auch die Viskosität über die Schichtdicke ermittelt werden. Hierzu ist die Viskosität als Input-Größe von der Streichlösung bei unterschiedlichen Feststoffgehalten gemessen worden. Die Scherrate, bei der die Messungen vorgenommen wurden, waren klein, da der Strich nur geringe Scherbelastungen im Trocknungsprozess erfährt. Die Messungen wurden bei 48 °C ausgeführt. Im interessierenden Bereich des Trocknungsprozesses stellt dies einen Wert für

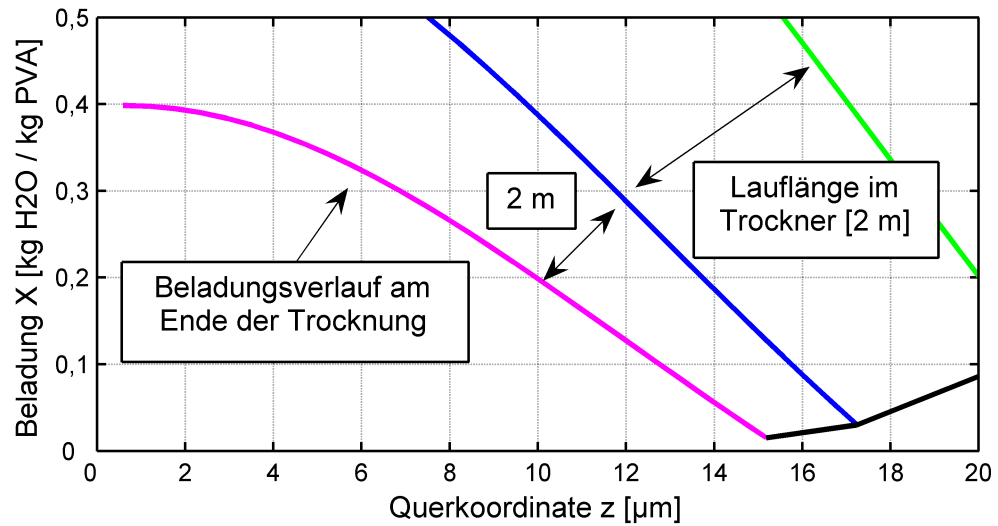


Abbildung 53: Beladungsprofil zum Ende der Trocknung

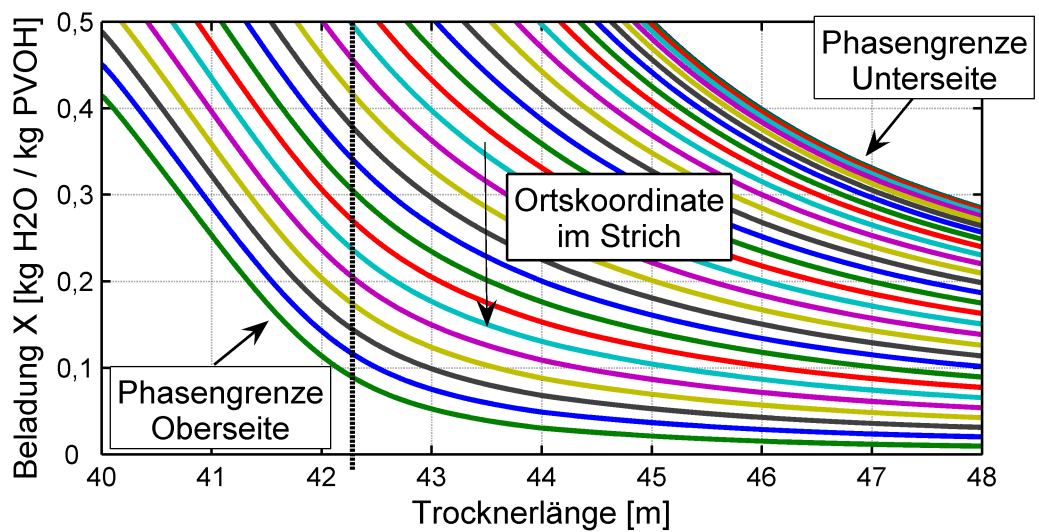


Abbildung 54: Beladungsverläufe im hinteren Bereich der Trocknung

die Bahntemperatur auf einer größeren Länge im Trockner dar. Der Temperaturgradient im Strich beträgt ca. 3 °C, was bei dieser Betrachtung vernachlässigt wurde. Zudem ist der Bereich der Phasengrenze für diese Betrachtung von besonderem Interesse und hier herrscht die adiabatische Verdunstungstemperatur.

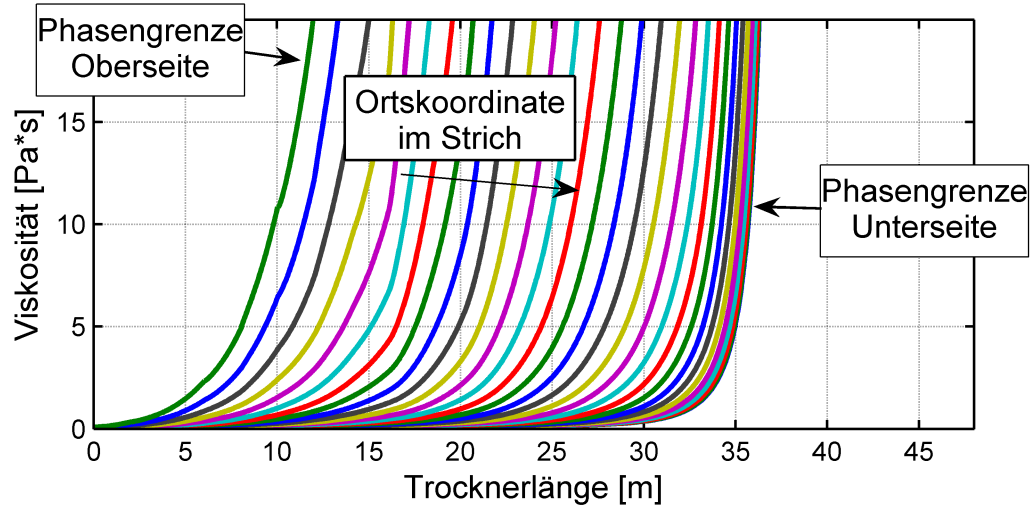


Abbildung 55: Viskositätverlauf während der Trocknung

In Abb. 55 sind die Verläufe der Viskosität über die Trocknerlänge dargestellt. Die Viskosität nimmt in den oberen Volumenelementen schon nach relativ kurzer Zeit / Trocknerstrecke sehr stark zu. So werden z.B. nach 5 m Trockner Werte von 2 Pa s an der Phasengrenze Strich - Luft erreicht, nach 10 m zwischen 4 Pa s - 10 Pa s. In diesem Zustand ist die Schicht schon um Größenordnungen resistenter gegen Verblasungen im Vergleich zum Beginn des Prozesses.

10.3 Kritische Bereiche bei der Trocknung

Die kritischen Abschnitte bei der Trocknung für lösungsmittelbasierte Farbempfangsschichten bestehen zum Einen in den vorderen Trocknern. Hier besteht aufgrund der sehr niedrigen Viskosität des Striches die Gefahr des Verblasens. Zum Anderen besteht gegen dem Ende der Trocknung die Gefahr der Erweichungstemperatur des PE's auf dem Substrat. Darüber hinaus ist stets dafür zu sorgen, dass der Endfeuchtegehalt des Striches beim Verlassen des Trockners geringer als die Feuchtigkeitsgrenze zum Verkleben des Striches ist.

Verblasungsgrenze Die Verblasungsgrenze kann durch die Relation von Strichviskosität zu Ventilator Drehzahl beschrieben werden. Hierzu sind experimentelle Untersu-

chungen oder die Auswertung vorhandener Produktionsdaten notwendig. Sowohl Einstellungen, die zu einem guten als auch zu einem schlechten Produkt führten, wurden daher analysiert und liegen der im nächsten Abschnitt beschriebenen Optimierungsprozedur zugrunde. Das Verblasen des Striches äußert sich in Form von Mottle im Endprodukt. Als Mottle werden bei einem vollflächigem Druck Stellen bezeichnet, die ein mattes Erscheinungsbild vermitteln. Die Mattigkeit wird in diesem Fall durch eine stellenweise zu hohe Feuchtigkeit im Strich hervorgerufen. Durch die Verblasungen werden Ungleichmäßigkeiten im Strichauftrag verursacht, die an den Stellen mit dickerem Strich dazu führen, dass diese nicht vollständig trocknen. Wird das Produkt nun aufgewickelt, kommt es zum Abdrücken der Rückseite auf die bestrichene Seite.

Maximale Produkttemperatur Die maximale Produkttemperatur wird durch den PE-Auftrag bestimmt. Die Erweichungstemperatur PE liegt bei 95 °C. Übersteigt die Produkttemperatur diesen Wert, beginnt das PE seine Oberflächenstruktur zu verändern. Diese Veränderung würde sich unmittelbar auf die Oberflächenstruktur der Beschichtung und somit auch auf das Erscheinungsbild des Photoausdruckes auswirken. Die Bahntemperatur ist daher ein wesentlicher Parameter für die Simulation. Die Prozesseinstellungen können simuliert und die Bedingung der maximalen Temperatur relativ einfach vorempfunden und eingehalten werden.

Grenzfeuchtegehalt Der Feuchtegehalt beim Verlassen des Trockners ist wie die Bahntemperatur ein Standardberechnungsparameter im Simulationsprogramm. Die vielfach in der Praxis angewandte Vorgehensweise, den Trockengehalt mit der maximalen Bahntemperatur gleichzusetzen, kann bei der Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit dazu führen, dass das Produkt zu feucht aufgerollt wird. Der Diffusionswiderstand im Film bildet sich bei erhöhten Produktionsgeschwindigkeit bei einem höheren Feuchtegehalt aus, da der Feuchtegradient steiler im Vergleich zu niedrigen Geschwindigkeiten ist. Dies führt durch fehlende Verdunstungskühlung zum frühzeitigem Anstieg der Produkttemperatur und kann somit zu Fehlinterpretationen bezüglich der Feuchte im Produkt führen. Da der Vorgang der Filmbildung im Simulationsprogramm implementiert ist, wird der zulässige Feuchtegehalt berechnet und kontrolliert.

10.4 Optimierung der Prozesskinetik

Die Anwendung der Simulation auf den Standardprozess für binderbasierte Farbefangschichten hat gezeigt, dass sich das Modell durch hohe Zuverlässigkeit auszeichnet. Kontrolle für die Richtigkeit des Modells waren hier der Feuchtegehalt am Ende des Trocknungsprozesses und die online gemessene Bahntemperatur. Beide Parameter stimmten mit den Daten der Simulation gut überein.

Im Kapitel 6 wurden die Möglichkeiten zur Beeinflussung und Steuerung des Trocknungsprozesses gelegt. Die Luftgeschwindigkeit wirkt sich direkt auf den Wärmeübergang aus, was in analoger Weise auch für den Stoffübergangskoeffizienten gilt. Die Lufttemperatur hat kaum eine Auswirkung auf den Wärmeübergang, sie bestimmt über die Temperaturdifferenz zur Bahn die Wärmestromdichte, die dann in Verdunstung umgesetzt wird. Zwar geht sie nicht direkt in die Berechnung des Verdunstungsmassenstroms ein, bewirkt aber durch die Erhöhung der Bahntemperatur in Kombination mit der erhöhten Lufttemperatur eine Veränderung der Partialdruckdifferenz, was dann schließlich die Verdunstungsleistung beeinflusst. Ein weiterer Parameter ist die Feuchte der Trocknungsluft. Durch sie wird die Bahntemperatur beeinflusst. Generell entspricht in den gaseitig limitierten Trocknungsabschnitten eine geringere Luftfeuchtigkeit einer größeren Trocknungsgeschwindigkeit. In den filmseitig durch Diffusion limitierten Trocknungsabschnitten kann eine höhere Luftfeuchte positiven Einfluss auf den Prozessgeschwindigkeit haben.

Möglich wäre hier, dass sich durch den erhöhten Partialdruck in der Gasphase ein entsprechend höherer Dampfdruck an der Filmoberseite einstellt und der Diffusionsstofftransport aufgrund des schlechter werdenden Transportkoeffizienten zunehmend unterdrückt wird. Ebenfalls würde für diesen Fall die Bahntemperatur ansteigen, was nach Arrhenius den Stofftransport begünstigt.

Der untersuchte Produktionsprozess zeigt unter Berücksichtigung der physikalischen Zusammenhänge noch Verbesserungspotential bezüglich der Produktionsgeschwindigkeit auf. Wie Abb. 52 zeigt, nimmt die Beladung erst im hinteren Bereich des Trockners soweit ab, dass eine Hautbildung bzw. dass die Erhöhung des Diffusionswiderstandes stattfinden kann. In weiten Teilen des Trocknungsprozesses ist die Beladung so groß, dass von diesem Standpunkt aus die Trocknungsgeschwindigkeit noch weiter erhöht werden könnte.

Die Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit ist durch verschiedene Möglichkeiten realisierbar. Nicht alle jedoch würden zu der geforderten Produktqualität führen. In diesem Abschnitt sollen die grundsätzlichen Wege aufgezeigt werden, die eine bessere Nutzung der Produktionskapazität ermöglichen können. Im folgenden werden die Einflüsse der Ventilatorleistung, der Trocknungslufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit auf die Produktionskapazität diskutiert.

Einfluss der Ventilatorleistung Die Steigerung der Ventilator Drehzahlen birgt die Gefahr, das Produkt durch eine nicht konstantes Druckquerprofil in seiner Qualität zu beeinträchtigen. Die für den aktuellen Prozess gewählten Einstellungen sind die durch eine heuristische Herangehensweise in Versuchsläufen ermittelten Maximalwerte. Mit den Möglichkeiten der Simulation sind jedoch weitere Potentiale aufdeckbar. So kann man den Zusammenhang des Verblasens mit der Rheologie des Striches verknüpfen. Die Verläufe der Viskosität über die Trocknerlänge (Abb. 55) zeigen, dass die Steigerung der Luftgeschwindigkeiten bereits bei viel kleineren Lauflängen stattfinden kann, da die Viskosität im Strich schon in der 3. Trocknerzone wesentlich zunimmt.

Trocknungslufttemperaturen Die Erhöhung der Trocknungslufttemperatur ist anlagentechnisch bis 140 °C möglich. Bei der Nutzung der vollen Leistungsfähigkeit für die Lufttemperatur würde sich die adiabatische Verdunstungstemperatur um 5 °C auf ca. 53 °C erhöhen. Die eingetragene Energie bei einer solchen Veränderung würde sich aber nahezu verdoppeln. Als nachteilig bei dieser Vorgehensweise ist allerdings die Verringerung der Viskosität zu bewerten, was das Produkt gegen Verblasungen anfälliger macht. Da sich während der Annäherung der Bahntemperatur an den stationären Zustand auch schon eine höhere Verdunstungsrate erzielen lässt, wird der Viskositätsanstieg ebenfalls schneller stattfinden, was durch die Simulation ermittelt werden kann. Für die filmseitige Betrachtung des Prozesses wäre dies ein gangbarer Weg, zumal die Transportkoeffizienten mit der Temperatur steigen.

Trocknungsluftfeuchte Im gasseitig kontrollierten Bereich sollte die Trocknungsluftfeuchte so niedrig wie möglich, im filmseitig kontrollierten Teil der Trocknung so hoch wie erforderlich gehalten werden. Diese Regelung gilt, wenn die Trocknungsgeschwindigkeit als Regelgröße betrachtet wird. Vom energetischen Gesichtspunkt wäre eine höhere

Trocknungsluftfeuchte durch Reduzierung der Frischluftzufuhr von Vorteil. Die Absenkung der Trocknungsluftfeuchte bedeutet eine Vergrößerung des Dampfpartialdruckgefälles, wodurch die Verdunstungsrate steigt. Im letzten, filmseitig kontrolliertem Teil könnte die Erhöhung der Umluftfeuchte sich vorteilhaft auf die Trocknungsgeschwindigkeit auswirken. Die Ermittlung der Grenzen wäre an der Produktionsmaschine nur mit sehr großem Aufwand möglich, weshalb sich hier das Simulationswerkzeug als sehr hilfreich erweist.

10.5 Auswirkungen der Prozessparameter

Die folgend aufgeführten Daten resultieren aus theoretischer Überlegung und wurden mittels der in dieser Arbeit entwickelten Simulation auf ihren Einfluss hin überprüft. Die Umsetzung in der Produktion ist erfolgt und hat die modellierten Daten bestätigt. Die unter der Forderung, maximale Produktionsgeschwindigkeit ohne Einbußen in der Produktqualität, deduzierten Daten sind in der Tab. 11 aufgeführt. Qualitätsrelevante Daten bei binderbasierten Produkten sind z.B. Verblasungen, die durch zu hohe Düsenausblasgeschwindigkeiten bei zu niedrigen Stirchviskositäten entstehen. Eine anschließende Kontrolle des Striches hat die gute Produktqualität bestätigt.

Tabelle 11: Trocknungsbedingungen für ein binderbasiertes System im optimierten Prozess

Trocknerzone												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Trocknungslufttemperaturen in °C												
OS	140	140	140	140	140	140	140	140	140	105	105	100
US	140	140	140	140	140	140	140	140	140	105	105	100
Lüfterdrehzahlen in %												
OS	50	60	70	90	100	100	100	100	100	100	100	90
US	50	60	70	90	100	100	100	100	100	100	100	90
Resultierende Bahntemperaturen (Errechnet)												
OS		53	54	55	55	56	55	56	57	57	75	87

Die dazugehörigen weiteren Anlagenparameter sind in Tab. 12 zusammengestellt. Mit der vorgeschlagenen Trocknung erhöht sich die Bahngeschwindigkeit bei sonst konstanten Bedingungen auf 129 m/min. Durch die Berechnungen zum Trocknungsverlauf können die Änderungen dieses Prozesses gegenüber dem Standard veranschaulicht werden.

Tabelle 12: Optimierte Anlagenparameter

Bahngeschwindigkeit	v_{Bahn}	129	m/min
Spezifische Strichmasse	m_{Strich}	15	g/m^2
Beladung Strich	X_{Strich}	8	$kgH_2O/kgPVOH$
Spezifische Substratmasse	$m_{Subs.}$	158	g/m^2

Abb. 56 zeigt den Energieeintrag über die Trocknerstrecke. Im Vergleich zu Abb. 48, die den Energieeintrag der Standardfahrweise darstellt, ist ersichtlich, dass die eingetragene Energie in nahezu allen Bereichen größer ist. Der zusätzliche Energieeintrag wird hierbei fast vollständig in die höhere Bahngeschwindigkeit umgesetzt, was im dargestellten Beispiel eine Steigerung um 50 % gegenüber der Ursprungsgeschwindigkeit bewirkt.

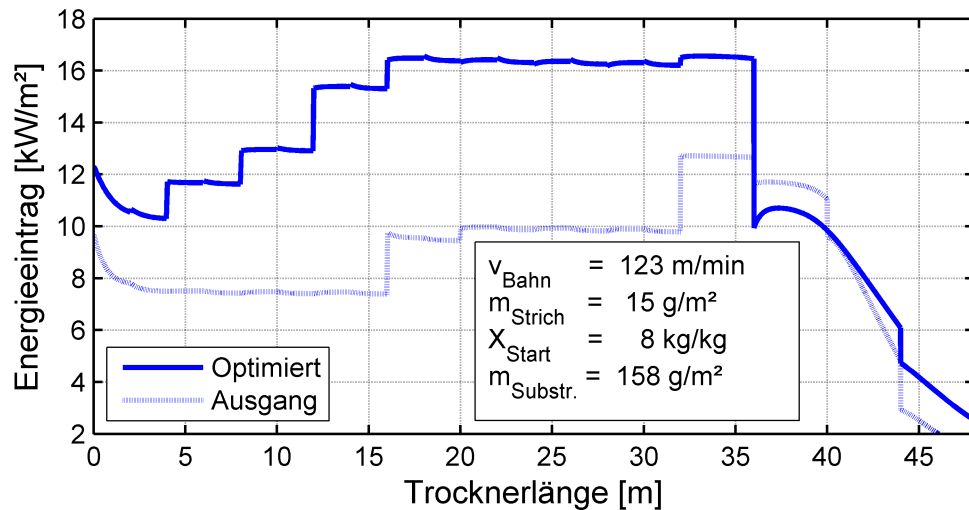


Abbildung 56: Energieeintrag im optimierten Prozess

Der hintere Bereich der Trocknung wurde wegen seiner empfindlichen Wirkung auf den Glanz des Produktes unverändert gelassen. Als Grenzwert wurde eine Trocknerzone vor Beginn des Knickpunktes der Bahntemperatur genommen und die weiter folgenden Zonen ebenfalls konstant gelassen. Im vorderen Bereich ist eine Lüftereinstellung in Form von Stufen gewählt worden. Diese soll der stark ansteigenden Viskosität in den ersten Trocknerzonen gerecht werden und den Strich schon früh mit hohen Lüfterdrehzahlen belasten. Dadurch wird der Stofftransport erhöht, was einen stärkeren Viskositätsanstieg bedingt. Die Erhöhung der Lufttemperatur hat in diesem Bereich eine analoge Wirkung. Die Abb. 57 zeigt die errechneten Bahntemperaturen für den

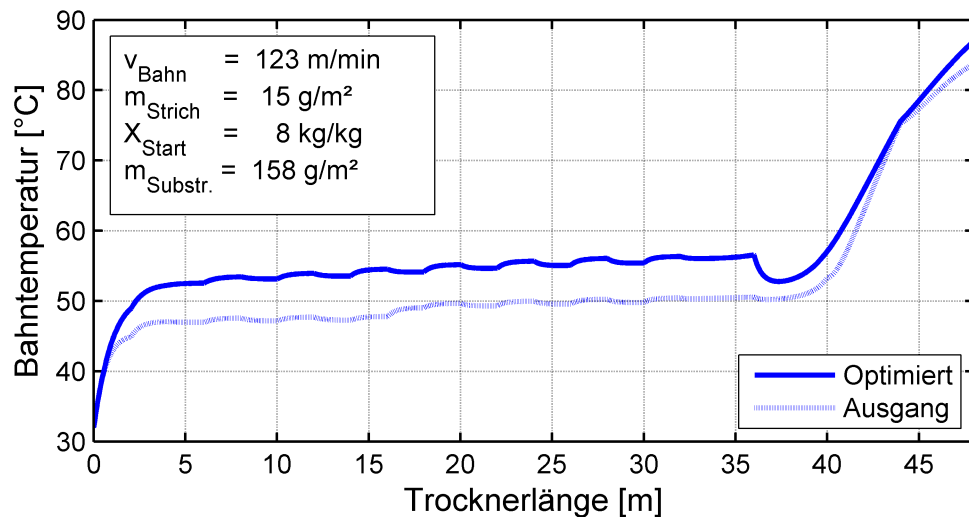


Abbildung 57: Verlauf der Bahntemperatur im optimierten Prozess

leistungsgesteigerten Trocknungsprozess. Im Vergleich zum Normalbetrieb (Meßwerte) liefert das Modell höhere Bahntemperaturen. Der Unterschied beträgt in weiten Teilen ca. 4 °C, was aber als unbedenklich bezüglich der Produktqualität bewertet wird. Die Ursache für diese Differenz ist die höhere Trocknungsluftfeuchte, die durch die höhere Verdunstungsrate verursacht wird, und die angehobene Trocknungslufttemperatur, die sich unmittelbar auf die adiabatische Verdunstungstemperatur auswirkt.

Die Abnahme des Wassergehaltes in der Schicht gleicht der beim Standardprozess. Dies ist in der Darstellungsweise, über die Trocknerstrecke, begründet. Würde man dem Prozess über die Zeit darstellen, könnte man einen Unterschied in der Steigung feststellen.

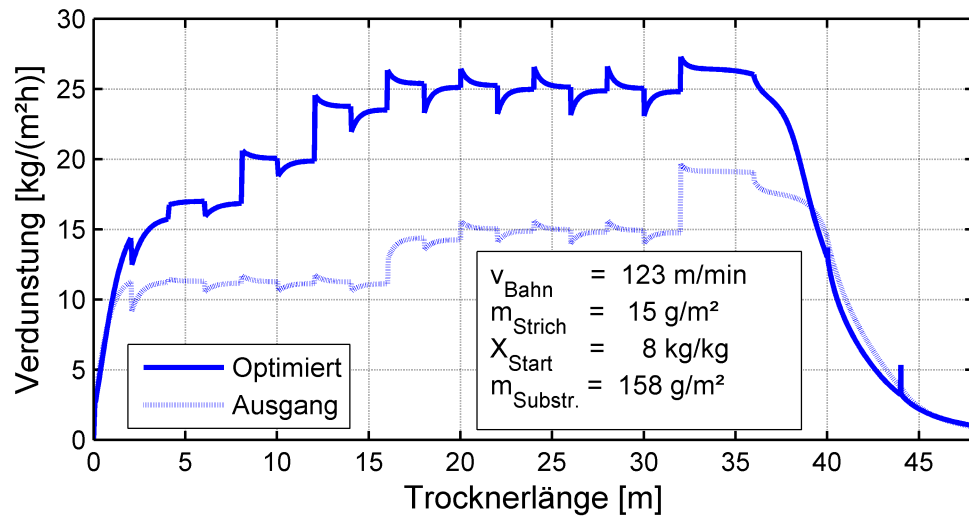


Abbildung 58: Verlauf des Verdunstungsmassenstroms im optimierten Prozess

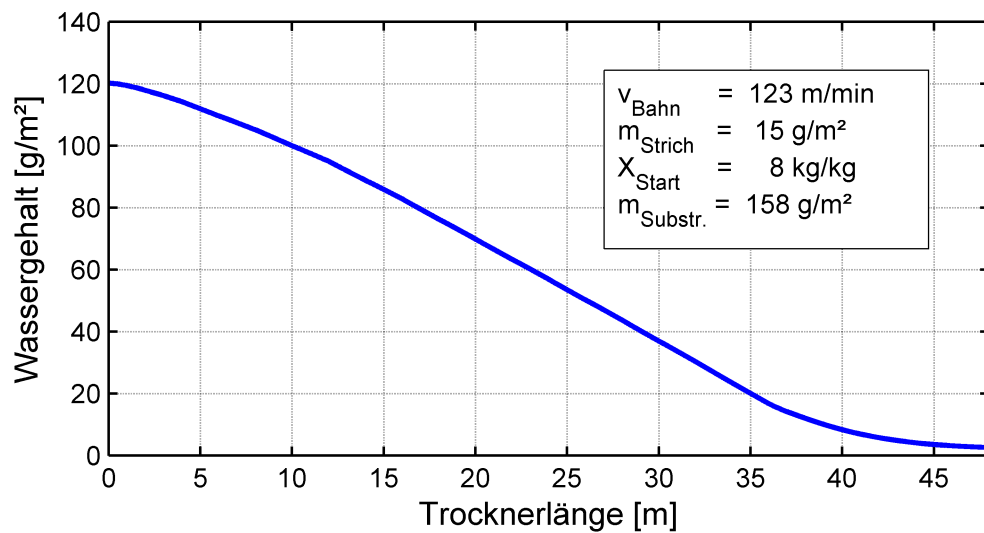


Abbildung 59: Verlauf des Wassergehalts im optimierten Prozess

Der Verlauf der Beladung über die Schichtdicke scheint auf den ersten Blick ein ähnliches Profil wie im Referenzfall zu liefern. Untersucht man die Diagramme jedoch im direkten Vergleich zueinander, so stellt man in der gesteigerten Version deutlich steilere Gradienten im vorderen Bereich des Trocknungsprozesses fest. Im hinteren Teil des Trockners gleichen sich diese schnell aus und das Produkt kann den Trockner mit einem ähnlichen Profil wie im Standardverfahren verlassen.

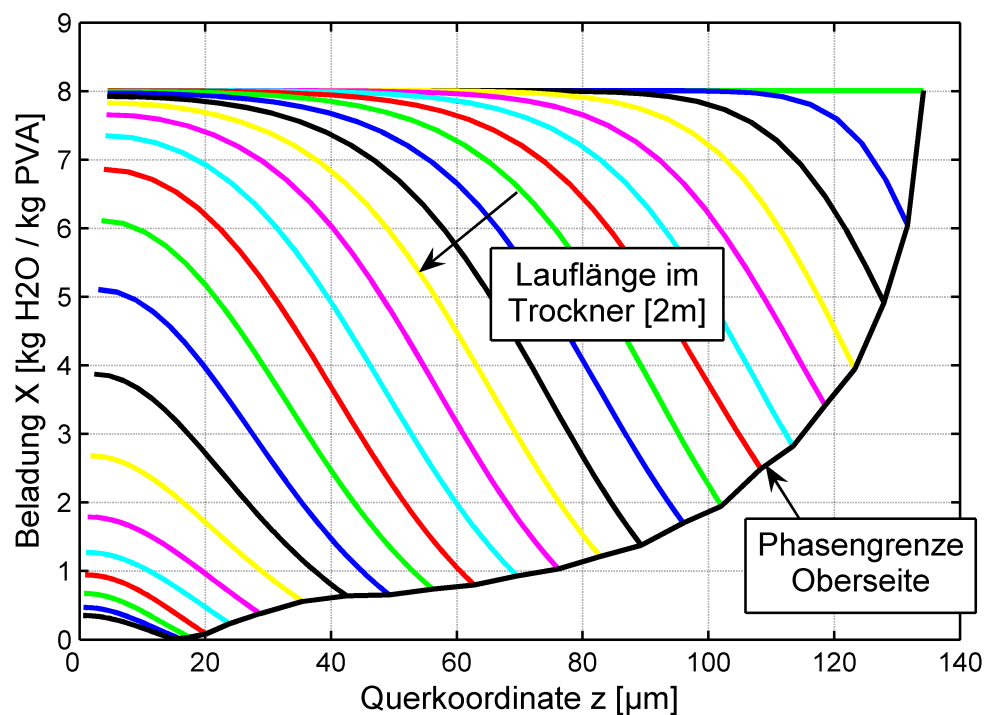


Abbildung 60: Beladungsverläufe im Strich beim optimierten Prozess

Eine detailliertere Darstellung des letzten Abschnittes ist in Abb. 61 illustriert. Hier wird deutlich, dass der Anteil der verdunsteten Menge in den hinteren Zonen geringer und dass der Feuchtegradient in diesem Bereich nicht so stark ausgebildet ist, wie in der vorhergehenden Betrachtung. Da bei konstanter Trocknereinstellung in diesem Bereich die Bahngeschwindigkeit erhöht wurde, verkürzt sich entsprechend die Verweilzeit in diesem Abschnitt. Der erreichte Endfeuchtegehalt ist bei der leistungsgesteigerten Version etwas geringer als im Ausgangsprozess.

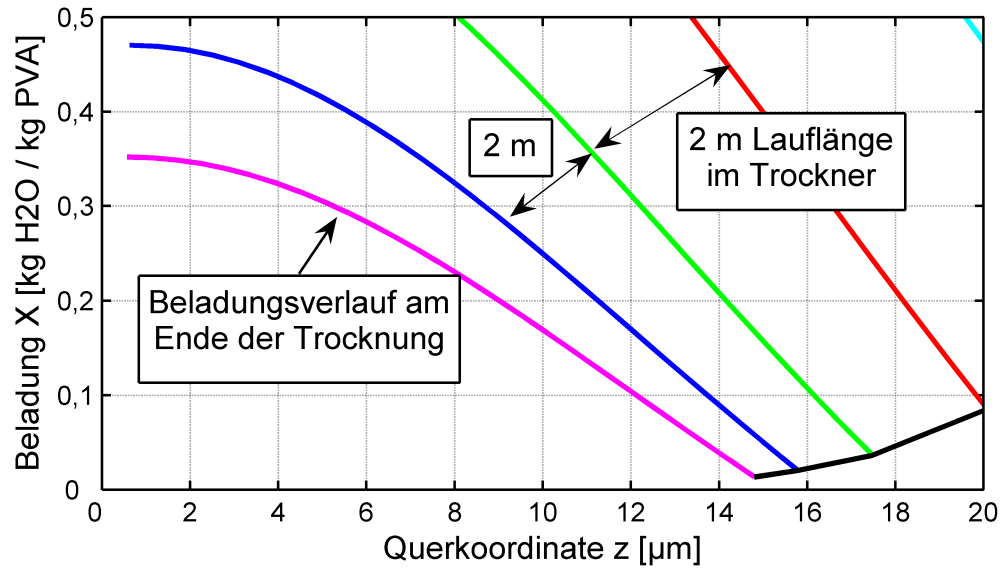


Abbildung 61: Beladungsprofile zum Ende der Trocknung im optimierten Prozess

Die Veranschaulichung der Beladungsverläufe über die Trocknerstrecke ab 40 m zeigt diesen Zustand ebenfalls, Abb. 62. Die Beladungen nahe der oberen Phasengrenze sind im dargestellten Beispiel sehr viel geringer als im Standardprozess.

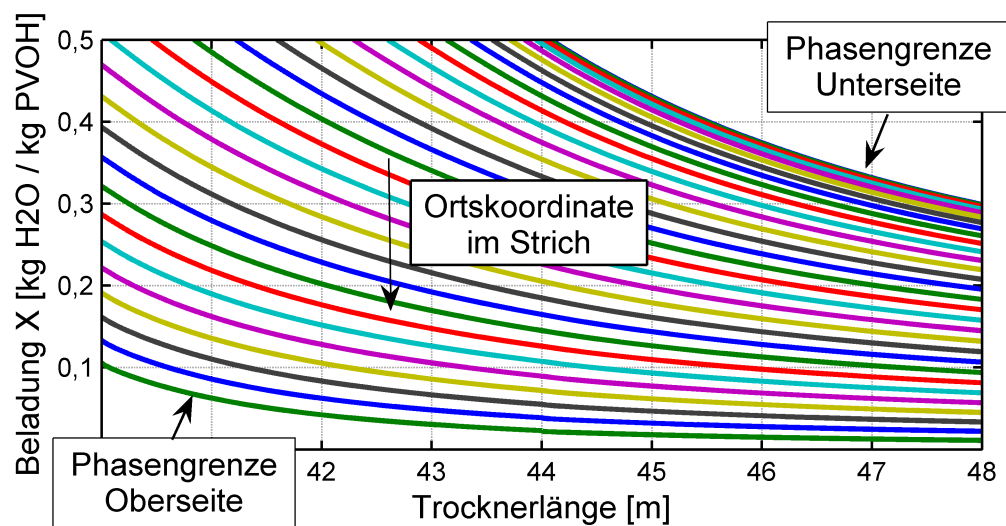


Abbildung 62: Beladungsverlauf zum Ende der Trocknung im optimierten Prozess

Die Änderung der Viskosität im vorderen Bereich der Trocknung findet viel schneller statt, was auf die höhere Verdunstungsrate zurückzuführen ist. Nicht zuletzt dieser Anstieg in der Viskosität erlaubt die erhöhte Lüfterleistung in den Zonen 2 bis 8, wobei an dieser Stelle auch davon ausgegangen wird, dass die Einstellungen des Standardprozesses nicht den maximal verträglichen Einstellungen in der Produktion entspricht.

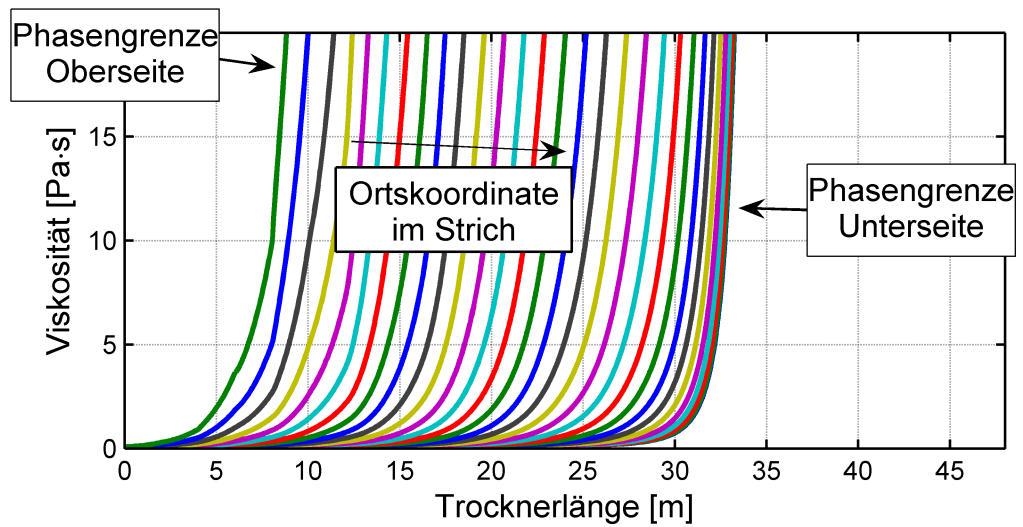


Abbildung 63: Viskositätsverläufe im Strich beim optimierten Prozess

11 Mikroporöse Systeme auf PE-Papier

Wie schon in der Einleitung erläutert, bestehen mikroporöse Striche neben Bindemittel (PVOH) im Wesentlichen aus Nanopartikeln. Für Aluminiumoxidpartikel eingesetzte Bindemittel- / Pigmentmassenverhältnisse bewegen sich in einem Rahmen von 8:1 bis 10:1. Sie sind tendenziell empfindlicher als die im vorherigem Abschnitt beschriebenen Bindersysteme. Die größte Herausforderung stellt das Cracken des aufgetragenen Films dar. Beispielhaft wird im Folgenden ein Prozess für ein mikroporöses System betrachtet.

Prozessbedingungen Die Prozessparameter bei der Trocknung dieses Striches beschreiben vom Einlauf bis zum Ende des Trockners ansteigende Trocknungslufttemperaturen und Lüfterleistungen, Tab. 13 und Tab. 14. Weitere prozessrelevante Parameter sind in Tab. 15 aufgeführt. Bei den derzeitigen Prozessbedingungen stellt, neben der viel zu geringen Produktionsgeschwindigkeit, Mikrocracking ein Problem dar. Die mit den dargestellten Prozessparametern produzierten Proben haben wegen des erhöhten Mikrocrackingniveaus eine nicht akzeptable Qualität. Die Optimierungsaufgabe for-

muliert sich somit in der Verbesserung der Produktqualität und der Steigerung der Maschinengeschwindigkeit.

Tabelle 13: Ausgangseinstellungen der Lufttemperaturen für einen mikroporösen Strich auf PE-Papier

Trocknungslufttemperaturen in °C											
Trocknerzone											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
OS	60	60	60	60	80	80	80	80	100	100	110
US	60	60	60	60	80	80	80	80	100	100	110
Trocknerzone											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
OS	110	110	100	100	100	100	100	100	100	100	100
US	110	110	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabelle 14: Ausgangseinstellungen der Lüfterleistungen für einen mikroporösen Strich auf PE-Papier

Lüfterleistungen in %											
Trocknerzone											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
OS	28	28	28	28	28	30	30	30	30	30	30
US	28	28	28	28	28	30	30	30	30	30	30
Trocknerzone											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
OS	35	35	40	40	60	60	80	80	80	80	80
US	35	35	40	40	60	60	80	80	80	80	80

Tabelle 15: Prozessparameter

Bahngeschwindigkeit	v_{Bahn}	150	m/min
Spezifische Strichmasse	m_{Strich}	22	g/m^2
Beladung Strich	X_{Strich}	3,3	$kgH_2O/kgStrich$
Spezifische Substratmasse	$m_{Subs.}$	160	g/m^2

11.1 Simulation

Die Simulationsergebnisse für den Ausgangsprozess sind in Abb. 64 illustriert. Im oberen Diagramm sind die Trocknungsparameter, im mittleren die Verdunstungsrate und im unteren die Feststoffkonzentration im Strich sowie der Verlauf der Bahntemperatur dargestellt.

Im der vorangegangenen Betrachtung zum binderbasierten System wurde eine ausführliche Betrachtung vorgenommen. Auf die detaillierte Beschreibung von Vorgängen, die bei den binderbasierte und mikroporösen Strichen analog sind, kann daher in diesem Kapitel verzichtet werden.

Der Verlauf der Trocknung Der Trocknungsprozess verläuft analog den Einstellungen der Trocknungsparameter. Im vorderen Bereich herrschen eher geringe Verdunstungsraten, die mit dem Verlauf der Trocknung ansteigen. Die Trocknungslufttemperatur ist in den ersten Modulen sehr niedrig gewählt, in den mittleren und hinteren Modulen erreicht diese ca. 100 °C. Wie die Trocknungslufttemperaturen, sind auch die Lüftergeschwindigkeiten eingestellt. Sie beginnen bei 28 %, verharren auf einem nahezu konstantem Niveau und steigen zum Ende auf 80 %. Die Kombination von Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur spiegelt der Verdunstungsmassenstrom wieder, mittleres Diagramm in Abb. 64. Dieser verläuft analog den Einstellungen der Trocknungsparameter. In den vorderen Zonen herrschen relativ geringe Verdunstungsraten, die zum Ende der Trocknung ansteigen. Anhand der gemessenen und berechneten Bahntemperaturen, beobachtet man auch bei dieser Simulation eine gute Übereinstimmung zwischen Praxis und Theorie, unteres Diagramm in Abb. 64.

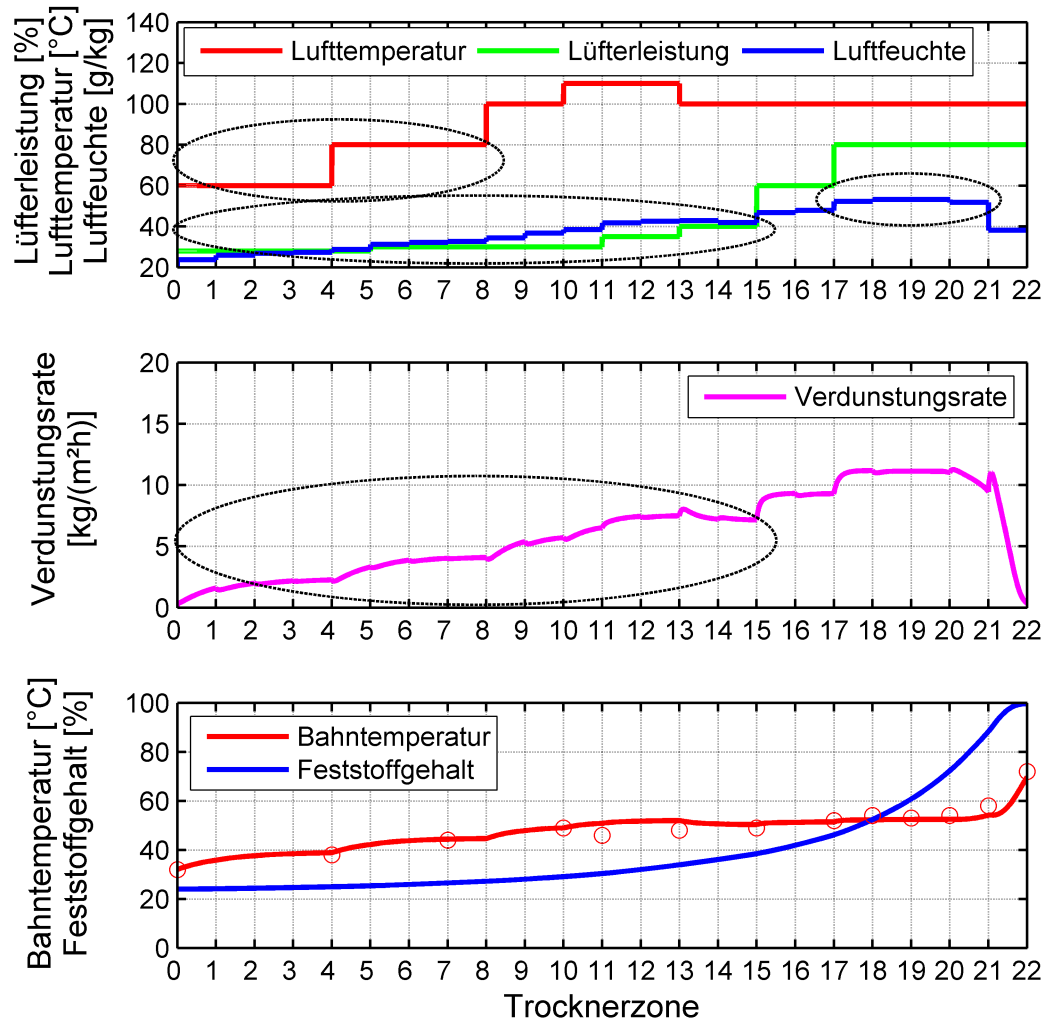


Abbildung 64: Prozessübersicht des Ausgangsprozesses mikroporöser Strich auf PE-Papier

11.2 Kritische Bereiche bei der Trocknung

Wie anfangs erwähnt, stellen das Mikrocrackingniveau und die zu geringe Produktionsgeschwindigkeit die zu optimierenden Parameter dar. Die Ansätze, mit denen diese Ziele erreicht werden sollen, werden folgend kurz dargelegt.

Produktionsgeschwindigkeit Bei der Betrachtung des Prozesses hinsichtlich der Produktionsgeschwindigkeit fallen die niedrigen Verdunstungsraten im vorderem Bereich der Trocknung auf. Diese sind durch die sehr niedrigen Lüfterleistungen und Lufttemperaturen in diesen Zonen bedingt. Die Viskosität steigt sehr stark in diesem Bereich an, wie bei den binderbasierten Systemen. Die nahezu konstanten Lüfterleistungen und Lufttemperaturen werden der Steigerung der Viskosität nicht gerecht. Die Gefahr, dass durch zu hohe Lüfterleistungen Verblasungen entstehen, nimmt mit zunehmender Viskosität ab. Deshalb ist aus theoretischer Sicht eine stärkere Verdunstung im vorderen Bereich erwünscht.

Cracking Cracking entsteht durch ein zu hohes Spannungsniveau in der trocknenden Schicht. Diese bilden sich im hinteren Bereich des Trocknungsprozesses aus. Zeitpunkt der Ausbildung und die spannungsbeeinflussenden Trocknungsparameter wurden im Kapitel trocknungsinduzierte Spannungen behandelt. Angewandt auf den vorliegenden Fall können die spannungs- und somit crackingrelevanten Trocknerbereiche auf die Zonen 18 bis 21 beziffert werden, bzw. auf einen Feststoffgehalt von 50 % bis 80 %. Die berechneten Trocknungsluftfeuchten für diese Zonen zeigen Feuchtebelastungen von ca. 50 g/kg auf. Folgend den Ergebnissen aus der Sensitivitätsanalyse der Spannungsbetrachtung scheint es zweckmäßig die Trocknungsluftfeuchte durch die Prozessführung in diesen Zonen zu erhöhen.

11.3 Optimierung der Prozessparameter

Die genannten Ansätze führten zu den hier im einzelnen vorgestellten Parametern für den optimierten Prozess.

Optimierung der Ventilatorleistung Die Ventilatorleistung wird beim Ausgangsprozess im vorderen Bereich sehr niedrig gehalten. Im optimierten Prozess wird sie nahezu analog dem Viskositätsanstieg erhöht, Tab. 16.

Optimierung der Trocknungslufttemperaturen Die Trocknungslufttemperaturen sollen bei Verblasungsgefahr so niedrig wie möglich gehalten werden. Ist diese Gefahr gebannt, können die Temperaturen analog den Lüftereinstellungen bzw. der Viskosität

11.4 Simulationsergebnisse des optimierten Prozesses

Die Simulationsergebnisse des optimierten Prozesses sind in Abb. 65 illustriert. Die Prozessparameter zeigen die vorgenommenen Änderungen auf. Die Lüfterleistung und die Trocknungslufttemperaturen steigen deutlich früher und stärker an als im Ausgangsprozess. Die Zonen mit den höchsten Verdunstungsraten befinden sich nun in den vorderen Trocknerzonen. Des Weiteren wurde die Luftfeuchtigkeit in den hinteren Trocknerzonen gesteigert. Im Vergleich zur vorherigen Einstellung ist diese um 32 g/kg angehoben worden.

Der optimierte Prozess lief mit einer Produktionsgeschwindigkeit von 280 m/min, was nahezu einer Verdopplung der Produktionsgeschwindigkeit entspricht. Cracking wurde trotz der erhöhten Produktionsgeschwindigkeit verbessert.

11.5 Ergebnisse und Diskussion

Die im Kapitel trockenungsinduzierte Spannungen vorgestellten Maßnahmen zur Reduktion des Fehlerniveaus, konnten erfolgreich umgesetzt werden; sie wurden durch diesen praktischen Anwendungsfall bestätigt. An diesem Optimierungsbeispiel konnte gezeigt werden, wie die scheinbar mit einander gegenläufigen Einflüsse, Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit und Verbesserung der Produktqualität, durch eine geeignete Prozesssteuerung erreicht werden konnten. Die Anwendung der Simulation bot hierbei die notwendige Möglichkeit, den Prozess im Vorfeld produktionsunabhängig zu untersuchen sowie eine Vielzahl von sonst nur schwer zugänglichen Prozessgrößen während der Trocknung zu bestimmen.

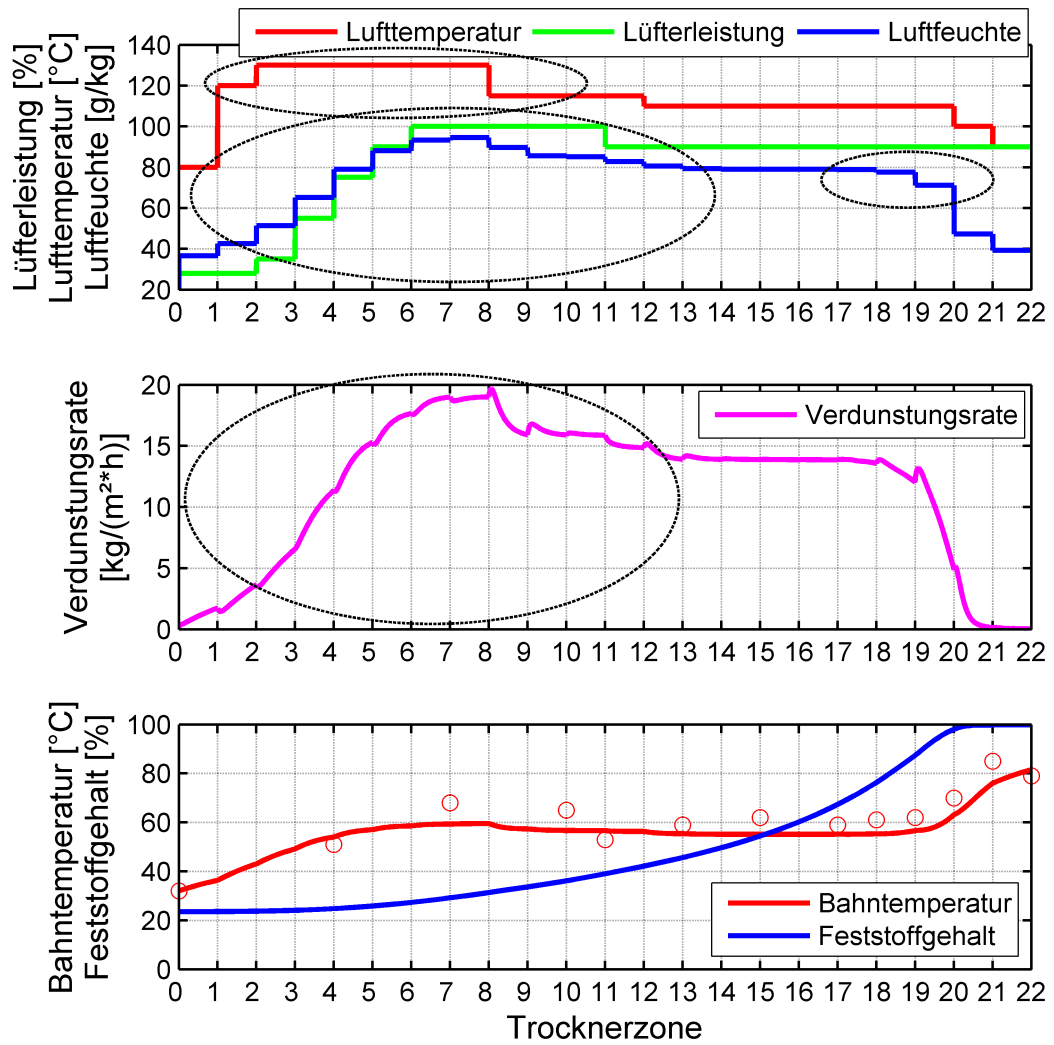


Abbildung 65: Prozessübersicht im optimierten Prozess mikroporöser Strich auf PE-Papier

12 Mikroporöse Systeme auf bestrichenem Papier

Eine weitere Sorte von mikroporösen DI-Papieren stellt ein Produktaufbau dar, in dem das Substrat nicht aus PE-beschichtetem Papier, sondern aus einem Rohpapier mit einem Vorstrich besteht, Abb. 66. Dies soll dem Produkt eine höhere Absorptivität verleihen, da das Rohpapier in diesem Fall an der Feuchteaufnahme der Tinte beim Bedrucken beteiligt ist.

Da das Rohpapier nicht stoffdicht, sondern im Gegenteil sehr hydrophil und permeabel ist, gelangt ein Großteil des Lösungsmittels schon beim Auftragen der Suspension in das Rohpapier. Durch diesen Vorgang stellen sich kurz nach dem Gießen der Farbempfangsschicht andere Verhältnisse im Strich ein, als beim Gießen auf einem PE-beschichtetem Substrat. Die Unterschiede werden bei der weiterführenden Betrachtung durch die Simulation deutlich.

Prozessbedingungen Der Ausgangsprozess für die Herstellung von mikroporösen Strichen auf Rohpapier wird mit verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten betrie-

Tabelle 19: Ausgangseinstellungen der Lüfterleistungen für mikroporösen Strich auf Rohpapier

Lüfterleistungen in %											
Trocknerzone											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
OS	75	85	85	75	70	60	55	50	40	40	40
US	70	80	80	70	65	60	55	50	40	40	40
Trocknerzone											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
OS	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50
US	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50

Tabelle 20: Prozessparameter

Bahngeschwindigkeit	v_{Bahn}	90	m/min
Spezifische Strichmasse	m_{Strich}	39	g/m^2
Beladung Strich	X_{Strich}	1,9	$kgH_2O/kgStrich$
Spezifische Substratmasse	$m_{Subs.}$	171	g/m^2

12.1 Simulation

Wie schon im Kapitel mikroporöse Striche auf PE-Papier, wird auch hier der Ausgangsprozess simuliert. Die Simulationsergebnisse sind in Abb. 67 dargestellt. Es wird nun eine kurze Analyse des Ausgangsprozesses, auf Basis der Simulationsergebnisse, vorgenommen.

Betrachtungen zum Ausgangsprozess Wie schon erwähnt, stellen die eingestellten Prozessparameter einen funktionierenden Prozess dar. Die Lüfterleistungen sind im Anfangsbereich sehr hoch und fallen zur Mitte des Prozesses ab. Diese anfänglich hohen Lüfterleistungen stellen die minimalen Einstellungen für einen stabilen Bahnlauf dar und können daher nicht variiert werden. Die Trocknungslufttemperatur bleibt konstant bei 60 °C, was gleichzeitig die untere Grenze der einstellbaren Lufttemperatur

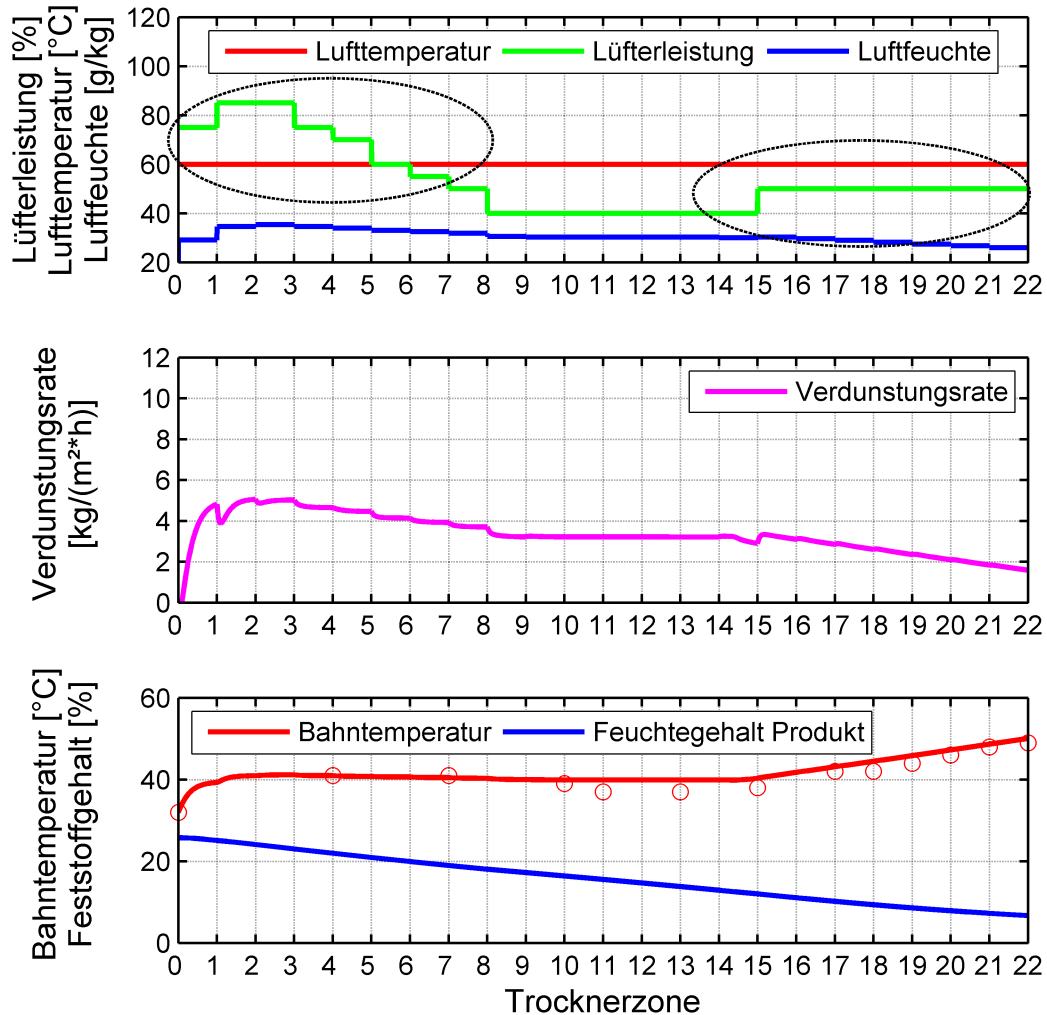


Abbildung 67: Prozessübersicht des Ausgangsprozesses mikroporöser Strich auf Rohpapier

darstellt. Die Luftfeuchte im Trockner liegt unter 40 g/kg. Die Verdunstungsrate liegt, im Vergleich zu den im vorhergehenden Abschnitt betrachteten mikroporösen Strichen auf PE-beschichtetem Papier, auf einem niedrigerem Niveau. Die errechnete Bahntemperatur stimmt auch in diesem Fall gut mit der gemessenen Bahntemperatur überein. Auffällig ist der Feuchtegehalt im Produkt. Da ein Großteil des Lösungsmittels schon kurz nach dem Auftragen des Striches in das Substrat abgefließen ist, wird hier der Feuchtegehalt auf das gesamte Produkt bezogen. So verläuft der Feuchtegehalt vom Beginn mit 25 %

bis zum Ende der Trocknung auf 6 %.

12.2 Kritische Bereiche bei der Trocknung

Schon kurz nach dem Auftragen des Striches verändern sich seine Eigenschaften massiv durch die Veränderung des Feststoffgehaltes. Der theoretisch kritische Feststoffgehalt von 60 % - 85 % entspricht einem Feuchtegehalt von 40 % bis 15 %, bezogen auf das Gesamtprodukt. Durch den initialen Feuchteausgleich mit dem Substrat wird dieser kritische Bereich unmittelbar nach dem Auftragen des Striches erreicht, mittleres Diagramm Abb. 67. Da sich die Bezugsmasse für diese Betrachtung enorm vergrößert hat, bedeutet dies ebenfalls, dass sich der kritische Bereich über einen weitaus größeren Abschnitt als beim PE-beschichtetem Papier vollzieht. Bei Anwendung dieser Betrachtung muss der Trocknungsprozess von Beginn an sanft und kann ab Erreichen eines Feuchtegehaltes von 15 % zunehmend härter geführt werden.

12.3 Optimierung der Prozessparameter

Die Optimierungsstrategie leitet sich somit aus den geänderten Verhältnissen beim Rohpapier ab. Im vorderen Bereich sollte die Trocknung so sanft wie möglich sein, da hier der Strich sehr empfindlich ist. Die Lüfterleistungen ergeben sich aus dem notwendigen Druck um einen einwandfreien Lauf der Bahn im Trockner sicherzustellen. Die Trocknungslufttemperatur sollten hier möglichst gering gehalten werden.

Im hinteren Bereich, das heißt ab einem Feuchtegehalt von 15 %, ist das Anheben des Energieeintrags möglich. Die maximale Produktionsgeschwindigkeit ist bei diesem Prozess durch nicht trocknungsbedingte Faktoren auf 130 m/min begrenzt.

Optimierung der Ventilatorgeschwindigkeit Die ermittelten Lüfterleistungen für den optimierten Prozess sind in Tab. 21 aufgeführt. Im vorderen Bereich wurden die Leistungen nicht angepasst. Lediglich im hinteren Bereich ist die Leistung der Ventilatoren, von hinten beginnend, angehoben worden.

Optimierung der Trocknungslufttemperatur Die Trocknungslufttemperatur wurde - wie die Lüfterleistungen - nur im hinteren Bereich erhöht. Die Einstellungen im

Tabelle 21: Lüfterleistungen mikroporöser Strich auf Rohpapier im optimierten Prozess

Lüfterleistungen in %											
Trocknerzone											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
OS	75	85	85	75	70	60	55	50	50	50	50
US	70	80	80	70	65	60	55	50	50	50	50
Trocknerzone											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
OS	45	45	45	45	50	50	60	70	70	70	50
US	45	45	45	45	50	50	60	70	70	70	50

Tabelle 22: Lufttemperaturen mikroporöser Strich auf Rohpapier im optimierten Prozess

Trocknungslufttemperatur in °C											
Trocknerzone											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
OS	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
US	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Trocknerzone											
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
OS	60	60	60	60	60	105	105	105	105	100	90
US	60	60	60	60	60	105	105	105	105	100	90

vorderen Bereich stellen das Minimum der zu realisierenden Temperaturen dar.

12.4 Simulationsergebnisse des optimierten Prozesses

Die Simulationsergebnisse zum optimierten Prozess sind in der Abb. 68 illustriert. Deutlich sind die gesteigerten Prozessparameter im hinteren Bereich zu erkennen. Diese führten zu einer Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit um 45 % auf 130 m/min.

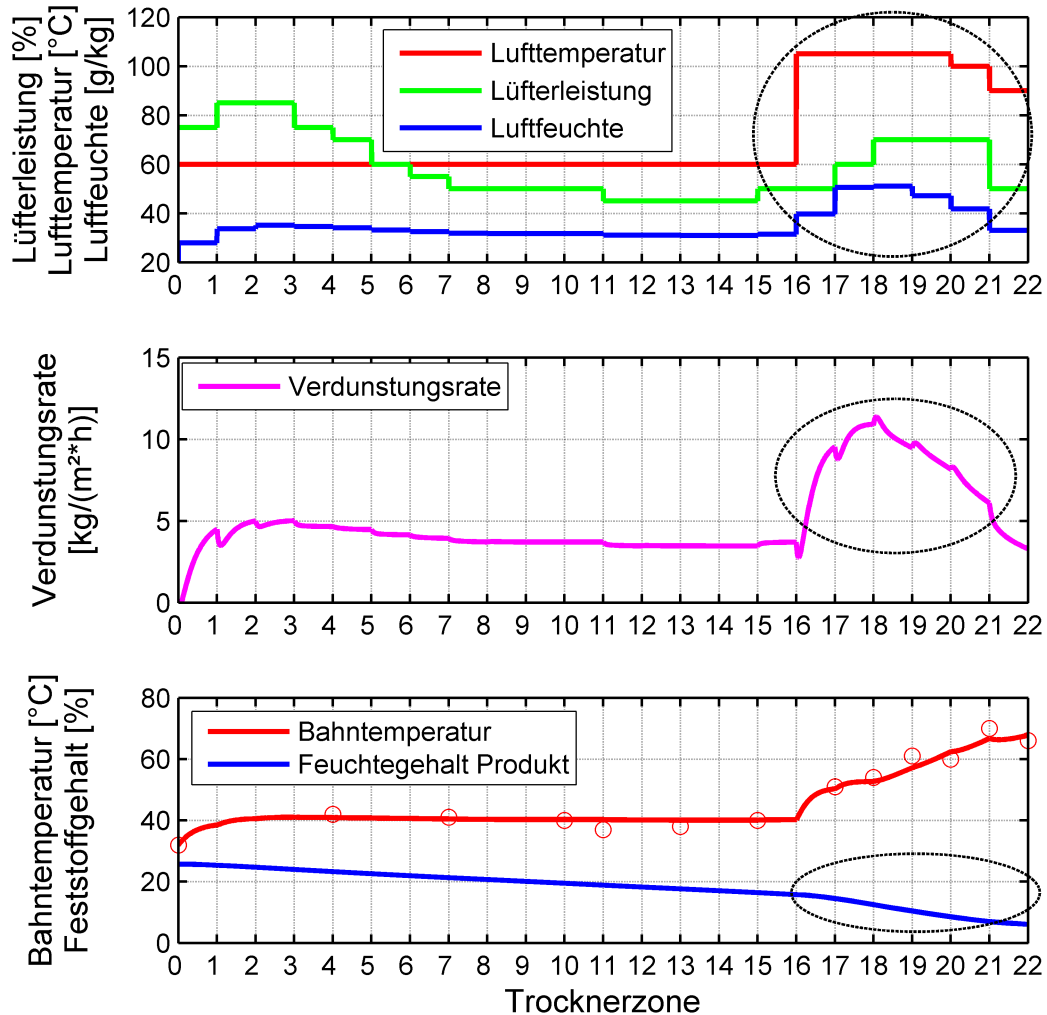


Abbildung 68: Prozessübersicht im optimierten Prozess mikroporöser Strich auf Rohpapier

Zum Abgleich wurde neben der vorgestellten Optimierungsstrategie die Anhebung der Trocknungsleistung in anderen Bereichen getestet. Bei diesen Versuchen zeigte sich, dass schon leichte Anhebungen der Trocknungslufttemperatur, um 5 °C, zu empfindlichen Steigerungen in der Fehlerrate führen und folglich den kritischen Bereich der Produktfeuchte von 40 % bis 15 % bestätigen.

12.5 Ergebnisse und Diskussion

Wie bei der vorhergehenden Betrachtung zu den mikroporösen Strichen auf PE-beschichtetem Papier wurde durch den Einsatz der Simulation eine detailliertere Betrachtung des Trocknungsprozesses möglich. Mit den weiterführenden Überlegungen zum grundsätzlichen Unterschied zwischen den beiden Produkten, wurde die Optimierungsstrategie festgelegt und erfolgreich umgesetzt. Die praktischen Versuchsergebnisse bestätigten hierbei die theoretischen Erwartungen.

13 ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Herstellung von Digital Imaging Papieren für Ink-Jet Photoanwendungen kommt dem Trocknungsprozesses eine besondere Rolle zu. Nach dem Gießen der Farbempfangsschicht ist die Trocknung der letzte Prozessschritt, in dem die Produktqualität beeinflusst werden kann. Maßgeblich werden hier zudem die Produktionskosten, durch die Höhe der notwendigen Investitionen für Beschichtungsanlagen und die Betriebskosten, festgelegt. Die Limitierung für die Produktionsgeschwindigkeit stellt in vielen Fällen die Produktqualität dar. Die Optimierung der Gesamtkosten, das heißt, die Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit bei guter Produktqualität, ist daher für die Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses von herausragender Bedeutung.

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Analyse des Trocknungsvorgangs ein Modell entwickelt. Beschrieben wird hierbei der Wärme- und Stofftransport in der Gas- und der Flüssigphase sowie das Entstehen von trocknungsinduzierten Spannungen, wodurch Produktqualität und Trocknungsbedingungen miteinander verknüpft wurden. Die Modellvorstellungen wurden in ein numerisches Berechnungsprogramm umgesetzt und dienen

für umfangreiche theoretische Trocknungsuntersuchungen, in denen Betriebszustände und Optimierungsstrategien entwickelt werden konnten.

Das Modell für den Wärme- und Stofftransport basiert auf den gängigen Gleichungen zur Beschreibung eines Trocknungsprozesses. Die Vorgänge in der Gasphase wurden hierbei in integraler Weise betrachtet. Der Wärme- und Stofftransport im Produkt hingegen differentiell oder integral. Zur Lösung der parabolischen Differentialgleichungen zweiter Ordnung für den Transport im Produkt, wurde ein Finite Differenzen Verfahren unter der Verwendung einer Koordiantentransformation, für das schrumpfende Berechnungsgebiet, angewendet. Das dabei entstehende lineare Gleichungssystem ist mittels eines Bandmatrizenlösers berechnet worden. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde nach den Beziehungen für Schlitzdüsen modelliert, der Stoffübergang aus der Analogie zwischen dem Wärme- und Stoffübergang. Zur Beschreibung der Transportkinetik wurden für den Stofftransport der Diffusionskoeffizient und der Verlauf der Aktivität als Messwerte aus der Literatur entnommen. Die für die Berechnung der trockenungsinduzierten Spannungen notwendigen Daten wurden in Laborversuchen ermittelt. Die Stoffparameter des Striches wurden aus Biegesteifigkeitsmessungen bei unterschiedlichen Bedingungen gewonnen. Die Herausforderung für diese Messungen lag in der Ermittlung der Festigkeitseigenschaften des Striches bei unterschiedlichen Feuchtegehalten, was durch den sorptiven Gleichgewichtszustand mit der Umgebung realisiert wurde. Da der Strich nicht genügend Eigenstabilität aufwies, mussten die Versuche mit einem Träger vorgenommen werden.

Zum Wärme- und Stofftransport sowie zu den trockenungsinduzierten Spannungen wurden theoretische Sensitivitätsanalysen vorgenommen, um die Schlüsselfaktoren zur Steuerung einzelner Vorgänge während der Trocknung zu identifizieren. Eine sehr wichtige Aufgabe bei diesen Untersuchungen war die Entkopplung der Spannungen im System von der Trocknungsgeschwindigkeit. Die generelle Eignung des Modells wurde anhand von Untersuchungen an einem Labortrockner überprüft. Bei diesen Untersuchungen wurde eine gute Übereinstimmung zwischen dem Labortrockner und den Modelldaten gefunden. Mit den Ergebnissen aus den Sensitivitätsanalysen sind Optimierungsstrategien für bestehende Produktionsprozesse abgeleitet worden. Die Vorgehensweise entsprach: Formulierung der Optimierungsziele, Aufnahme des bestehenden Prozesses, Simulation der Prozessparameter, Identifizierung von Optimierungspotentialen durch Anwendung der Simulation, Umsetzen des optimierten Prozesses in der Produktionsanlage und Beurtei-

lung der Ergebnisse. Auf diesem Weg sind in dieser Arbeit 3 Optimierungen vorgestellt worden, die stellvertretend für 3 Produktgruppen stehen. Der Kernpunkt bei diesen Untersuchungen war die Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Reduzierung der trocknungsinduzierten Spannungen.

Die in den Optimierungsstrategien angeführten Mechanismen basierten zunächst nur auf theoretischen Betrachtungen, konnten aber durch Versuche an Produktionsmaschinen bestätigt werden. Die Produktionsgeschwindigkeiten konnten in vielen Fällen um mehr als 40 % gesteigert werden. Die scheinbar einander gegenläufigen Ziele, Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit und Verbesserung der Produktqualität, wurden voneinander entkoppelt. Zusammenfassend bietet das vorgestellte Modell eine Vielzahl von Möglichkeiten, bestehende Prozesse zu untersuchen. Es hat durch die praktischen Einsätze eine gute Übereinstimmung von Theorie und Praxis demonstriert. Zukünftig kann es als ein Werkzeug zur Übertragung von Produkten vom Labormaßstab auf den Produktionsmaßstab und zur detaillierten Analyse der komplexen Vorgänge bei der Trocknung von verschiedenen Produkten dienen.

Tabellenverzeichnis

1	Überprüfung der numerischen Lösung auf Massenerhaltung	32
2	Parameter Wärmeleitungsrechnung	35
3	Kennzahlen der verwendeten Düsen	38
4	Folienparameter	52
5	Randbedingungen Permeabilitätsmessung	55
6	Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen	55
7	Betriebsbereich Labortrockner	74
8	Versuchsbedingungen	74
9	Trocknungsbedingungen binderbasiertes System	79
10	Prozessparameter	80
11	Trocknungsbedingungen für ein binderbasiertes System im optimierten Prozess	91
12	Optimierte Anlagenparameter	92
13	Ausgangseinstellungen der Lufttemperaturen für einen mikroporösen Strich auf PE-Papier	99
14	Ausgangseinstellungen der Lüfterleistungen für einen mikroporösen Strich auf PE-Papier	99
15	Prozessparameter	100
16	Lüfterleistungen für einen mikroporösen Strich auf PE-Papier im optimierten Prozess	103
17	Lufttemperaturen für einen mikroporösen Strich auf PE-Papier im optimierten Prozess	103
18	Ausgangseinstellungen der Lufttemperaturen für einen mikroporösen Strich auf Rohpapier	107
19	Ausgangseinstellungen der Lüfterleistungen für mikroporösen Strich auf Rohpapier	108
20	Prozessparameter	108
21	Lüfterleistungen mikroporöser Strich auf Rohpapier im optimierten Prozess	111
22	Lufttemperaturen mikroporöser Strich auf Rohpapier im optimierten Prozess	111
23	Konstanten Wärmeleitfähigkeit Gas	126

24	Konstanten Wärmekapazität Gas	127
25	Konstanten dynamische Viskosität	127
26	Konstanten Dichte	128
27	Konstanten Wärmekapazität Fluid	128
28	Konstanten Dampfdruck	129
29	Konstanten Verdampfungsenthalpie	129

Abbildungsverzeichnis

1	Produktaufbau Ink-Jet Photoimaging Papier	2
2	Metalloxidpartikel Herstellung	3
3	Streichmaschine (Coater) mit 12 Schwebetrocknermodulen	4
4	Trocknungskinetik in einem Schwebetrockner	5
5	Stadien der Strichtrocknung 1	6
6	Stadien der Strichtrocknung 2	7
7	Stadien der Strichtrocknung 3	8
8	Illustration des Wärmetransports	15
9	Geometrie Schlitzdüsenfeld	16
10	Illustration einseitiger Stofftransport	19
11	Verlauf der Aktivität einer Wasser/PVOH Lösung	22
12	Luftsystem eines Schwebetrockners, BH-Bilanzhülle	24
13	Massenabnahme in den Trocknungsmodellen	26
14	Gitter definiert durch Orts- und Zeitschritte	29
15	Struktur des Rechenmoduls zum Stofftransport durch Diffusion	30
16	Vergleich der numerischen mit der analytischen Lösung der Diffusionsgleichung bei konst. Diffusionskoeffizienten	33
17	Beispielhafter Verlauf der Bahntemperatur im 2. Trocknungsabschnitt	36
18	Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Feuchtebeladung der Trocknungsluft; $v_{Duese} = 35 \text{ m/s}$	39
19	Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit am Düsenaustritt; $X = 60 \text{ g/kg}$	40
20	Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit des Abstandes Düsenaustritt / Bahn und der Lufttemperatur	40
21	Feuchtebeladung - Temperaturdifferenz	42
22	Feuchtebeladung - Partialdruckgefälle	43
23	Diffusionskoeffizient von Polivinylalkohol in Wasser	44
24	Verlauf der Trocknung einer Wasser-PVOH-Lösung	45
25	Stofftransport im 4. Trocknungsabschnitt	47
26	Porenvolumenverteilung unterschiedlicher Striche	49

27	Knudsendiffusion mit - ohne	50
28	Vorgänge in der Diffusionsschicht	51
29	Illustration der bestrichenen Folien: a - perforierte Folie, b - bestrichene Basisfolie für die Messung, c - Probe für den ersten Messwert im Strich, d - Probe für den zweiten Messwert im Strich	53
30	Druckverlauf in der Meßprobe	54
31	Konvektive Spannung im Trocknungsprozess	56
32	Illustration eines Cracks	59
33	Spannungsaufbau	60
34	Biegeversuch an einem homogenen Träger	61
35	Biegeversuch an einem heterogenen Träger	62
36	Experimentelle Werte des E-Moduls	63
37	Spannungs-Dehnungs Diagramm sprödes Material	64
38	Spannungsverlauf im Strich	65
39	Integraler Mittelwert der Spannung	66
40	Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen Feuchtebelastungen der Trocknungsluft	67
41	Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen Lufttemperaturen	68
42	Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten	69
43	Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen Trocknungsbedingungen	69
44	Verlauf der Spannung bei unterschiedlichen spez. Strichauftragsgewichten	70
45	Probenraum Labortrockner	73
46	Experimentelle Daten Lab Dryer Untersuchung	75
47	Vergleich des Probengewichtes von Simulation und Experiment	77
48	Energieeintrag in einem Trocknungsprozess in Abhängigkeit der Trocknerlänge	80
49	Verlauf der Bahntemperatur	81
50	Verlauf des Verdunstungsmassenstroms	83
51	Wassergehalt im Strich	84
52	Beladungsverläufe im Strich in verschiedenen Abständen vom Trocknerlauf	85
53	Beladungsprofil zum Ende der Trocknung	86

54	Beladungsverläufe im hinteren Bereich der Trocknung	86
55	Viskositätverlauf während der Trocknung	87
56	Energieeintrag im optimierten Prozess	92
57	Verlauf der Bahntemperatur im optimierten Prozess	93
58	Verlauf des Verdunstungsmassenstroms im optimierten Prozess	94
59	Verlauf des Wassergehalts im optimierten Prozess	94
60	Beladungsverläufe im Strich beim optimierten Prozess	95
61	Beladungsprofile zum Ende der Trocknung im optimierten Prozess	96
62	Beladungsverlauf zum Ende der Trocknung im optimierten Prozess	96
63	Viskositätsverläufe im Strich beim optimierten Prozess	97
64	Prozessübersicht des Ausgangsprozesses mikroporöser Strich auf PE-Papier	101
65	Prozessübersicht im optimierten Prozess mikroporöser Strich auf PE-Papier	105
66	Produktaufbau Ink-Jet Photoimaging Papier mit gestrichenem Substrat	107
67	Prozessübersicht des Ausgangsprozesses mikroporöser Strich auf Rohpapier	109
68	Prozessübersicht im optimierten Prozess mikroporöser Strich auf Rohpapier	112

Literatur

- [1] *VDI Wärmeatlas*, volume 8. Auflage. Springer, 1997.
- [2] R. Aust. *Verfahrenstechnische Aspekte der Trocknung beschichteter Materialbahnen*. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 1996.
- [3] H. D. Baehr and K. Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer, New York, third edition, 1998.
- [4] R. B. Bird, W. E. Stewart, and E. N. Lightfoot. *Transport Phenomena*. John Wiley Sons, Inc., second edition edition, 2002.
- [5] H. Blandin, J. David, J. Vedrgnaud, J. Illien, and M. Malizewicz. *Modelling of drying of coatings: effect of the thickness, temperature and concentration of solvent*. *Progr. Org Coatings* 15, 163-172, 1987.
- [6] H. Blandin, J. David, J. Vedrgnaud, J. Illien, and M. Malizewicz. *Modelling the drying process of coatings with various layers*. *J. Coat. Tech.* 59, 27-32, 1987.
- [7] H. Brauer and D. Mewes. *Gesetze für den Stoff und den Wärmeübergang an senkrecht angeströmten Platten*. *Chem. Ing. Tech.* 44, 741-744, 1972.
- [8] R. Cairncross, S. Jeyadev, R. Dunham, K. Evans, L. Francis, and L.E. Scriven. *Modelling an design of an industrial dryer with convective and radiant heating*. *J. Appl. Polym. Sci.*, 58 (8), 1279-1290, 1995.
- [9] R.A. Cairncross. *Science and Technology of Coating Processes: short course presented at the International*. Society for Coating Science and Technology Symposium, Rochester, New York, Sept. 2004.
- [10] R.A. Carincross, PR. Schunk, K.S. Chen, S.S. Prakash, J. Samuel, A.J. Hurd, and C.J. Brinker. *Pore evolution and solvent transport during drying of gelled sol-gel coatings: Predicting springback*. *Drying Technology*, 15(6-8), 1815-1825, 1997.
- [11] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon Press, Oxford, 1959.
- [12] E. Cohen and E. B. Gutoff. *Modern Coating and Drying Technology*. Wiley-VCH, 1992.
- [13] J. Crank. *Diffusion in media with variable properties. Part III Diffusion coefficients which vary discontinuously with concentration*. *Transactions of the Faraday Society*, vol 47, 450-461, 1950.
- [14] J. Crank. *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press, Oxford, second edition edition, 1975.

- [15] J. Crank. *Free and moving boundary problems*. Oxford Science Publications, New York, 1984.
- [16] E. Cussler. *Diffusion: Mass transfer in fluid systems*. Univ. Pr., Cambridge, 1987.
- [17] T.E. Daubert and R.P. Danner. *Data compilation tables of pour compounds*. New York, 1985.
- [18] J. H. Ferziger and M. Peri'c. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 3rd edition edition, 2002.
- [19] P.J. Flory. *Thermodynamics of High Polymer Solutions*. Journal of Chemical Physics, 9, 660-661, 1941.
- [20] L.F. Francis, A.V. McCormick, D.M. Vaessen, and J.A. Payne. *Development and measurement of stress in polymer coatings*. J. of Materials Science 37, 4717-4731, 2002.
- [21] D. Gehrman. *Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur konvektiven Trocknung dünner, ebener Gelatineschichten*. Dissertation TH Darmstadt, 1979.
- [22] D. Gehrman and W. Kast. *Trocknung von Gelen am Beispiel dünner, ebener Gelatineschichten*. VDI-Berichte, No. 391, 590-615, 1980.
- [23] Gnielinski, Mersmann, and Thurner. *Verdampfung, Kristallisation, Trocknung*. vieweg, 1993.
- [24] B. Guerrier, C. Bouchard, C. Allain, and C. Benard. *Drying Kinetics of Polymer Films*. AIChE 44 (41), 791-798, 1998.
- [25] G.D. Hartley and J. Crank. *Some fundamental definitions and concepts in Diffusion processes*. Transaction Faraday society, 45, 801-818, 1949.
- [26] P. Heikkilä. *A Study on the drying process of pigment coated paper webs*. Academic dissertation, ABO Akademi, 1992.
- [27] F. Hensen, W. Knappe, and H. Potente. *Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik I Grundlagen*, volume I. Carl Hanser Verlag München Wien, 1989.
- [28] M.L. Huggins. *Solutions of Long Chain Compounds*. Journal of Chemical Physics, 9, 440-441, 1941.
- [29] J.B. Jones and R.E. Dugan. *Engineering Thermodynamics*. New Jersey, USA 1996.
- [30] S. Ju, L. Duda, and J. Vrentas. *Influence of temperature on the diffusion of solvents in polymers above the glass transition temperature*. Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 20, 330-335, 1981.
- [31] M. Kanzamar. *Simulation der Trocknung gestrichener Papiere*. Dissertation, Universität Darmstadt, 2004.

- [32] J. Krenn, W. Schabel, and M. Kind. *Untersuchung zur Filmtrocknung mit mehreren Lösungsmitteln*. VDI Fachtagung Wärme- und Stofftransport, Stuttgart, März 2007.
- [33] O. Krischer and W. Kast. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer, Berlin, 1978.
- [34] H. Lei, L.F. Francis, W.W. Geberich, and L.E. Scriven. *Stress Deveopment in Drying Fibers and Spheres*. J. of Applied Polymer Science, Vol. 90. 3934-3944, 2003.
- [35] H. Lei, J.A. Payne, A.V. McCormick, L.F. Francis, W.W. Gerberich, and L.E. Scriven. *Stress Development in Drying Coatings*. J. of Appl. Polym. Sci., Vol. 81, 1000-1013, 2001.
- [36] H. Martin. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. *Advances in Heat Transfer*, 13:1-60, 1977.
- [37] E. Meier. *Dimensionslose Darstellung von Trocknungsvorgängen in hygroskopischen Kunststoffen mit feuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten*. Chem.-Ing.-Tech. 1, 20-25, 1970.
- [38] J. Mitrovic. *Stofftransport*. Vorlesungsskript Universität Paderborn, 2005.
- [39] P. Navarri. *Étude du séchage par rayonnement infrarouge - application á un produit capillaro-poreux et á une enduction*. Thèse de doctorat, Univeité Claude Bernard, Lyon, 1992.
- [40] P. Navarri and J. Andrieu. *High-intensity infrared study Part II. Case of thin coated film*. Chem. Eng. Proc. 32, 319-325, 1993.
- [41] M. Okazaki, K. Shioda, K. Masuda, and R. Toei. *Drying mechanism of coated film of polymer solution*. J. Chem. Eng. Jpn. 7, 99-105, 1974.
- [42] J.A. Payne, L.F. Francis, and A.V. McCormick. *The Effects of Processing Variables on Stress Development in Ultraviolet-Cured Coatings*. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 66, 1267-1277, 1997.
- [43] J.A. Payne, A.V. McCormick, and L.F. Francis. *A Sudy of Stress Development in Aqueous Gelatin Coatings*. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 73, 553-561, 1999.
- [44] C. Petersen. *Internal Stress during Film Formation of Polymer Latices*. Langmuir, 15, 7745-7751, 1999.
- [45] S. Polat. *Heat and mass transfer in impingement drying*. Drying Technology 11 (6), 1147-1176, 1993.
- [46] G. Powers and J. Collier. *Experimental modeling of solvent-casting thin polymer films*. Poly. Eng. Sc. 30 (2), 118-123, 1990.

- [47] P.E. Price, S. Wang, and I.H. Romdhane. *Extracting effective diffusion parameters from drying experiments*. AIChE 43, 1925-1934, 1997.
- [48] K. Subba Raju and E. Schlünder. *Heat transfer between an impinging jet and a continuously moving flat surface*. Wärme- und Stoffübertragung 10, 131-136, 1977.
- [49] Y. Sano. *Drying of polymer solution*. Drying Tech. 10 (3), 591-622, 1992.
- [50] Y. Sano and S. Yamamoto. *Calculation of concentration-dependent mutual diffusion coefficient in desorption of film*. J. Chem. Eng. Jap. 23 (3), 331-338, 1990.
- [51] R. Saure. *Zur Trocknung von lösungsmittelfeuchten Polymerfilmen*. Dissertation TH Karlsruhe, 1995.
- [52] R. Saure and V. Gnielinski. *Moisture Measurement by FT-IR-Spectroscopy*. Drying Technology 12, II. 6, 1427-1444, 1994.
- [53] R. Saure and E.U. Schlünder. *Sorption Isotherms for Methanol, Benzene and Ethanol on Polyvinylacetate (PVAc)*. Chem. Eng. Proc. 34, 305-316, 1995.
- [54] W. Schabel. *Trocknung von Polymerfilmen*. Dissertation TH Karlsruhe, 2004.
- [55] H.-R. Schwarz and N. Köckler. *Numerische Mathematik*. Teubner, 5. auflage edition, Juli 2004.
- [56] S. Shojaie, W. Krantz, and A. Greenberg. *Development and validation of a model for the formation of evaporatively cast polymeric films*. J. Mat. Proc. a. Man. Sc. 1, 181-194, 1992.
- [57] G. D. Smith. *Numerical solution of partial differential equations*. 2nd Ed., Clarendon Pr., Oxford, 1979.
- [58] J.S. Vrentas and J.L. Duda. *Diffusion in Polymer-Solvent Systems I*. J. of Polym. Sci., Polymer Physics Edition, 15, 403, 1977.
- [59] G.R. Wagner. *Trocknung lösemittelhaltiger Polymerbeschichtungen*. Dissertation TH Karlsruhe, 2000.
- [60] J.M. Zielinski and B.F. Hanley. *Practical Friction-Based Approach to Modeling Multicomponent Diffusion*. AIChE, 45 (1), 1-12, 2000.

A Stoffkonstanten

A.1 Gasphase

A.1.1 Dichte

Zur Berechnung der Dichte des Lösungsmittels und der trockenen Luft wurde die ideale Gasgleichung herangezogen,

$$\rho_g(T) = \frac{PM}{RT} \quad (\text{A.1})$$

Massen:

Stoff	\tilde{M} <i>kg/kmol</i>
<i>Luft</i>	28,96
<i>H₂O</i>	18,0152

A.1.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit wurde für die einzelnen Stoffe nach [17] berechnet:

$$\lambda_g(T) = \frac{AT^B}{1 + C/T + D/T^2}, [W/(mK)] \quad (\text{A.2})$$

Die Temperatur ist in Kelvin einzusetzen. Die Konstanten können der Tab. 23 entnommen werden

Tabelle 23: Konstanten Wärmeleitfähigkeit Gas

Gas	A	B	C	D
<i>Luft</i>	$2.8720 \cdot 10^{-3}$	$4.8830 \cdot 10^{-1}$	$2.5650 \cdot 10^2$	$-6.4900 \cdot 10^{-3}$
<i>H₂O</i>	$1.0624 \cdot 10^2$	$-8.6810 \cdot 10^{-1}$	$-2.775 \cdot 10^3$	$4.4782 \cdot 10^6$

A.1.3 Wärmekapazität

Die spezifischen Wärmekapazitäten für Luft und Wasser wurden nach den folgenden Polynomen modelliert [29].

$$c_p = R_i (a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4), [kJkg^{-1}K^{-1}] \quad (A.3)$$

Tabelle 24: Konstanten Wärmekapazität Gas

Gas	R_i	a	b	c	d	e
<i>Luft</i>	0.28722	3.721	$-1.874 \cdot 10^{-3}$	$4.719 \cdot 10^{-6}$	$-34.45 \cdot 10^{-10}$	$8.531 \cdot 10^{-13}$
<i>H₂O</i>	0.46152	4.132	$-1.559 \cdot 10^{-3}$	$5.315 \cdot 10^{-6}$	$-42.09 \cdot 10^{-10}$	$12.84 \cdot 10^{-13}$

Die Temperatur stellt den Absolutwert in Kelvin dar.

A.1.4 Dynamische Viskosität

Zur Berechnung der dynamischen Viskosität wurde eine Gleichung aus [17] verwendet:

$$\eta_g(T) = \frac{AT^B}{1 + C/T + D/T^2}, [Pas] \quad (A.4)$$

Die Temperatur ist in Kelvin einzusetzen. Die Konstanten können der Tab. 25 entnommen werden

Tabelle 25: Konstanten dynamische Viskosität

Stoff	A	B	C	D
<i>Luft</i>	$1.4373 \cdot 10^{-6}$	$5.0230 \cdot 10^{-1}$	$1.0800 \cdot 10^2$	–
<i>H₂O</i>	$7.6190 \cdot 10^{-8}$	$9.2758 \cdot 10^{-1}$	$2.1160 \cdot 10^2$	$-4.6700 \cdot 10^3$

A.1.5 Diffusionskoeffizient

Der Diffusionskoeffizient von binären Gemischen bei niedrigen Drücken kann wie folgt berechnet werden [1].

$$D_{12}^o = \frac{10^{-3} T^{1.75} \left(\frac{\tilde{M}_1 + \tilde{M}_2}{\tilde{M}_1 \tilde{M}_2} \right)^{1/2} 1.013}{p \left[(\sum \nu_1)^{1/3} + (\sum \nu_2)^{1/3} \right]^2}, [cm^2 s^{-1}] \quad (A.5)$$

Mit den Diffusionsvolumen ν :

Stoff	ν
<i>Luft</i>	20.1
<i>H₂O</i>	12.7

A.2 Flüssigphase

A.2.1 Dichte

Dichte von Wasser nach [17]:

$$\rho_l(T) = \frac{A}{B[1+(1-T/C)^D]}, [\text{kmol}/\text{m}^3] \quad (\text{A.6})$$

Tabelle 26: Konstanten Dichte

Stoff	A	B	C	D
<i>H₂O</i>	4.6137	$2.6214 \cdot 10^{-1}$	$6.4729 \cdot 10^2$	$2.3072 \cdot 10^{-1}$

A.2.2 Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität des Lösungsmittel wurde wie folgt berechnet:

$$c_{p,l}(T) = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4, [\text{J}/(\text{kmolK})] \quad (\text{A.7})$$

Tabelle 27: Konstanten Wärmekapazität Fluid

Stoff	A	B	C	D	E
<i>H₂O</i>	$5.2634 \cdot 10^4$	$2.4119 \cdot 10^2$	$-8.5085 \cdot 10^{-1}$	$1.000 \cdot 10^{-3}$	–

Temperatur Absolutwert in Kelvin.

A.2.3 Dampfdruck

Der Dampfdruck wurde wie folgt berechnet [17]:

$$p(T) = \exp[A + B/T + C \ln(T) + DT^E], [\text{Pa}] \quad (\text{A.8})$$

Die Temperatur stellt den Absolutwert in Kelvin dar.

Tabelle 28: Konstanten Dampfdruck

Stoff	A	B	C	D	E
H_2O	$7.2550 \cdot 10^1$	$-7.2067 \cdot 10^3$	-7.1385	$4.0460 \cdot 10^{-6}$	2.0

A.2.4 Verdampfungsenthalpie

Die Verdampfungsenthalpie wurde nach der folgenden Beziehung ermittelt [17]:

$$\Delta h_v(T_r) = A(1 - T_r)^{[B+CT_r+DT_r^2+ET_r^3]}, [J/kmol] \quad (\text{A.9})$$

Mit der reduzierten Temperatur

$$T_r = T/T_c. \quad (\text{A.10})$$

(T_c kritische Temperatur)

Tabelle 29: Konstanten Verdampfungsenthalpie

Stoff	A	B	C	D	E	$T_c [K]$
H_2O	$5.7608 \cdot 10^7$	$6.9640 \cdot 10^{-1}$	$-7.7970 \cdot 10^{-1}$	$4.7678 \cdot 10^{-1}$	–	647.29

Die Temperatur stellt den Absolutwert in Kelvin dar.