

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Arbeitskreises Forschung und Lehre der

Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

491

Barbara Sturm

**Einfluss der Führung des Trocknungsprozesses
auf den Trocknungsverlauf und die Produkteigenschaften empfindlicher biologischer Güter**

Dissertation

Witzenhausen 2010

Universität Kassel
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
Fachgebiet Agrartechnik
Prof. Dr. sc. agr. Oliver Hensel

**Einfluss der Führung des
Trocknungsprozesses auf den Trocknungsverlauf und die
Produkteigenschaften empfindlicher biologischer Güter**

Dissertation
zur Erlangung des Grades einer Doktorin
der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) **Barbara Sturm** M.Eng.
aus Schopfheim

2010

Die vorliegende Arbeit wurde am 20.04.2010 vom Fachbereich für Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Agrartechnik der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des Grades einer Doktorin der Agrarwissenschaften angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 09.06.2010

Hauptberichter: Prof. Dr. sc. agr. Oliver Hensel

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Werner Hofacker

Mündliche Prüfung: Prof. Dr. sc. agr. Oliver Hensel

Prof. Dr.-Ing. Werner Hofacker

D120

Copyright 2010

Im Selbstverlag: Barbara Sturm

Bezugsquellen: HTWG Konstanz
Studiengang Verfahrenstechnik
Brauneggerstraße 55
78467 Konstanz

Universität Kassel
Fachgebiet Agrartechnik
Nordbahnhofstrasse 1a
37213 Witzenhausen

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdrucks, sowie jede Art photomechanischer Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben vorbehalten.

All rights reserved, including the right of reproduction of this book or portions thereof in any form whatsoever.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe für Thermische Verfahrenstechnik der HTWG Konstanz. Die finanzielle Förderung erfolgte durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Programmes „Förderung der Erhöhung der Innovationskompetenz mittelständischer Unternehmen“ (PRO INNO II), Förderkennzeichen KF0114104WZ6.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Prof. Dr. sc. agr. Oliver Hensel und Prof. Dr.-Ing. Werner Hofacker für die Anregung und die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Meissner und Herrn Dr.-Ing. Albert Esper für die Durchsicht der Arbeit.

Weiter gilt mein Dank allen meinen Kollegen, den studentischen Hilfskräften und den Mitarbeitern der mechanischen und elektrischen Werkstätten, besonders Herrn Manuel Honsell, sowie den Mitarbeitern des Werkstoffprüflabors.

Frau Heike Eisenhuth und Herrn Reinhard Gronewold möchte ich für die Durchsicht der Arbeit besonders danken. Frau Connie Haag einen herzlichen Dank für die Durchsicht der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Veröffentlichungen. Ein weiterer herzlicher Dank geht an Frau Eva-Maria David und Herrn Martin Hähnlen für ihre geduldige Unterstützung.

Im August 2010

Barbara Sturm

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	LITERATURÜBERBLICK	4
3	TROCKNUNG VON EMPFINDLICHEN PRODUKTEN	10
3.1	Der Trocknungsverlauf	10
3.2	Wärme- und Stofftransport in feuchten Gütern	12
3.2.1	Wärmetransport	12
3.2.2	Stofftransport	13
3.3	Konvektionstrockner	14
3.4	Zustand des Trocknungsmediums	15
4	PRODUKTEIGENSCHAFTEN	16
4.1	Wasseraktivität und Verderbreaktionen	16
4.2	Temperaturempfindlichkeit biologischer Güter	18
4.2.1	Veränderungen an den Zellbestandteilen	18
4.2.2	Nichtenzymatische Bräunung	19
4.2.3	Veränderung des ernährungsphysiologischen Wertes	19
4.2.4	Verlust an aromagebundenen Substanzen	20
4.3	Qualitätsfaktoren	20
4.3.1	Qualitative Abschätzung chemischer Veränderungen während der Trocknung	20
4.3.2	Mechanismen der Farbveränderungen während der Trocknung	21
4.3.3	Mechanismen der Schrumpfung während der Trocknung	21
4.3.4	Wiederbefeuchtungsverhalten	23
4.4	Morphologie eines Apfels	23
4.4.1	Physikalisch-chemische Charakterisierung	23
4.4.2	Beziehung zwischen Frucht- und Zellwachstum	24
4.4.3	Fruchtfestigkeit	24
5	EXPERIMENTELLER AUFBAU UND KALIBRIERUNG	25
5.1	Aufbau der Versuchsanlage	25
5.1.1	Methoden und Messwerterfassung	28
5.1.2	Kompensation der Gewichtsverfälschungen	29
5.1.3	Erfassung der Produkttemperatur	29
5.1.4	Geschwindigkeitsverteilung und Abreißen des Strömungsprofils	29
5.1.5	Taupunkteinstellung	30
5.1.6	Exemplarische Darstellung des Verlaufes der relativen Luftfeuchtigkeit	31
5.1.7	Trocknungstemperatur	32
5.1.7.1	Regelung der Lufttemperatur	32
5.1.7.2	Regelung der Oberflächentemperatur	33
5.1.8	Festlegung der Maximaltemperatur der Luft	33

5.2	Steuerung und Regelungsverhalten des Trockners	33
5.2.1	Lufttemperatur	33
5.2.2	Produkttemperatur	33
5.2.3	Taupunkttemperatur	34
5.2.4	Strömungsgeschwindigkeit der Zuluft	34
5.3	Optische Qualitätsprüfung	35
5.4	Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments)	36
5.5	Auswertung	37
5.5.1	Bildauswertung	38
5.5.1.1	Farbwahrnehmung	38
5.5.1.2	RGB-Farbraum	38
5.5.1.3	L*a*b* Farbraum	39
5.5.1.4	Funktionsweise des Auswerteprogrammes	40
5.5.1.5	Total Colour Difference (TCD)	40
5.5.1.6	Exemplarische Darstellung der Farbverläufe	41
5.5.1.7	Bestimmung der Flächenschrumpfung	42
5.5.2	Statistische Ergebnisauswertung, Modellbildung und Optimierung	43
5.5.3	Schrumpfung und Wiederbefeuchtung	44
5.5.3.1	Zulässigkeit der ermittelten Schrumpfungsdaten	44
5.5.3.2	Signifikanz der ermittelten Wiederbefeuchtungsdaten	46
5.6	Versuchsdurchführung	46
5.6.1	Versuchsgut	46
5.6.2	Vorbereitung	46
5.6.3	Trocknung	47
5.6.4	Endfeuchtegehaltsbestimmung	48
5.6.5	Bilddatenerfassung	48
5.6.6	Streifenlichtprojektion und Rasterelektronenmikroskopie	49
6	ERGEBNISSE	50
6.1	Gut- und Prozessparameter	50
6.1.1	Feuchteverteilung in einem Apfel	50
6.1.2	Einfluss der Scheibendicke auf die Prozessdauer	51
6.1.3	Einfluss des Anfangsfeuchtegehaltes und der Lagerdauer	51
6.1.3.1	Steuerung des Prozesses nach der Temperatur der Trocknungsluft	52
6.1.3.2	Steuerung des Prozesses nach der Temperatur des Produktes	61
6.1.3.3	Diskussion	65
6.2	Steuerung des Prozesses nach der Temperatur der Trocknungsluft	66
6.2.1	Einfluss der Temperatur	66
6.2.2	Einfluss der Luftgeschwindigkeit	71
6.2.3	Einfluss der Taupunkttemperatur	76
6.2.4	Abhängige Effekte	81

6.2.5	Statistische Auswertung	88
6.2.5.1	Trocknungsdauer	89
6.2.5.2	Farbveränderung	90
6.2.5.3	Schrumpfung	91
6.2.5.4	Wiederbefeuchtungsrate	92
6.2.6	Diskussion der Ergebnisse	93
6.2.7	Statistische Optimierung	94
6.3	Steuerung des Prozesses nach der Temperatur des Produktes	97
6.3.1	Einfluss der Temperatur	97
6.3.2	Einfluss der Luftgeschwindigkeit	102
6.3.3	Einfluss der Taupunkttemperatur	107
6.3.4	Abhängige Effekte	111
6.3.5	Statistische Auswertung	120
6.3.5.1	Trocknungszeit	120
6.3.5.2	Farbveränderungen	121
6.3.5.3	Flächenschrumpfung	121
6.3.5.4	Wiederbefeuchtungsrate	122
6.3.6	Diskussion der Ergebnisse	123
6.4	Einfluss der Regelungsstrategie	124
6.4.1	Trocknungsverlauf	124
6.4.2	Trocknungsgeschwindigkeit	126
6.4.3	Temperaturentwicklung	127
6.4.4	Farbveränderung und Schrumpfung	130
6.4.5	Diskussion der Ergebnisse	131
7	DISKUSSION	132
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	143
9	SUMMARY	146
10	LITERATURVERZEICHNIS	149
11	ANHANG	158

Formelzeichen

A	m^2	Probenquerschnitt
A_R	m^2	wärmeübertragende Fläche
A_T	m^2	Querschnitt des Auslasskanals im Trockner
A_Z	m^2	Querschnitt des Einlasskanals
D_D	m^2/s	Diffusionskoeffizient der Dampfdiffusion
D_F	m^2/s	Diffusionskoeffizient der Flüssigkeitsdiffusion (Osmose)
D_K	m^2/s	Diffusionskoeffizient der inneren Dampfdiffusion
\dot{Q}_α	W	Wärmestrom (Verdampfung und Kondensation)
S	-	Flächenschrumpfung
S_{AP}	-	offensichtliche Schrumpfung
SV	-	volumetrische Schrumpfung
TCD	-	Total Colour Difference
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom
V	m^3	offensichtliches Volumen
V_0	m^3	offensichtliches Ausgangsvolumen
WB	-	Wiederbefeuchtungsrate
X	g_W/g_{TS}	Feuchtegrad
X^*	g_W/g_{TS}	Gleichgewichtsfeuchtegrad
X_E	g_W/g_{TS}	Lagerfeuchtegrad
X_{kn}	g_W/g_{TS}	Feuchtegrad am Knickpunkt
Y	kg_W/kg_L	absolute Feuchtebeladung
a_w	-	Wasseraktivität
dt	s	Zeitinkrement
du/ dl	$kg/(kgm)$	Wassergehaltsgradient

dX/dt	kg/(kgs)	Trocknungsgeschwindigkeit
g	m/s^2	Fallbeschleunigung
k	min^{-1}	Geschwindigkeitskonstante der Umsetzung
m_0	kg	Masse zu Beginn der Trocknung
\dot{m}_D	kg/s	Diffusionsstrom des Dampfes
\dot{m}_L	kg/s	Luftmassenstrom
m_R	kg	Masse des rehydrierten Produktes
m_W	kg/s	Diffusionsstrom des Wassers
ρ	-	Anteil der fehlerhaften Einheiten
p_D	Pa	Dampfdruck über der Flüssigkeit
p_S	Pa	Sattdampfdruck des reinen Wassers
p_{tot}	Pa	Gesamtdruck
p_w^*	Pa	Wasserdampfpartialdruck
t	min	Zeit
t_{tr}	min	Trocknungsdauer
Δt	min	Trocknungsdauer
v_L	m/s	Luftgeschwindigkeit
v_T	m/s	Geschwindigkeit in der Trocknungskammer
v_Z	m/s	Luftgeschwindigkeit am Trocknereinlass
x_i	-	Faktor
α	W/m^2K	Wärmeübergangskoeffizient
ε	-	Emissionsgrad
κ	m^2/s	Feuchtigkeitsleitfähigkeit
ρ	kg/m^3	Dichte
ρ_{tr}	kg/m^3	Dichte des Trocknungsgutes
φ	% r.F.	relative Luftfeuchtigkeit
ϑ_F	$^{\circ}C$	Feuchtkugeltemperatur

ϑ_I	°C	Produktinnentemperatur
ϑ_L	°C	Lufttemperatur
ϑ_{KG}	°C	Kühlgrenztemperatur
ϑ_P	°C	Produkttemperatur
ϑ_T	°C	Lufttemperatur in der Trocknungskammer
ϑ_{Tk}	°C	Trockenkugeltemperatur
ϑ_{Tp}	°C	Taupunkttemperatur
ϑ_U	°C	Umgebungstemperatur
ϑ_Z	°C	Lufttemperatur am Einlass
$\Delta\vartheta$	°C	Temperaturdifferenz

Indizes

AS	Apfelscheibe
CA	Controlled Atmosphere
CCD	Charge-Coupled Device
CSV	Comma Separated Values
FI	Faktoren-Interaktion
HMF	5-Hydroxi-Methyl-Furfural
L	Luft
P	Produkt
REM	Rasterelektronenmikroskopie
r. F.	relative Feuchte
TS	Trockensubstanz
W	Wasser
WB	Wiederbefeuchtung

Kurzfassung

Die Konvektionstrocknung ist eine der ältesten Methoden zur Konservierung von Lebensmitteln. Es ist bekannt, dass Agrarprodukte temperaturempfindlich sind. Bei Überhitzung erleiden sie chemische und physikalische Veränderungen, die ihre Qualität vermindern. In der industriellen Praxis wird die Konvektionstrocknung in der Regel auf Grundlage empirisch ermittelter Werte durchgeführt, welche die Produkttemperatur nicht berücksichtigen. Es ist deshalb nicht sichergestellt, ob der Prozess optimal oder auch nur gut betrieben wird.

Inhalt dieser Arbeit ist ein Vergleich der klassischen einstufigen Konvektionstrocknung mit einer Prozessführungsstrategie bei der die Produkttemperatur als Regelgröße eingeführt wird. Anhand der Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Äpfeln werden die beiden Verfahren analysiert, die erhaltenen Ergebnisse miteinander verglichen und daraus optimierte Trocknungsbedingungen abgeleitet.

Die für dieses Projekt entwickelte Prozessanlage erlaubt die simultane Untersuchung sämtlicher wesentlicher Temperaturen, der Gewichtsveränderung und der optischen Qualitätskriterien. Gleichzeitig ist es möglich, entweder die Lufttemperatur oder die Temperatur des Produktes zu regeln, während die jeweils andere Größe als Messwert erfasst wird. Es kann weiterhin zwischen Durch- und Überströmung gewählt werden.

1 Einleitung

Die Güte eines Trocknungsprozesses ist eine Funktion der Trocknungsdauer, des Energieverbrauchs und der Produktqualität. Eine Optimierung der Trocknung muss allen drei Aspekten Rechnung tragen. Die optimalen Anforderungen an Wärmeübertragung und Stofftransport entsprechen nicht immer denen einer optimalen Qualität. Diese Erkenntnis hat dazu geführt, dass sich in den letzten 20 bis 30 Jahren die Schwerpunkte der Forschung stark in Richtung der Qualitätsoptimierung verschoben haben [Mujumdar, 2000].

Der übliche Verarbeitungsablauf zur Produktion getrockneter Agrarprodukte kann grob in die Einzelschritte Sortieren, Waschen, Schälen, Schneiden, chemische und thermische Vorbehandlung, Trocknen und Verpacken untergliedert werden. Die Einzelschritte [Brennan, 2006; Pott et al., 2005] beeinflussen sich gegenseitig teilweise stark. Deshalb müssen alle Prozessschritte einzeln überprüft werden. Eine Vielzahl von Informationen aus unterschiedlichen Disziplinen (Lebensmittelchemie, -biologie, -physik sowie Verfahrenstechnik, Mechatronik, Automatisierungstechnik) muss gesammelt, verknüpft und in entsprechenden Steuer- und Regelstrategien umgesetzt werden.

In der industriellen Praxis werden weitgehend Anlagen verwendet, die optimale Bedingungen für die Wärmeübertragung und den Stofftransport bieten. Die Güte eines industriellen Prozesses zeichnet sich auch durch seine Robustheit aus [Mujumdar, 2007]. In den eingesetzten Trocknern dauert der Prozess in der Regel sehr lange, die Qualität des Produktes ist meist nicht optimal und Energieverbrauch sowie Platzbedarf sind sehr hoch. Viele industrielle Trocknungsprozesse basieren auf teilweise vor Jahrzehnten gefundenen Einstellungen, die empirisch ermittelt worden waren und bei denen nicht sichergestellt ist, ob diese optimal sind. Ein weiteres Problem der traditionellen Trocknung stellen die gewachsenen Ansprüche der Verbraucher an die Eigenschaften eines Produktes dar. Oftmals wird versucht, mit großem Aufwand eine bestehende Anlage hinsichtlich veränderter Anforderungen an die Produktqualität anzupassen. Dies geschieht, wenn überhaupt möglich, meist auf Kosten der Effizienz des Prozesses [Mujumdar, 2007].

Wenn von der Optimierung eines Trocknungsprozesses gesprochen wird, muss zunächst geklärt werden, welche Zielgrößen angestrebt werden. Handelt es sich um eine reine Verbesserung der Produktqualität, oder soll der Prozess gleichzeitig hinsichtlich der Trocknungsdauer und Energieeffizienz verbessert werden? Wird die Trocknung als *Unit Operation* oder Teil des Gesamtprozesses angesehen? In den letzten 20 Jahren hat sich der Ansatz durchgesetzt, die Trocknung als Teil eines Gesamtprozesses anzusehen und die Produktqualität nicht nur durch Optimierung des Trocknungsprozesses, sondern auch aller vor- und nachgelagerten Schritte zu verbessern [Lewicki, 2006].

Gewöhnlich resultiert die Optimierung der Qualität eines Produktes in einer Steigerung der Produktionskosten und des Energiebedarfs. Zusätzliche Kosten oder sogar längere Trocknungszeiten sind jedoch, wenn möglich, zu vermeiden. Deshalb ist es unumgänglich, bei der Optimierung der Produktqualität die technologischen Anforderungen an Anlagen und Prozessführung nicht aus den Augen zu verlieren. Dies setzt ein gutes Verständnis sowohl der Veränderungen, die das Produkt während des Prozesses durchläuft als auch der Verfahrens-, Anlagen- sowie Regelungs- und Steuerungstechnik voraus. Die Optimierung des Trocknungsprozesses durch Verbesserung der Regelungstechnik ist erst seit kurzem Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung [Dufour, 2006]. Es ist mittlerweile anerkannt, dass die Prozessführung und -regelung einen großen Einfluss auf die Produktqualität, den Energieverbrauch und die Trocknungszeit hat. Die gezielte Steuerung von Trocknungsprozessen nach bestimmten erwünschten Produkteigenschaften gewinnt immer mehr an Bedeutung. Vor allem sich schnell ändernde Kundenwünsche an die Produkte erfordern eine möglichst kurze Reaktionszeit der produzierenden Industrie. Daher ist die Kenntnis der Verläufe bestimmter Produkt- und Trocknungsmiteigenschaften bei entsprechenden Prozesseinstellungen essentiell für eine entsprechende Anpassung und Optimierung. Die Energieeffizienz kann zusätzlich durch eine verbesserte Gestaltung des Trockners optimiert werden. Eine Verkürzung der Trocknungszeit wiederum führt in der industriellen Umsetzung zu einer Verringerung der Baugröße bzw. einer Erhöhung des Durchsatzes [Mujumdar & Zhonghua, 2008].

Es ist bekannt, dass biologische Produkte temperaturempfindlich sind und bei Überschreiten gewisser Grenztemperaturen thermisch geschädigt werden können. Trotzdem ist in der industriellen Praxis die Produkttemperatur meist unbekannt und spielt auch in der wissenschaftlichen Forschung nur eine untergeordnete Rolle bei der Untersuchung und Optimierung von Trocknungsprozessen. Wenn jedoch die entscheidende Größe für die Qualität eines Produktes die Temperatur ist, muss diese bei der Trocknung ermittelt und im Bedarfsfall aktiv berücksichtigt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Potentials der aktiven Einbeziehung der Produkttemperatur in die Regelung und Steuerung konvektiver Trocknungsprozesse. Durch die aktive Regelung der Oberflächentemperatur des Trocknungsgutes kann die Produkttemperatur schon in einem frühen Stadium des Prozesses nahe an dessen Beschädigungsgrenze geführt und somit die Trocknung beschleunigt werden. Da die Wärmezufuhr von außen nach innen stattfindet, ist die Temperatur der Oberfläche stets die höchste vorzufindende Temperatur. Deshalb ist eine Schädigung zunächst an der Oberfläche zu erwarten. Sind die Schädigungsgrenztemperaturen für die Oberfläche bekannt, kann diese Strategie angewandt werden, ohne eine thermische Schädigung zu riskieren.

Es soll ein Verfahren entwickelt werden, das die Produkttemperatur als Führungsgröße nutzt. In umfangreichen experimentellen Untersuchungen soll die Auswirkung des Konstanthaltens dieser anstelle der Lufttemperatur auf den Trocknungsverlauf, die Entwicklung der Lufttemperatur und der gemessenen Produkteigenschaften in einem weiten Parameterbereich untersucht werden. In einem weiteren Schritt sollen diese Zusammenhänge für die einstufige Konvektionstrocknung ermittelt werden. Durch einen Vergleich der erhaltenen Ergebnisse sollen die funktionalen Zusammenhänge zwischen Art der Führung des Prozesses und der daraus resultierenden Entwicklung des Trocknungsverlaufes und Produkteigenschaften während des Prozesses ermittelt werden und diese in Beziehung zur Entwicklung der Prozesstemperaturen gesetzt werden. Dazu ist es nötig, alle relevanten Größen nichtinvasiv zu messen. Es müssen leicht messbare, repräsentative Merkmale für den Prozess und dessen Führung sowie Qualitätsmerkmale für das Produkt festgelegt werden.

Im Einzelnen soll eine Laboranlage entwickelt werden, mit der es möglich ist, das Gut entweder im Durchström- oder im Überströmverfahren zu trocknen. Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Taupunkttemperatur und dadurch die relative Feuchte der Luft sollen in einem großen Parameterraum sehr genau eingestellt werden können. Die Anlage soll mit Messtechnik ausgestattet werden, welche die gleichzeitige Aufnahme des Gewichtsverlaufs, sämtlicher relevanter Temperaturen, der Farbveränderungen am Gut und der Schrumpfung zulässt. Weiterhin soll es möglich sein, entweder die Lufttemperatur oder alternativ die Produkttemperatur als Führungsgröße zu nutzen.

Um mit einem vertretbaren Aufwand einen möglichst großen Parameterraum von Strategien, Temperaturen, Luftfechtigkeiten und Strömungsgeschwindigkeiten abdecken zu können, soll die Planung und Auswertung der Versuche mittels statistischer Methoden, des sogenannten Design of Experiments (DoE), durchgeführt werden. Das DoE bietet die Möglichkeit, neben der Ermittlung der Einflüsse der Einzelfaktoren auch kombinierte Abhängigkeiten erfassen zu können, was mit der klassischen Versuchsplanung und Auswertung nicht oder nur bedingt möglich ist [Kleppmann, 2004; Palm, 2008].

Die vorliegende Arbeit soll sich hauptsächlich mit den Einflüssen der Verfahrensführung und der eingestellten Prozessbedingungen auf die thermodynamischen Vorgängen und die daraus resultierenden Veränderungen der qualitätsbestimmenden Eigenschaften des Produktes, vornehmlich am Beispiel des Apfels, beschäftigen. Daraus soll die Rolle der Produkttemperatur für das Verständnis der im Produkt ablaufenden Veränderungen ermittelt werden. Diese Kenntnis eröffnet die Möglichkeit, mit Hilfe der erhaltenen Daten konvektive Trocknungsprozesse anhand sehr begrenzter Untersuchungen gezielt hinsichtlich bestimmter Merkmale zu optimieren.

2 Literaturüberblick

Temperatur, Feuchtegehalt und Geschwindigkeit der Trocknungsluft haben bei der Konvektionstrocknung einen signifikanten Einfluss auf Trocknungskinetik und Qualität eines Produktes. Die meisten biologischen Lebensmittel sind hitzeempfindlich, was zu strukturellen, organoleptischen und ernährungsphysiologischen Veränderungen während der Trocknung bei hohen Temperaturen führt [Crapiste, 2000]. Das Ausmaß der Veränderungen der wichtigsten Qualitätsmerkmale wie Farbe (Pigmente, enzymatische und nichtenzymatische Bräunung) und Nährwert (Antioxidantien, Vitamine) steigt meist deutlich mit zunehmender Temperatur. Die Abhängigkeit der Reaktionskonstanten von der Temperatur legt nahe, dass die Trocknung bei niedrigen Temperaturen einen geringeren Qualitätsverlust verursacht [Ratti, 2009]. Es ist jedoch für viele Produkte bisher nicht geklärt, wo die thermische Beschädigungsgrenze liegt oder ob es abhängig vom erwünschten Produktendzustand mehrere solcher Temperaturen gibt. In Anlage 14 sind die für diese Arbeit wesentlichen Erkenntnisse zusammengestellt.

Die wichtigen Mechanismen des Wärme- und Stoffüberganges bei der Trocknung sind bereits seit längerer Zeit bekannt [Lykow, 1958; Modest, 1993; Krischer & Kast, 1978]. Auch das Sorptionsverhalten, also das Gleichgewicht zwischen der Gutfeuchte und der Feuchte der umgebenden Luft, wurde vielfach untersucht [Beke & Mujumdar, 1995; Gerhards, 2002]. Indessen ist der Zusammenhang zwischen dem Trocknungsverlauf und den daraus resultierenden Veränderungen der qualitätsbestimmenden Eigenschaften nur begrenzt bekannt geworden.

Bei der klassischen Konvektionstrocknung wird in der Regel eine Prozesstemperatur vorgegeben. Dazu wird die Lufttemperatur geregelt und konstant gehalten. Üblicherweise wird dabei auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, ohne die Produkttemperatur zu berücksichtigen. Die zeitliche Veränderung der Produktmerkmale während der Trocknung konnte auf Reaktionen nullter bzw. erster Ordnung zurückgeführt werden [Kröll & Kast, 1989], in der Regel mit der als konstant angenommenen Temperatur des Trocknungsgutes. Mehrere Untersuchungen an Heilkräutern, Obst und Gemüse [Müller, 1992; Bashir, 1998; Sturm & Hofacker, 2007, 2008a] haben jedoch gezeigt, dass sich bei Produkten mit hohen Anfangsfeuchtegraden die Temperatur des Produktes fast während des gesamten Trocknungsprozesses ändert und erst am Ende der Trocknung den Wert der Lufttemperatur annimmt beziehungsweise bei hohen Trocknungstemperaturen sogar deutlich darunter bleibt.

Eine Vielzahl von Untersuchungen beschäftigt sich mit dem Einfluss von Luftgeschwindigkeit und -feuchte auf den Trocknungsverlauf und die erzielbare Qualität im Produkt. Velic et al. (2004) ermitteln bei der Überströmtrocknung von Äpfeln eine Verringerung der Trocknungszeit von 245 min auf 145 min bei

einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 0,6 m/s auf 2,75 m/s. Dieser Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitserhöhung und Verkürzung der Trocknungszeit ist nicht linear. Es konnten klare geschwindigkeitsabhängige Verläufe der Produkttemperatur festgestellt werden, wobei die eingestellte Temperatur von 60 °C in keinem der aufgeführten Fälle erreicht wurde. Kaya et al. (2007) konnten bei der Durchströmtrocknung von Äpfeln durch eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 0,2 m/s auf 0,6 m/s die Trocknungsdauer um circa 7 % von 14,5 h auf 13,5 h reduzieren. Eine Reduktion der relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % auf 40 % resultierte sogar in einer Verkürzung um 51,7 %.

Die Qualität eines biologischen Trocknungsproduktes wird durch eine Vielzahl von biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt [Perera, 2005]. Die bekannten Arbeiten zur Bestimmung ausgewählter Qualitätsmerkmale befassen sich im Wesentlichen mit dem Gehalt an Leitsubstanzen, der Textur und der Farbe. Die meisten Veröffentlichungen über das Trocknungsverhalten von thermisch labilen biologischen Produkten beschäftigen sich nur sehr eingeschränkt mit Qualitätskriterien sowie den unterschiedlichen Einflüssen der Trocknungsmethoden und -bedingungen auf diese Kriterien. Es werden wenige, mit geringem Aufwand ermittelbare Merkmale festgelegt, anhand derer die Produktqualität definiert wird. Dies sind z. B. die Maillard-Reaktion [Kröll & Kast, 1989] und strukturelle Eigenschaften [Hawlander et al., 2006; Aktan, 1990; Beke & Vas, 1994].

Der Verbraucher tendiert dazu, die Farbe eines Produktes mit dessen Geschmack, hygienischer Sicherheit, Haltbarkeit, Nährwert der persönlichen Zufriedenheit bezüglich physikalischen, chemischen und sensorischem Empfinden des Produktes zu assoziieren [Pedreschi et al, 2006]. Die Farbe ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal getrockneter Lebensmittel [Kays, 1991]. Dies ist durch die Beziehung zwischen Farbe, Geschmack und Aroma bedingt [Morris et al., 1953]. Farbveränderungen und Bräunungen von Früchten sind die Folgen einer Vielzahl von Reaktionen wie der Maillard-Reaktion [Resnik & Chirife, 1979; Cornwell & Wrolstad, 1981; Karabulut et al., 2007; Wall & Gentry, 2007] und der Pigmentzerstörung [Abers & Wrolstad, 1979]. Die Trocknung führt zu einer Aufkonzentrierung der gelösten Inhaltstoffe. Bei zuckerhaltigen Produkten wie Äpfeln ist eine Ursache der Bräunung die durch anwesende Fruchtsäuren katalysierte Umsetzung von Glukose und Fruktose zu 5-Hydroxymethyl-Furfural (HMF) [Resnik & Chirife, 1979].

Eine Vielzahl neuerer Veröffentlichungen beschäftigt sich mit der Auswirkung der Trocknungsbedingungen auf die Farbqualität des Endproduktes. Maskan (2006) gibt in seiner Arbeit einen Überblick über aktuelle Forschungsergebnisse im Bereich Farbveränderung während der thermischen Behandlung von Lebensmitteln. Er kommt zu dem Schluss, dass die Qualität des Endproduktes sehr stark vom ausgewählten Verfahren abhängt, es jedoch bei jedem Verfah-

ren zu deutlichen Veränderungen der Farbqualität kommt. Krokida et al. (1998) untersuchten die Kinetik der Farbveränderung einiger Früchte und Gemüsearten während der konvektiven und der Vakuumtrocknung in Abhängigkeit der Trocknungsbedingungen. In beiden betrachteten Fällen konnte für Äpfel eine starke Abhängigkeit der Farbveränderungen von der Trocknungstemperatur ermittelt werden. Bei der Konvektionstrocknung wurde zusätzlich eine starke Abhängigkeit der Werte für die Verhältnisse zwischen Rot und Grün (a) und zwischen Blau und Gelb (b) von der relativen Luftfeuchtigkeit festgestellt. Die Veränderung von a nimmt mit steigender Temperatur zu, während sie bei konstanter Temperatur mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit abnimmt. Die Veränderung von b nimmt mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit drastisch zu, während sie mit steigender Temperatur zunächst zu und später abnimmt. Während auf einem Temperaturniveau von 50 °C die Vakuumtrocknung deutlich bessere Farbwerte liefert als die Konvektionstrocknung, verschiebt sich dieses Verhältnis bei höheren Temperaturen zu Gunsten der Konvektionstrocknung. Bei der Trocknung von Aloe vera [Miranda et al., 2009] lassen sich hingegen keine klaren temperaturabhängigen Tendenzen ermitteln. Bei der Untersuchung von Guaven und Papaya wurden von Hawlader et al. (2006) konträre Ergebnisse für die Konvektions-, Vakuum- und Gefriertrocknung ermittelt. Während bei Guaven der TCD (Total Colour Difference) Wert von 39 für Konvektionstrocknung, 35 für Vakuumtrocknung und 6 für Gefriertrocknung erreichte, lagen diese für Papaya für die Konvektionstrocknung bei 20, die Vakuumtrocknung bei 31 und die Gefriertrocknung bei 35. Dies stimmt mit den Untersuchungen von Müller (1992) an Salbei und Kamille überein. Diese ergaben unterschiedliche produktspezifische Abhängigkeiten der Produktmerkmale von den eingestellten Prozessbedingungen. Während sich bei Kamille die Verläufe der Gehalte von ätherischen Ölen analog zu den Veränderungen der Farbeverläufe entwickelten, konnte bei Salbei schon eine starke Verfärbung auftreten, wenn der Ölgehalt noch sehr hoch war. Müller kommt zu dem Schluss, dass jedes Produkt gesondert untersucht und dessen Trocknung auf dieser Basis optimiert werden muss. In den letzten Jahren setzen sich neben der klassischen Messung der Farbwerte mittels Colorimeter zunehmend einfache Scanner oder CCD (Charge-Coupled Device) Kamera basierte Systeme durch. Diese sind kostengünstig, und es wird eine ausreichende Genauigkeit [Brosnan & Sun, 2004; Lèon et al., 2006; Sturm & Hofacker, 2008b] erreicht. Die Veränderungen, die das Produkt durchläuft, werden nichtinvasiv gemessen. Somit sind die erhaltenen Ergebnisse genauer, da der Prozess zu keinem Zeitpunkt unterbrochen wird.

Eine der wichtigsten physikalischen Veränderungen, die ein Produkt während der Trocknung durchläuft, ist die Reduktion seines Volumens. Die Schrumpfung eines Produktes während der Trocknung hängt stark vom Aufbau des Produktes ab. Im Falle von Obst und Gemüse besteht meist ein annähernd linearer Zusammenhang mit dem Wassergehalt. Ausmaß der Schrumpfung und Grad der Zerstörung der Zellstruktur hängen von der Trocknungsmethode,

der Lufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit ab [Lewicki, 1998]. Die Schrumpfung hat negative Folgen für die Qualität des getrockneten Produktes. Formveränderungen, Volumenverlust und eine erhöhte Härte führen in den meisten Fällen zu einer Verminderung des Wiederbefeuchtungsvermögens und einem negativen Eindruck beim Verbraucher [Mayor & Sereno, 2004]. Sturm & Hofacker (2008b) und Martynenko (2008) stellen nichtinvasive Methoden zur Onlinemessung und -bestimmung der Flächenschrumpfung während der Trocknung vor. Martynenko (2008) hat ein auf die Verarbeitung der erhaltenen Bilder aufbauendes Regelungssystem für die Trocknung von Ginseng entwickelt. Seine Untersuchungen ergaben, dass die Flächenschrumpfung der Wurzeln bis zu einem Feuchtegrad von $X=0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ mit dem Wassergehalt korreliert. Auf dieser Basis baute er ein dreistufiges Regelungssystem auf, bei dem an den für die Entwicklung der Produktqualität signifikanten Punkten $X=1 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ und $X=0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ das Niveau der Trocknungslufttemperatur verändert wird. Um eine Überbräunung des Ginsengs zu verhindern, werden die erhaltenen Farbwerte ebenfalls ausgewertet und daraus die Geschwindigkeit der Farbveränderung bestimmt. Übersteigt diese während der Trocknung mit hoher Temperatur das vorgegebene Niveau, wird sofort die Lufttemperatur reduziert. Diese Art der Prozessregelung ermöglicht die Beschleunigung des Trocknungsprozesses ohne Gefahr zu laufen, das Produkt zu schädigen.

Das Rekonstitutionsverhalten des getrockneten Produktes hängt stark von der Art der vorangegangenen Trocknung, dem Ausmaß der Schrumpfung und den Rekonstitutionsbedingungen ab [Cunningham et al., 2008; McMinn & Magee, 1997]. Ziel ist es, ein Produkt zu erhalten, das den Eigenschaften des frischen Produktes möglichst nahe kommt. Lewicki & Wiczowska (2006) haben nachgewiesen, dass die Konvektionstrocknung bei Äpfeln zwar zur stärksten Schrumpfung und zu einer vergleichsweise geringen Wasseraufnahme führt, das rekonstituierte Produkt jedoch am besten den Eigenschaften des frischen Produktes entspricht.

Während in der Vergangenheit der Fokus der Untersuchungen der mechanischen Veränderungen des Gutes im makroskopischen Bereich lag, werden nun zunehmend auch die mikroskopischen Veränderungen untersucht. Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen ermöglichen eine Aussage über mikroskopische Struktur des Ausgangsgutes und deren Veränderungen während der Verarbeitung [Cunningham et al., 2008].

Die Notwendigkeit der Verbesserung der Trocknungscharakteristik von Lebensmittelprodukten hat einerseits zur Entwicklung von Hybridtrocknungsverfahren oder Kombinationen verschiedener Verfahren geführt. Andererseits wurde die Notwendigkeit zur Erhöhung des Automatisierungsgrades und der Verbesserung der Steuer- und Regeltechnik erkannt.

Ein Ansatz der Prozessoptimierung in der Konvektionstrocknung ist die zeitliche Veränderung der Trocknungslufttemperatur und/oder ihrer Geschwindigkeitsprofile während der Trocknung empfindlicher biologischer Güter. Sie ermöglicht unter anderem eine Reduktion der Qualitätsverluste. Es wurden mehrere Studien zum Einfluss der Art und Dauer der Temperaturrampen für unterschiedliche Lebensmittelprodukte durchgeführt: intermittierende Trocknung von Mais [Zhang & Litchfield, 1991], intermittierende Trocknung von Erdnüssen mit Luftstromunterbrechung [Troger & Butler, 1980], sinusförmige Erhitzung von Weizen in einem Fließbett [Giwacka & Malczewski, 1986], Trocknung von Guavestücken unter isothermen und veränderlichen Luftbedingungen [Chua et al., 2000a].

Chua et al. (2000b) und Chua et al. (2000c) untersuchten die Auswirkung der Veränderung der Lufttemperatur nach unterschiedlichen Vorschriften auf die Qualität von Lebensmitteln. Die Güte des Prozesses wurde anhand der Veränderung der Produktfarbe beurteilt. Sie fanden heraus, dass Farbveränderungen durch die Anwendung unterschiedlicher Temperaturprofile reduziert werden können, wobei am Anfang des Prozesses hohe und später stufenweise abnehmende Temperaturen das beste Ergebnis lieferten. Ho et al. (2002) untersuchten und modellieren die Auswirkung der zyklischen Veränderung der Lufttemperatur mit unterschiedlichen Funktionsformen auf das Trocknungsverhalten biologischer Güter. Sie kommen zu dem Schluss, dass sich diese sowohl auf die Qualität als auch auf die Trocknungskinetik der Produkte, die einer Satztrocknung unterzogen werden, auswirken. Chou & Chua (2003) kommen zu dem Ergebnis, dass für eine intelligente Online-Steuerung des Trocknungsprozesses die Produkttemperatur kontinuierlich erfasst und die Lufttemperatur stufenweise verändert werden müssen, um die Produktqualität zu verbessern. Weiterhin schließen sie aus den vorliegenden Ergebnissen, dass eine Reduktion der Wärmestromdichte gegen Ende des Prozesses eine positive Wirkung auf die Qualität des Endproduktes hat. Sie gehen jedoch davon aus, dass die Produkttemperatur möglichst niedrig gehalten werden muss (max. 40 °C). Durch die sehr niedrigen Lufttemperaturen erreicht die Produktoberflächentemperatur immer sehr schnell die eingestellte Temperatur der Luft. Schultz et al. (2007) untersuchten den Einfluss der Anwendung anfänglich sehr hoher Lufttemperaturen (120 °C und 140 °C) auf die Trocknungskinetik von Äpfeln und verglichen die Ergebnisse mit der einstufigen Trocknung bei 60, 70 und 80 °C. Sie beobachteten nach der Aufwärmphase eine zusätzliche Phase der fallenden Trocknungsgeschwindigkeit. Weiterhin wiesen Äpfel, die zunächst mit 120 °C und dann mit 60 °C getrocknet wurden, über den gesamten Trocknungsprozess eine erhöhte Trocknungsgeschwindigkeit auf.

Die Übersicht über die Verfahren zur Untersuchung des Trocknungsverlaufes und der Veränderungen der qualitätsbestimmenden Eigenschaften getrockneter Agrarprodukte zeigt, dass es bisher nicht gelungen ist, eine Anlagentechnik zu entwickeln, die in der Lage ist, alle relevanten Messgrößen simul-

tan und nichtinvasiv online zu messen. Alle aufgeführten Untersuchungen beschäftigen sich jeweils nur mit Teilbereichen der interessierenden Größen, in der Regel wurden Qualitätskriterien invasiv gemessen, also der Prozess zu deren Bestimmung unterbrochen. Oft wird lediglich der Einfluss bestimmter Prozesseinstellungen auf den Trocknungsverlauf ermittelt [Velic et al, 2004; Srikiatden & Roberts, 2005] und daraus Berechnungsvorschriften für Optimierungsfunktionen abgeleitet. Qualitätskriterien werden in der Regel nur für Teilbereiche der untersuchten Prozesseinstellungen ermittelt, um den Versuchsaufwand zu minimieren. Dadurch ist es kaum möglich, diese auf andere Prozesseinstellungen zu beziehen. Die Produkttemperatur wird von der Mehrheit der Autoren nicht untersucht. Daraus lässt sich schließen, dass deren Wichtigkeit für den Prozessablauf und eventuell daraus mögliche Optimierungsfunktionen als sehr gering eingestuft wird. Veröffentlichungen, die sich unter anderem auch mit der Entwicklung der Produktoberflächen- und Innentemperatur beschäftigen, diskutieren deren Verläufe zwar, es gibt jedoch bisher keine eindeutigen Vorschriften zu deren Einbindung in die Regelung des Prozesses.

Nur Srikiatden & Roberts (2005) untersuchten die Auswirkung der stationären und isothermen Trocknung von Äpfeln auf deren Trocknungsverlauf und maßen dabei zwangsläufig die Produkttemperatur. Bei der isothermen Trocknung verwendeten sie eine Kombination aus Konvektions- und Mikrowellentrocknung. Sie maßen Oberflächen- und Innentemperatur und nutzten diese zur Regelung der Lufttemperatur und der Mikrowellenintensität, wobei die Lufttemperatur und die Mikrowellenleistungsdichte kontinuierlich von Hand nachgeregelt werden mussten. Sie kamen bei der Auswertung der Trocknungsverläufe zu dem Schluss, dass bei der isothermen Trocknung die Wärmeübertragung der limitierende Faktor war und diese deshalb nicht mit dem Fick'schen Gesetz beschrieben werden kann. Während dieser Versuche wurden keine Qualitätsmerkmale bestimmt und somit konnten keine Rückschlüsse auf den Einfluss der geänderten Prozessführung auf den Verlauf der qualitätsbestimmenden Eigenschaften gezogen werden.

Erst wenn die Zusammenhänge zwischen Prozesseinstellungen, Produkttemperaturentwicklung, Trocknungsverlauf und resultierenden Produkteigenschaften während des Prozesses bekannt sind, können auf technisch einfache Weise Prozesse entsprechend der gewünschten Produkteigenschaften gesteuert werden.

Die herausgearbeiteten Hauptmerkmale der mehrstufigen beziehungsweise instationären Trocknung sind kürzere effektive Trocknungszeiten, höhere Trocknungsraten, niedrigere maximale Temperaturen an der Produktoberfläche und im Produkt, eine höhere Produktqualität (verbesserte Farbeigenschaften, höherer Nährwert, verminderte Schrumpfung, Bruchbildung und Sprödigkeit) sowie Einsparungen thermischer Energie [Mujumdar, 2007].

3 Trocknung von empfindlichen Produkten

Obst und Gemüse haben einen sehr hohen Wasser- und einen geringen Nährwertgehalt. Der Fettanteil ist in den meisten Fällen vernachlässigbar. Ausnahmen sind Kartoffeln (0,5 %) und Nüsse (50-65 %). Auch Eiweiß liefern Obst und Gemüse nur in geringem Umfang (Obst circa 0,5-1 %, Gemüse 1-5 %).

Durch Trocknen lässt sich die Haltbarkeit des wasserhaltigen Obstes und Gemüses deutlich verlängern, dabei nimmt jedoch beispielsweise der Vitamingehalt ab. Weit verbreitete Trocknungsverfahren sind die Warmluft- und Kontakt-trocknung sowie die Gefriertrocknung für qualitativ hochwertige Produkte [Gehrmann et al. 2009], wobei die Konvektionstrocknung die breiteste Anwendung findet. Viele Agrarprodukte sind kapillarporöse, hygroskopische Stoffe. Deshalb wird im Folgenden der Trocknungsverlauf solcher Stoffe bei konstanten Trocknungsbedingungen (Temperatur, Geschwindigkeit, Feuchtigkeit der Luft) beschrieben. Dies ist der Standard, an welchem der Einfluss der Einbindung der Produkttemperatur in die Steuerung und Regelung, also die instationären Randbedingungen, gemessen wird.

3.1 Der Trocknungsverlauf

Die Trocknungsverlaufskurve liefert wichtige Informationen über das Verhalten von Gütern während des Prozesses. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Trocknungsgeschwindigkeit und der mittleren Gutfeuchte. Sie wird als wesentliche Größe für die Konzeption von Trocknungsanlagen herangezogen.

Das Trocknungsverhalten hygroskopischer Stoffe unterscheidet sich von dem nichthygroskopischer Stoffe grundsätzlich dadurch, dass sie nicht auf den Feuchtigkeitsgehalt Null getrocknet werden können, sondern nur auf die Gleichgewichtsfeuchtigkeit X^* , die entsprechend den Sorptionsisothermen des Gutes der relativen Feuchtigkeit der Luft und deren Temperatur zugeordnet ist. Ansonsten ähnelt der Trocknungsverlauf dem der nichthygroskopischen Stoffe.

In Bild 1 sind die charakteristischen zeitlichen Trocknungsverläufe, die daraus ermittelten Trocknungsverlaufskurven eines kapillarporösen, hygroskopischen und eines nichthygroskopischen Stoffes dargestellt. Der hygroskopische Stoff verhält sich bei hohen Gutfeuchten nichthygroskopisch. In diesem Zusammenhang wird auch von überhygroskopischer Feuchte gesprochen. Im Bereich niedriger Gutfeuchten verhält sich der Stoff jedoch hygroskopisch.

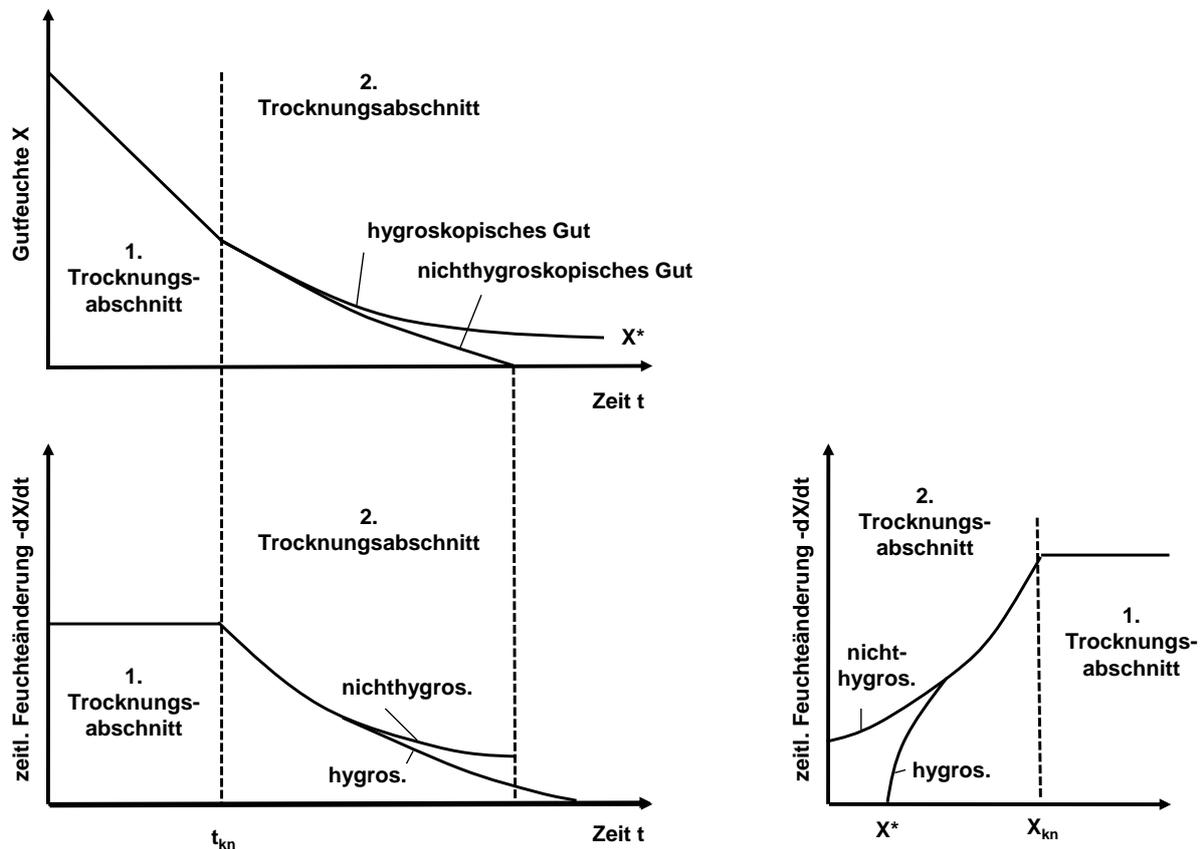


Bild 1. Gutsfeuchte abhängig von der Zeit (oben); zeitliche Feuchteveränderung abhängig von der Zeit (links unten) und abhängig von der Gutsfeuchte (rechts unten) [Mersmann et al., 2005]

Im *ersten Trocknungsabschnitt* stellt sich sehr schnell ein scheinbarer Beharrungszustand ein. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass sich der abgegebene Massenstrom und die Guttemperatur an der Gutoberfläche zeitlich nicht ändern. Dabei liegt die Guttemperatur etwas unterhalb der Kühlgrenztemperatur, was bedeutet, dass das thermodynamische Verhalten der Gutoberfläche dem einer freien Flüssigkeitsoberfläche ähnelt [Krischer & Kast, 1978].

Solange die Kapillarkräfte groß genug sind, die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Inneren des Trocknungsgutes nachzuführen, bleibt dieser Zustand aufrechterhalten. Der Beharrungszustand endet mit einem Knick in der Trocknungsverlaufskurve, wenn die Fasersättigung oder auch Knickpunktfeuchte X_{kn} an der Gutoberfläche erstmals unterschritten wird.

Dies lässt sich folgendermaßen erklären: In kleineren Poren (feinen Kapillaren) wirken aufgrund stärkerer Meniskenkrümmungen der Porenflüssigkeit größere kapillare Zugkräfte als in größeren Poren (größere Kapillaren). Die kleinen Kapillaren ziehen während des Trocknungsvorganges Flüssigkeit aus den größeren, die sich nach und nach entleeren. Ist die maximale hygroskopische Feuchte erreicht, bilden sich in den noch gefüllten Kapillaren derart gekrümmte Menisken aus, dass sie eine Druckabsenkung bewirken. Dies führt zu einer Verringerung des für die Verdunstung wirksamen Druckes vom Satt-

dampfdruck auf einen wesentlich geringeren Partialdruck. Dadurch verringert sich der an das Trocknungsmedium abgegebene Massenstrom ebenfalls. Dies ist durch den Knick in der Trocknungsverlaufskurve in Bild 1 deutlich zu erkennen [Mersmann et al., 2005].

Im *zweiten Trocknungsabschnitt* zeigt das Gut sowohl nichthygroskopisches als auch hygroskopisches Verhalten. Dieser zweite Abschnitt dauert an, bis auch im Kern des Trocknungsgutes die maximale hygroskopische Feuchte erreicht ist. An diesem Punkt des Trocknungsprozesses weist der zeitliche Verlauf der Trocknungskurve einen zweiten Knickpunkt auf. Dieser ist in der Regel nicht so markant, wie in Bild 1 dargestellt. Er ist durch einen Wendepunkt in der Trocknungsverlaufskurve gekennzeichnet.

Im *dritten Trocknungsabschnitt*, der so genannten Endtrocknung, verhält sich das Trocknungsgut über den ganzen Querschnitt hygroskopisch. In den entleerten und nun luftgefüllten Poren liegt ein im Vergleich zum Sattdampf niedrigerer Partialdruck an. Das damit verbundene Dampfdruckgefälle bewirkt eine Flüssigkeitsverdunstung und eine Diffusion des Dampfes in Richtung des Feuchtegefälles [Dietl, 1994]. Damit kommt mit der Dampfdiffusion ein weiterer Mechanismus ins Spiel, der sich mit der kapillaren Flüssigkeitsleitung überlagert. Im Bereich sehr geringer Gutfeuchten wird der Stofftransport in der flüssigen Phase mehr und mehr durch molekulare Bindekräfte unterdrückt. Somit kann in den luftgefüllten Poren die Dampfdiffusion als entscheidender Transportmechanismus angenommen werden. Hat sich im Trocknungsgut die Gleichgewichtsfeuchte X^* eingestellt, geht die Trocknungsgeschwindigkeit gegen Null. Die Gleichgewichtsfeuchte ist abhängig vom Zustand des Trocknungsmediums und vom Sorptionsverhalten des Trocknungsgutes.

3.2 Wärme- und Stofftransport in feuchten Gütern

3.2.1 Wärmetransport

Strömt ein Fluid über die Oberfläche eines Körpers, bildet sich an der Feststoffoberfläche eine Strömungs- und Temperaturgrenzschicht. Für den durch Konvektion übertragenen Wärmestrom kann nach Newton mit der wärmeübertragenden Fläche A_R und der Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta$ zwischen der gemittelten Temperatur der Feststoffoberfläche und der des Trocknungsmediums folgende Beziehung angesetzt werden:

$$\dot{Q}_\alpha = \alpha \cdot A_R \cdot \Delta \vartheta$$

Gl. 1

Der Wärmeübergangskoeffizient α berücksichtigt dabei sämtliche Wärmeübertragungsmechanismen zwischen dem Trocknungsmedium und dem Trocknungsgut.

Durch seinen Feuchtegehalt wird die Wärmeleitfähigkeit eines porigen Stoffes in zweierlei Hinsicht beeinflusst:

- In den kapillaren Räumen bilden sich zusammenhängende Flüssigkeitshäute bzw. -röhren aus. Die Flüssigkeit hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit als trockene Luft in den Poren, dadurch wird die Wärmeleitung im Stoff durch eine zusammenhängende Flüssigkeitshaut erhöht.
- In den luftgefüllten Poren zwischen flüssigkeitsbenetzten Wänden stellt sich mit dem Temperaturgefälle ein Dampfdruckgefälle ein, auf Grund dessen eine Diffusion des Dampfes stattfindet.

Die Wärmeleitfähigkeit eines feuchten Stoffes wird durch alle Einzelercheinungen des Energietransportes beeinflusst. Die Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe variiert in dem Bereich, der die Trocknungstechnik interessiert ($\leq 100\text{ °C}$), so stark, dass die Einflüsse, welche die Leitfähigkeit der trockenen Stoffe bestimmt, meist völlig in den Hintergrund treten.

3.2.2 Stofftransport

In Analogie zum Wärmeübergang findet beim Stoffübergang der Transport eines diffundierenden Stoffes von einer Feststoffoberfläche in ein bewegtes Medium oder umgekehrt statt.

Einseitige Diffusion

Der in der Trocknungstechnik interessierende Fall der Diffusion ist dadurch gekennzeichnet, dass von der Flüssigkeit, die an der Oberfläche verdunstet, eine Diffusion des Dampfes ausgeht, während die Luft nicht durch die Flüssigkeitsoberfläche wandern kann. Folglich ist die Geschwindigkeit der Luft v_L überall Null. Da aber in der Luft ein Teildruckgefälle vorhanden ist, muss stets Luft entgegen dem Dampf diffundieren. Dies hat zur Folge, dass sich die Dampfdiffusion mit einer Ausgleichsströmung überlagert, die den Diffusionsstrom der Luft kompensiert ($\dot{m}_L=0$). Die Dampfmenge im Ausgleichstrom ist dann gleich dem Diffusionsstrom \dot{m}_D , der Dampf entsprechend der örtlichen Konzentration p_D/p_{tot} aufgenommen hat [Dietl, 1994].

Bei der Beurteilung der Möglichkeiten, die Dampfbewegung in porigen Gütern zu beeinflussen, muss man sich zunächst darüber klar werden, welcher Mechanismus die Bewegung von Flüssigkeiten, Dampf und unter Umständen Luft bewirkt.

Im kapillarporösen Gut tragen alle Transportformen zum Feuchtigkeitstransport bei, wobei man die einzelnen Transportphänomene als Summanden auffassen kann. In Abhängigkeit vom Wassergehaltsgradienten gilt folglich:

$$\dot{m}_W = -A \cdot \kappa \cdot \rho_{\text{tr}} \cdot \frac{du}{dl} \quad \text{Gl. 2}$$

Die summarische Feuchtigkeitsleitfähigkeit κ ist die Summe der Koeffizienten der einzelnen Stofftransportformen im kapillarporösen Gut:

$$\kappa = \kappa_W + D_k + D_F + D_D \quad \text{Gl. 3}$$

Die summarische Feuchtigkeitsleitfähigkeit hängt vor allem vom jeweiligen Wassergehalt ab. Die prinzipielle Abhängigkeit wurde von Lykow (1958) analysiert. Danach überwiegt bei sehr großen Wassergehalten der reine Flüssigkeitstransport nach den Gesetzen der Flüssigkeitsdiffusion (Osmose). Sobald sich der Flüssigkeitsspiegel als Meniskus in Makrokapillaren zurückzieht, beginnt der Transport durch Dampfdiffusion, welcher wegen der geringeren Dichte des Dampfes gegenüber der Flüssigkeit ein Absinken der Transportintensität zur Folge hat. Der Feuchtigkeitstransport unter dem Einfluss des Wassergehaltsgradienten erreicht mit geringer werdendem Wassergehalt ein Minimum. Der Wiederanstieg rührt daher, dass der Dampfdruck, die eigentliche Ursache des kapillaren Dampftransportes, über die Sorptionsisotherme stark vom Wassergehalt beeinflusst wird. Bei sehr niedrigen Wassergehalten wird die Sorptionsisotherme wieder steiler, dadurch sinkt sowohl der Einfluss des Wassergehaltes auf den Dampfdruck als auch die Feuchtigkeitsleitfähigkeit [Christen, 2005].

3.3 Konvektionstrockner

Bei der Konvektionstrocknung strömt ein heißes Gas über oder durch das feuchte Gut. Gut und Gas treten dadurch in einen innigen Kontakt zu einander und können im Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom zueinander geführt werden.

Bei Gleichstrom kommt das feuchte Frischgut gleich zu Beginn mit dem heißen, trockenen Gas zusammen. Gleichstromtrockner werden angewandt, wenn das trockene Gut gegen hohe Temperaturen empfindlich ist, das ange-trocknete Gut keine hohen Trocknungsgeschwindigkeiten erträgt, bzw. eine gleichmäßige Gutfeuchte angestrebt wird.

Bei Gegenstrom trifft das feuchte Frischgut auf das bereits abgekühlte und befeuchtete Abgas. Die Wärmeübertragung ist anfangs nur moderat. Über den gesamten Trocknungsprozess betrachtet, kann der Wärmeübergang an das Gut gleichmäßiger und effizienter erfolgen als bei Gleichstrom. Am Ende der Trocknung erreicht das Gut eine Temperatur, die nahe der heißen Frischluft liegt. Gegenstrom wird angewandt, falls das getrocknete Gut eine nur geringe Restfeuchte aufweisen darf, das Gut hygroskopisch ist, das feuchte Gut keine hohe Trocknungsgeschwindigkeit erträgt und eine hohe Endtemperatur aus-hält.

Bei Kreuzstrom durchdringt die heiße Frischluft das Gut vertikal zu dessen Bewegungsrichtung. Hier kann sowohl feuchtes als auch getrocknetes Gut direkt mit der heißen, trockenen Luft zusammenzutreffen. Kreuzstromtrocknung wird angewandt, wenn das Gut jederzeit eine hohe Trocknungsgeschwindig-

keit erträgt, im trockenen Zustand wärmeunempfindlich ist oder eine hohe Trocknungsgeschwindigkeit verlangt wird.

Die größte Bedeutung bei Trocknung von Obst kommt Kammer- und Bandtrocknern zu. Die Lufttrittstemperatur liegt dabei im Regelfall zwischen 50 und 75 °C. Ein Kammer- oder Hordentrockner ist ein satzweise betriebener Mehrzwecktrockner. Er besteht aus einer wärmegeämmten Kammer, einem Gebläse, einer Heizeinheit und Horden. Das stückige Gut ist auf feststehenden, übereinander angeordneten Drahtgeflecht- oder Siebplattenhorden ausgebreitet. Abhängig von Bauart und Betrieb kann die Trocknungsluft entweder von unten durch die Horden strömen oder alternativ das Trocknungsgut überströmen. Ein Teil der feuchten Luft wird über Abluftklappen abgeblasen, während der überwiegende Teil im Umluftbetrieb zurück in den Trockner geführt wird.

3.4 Zustand des Trocknungsmediums

Feuchte Luft ist eine Mischung aus trockener Luft und Wasserdampf. Beim Trocknen ändert sich zwar die Wasserdampfmenge in der feuchten Luft, jedoch nicht die Masse trockener Luft.

Die relative Feuchtigkeit einer realen Luft schwankt immer zwischen 0 und 100 %. Der Sättigungsdampfdruck nimmt exponentiell mit der Temperatur zu. Bei einer Temperaturerhöhung sinkt die relative Luftfeuchtigkeit bei gleichbleibender Feuchtebelastung ab. Parallel dazu vergrößert sich das Trocknungsvermögen der Luft. Umgekehrt sinkt das Trocknungsvermögen, wenn die Luft abkühlt und/oder die Feuchtebelastung steigt.

Der Zusammenhang zwischen absoluter Feuchtebelastung und relativer Luftfeuchtigkeit lautet:

$$Y = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_w^*}{(p_{\text{tot}} - \varphi \cdot p_w^*)} \quad \text{Gl. 4}$$

Die spezifische Enthalpie feuchter Luft setzt sich additiv aus den Enthalpien der trockenen Luft und des Wasserdampfes in der Luft zusammen [Christen, 2005; Meersmann, 2005].

4 Produkteigenschaften

4.1 Wasseraktivität und Verderbreaktionen

Lebensmittel sind natürliche Erzeugnisse, die mit wenigen Ausnahmen (Wasser, Salze) pflanzlichen oder tierischen Ursprungs sind. Alle Lebensmittel enthalten eine große Zahl von Stoffen, die als Ganzes den ernährungsphysiologischen Wert eines Erzeugnisses ausmachen. Trotz ihrer Vielfalt lassen sie sich chemisch gesehen wenigen Stoffen oder Stoffgruppen zuordnen.

Der Bestandteil, der in allen frischen Lebensmitteln in der höchsten Konzentration vorliegt, ist Wasser. Kröll & Kast (1989) geben eine Übersicht der mittleren Wassergehalte einiger für die Trocknungsindustrie relevanter Lebensmittel. Die Anwesenheit von Wasser in Lebensmitteln bestimmt in großem Maß deren Qualität und Genussfähigkeit. In getrockneten Lebensmitteln bestimmt der Wassergehalt Art und Ausmaß der meisten Verderbreaktionen und damit die Lagerfähigkeit eines Produktes.

Feuchte kommt in Lebensmitteln selten als reines, freies Wasser vor. Es ist in vielfältiger Form an die Trockensubstanz des Lebensmittels gebunden (Oberflächenkräfte, Kapillarkräfte, Lösung etc.). Wegen der komplexen Natur der Lebensmittel ist es in der Praxis schwierig, die verschiedenen Bindungsformen des Wassers gegeneinander abzugrenzen und quantitativ zu bestimmen. Deshalb wird eine Hilfsgröße, die so genannte Wasseraktivität, eingeführt [Kröll & Kast, 1989].

Die Wasseraktivität a_w ist ein Maß für frei verfügbares Wasser in einem Material. Sie ist definiert als Quotient aus dem Wasserdampfdruck über einem Material (p_D) und dem Sattdampfdruck des reinen Wasser (p_S) bei einer bestimmten Temperatur:

$$a_w = \frac{p_D}{p_S} \quad \text{Gl. 5}$$

Der a_w -Wert ist ein wichtiges Maß bezüglich der Haltbarkeit von Lebensmitteln, da Mikroorganismen, die potentiell schädlich sein könnten (Verderbniserreger), für Stoffwechselaktivitäten freies Wasser benötigen. Bei Mangel an freiem Wasser werden die Wachstumsprozesse von Mikroorganismen verlangsamt, empfindliche können gar abgetötet werden.

Der mikrobiologische Verderb, verursacht durch Bakterien, Hefen und Schimmelpilze, tritt nur bei hohen Wasseraktivitäten des Produkts auf und wird bei Wasseraktivitäten unterhalb $a_w = 0,6$ vollständig unterbunden (Bild 2). Der enzymatische Verderb ist bei hohen Wasseraktivitäten besonders stark ausgeprägt, wird jedoch im Gegensatz zum mikrobiologischen Verderb bei niedrigen und sehr niedrigen Wasseraktivitäten nicht vollständig unterbunden. Die nicht-

enzymatische Bräunung hat im Bereich mittlerer Wasseraktivitäten ihre höchste Umsetzungsgeschwindigkeit. Bei sehr hohen und sehr niedrigen Wasseraktivitäten tritt sie kaum in Erscheinung. Der qualitative Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt bzw. der Wasseraktivität eines Lebensmittels und einigen unerwünschten Verderbreaktionen ist in Bild 2 dargestellt.

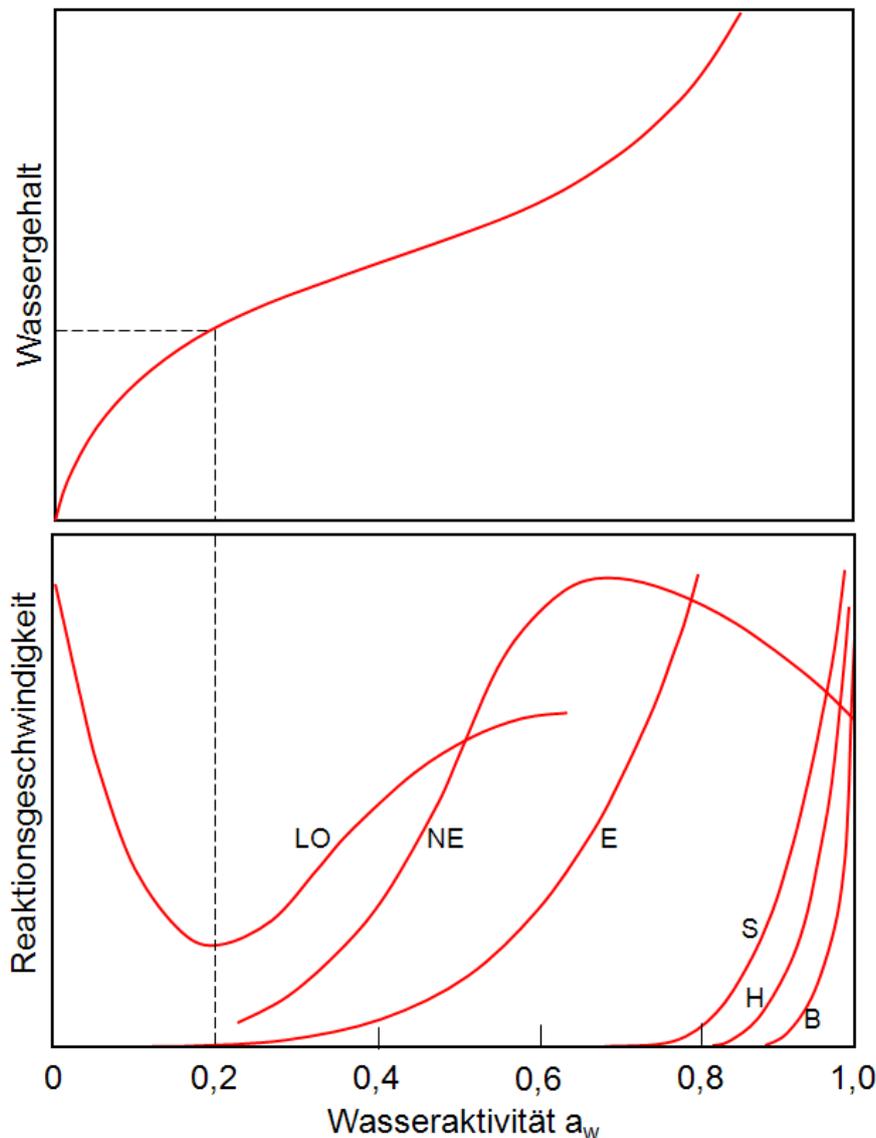


Bild 2. Stabilitätsdiagramm. LO Lipidoxidation, NE nichtenzymatische Bräunung, E enzymatische Reaktionen, S, H, B Verderb durch Schimmelpilze, Hefen, Bakterien [Labuza et al., 1972]

Der für die Stabilität eines Produktes optimale Wassergehalt, auf den das Produkt getrocknet werden sollte, ist dort gegeben, wo die Summe der verschiedenen bei einem Erzeugnis überwiegenden Verderbreaktionen ein Minimum annimmt. Dieser Wassergehalt stimmt in vielen Fällen zahlenmäßig mit dem so genannten BET-Punkt (Brunauer-Emmett-Teller-Theorie) der Sorptionsisothermen des Produkts überein, sodass die Kenntnis des Wasserdampfsorptionsverhaltens eines Produktes es gestattet, Stabilitätsprobleme bei der Trocknung, Verpackung und Lagerung einschätzen und bewerten zu können.

Folgende Faktoren beeinflussen die mikrobiologische Qualität getrockneter Produkte [Gehrmann, 2009]:

- Mikrobiologische Beschaffenheit des Rohmaterials (physiologischer Zustand)
- Produktvorbehandlung (Schälen, Schneiden, chemisch und thermisch)
- Hygienische Bedingungen während der Zwischenlagerung (zwischen Vorbehandlung und Trocknung)
- Produkttemperatur während der Trocknung
- Trocknungsdauer und Wassergehalt des getrockneten Produktes

4.2 Temperaturempfindlichkeit biologischer Güter

Es gibt kaum ein Gut, das sich bei der Trocknung nicht in einigen Eigenschaften wandelt. Ändern können sich die äußere Form, die Größe und die Anordnung der makroskopischen sowie der mikroskopischen Teile. Ferner können sich die kolloidalen Teile sowie die Zusammensetzung der Moleküle ändern.

Die Aufhebung des ursprünglich im Rohmaterial vorliegenden ausgewogenen Verteilungszustandes der Inhaltsstoffe bei der Trocknung, meist verbunden mit erhöhten Temperaturen, verursacht eine Reihe qualitätsmindernder chemischer und physikalischer Veränderungen im Gut wie Verlust an wertgebenden Inhaltsstoffen, Zerstörung der Zellen, vermindertes Wiederbefeuchtungsvermögen etc. [Miranda et al., 2009; Timoumi et al., 2007; Santos & Silva, 2008]. Der Ablauf dieser Veränderungen wird durch lokale Aufkonzentrierungen gelöster Stoffe sowie den Zutritt von Sauerstoff in das Innere des Gutes begünstigt. Für eine, die Produktqualität schonende, Führung von Trocknungsprozessen ist die Kenntnis der Mechanismen und Vorgänge erforderlich, die letztlich zur Schädigung des Produktes führen. Weiterhin ist die Kenntnis der Schädigungsgrenze (kritische Temperatur) des Gutes nötig.

4.2.1 Veränderungen an den Zellbestandteilen

Bei pflanzlichen Erzeugnissen laufen wichtige, die Qualität mitbestimmende Veränderungen in den Zellwänden und im Zytoplasma ab [Bai et al., 2002; Lewicki & Pawlack, 2003; Mayor et al., 2005]. Gefordert wird, dass nach einer Trocknung beim rekonstituierten Material der Zellverband weitgehend erhalten bleibt und das Zytoplasma in der Lage ist zu quellen. Bei unsachgemäßer Führung des Trocknungsprozesses (zu hohe Guttemperaturen) löst sich der Zusammenhalt der Zellen bei der Rekonstitution. Es treten stark vergrößerte Zellzwischenräume auf, deshalb wird der ursprüngliche Quellzustand nicht mehr erreicht. Die Beeinträchtigung des Quellvermögens, das sich nicht unbedingt in einem erniedrigten Wassergehalt des rekonstituierten Produktes äußern muss, beeinflusst in erster Linie die sensorischen Eigenschaften des Gutes. Die Textur des Gutes wird schwammig, der Geschmack wässrig. Ähnliche Auswirkungen auf das Quellvermögen und damit auf die sensorischen Eigen-

schaften rekonstituierter Produkte hat die Kristallisation von Polysacchariden (Stärke, Zellulose) in den Zellen pflanzlicher Produkte [Rowland, 1980].

4.2.2 Nichtenzymatische Bräunung

Durch die Aufkonzentrierung gelöster Kohlehydrate und Proteine bzw. Proteinbausteine (Aminosäuren) kann es unter anderem zu Reaktionen zwischen reduzierenden Zuckern (insbesondere Aldosen) und Aminosäuren kommen. Selbst moderate Wärmebehandlung kann zur Maillard-Reaktion während des Prozesses führen. Dabei werden Proteine geschädigt, Aminosäuren wie Lysin, L-Arginin und L-Histidin gehen verloren. Gerade der Verlust von Lysin ist wegen seiner ernährungsphysiologischen Bedeutung entscheidend [Fennema, 1985]. Die im Falle der Aldosen gebildeten Amadori-Verbindungen sind sensorisch nicht feststellbare primäre Reaktionsprodukte der Maillard-Reaktion. Sie können sich bereits während der Trocknung, jedoch auch später unter ungünstigen Lagerbedingungen, in unangenehm schmeckende Abbau- und Bräunungsprodukte umwandeln [Kröll & Kast, 1989; Awuah et al., 2007; Baltes, 2007].

4.2.3 Veränderung des ernährungsphysiologischen Wertes

Der Verlust an wertgebenden Inhaltsstoffen ist eine Funktion aus Temperatur, Feuchtegehalt, Prozessdauer und der Anwesenheit von Katalysatoren [Rovedo & Viollaz, 1998]. Die meisten in der Literatur angegebenen Hinweise bezüglich der Schädigung von Proteinen während eines Trocknungsprozesses stützen sich auf die chemisch-analytische Bestimmung des verfügbaren Lysins, das in der Ernährungsphysiologie häufig als Indikator für das Ausmaß von Proteinschädigungen herangezogen wird.

Vitamine gehören zu den hitzeempfindlichen Bestandteilen in Lebensmitteln. Die Vitaminzersetzung während der Wärmebehandlung ist kein einfacher Prozess und hängt stark von der Anwesenheit anderer Agentien wie Licht, Sauerstoff sowie ihrer Wasserlöslichkeit ab. Weiterhin wird die Vitaminzersetzung durch den pH-Wert beeinflusst und kann durch vorhandene chemische Komponenten, Metalle, andere Vitamine und Enzyme katalysiert werden [Lewis & Heppell, 2000]. Als besonders wärmeempfindlich gelten die fettlöslichen Vitamine A (in Gegenwart von Sauerstoff), D, E und Betakarotin sowie die wasserlöslichen Vitamine C, B₁ (Thiamin), B₂ (Riboflavin) in saurer Umgebung, Nicotinsäure, Pantothensäure und Biotin [Ryley & Kajada, 1994]. Der Vitamin-C-Verlust von Nichtzitrusfrüchten ist während der Wärmebehandlung am höchsten [Fennema, 1985].

Zur Beurteilung des Verlustes an Vitaminen während der technischen Verarbeitung wird am häufigsten der Ascorbinsäuregehalt der Produkte herangezogen [Miranda et al., 2009; Timoumi et al., 2007; Santos & Silva, 2008; Rovedo & Viollaz, 1998].

4.2.4 Verlust an aromagebundenen Substanzen

Inhaltsstoffe, die das Aroma eines Stoffes prägen, sind im Allgemeinen leichter flüchtig als Wasserdampf. Trocknungsvorgänge sind dadurch stets mit einem ausgeprägten Verlust von aromagebundenen Substanzen verbunden [Boudhrioua et al., 2003; Hawlader et al., 2006]. Die Verluste sind im ersten Trocknungsabschnitt am stärksten, da während dieses Prozessabschnitts die Substanzen ungehindert zur Oberfläche diffundieren können. Aromastoffe diffundieren im Allgemeinen in wässrigen Lösungen von Kohlenhydraten sowie in amorphen Kohlenhydraten langsamer als Wasser bzw. sie werden von amorphen Kohlenhydraten mit erniedrigter Wasseraktivität gebunden. Durch gezielte Führung des Trocknungsvorganges kann eine verbesserte Aromaretention insbesondere von flüssigen Produkten erreicht werden. Durch Einstellung einer sehr hohen Trocknungsgeschwindigkeit zu Beginn des Prozesses wird an der Oberfläche des zu trocknenden Gutes eine „Trockenhaut“ ausgebildet. Durch diese Schicht mit erniedrigtem Wassergehalt diffundieren die im Allgemeinen großen Aromamoleküle wesentlich langsamer als die Wassermoleküle [Thijssen, 1979]. Dadurch wird eine selektive Retention von Aromabestandteilen erzielt.

4.3 Qualitätsfaktoren

4.3.1 Qualitative Abschätzung chemischer Veränderungen während der Trocknung

Die Qualität eines getrockneten Lebensmittels wird, wie dargestellt, durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die unter Umständen hinsichtlich der Prozessführung zu unterschiedlichen Forderungen führen können und somit nicht immer miteinander vereinbar sind. Eine bestmögliche Erhaltung von Zellverband und Rekonstitutionseigenschaften von Zellbausteinen pflanzlicher Erzeugnisse erfordert eine Trocknung bei niedrigen Temperaturen [Vega-Galvez et al., 2009]. Zum Erhalt des Aromas hingegen muss zumindest am Anfang der Trocknung mit relativ hohen Temperaturen gearbeitet werden [Thijssen, 1979]. Ähnliche, sich teilweise gegenseitig ausschließende Bedingungen können für andere Inhaltstoffgruppen formuliert werden. So muss beispielsweise zur Unterdrückung der Maillard-Reaktion die Temperatur am Ende der Trocknung so niedrig wie möglich liegen [Miranda et al., 2009], während sie für eine optimale Vitamin-C-Erhaltung am Ende der Trocknung relativ hoch sein sollte [Kröll & Kast, 1989]. Im zu trocknenden Lebensmittel sind neben den Hauptbestandteilen meist eine große Anzahl unbekannter Begleitprodukte in häufig wechselnder Konzentration vorhanden. Diese Substanzen können den Verlauf von qualitätsbestimmenden Reaktionen sehr nachhaltig beeinflussen. Eine quantitative Vorhersage über mögliche Umsetzungen während einer Trocknung ist daher sehr schwierig. Erschwerend kommt hinzu, dass der Wassergehalt und auch die

Temperatur innerhalb eines trocknenden Gutes große Unterschiede aufweisen können.

4.3.2 Mechanismen der Farbveränderungen während der Trocknung

Die Farbe eines getrockneten Produktes hängt direkt mit der Trocknungszeit, dem Trocknungsverfahren und der Temperatur des Trocknungsmediums zusammen. Weiterhin beeinflussen Art, Herkunft und Reifegrad des Produktes sowie die Vorbehandlung die erreichbare Farbqualität [Kröll & Kast, 1989; Brennan, 2006].

Die Farbveränderungen werden durch enzymatische und nichtenzymatische Reaktionen an der Oberfläche und Pigmentzerstörung (v. a. Karotinoide und Chlorophyll) ausgelöst und hängen nicht mit dem Wassergehalt des zu trocknenden Gutes zusammen [Mujumdar, 2000, Maskan, 2006].

Dabei wird das Chlorophyll über die Zwischenstufe Pheopytin in Pyropheophytin umgesetzt, während die Karotinoide von 5,6-Exposiden in 5,8-Exposide isomerisiert werden, die weniger farbintensiv sind. Anthocyanine werden in braune Pigmente umgewandelt [Awuah et al., 2007]. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Stabilität von Pigmenten gegen physikalische oder chemische Bedingungen.

Tabelle 1. Stabilität von Pigmenten gegen physikalische oder chemische Bedingungen [Bennion, 1980]

Pigment	Farbe	Auswirkung Säureeinwirkung	Auswirkung Baseeinwirkung	Anhaltende Wärmebehandlung
Chlorophyll	Grün	Olivgrün	intensiviert Grün	Olivgrün
Karotinoide	Gelb, Rot, Orange, Pink	weniger intensive Farbe	kaum Effekt	Farbe weniger intensiv
Anthocyanine	Rot, Lila, Blau	Rot	Lila oder Blau	kaum Effekt
Betalaine	Lila-Rot, manche Gelb	kaum Effekt	kaum Effekt	blass bei Ausbluten der Pigmente aus Gewebe
Anthoxantine	Weiß, Farblos	Weiß	Gelb	Dunkel bei überhöhter Temperatur

4.3.3 Mechanismen der Schrumpfung während der Trocknung

Natürlich gewachsene Lebensmittelsysteme sind stark heterogene Materialien, die als dreidimensionale Festkörpermatrizen dargestellt werden können, welche große Mengen an Flüssigkeit enthalten. Ihre Struktur besteht üblicherweise aus Biopolymeren. Die partikuläre Struktur des Materials und seine mechanischen Eigenschaften im Gleichgewichtszustand definieren das Volumen und legen Größe und Form fest. Wird dem System durch Trocknung Wasser entzogen, entstehen Spannungen, die zur Schrumpfung oder zum Kollaps der inneren Zellstrukturen führen [Lewicki & Pawlack, 2003; Lewicki & Wiczowska, 2006; Mayor & Sereno, 2004].

Die Schrumpfung beeinflusst das Trocknungsverhalten wegen der Änderung der freien Oberfläche und auftretenden Spannungen im Gut. Sie beeinflusst den Diffusionskoeffizienten [Suarez & Viollaz, 1991] und die Wärmeleitfähigkeit des Produktes, Letzteres v. a. gegen Ende der Trocknung [Balaban, 1989]. Es gibt einen einfachen Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Schrumpfung und der Menge an entzogenem Wasser [Ratti, 1994; McMinn und Magee, 1997]. Die Schrumpfungsgeschwindigkeit verringert sich gegen Ende der Trocknung.

Der Einfluss der Temperatur des Trocknungsmittels ist abhängig vom betrachteten Temperaturspektrum. Für viele Versuchsgüter gilt, dass das Ausmaß der Schrumpfung mit zunehmender Temperatur zunimmt. Wird jedoch eine kritische Temperatur überschritten, kann es durch auftretende Oberflächenverhärtungen zu einer Stabilisierung der äußeren Struktur kommen, selbst wenn die innere Struktur kollabiert [Mayor & Sereno, 2004], die Diffusion des Wassers durch die verhärtete Schicht jedoch wird erschwert. Lewicki & Jakubczyk (2004) haben nachgewiesen, dass die Schrumpfung von Äpfeln mit steigender Temperatur grundsätzlich sinkt und dieser Effekt an der Temperaturgrenze lediglich verstärkt wird. Es werden drei Arten von Schrumpfung unterschieden:

Offensichtliche Schrumpfung

Die offensichtliche Schrumpfung während der Trocknung wird beschrieben als Quotient des Volumens nach der Trocknung zum Volumen vor der Trocknung:

$$S_{ap} = \frac{V}{V_o} \quad \text{Gl. 6}$$

S_{ap} ist die offensichtliche (englisch: „*apparent*“) Schrumpfung, V ist das offensichtliche Volumen bei einem bestimmten Feuchtegehalt und V_o das offensichtliche Ausgangsvolumen.

In manchen Fällen wird die Schrumpfung auch als prozentuale Änderung des offensichtlichen Ausgangsvolumens beschrieben:

$$SV = 1 - \frac{V}{V_o} \quad \text{Gl. 7}$$

Isotrope Schrumpfung

Die isotrope Schrumpfung beschreibt die einheitliche Schrumpfung eines Gutes in alle Richtungen. Die Schrumpfung der meisten Früchte und Gemüsearten bei der Trocknung wird als isotrop angenommen. Die Schrumpfung von Äpfeln wird in der Literatur in der Regel als isotrop angegeben. Prothon et al. (2003) geben eine Übersicht von Modellen, die das Schrumpfungsverhalten von Äpfeln beschreiben.

Anisotrope Schrumpfung

Anisotrope Schrumpfung beschreibt die nicht einheitlich in alle Richtungen verlaufende Größenänderung. Sie tritt bei der Lebensmitteltrocknung wegen der fehlenden vollkommenen Elastizität sehr häufig auf. Bei der Trocknung von Fisch oder Meeresfrüchten beispielsweise verläuft die Schrumpfung parallel zu Muskelfasern auffallend anders als senkrecht dazu [Balaban & Pigott, 1986; Rahman & Potluri, 1990]. Dissa et al. (2008) beobachten für Mangos unterschiedliche Trocknungsverhalten in alle Raumrichtungen, wenden jedoch ungeachtet dessen ein Modell für isotrope Schrumpfung an.

4.3.4 Wiederbefeuchtungsverhalten

Der Grad der Wasseraufnahme eines getrockneten Gutes ist ein wichtiger Qualitätsparameter. Theoretisch sollte das getrocknete Gut wieder genau soviel Wasser aufnehmen können wie das Ausgangsprodukt enthalten hatte, vorausgesetzt, dass sich der Zellaufbau während der Trocknung nicht verändert hat. Jedoch haben Art der Porenstruktur und mechanische Eigenschaften des getrockneten Gutes einen starken Einfluss auf die Wiederbefeuchtung [Mujumdar, 2000]. Der Grad der Wasserwiederaufnahme ist also ein Indikator für Zellzerstörung während der Trocknung [Cunningham et al., 2008]. Das Wiederbefeuchtungsvermögen hängt stark von der Art der Trocknung und den Prozessbedingungen ab.

Die Wiederbefeuchtungsrate wird bestimmt aus dem Gewicht der wiederbefeuchteten Probe und dem ursprünglichen Gewicht:

$$WB = \frac{m_R}{m_0} \quad \text{Gl. 8}$$

Das gebildete Verhältnis erlaubt eine Aussage über die Qualität des Trocknungsprozesses bezogen auf strukturelle Veränderungen der Probe.

4.4 Morphologie eines Apfels

4.4.1 Physikalisch-chemische Charakterisierung

Im Mittel besteht ein Apfel aus circa 85 % Wasser, 14 % Kohlenhydrate, 2,4 % Ballaststoffen, 0,3 % Proteinen und 0,2 % Lipiden. Aufgrund der Sorte, des Reifegrades, des Anbaugebietes sowie ackerbaulicher und Umwelteinflüssen entstehen Schwankungen der Anteile der einzelnen Komponenten [Ackermann et al., 1992]. Die natürliche Schwankungsbreite des Wassergehaltes erntereifer Äpfel beispielsweise liegt zwischen 80,4 und 90 % oder anders ausgedrückt: 4,1 g_W/g_{TS} und 9 g_W/g_{TS} [Kröll & Kast, 1989].

Etwa 75 % der in einem Apfel enthaltenen Kohlenhydrate sind Zucker: Fruktose (etwa 6 %), Glucose (2,4 %) und Saccharose (2,0 %). Apfelsäure ist mit

0,3-1 % die vorherrschende organische Säure. Der Säureanteil eines Apfels hängt von Sorte, Reifegrad und Umwelteinflüssen während des Wachstums und der Lagerung ab. [Ackermann et al. 1992].

4.4.2 Beziehung zwischen Frucht- und Zellwachstum

Die Größe einer Frucht wird von der Zellzahl, dem Zellvolumen und der Zelldichte bestimmt. Während der Entwicklung nimmt der Volumenanteil des Kortex an der Frucht auf etwa 73 % zu, während der Anteil des Kernhausbereiches auf etwa 24 % zurückgeht [Bain & Robertson, 1951].

Allgemein sind die Zellen in großen Früchten länger und voluminöser und haben größere Flächen als in kleinen Früchten. Fruchtgröße und Reifungszustand können zum Erntezeitpunkt stark variieren [Krüger, 1986].

Die Beziehung zwischen Frucht- und Zellgröße ist sortenspezifisch und aufgrund von Umwelteinflüssen variabel. In erster Linie ist die Zellgröße von der Assimilatversorgung abhängig, was durch Ausdünnungs-, Schnitt-, Beschattungs- und Düngeversuche belegt wurde. Deshalb spielt letztendlich auch die Position des Apfels im Fruchtstand, am Trieb und am Baum eine Rolle bei seiner Ausbildung [Hund & Stösser, 1984]. Nährstoffversorgung und Witterung während der Zellteilung und -streckung sind ebenfalls maßgebend für die Abhängigkeit der Fruchtgröße von der Zellgröße.

4.4.3 Fruchtfestigkeit

Die Fruchtfestigkeit nimmt mit Fortschreiten des Reifungsprozesses aufgrund des Abbaus der Mittellamellen und des Umbaus der Zelle [Prasanna et al., 2007] stetig ab. Diese Abnahme geht auch während der Lagerung weiter. Die Fruchtfestigkeit gilt als Merkmal, mit dessen Hilfe die Textureigenschaften einer Frucht am einfachsten quantifiziert werden können. Die Festigkeit erntereifer Früchte ist ein Merkmal, das aufgrund seiner guten Korrelation zu subjektiven Kriterien wie Knackigkeit geeignet ist, die Fruchtqualität zu beschreiben [Brennan et al., 1977; Wills et al., 1980].

5 Experimenteller Aufbau und Kalibrierung

5.1 Aufbau der Versuchsanlage

Die Laboranlage zur Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Einzelschichten besteht aus dem Trocknerturm und den Mess-, Regel- und Klimatisierungseinrichtungen. Bild 3 zeigt eine schematische Darstellung des Trockners.

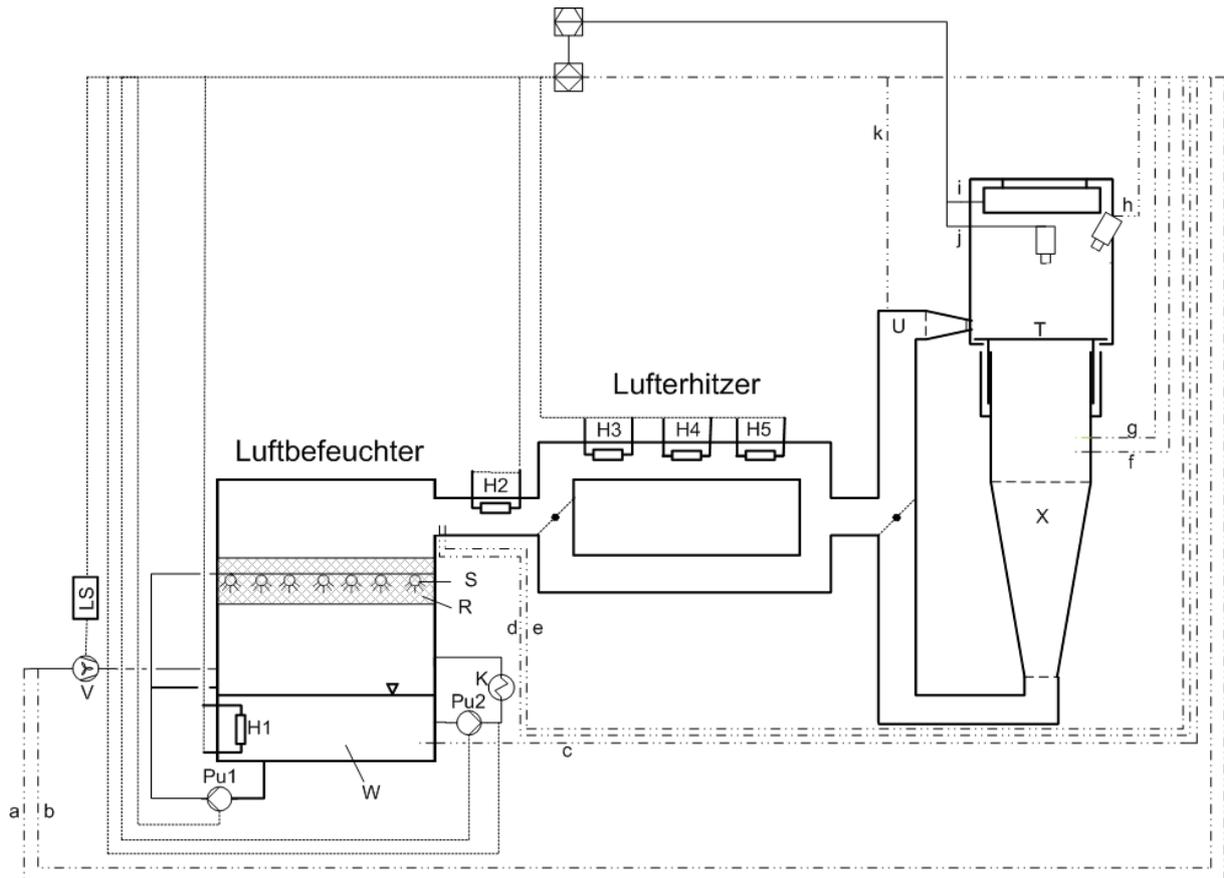


Bild 3. Schema des Labortrockners

a:	Temperatur Umgebungsluft	H2-H5:	Luftheizregister
b:	Luftgeschwindigkeit	K:	Kaltwassersatz
c:	Wasserbadtemperatur	LS:	Leistungssteller
d:	Trockenkugeltemperatur	Pu1:	Pumpe Primärkreislauf
e:	Feuchtkugeltemperatur	Pu2:	Pumpe
f:	Temperatur Durchströmung	R:	Raschigringschüttung
g:	Differenzdruckmessung	S:	Sprühdüsen
h:	Produkttemperatur	T:	Trocknungskammer
i:	Gewicht	U:	Überströmeinheit
j:	Bilddaten	V:	Ventilator
k:	Temperatur Überströmung	W:	Wasserbad
H1:	Wasserheizregister	X:	Durchströmeinheit

Die Trocknungsluft wird mit einem Radialgebläse (V) über eine Messleitung angesaugt. In der Messleitung wird die Geschwindigkeit der angesaugten Luft mittels Hitzdrahtanemometer (b) und deren Temperatur mittels Pt-100 (a) ge-

messen. Diese Größen werden gemeinsam mit der Lufttemperatur im Trockner (f, k) als Eingangsgrößen für die Regelung der Luftgeschwindigkeit verwendet (siehe Kapitel 5.2.4). Die Luftgeschwindigkeit im Trockner kann zwischen 0,1 und 2,2 m/s bei Durchströmung und 0,5 bis 6 m/s bei Überströmung bezogen auf den freien Ausströmquerschnitt stufenlos eingestellt werden. Der Volumenstrom wird mit einem Leistungssteller (LS) eingestellt.

Vom Gebläse strömt die Luft in den Luftbefeuchter. Das zur Befeuchtung notwendige Wasser wird dem Trinkwassernetz entnommen. Der Luftbefeuchter besteht aus einem Wasserbad mit circa 60 l Wasser (W), Sprühdüsen (S) und einer Füllkörperschüttung (R). Das Wasser kann durch elektrische Widerstandsheizungen (H1) mit einer maximalen Leistungsaufnahme von 31 kW und einer Kältemaschine (K, 8 kW) zwischen 4 °C und 75 °C temperiert werden. Es wird in einem ersten Kreislauf über Pu1 aus dem Bad angesaugt und entweder in die Sprühdüsen oder über eine abzweigende Leitung direkt ins Wasserbad zurückgefördert. Durch die direkte Rückleitung dieses Teilstroms ergibt sich eine bessere Zirkulation im Wasserbad. In einem zweiten Kreislauf wird das angesaugte Wasser (Pu2) über den Wärmetauscher der Kältemaschine (K) geleitet und direkt in das Wasserbad zurückbefördert. Über die Sprühdüsen (S) erfolgt die Verteilung des Wassers in der Raschigringschüttung (R). Das Wasser rieselt durch diese Füllkörperschüttung, befeuchtet deren Oberflächen und tropft anschließend in das Wasserbad. Die Luft tritt unterhalb der Schüttung in den Befeuchter ein und durchströmt die Schüttung im Gegenstrom zum Wasser. Die große spezifische Oberfläche der Schüttung stellt sicher, dass die Luft in ausreichenden Kontakt mit dem die Füllkörper benetzende, Wasser kommt, um die Luft zu sättigen. Die Wasserbadtemperatur entspricht hierbei der Taupunkttemperatur und wird mit einem Pt-100-Messwiderstand (c) im Zulauf zum ersten Wasserkreislauf gemessen. Zur Überprüfung der tatsächlichen Temperatur und Feuchte der Luft sind am Übergang zwischen Luftbefeuchter und Luftheritzer zwei Pt-100-Messfühler angebracht (d, e). Der erste Messfühler (d) misst dabei die Trockenkugeltemperatur, während der zweite (e) die Feuchtkugeltemperatur misst. Zur psychrometrischen Messung nach Assmann ist das Messelement (e) mit einem Watteüberzug versehen und wird mit temperiertem Wasser aus einem Infusionsschlauch kontinuierlich befeuchtet. Die Feuchtkugeltemperatur entspricht der Kühlgrenztemperatur, sie ist die niedrigste Temperatur, die sich durch Verdunstungskühlung erreichen lässt. Dabei stehen Wasserabgabe der feuchten Oberfläche und das Wasseraufnahmevermögen der umgebenden Atmosphäre im Gleichgewicht. Aufgrund der Verdunstungskälte liegt die Feuchtkugeltemperatur, abhängig von der relativen Feuchte der Luft, unterhalb der Lufttemperatur. Die Temperaturabsenkung ist dabei umso größer, je trockener die Luft ist. So kann aus der Temperaturdifferenz die Luftfeuchte bestimmt werden [Grassmann et al., 1997].

Dem Luftbefeuchter ist ein zweistufiger elektrischer Luftherhitzer mit insgesamt vier Heizeinheiten und einer maximalen Leistungsaufnahme von 40 kW nachgeschaltet. Zur Durchführung der Einsichtversuche werden die Module H3 und H4 verwendet und geregelt. Vom Luftherhitzer strömt die Luft in den Trocknungsturm (T).

Bei den Überströmversuchen tritt die Luft in einen Quellkasten, der von rund auf rechteckig übergeht (Bild 4), ein. Sowohl Eintritt als auch Austritt sind mit feinmaschigen Siebgeweben versehen, um eine Vergleichmäßigung der Luftströmung zu erreichen. Der Einfluss der induzierten Luftströmung ist bei der gewählten Positionierung der Proben (Bild 13) vernachlässigbar. Die Temperaturmessung der Trocknungsluft erfolgt mit einem Pt-100-Messwiderstandes (k). Die Temperaturmessung der Oberflächentemperatur erfolgt über ein Pyrometer (h), das fest in der Anlage installiert ist und ein analoges Signal an die SPS ausgibt. Abhängig von der Art der Versuche – Trocknung mit der Lufttemperatur bzw. der Produkttemperatur als Führungsgröße – wird entweder das Signal des Pt-100-Messwiderstandes am Trocknerausgang oder das des Pyrometers als Istwertgeber für die Regelung verwendet.

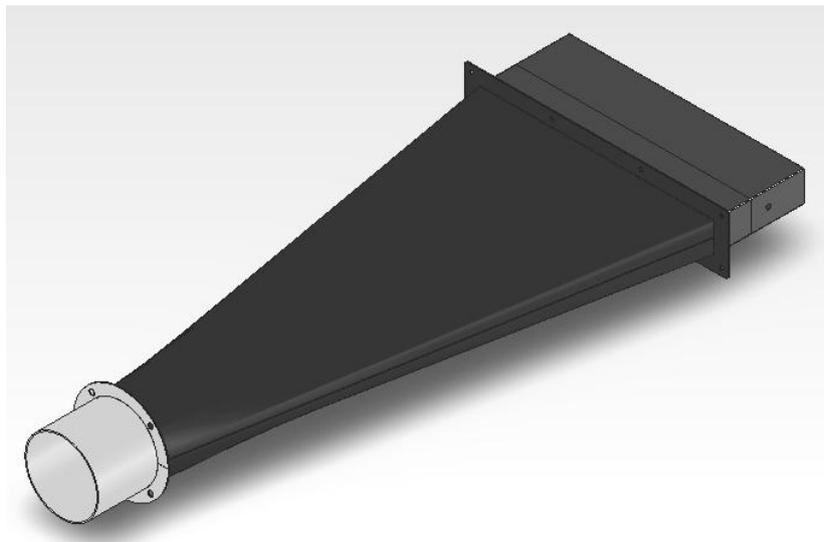


Bild 4. Quellkasten für Überströmversuche, Anschlussstutzen (links), Übergang (Mitte), Rechteckkanal mit Einbauten (rechts)

Bei den Durchströmversuchen strömt die klimatisierte Luft von unten in einen zunächst konischen Quellkasten (X), der in einen zylindrischen Teil übergeht. Der Einlass sowie der Quellkasten selbst sind mit Siebgeweben versehen, um durch einen zusätzlichen Druckabfall die Ungleichmäßigkeit der Geschwindigkeitsverteilung im Trockner und somit Schwankungen des zur Gewichtsbestimmung nötigen Überdrucksignals auszugleichen. Der anstehende Überdruck, bzw. der Differenzdruck zwischen Quellkasten und Umgebung wird mit einem Druckmessumformer (g) gemessen. Die Luft durchströmt anschließend das Trocknungsgut von unten.

Die Gutprobe wird bei Durchströmversuchen auf ein fest installiertes Siebge- webe mit einem Durchmesser von 30 cm gebracht. Bei Überströmversuchen wird das Gut auf ein rechteckiges Sieb gelegt. Die Probenmasse beträgt circa 150 g. Diese Probengröße stellt sicher, dass eventuelle Inhomogenitäten des Versuchsmaterials ausgeglichen sind. Die Platte auf der das Versuchsgut auf- liegt, ist mechanisch von den Luftzuführungen getrennt. Um bei der Durchströmung zu verhindern, dass Teilströme entweichen, ist die Platte mit einem ringförmigen Schwert versehen, das in einen Ringspalt eintaucht, der mit Silikonöl gefüllt ist. Silikon besitzt eine sehr geringe Viskosität und stört somit die Gewichtsdatenerfassung nicht.

Die geforderte Genauigkeit und Zeitkonstanz des Luftzustands wird durch den Einsatz von stetigen PID-Reglern erreicht. Der Aufbau der Regeleinrichtung und die Anordnung der Messfühler sind in Bild 3 dargestellt.

5.1.1 Methoden und Messwerterfassung

Die Messgrößen sowie die eingesetzten Messverfahren sind in Tabelle 2 zu- sammengestellt.

Tabelle 2. Zusammenstellung der Messgrößen, Messverfahren und Messgenauigkeiten

Messgröße	Messverfahren	Messgenauigkeit
Feuchtegrad des Trocknungsgutes X	Präzisionswaage Trockenschrank (48 h, $\vartheta_L=70\text{ °C}$)	$\pm 0,05\text{ g}$ $\pm 1\text{ °C}$
Massebestimmung	Präzisionswaage	$\pm 0,1\text{ g}$
Überdruck Δp	Digitales Manometer	$\pm 0,01\text{ mbar}$
Luftgeschwindigkeit v_L	Hitzdrahtanemometer	$\pm 0,02\text{ m/s}$
Umgebungstemperatur ϑ_U	Pt-100-Messwiderstand	$\pm 0,2\text{ K}$
Feucht- (ϑ_F) und Trockenkugeltempe- ratur (ϑ_{TK})	Pt-100-Messwiderstand	$\pm 0,2\text{ K}$
Taupunkttemperatur ϑ_{Tp}	Pt-100-Messwiderstand	$\pm 0,2\text{ K}$
Temperatur Trocknungsluft ϑ_L	Pt-100-Messwiderstand	$\pm 0,2\text{ K}$
Temperatur an der Gutoberfläche ϑ_P	Präzisionspyrometer	$\pm 0,2\text{ K}$
Entzogene Feuchtemasse Δm	Präzisionswaage	$\pm 0,1\text{ g}$
Farbveränderung	CCD-Kamera	1024x768 Pixel
Topographie	Streifenlichtmikroskop	
Mikroskopische Aufnahmen	Rasterelektronenmikroskop	Max. Vergrößerung x1000

Die in der Anlage gemessenen Werte werden, bis auf die Gewichts- und Bilddaten, direkt an die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) ausgegeben und von dort über eine Schnittstelle zum Computer weitergeleitet. Die Benutzerschnittstelle WinCC ermöglicht die kontinuierliche Aufzeichnung der erhaltenen Daten in einer CSV (Comma Separated Values) Datei, die später mit einem Kalkulationsprogramm ausgelesen und weiterbearbeitet werden kann. Die Waagensignale werden direkt über eine serielle Schnittstelle an den Computer gesendet und mittels LabView 8.2 ausgewertet und aufgezeichnet. Die Bilddaten werden von der CCD-Kamera über eine USB Schnittstelle an den Rechner ausgegeben und dort von der zugehörigen Software IC_Capture visualisiert und gespeichert.

Aus den erhaltenen Rohdaten erfolgt die Berechnung der zur Versuchsauswertung benötigten Größen. Dies sind Versuchsdauer, Verlauf des Feuchtegrades, Temperatur und Feuchtegrad der Trocknungsluft, Produkttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Farbveränderung und Schrumpfung.

5.1.2 Kompensation der Gewichtsverfälschungen

Da bei der Überströmung in der Regel keine Gewichtsverfälschungen auftreten, kann der Trocknungsverlauf ohne weiteren rechnerischen oder messtechnischen Aufwand aus den aufgenommenen Gewichtsdaten ermittelt werden. Der Messaufbau für die Durchströmung wird von Sturm et al. (2009) im Detail beschrieben.

5.1.3 Erfassung der Produkttemperatur

Die Oberflächentemperatur des Produktes wird berührungslos mittels Präzisionspyrometer gemessen. Da bei der Konvektionstrocknung die Temperatur an der Oberfläche immer höher ist als im Rest des Körpers, wird sichergestellt, dass kein Teil des Produktes die vorgegebene Maximaltemperatur überschreitet. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Probekörperdicke von weniger als 5 mm die Kerntemperatur sehr schnell den Wert der Oberflächentemperatur annimmt [Lengyel, 2007]. Das Pyrometer ist auf einen Emissionsgrad von $\epsilon=0,95$ eingestellt. Dieser Wert ist gültig für alle nicht gefrorenen Lebensmittel ohne freie Wasseroberfläche [testo, 2005].

5.1.4 Geschwindigkeitsverteilung und Abreißen des Strömungsprofils

Die Geschwindigkeitsverteilung ist über den gesamten belegten Querschnitt der Überströmeinheit nahezu konstant ($\pm 3\%$ des eingestellten Wertes). Dies wird sichergestellt durch die entsprechenden Einbauten im Quellkasten und das aufgesetzte Wabengewebe, das zusätzlich die Strömungsrichtung vorgibt und für einen konstanten Turbulenzgrad sorgt. Die Strömungsverteilung wurde mittels Prandtlrohr und Hitzdrahtanemometer bestimmt, die in einer dafür gebauten Vorrichtung befestigt waren, um reproduzierbare Werte zu erhalten.

Am Einlass des Ansaugrohres wurde ein Filtergewebe angebracht, um das Ansaugen von Staubpartikeln und anderen Verunreinigungen zu verhindern, da eine Verschmutzung des Messdrahts des Anemometers zu Verfälschungen des Messwertes führen würde.

Zur Überprüfung des Effektes des Strömungswiderstandes und der daraus resultierenden Ablenkung des Luftstromes wurde in die Trocknungsluft Rauch eingesprüht und der Strömungsverlauf visuell überprüft. Bei allen eingestellten Geschwindigkeiten wurde eine gleichmäßige Strömung ohne Abreißen in der Trocknungskammer beobachtet.

5.1.5 Taupunkteinstellung

Die Taupunkteinstellung erfolgte durch die Angleichung der Wasserbadtemperatur an den Sollwert. Zur Überprüfung der Zulässigkeit dieses Vorgehens wurden am Auslass des Befeuchters zwei Pt-100-Messfühler angebracht, welche die Luft- und Feuchtkugeltemperatur messen und somit ein Assmann'sches Psychrometer darstellen. Mersmann et al. (2005) geben eine Berechnungsvorschrift und stellen in einem Diagramm die psychrometrische Differenz abhängig von der Temperatur des trockenen Thermometers mit der relativen Feuchte als Parameter zusammen. Hieraus wurden die tatsächlichen Luftfeuchtigkeiten bestimmt.

Die Luft- und Feuchtkugeltemperaturen lagen bei allen Versuchen innerhalb der Messtoleranz (Bild 5).

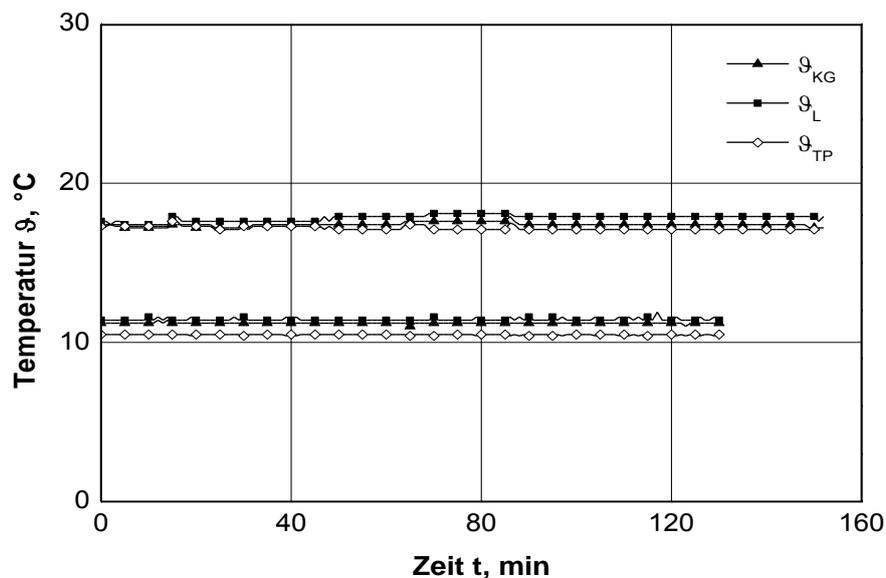


Bild 5. Tatsächliche Taupunkttemperatur (ϑ_{TP}) für unterschiedliche Temperaturniveaus sowie die entsprechenden Luft- (ϑ_L) und Kühlgrenztemperaturen (ϑ_{KG})

Die sich ergebenden Taupunkte entsprachen den eingestellten Taupunkten bei Temperaturen ab 17 °C sehr gut. Bei niedrigeren und höheren Temperaturen betrug die Differenz zwischen Ist- und Sollwert <math><0,6 \text{ °C}</math>.

5.1.6 Exemplarische Darstellung des Verlaufes der relativen Luftfeuchtigkeit

In Bild 6 sind die zeitlichen Verläufe der Produkt- und Lufttemperatur und somit der relativen Luftfeuchtigkeit über der Zeit t und in Bild 7 über dem Feuchtegrad X der untersuchten Probe dargestellt.

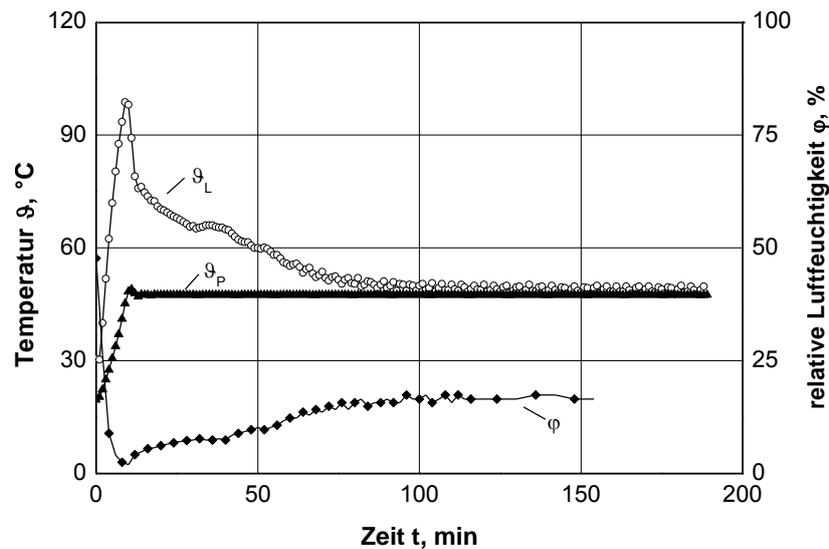


Bild 6. Zeitlicher Verlauf von Lufttemperatur ϑ_L und relativer Luftfeuchtigkeit φ bei konstanter Produkttemperatur, Taupunkttemperatur und Luftgeschwindigkeit, $\vartheta_P=47,5 \text{ °C}$, $\vartheta_{TP}=17,5 \text{ °C}$, $v_L=3,4 \text{ m/s}$, $X_0=5,2 \text{ g}_w/\text{g}_{TS}$

Die relative Luftfeuchtigkeit sinkt bei konstanter Taupunkttemperatur mit zunehmender Lufttemperatur sehr schnell ab und steigt nach Erreichen der eingestellten Produkttemperatur und dem damit verbundenen Abfall der Lufttemperatur wieder an.

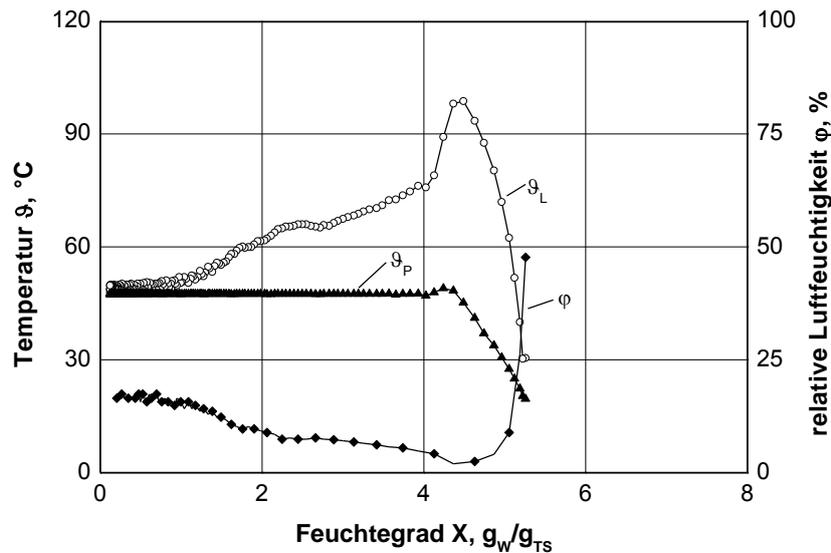


Bild 7. Verlauf von Lufttemperatur ϑ_L und relativer Luftfeuchtigkeit φ sowie der Produkttemperatur ϑ_P als Funktion der Gutfuchte bei sonst konstanten Bedingungen, Prozessbedingungen wie in Bild 6

Aus Bild 7 geht deutlich hervor, dass die niedrigste relative Luftfeuchtigkeit zu einem Zeitpunkt erreicht wird, zu dem das Produkt noch sehr feucht ist und somit genügend Wasser an die Oberfläche des Produktes durch Diffusion nachgeführt werden kann. Mit abnehmendem Feuchtegrad des Produktes steigt dann die relative Luftfeuchtigkeit wieder an.

Bei den durchgeführten Versuchen wurde bewusst die Taupunkttemperatur und nicht die relative Luftfeuchtigkeit als einer der untersuchten Faktoren gewählt. Einerseits wird in der Praxis in der Regel Umgebungsluft mit gegebenem Zustand verwendet und andererseits wäre es bei der in diesem Kapitel dargestellten instationären Trocknung nicht möglich parallel zur Veränderung der Lufttemperatur die Taupunkttemperatur kontinuierlich nachzuführen.

5.1.7 Trocknungstemperatur

5.1.7.1 Regelung der Lufttemperatur

Bei der klassischen Führung von stationären konvektiven Trocknungsprozessen wird standardmäßig die Lufttemperatur während des gesamten Prozesses konstant gehalten. Da sich die Temperatur der Luft nicht verändert, bleibt die Ventilatoreinstellung ebenfalls unverändert.

Werden Temperaturrampen irgendeiner Form umgesetzt, verändert sich die Dichte aufgrund der Wärmeausdehnung der Luft mit der veränderten Temperatur. Die Ventilatorleistung muss also ebenfalls nachgeregelt werden (siehe Kapitel 5.2.4).

5.1.7.2 Regelung der Oberflächentemperatur

Wird die Oberflächentemperatur des Produktes geregelt, verändert sich die Lufttemperatur kontinuierlich. Im ersten Abschnitt, der Erwärmung des Produktes bis zum Erreichen der Solltemperatur, steigt die Lufttemperatur zunächst stark an. Sobald das Produkt seine Solltemperatur erreicht hat, beginnt die Lufttemperatur, entsprechend dem Zusammenhang mit der Kühlgrenztemperatur, zu sinken. Diese Veränderung ist kontinuierlich und nicht linear.

Um eine konstante Luftgeschwindigkeit realisieren zu können, muss also die Ventilatorleistung entsprechend der sich ändernden Dichte der Luft nachgeführt werden (Umsetzung siehe Kapitel 5.2.4).

5.1.8 Festlegung der Maximaltemperatur der Luft

Während der Trocknung mit der Produkttemperatur als Führungsgröße wird sichergestellt, dass das zu trocknende Produkt die eingestellte Temperaturgrenze nicht überschreitet. Der Luft wird erlaubt, einen deutlich höheren Wert anzunehmen. Ein realer Hordentrockner für Obst und Gemüse ist im Regelfall so konzipiert, dass eine Lufttemperatur von 100 °C nicht überschritten werden kann. Deshalb wurde die Maximaltemperatur der Luft für die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche auf diesen Wert eingestellt.

Versuche mit Karotten haben jedoch gezeigt, dass eine Begrenzung der maximalen Lufttemperatur nicht nur sinnvoll, sondern auch notwendig ist. Karotten wurden mit 45 °C bzw. 50 °C eingestellter Oberflächentemperatur getrocknet. Im ersten Fall nahm die Luft eine maximale Temperatur von 120 °C an, im zweiten Fall von 140 °C. Die zweite Probe brauchte circa 25 % länger zum Trocknen als die Erste. Dies ist wahrscheinlich auf eine Verhärtung der Oberfläche und somit der Erschwerung der Flüssigkeits- und Dampfdiffusion an die Oberfläche des Produktes zurückzuführen.

5.2 Steuerung und Regelungsverhalten des Trockners

5.2.1 Lufttemperatur

Die Regelung der Lufttemperatur erfolgt über einen PID-Regler mit nachgeschaltetem Pulsgenerator. Der Heizstab zur Erwärmung der Lufttemperatur ist getaktet ansteuerbar, der Pulsgenerator wandelt das Analogsignal in eine entsprechende Pulsfolge um. Die Lufttemperatur im Strömungskanal wird an die vorgegebene Solltemperatur (Solltemperatur Luft) angeglichen.

5.2.2 Produkttemperatur

Die Regelung der Produkttemperatur erfolgt ebenfalls über einen PID-Regler mit nachgeschaltetem Pulsgenerator. Die Temperatur des Produktes wird an die vorgegebene Solltemperatur (Solltemperatur Trockengut) angeglichen.

Bei dieser Art der Prozessführung ist zusätzlich die maximale Lufttemperatur der anströmenden Luft als Begrenzung zu bestimmen und einzusetzen. Bei Erreichen der eingestellten Grenztemperatur der Trocknungsluft wird diese konstant gehalten. Erst wenn die sich ergebende Temperaturdifferenz zwischen Luft- und Produkttemperatur so klein ist, dass die Lufttemperatur wieder niedriger ist als die Grenztemperatur, wird die Produkttemperatur wieder als Führungsgröße verwendet.

5.2.3 Taupunkttemperatur

Die Regelung der Taupunkttemperatur erfolgt über einen PID-Regler mit nachgeschaltetem Pulsgenerator. Die Wasserbadtemperatur entspricht der Taupunkttemperatur der Trocknungsluft und wird an die vorgegebene Solltemperatur (Solltemperatur Wasserbad) angeglichen. Heizung und Kühlung werden vom selben Regelkreis angesteuert. Liegt die Solltemperatur über der Umgebungstemperatur, wird nur die Heizung angesteuert, liegt sie darunter, nur der Kaltwassersatz.

5.2.4 Strömungsgeschwindigkeit der Zuluft

Die Geschwindigkeit der erwärmten Luft kann nicht direkt in der Trocknungskammer gemessen werden. Um dem Anspruch der kontinuierlichen Geschwindigkeitsanpassung zu genügen, muss die Geschwindigkeit vor dem Zuluftventilator gemessen werden. Die Stellgröße jedoch ist die Geschwindigkeit in der Trocknungskammer. Der effektive Stellwert zur Ansteuerung des Ventilators muss aus dem Massenstrom, den Querschnitten der beiden Messstellen, den gemessenen Luftgeschwindigkeitswerten der Zuluft, der Temperaturdifferenz und der Wärmeausdehnung der Luft berechnet werden.

Der Trockner kann als Einzelschicht- sowie als Überströmtrockner betrieben werden. Da die beiden entsprechenden Einbauten unterschiedliche Geometrien aufweisen, müssen zwei Datensätze hinterlegt werden.

Für die Verhältnisbildung gilt:

$$\dot{V} = A \cdot v_L = \frac{\rho(\vartheta)}{\dot{m}} \quad \text{Gl. 9}$$

$$\dot{m}_L = \frac{\rho(\vartheta_Z)}{A_Z \cdot v_Z} = \frac{\rho(\vartheta_T)}{A_T \cdot v_T} \quad \text{Gl. 10}$$

$$v_Z = \frac{A_T \cdot v_T \cdot \rho(\vartheta_Z)}{A_Z \cdot \rho(\vartheta_T)} \quad \text{Gl. 11}$$

Die Werte der Dichte der Luft als Funktion der Temperatur sind tabellarisch hinterlegt. Bild 8 stellt die Verläufe der Lufttemperatur (ϑ_Z) und der Strömungsgeschwindigkeiten am Einlass (v_Z) und im Trockner (ϑ_T , v_T) dar. Steigt

die Lufttemperatur im Trockner, und somit der relative Volumenstrom, nimmt die Luftgeschwindigkeit im Einlass proportional dazu ab. Sinkt die Lufttemperatur wieder, steigt der Zuluftvolumenstrom wieder an. Im Trockner jedoch ist die Luftgeschwindigkeit konstant.

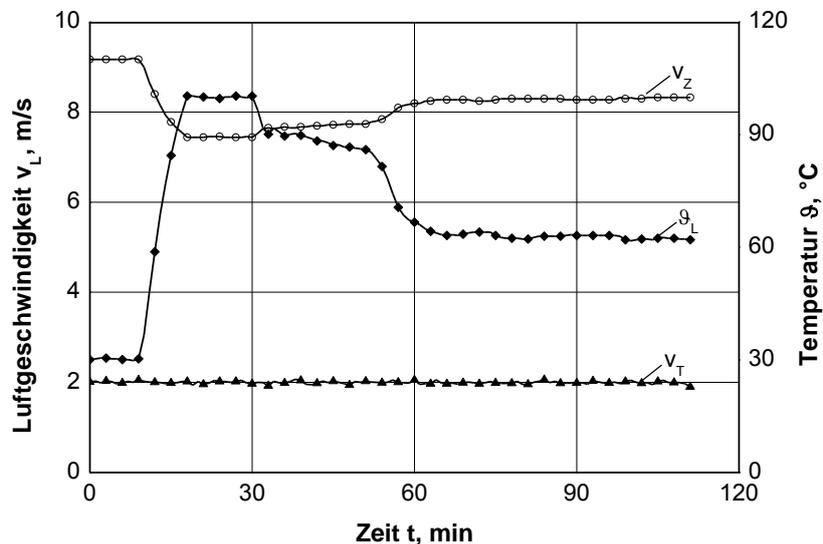


Bild 8. Luftgeschwindigkeit in Zuluftkanal (v_Z) und Trockner (v_T) bei kontinuierlich veränderter Lufttemperatur ϑ_L als Funktion der Zeit

5.3 Optische Qualitätsprüfung

Streifenlichtprojektion

Bei der Streifenlichtprojektion handelt es sich um ein Lichtschnittverfahren, bei dem das Messobjekt unter einem Triangulationswinkel mit äquidistanten Streifen schräg beleuchtet wird. Im Gegensatz zum konventionellen Lichtschnittverfahren besitzen die projizierten Streifenmuster eine \cos^2 -förmige Intensitätsverteilung und können so als Interferogramme aufgefasst und ausgewertet werden. Neben der Streifenposition liefern so auch deren Grauwerte Höheninformationen, woraus eine sehr hohe Auflösung hinsichtlich der Oberflächengeometrieerfassung resultiert.

In einem ersten Schritt werden digitale Streifenmuster projiziert mit deren Hilfe größere Höhenunterschiede detektiert werden können. Anschließend werden sehr feine Streifen mit sinusförmiger Lichtintensität projiziert, so dass nicht nur in der Streifenposition, sondern auch im Grauwert Höheninformationen enthalten sind.

Ähnlich wie bei klassischen Triangulationssensoren ist die Höheninformation in der Auslenkung der Streifen enthalten. Im Gegensatz zu diesem können die Phasenshiftbilder in Anlehnung an interferometrische Verfahren ausgewertet werden, wodurch eine wesentlich größere Auflösung erreicht wird.

Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Als Rasterelektronenmikroskop (REM) bezeichnet man ein Elektronenmikroskop, bei dem ein Elektronenstrahl in einem bestimmten Muster über das vergrößerte abzubildende Objekt geführt wird und Wechselwirkungen der Elektronen mit dem Objekt zur Erzeugung eines Bildes des Objektes genutzt werden. Die mit einem REM erzeugten Bilder sind Abbildungen der Objekt-oberfläche und weisen eine hohe Schärfentiefe auf.

Da in der Rasterelektronenmikroskopie nur leitende Oberflächen dargestellt werden können, müssen die Proben speziell präpariert werden. Durch Aufdampfen eines Goldfilms werden die Oberflächen der biologischen Objekte leitend gemacht. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schicht nicht zu dick aufgedampft wird, da sonst die feinen Strukturen des Objekts abgedeckt werden. Da die Abtastung im Hochvakuum stattfindet, müssen die Objekte außerdem vor dem Bedampfen so präpariert werden, dass sie absolut wasserfrei sind.

5.4 Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments)

Die in dieser Arbeit untersuchte Problemstellung stellt ein hochkomplexes, verflochtenes System aus Wirkungsgrößen, Einflussmechanismen, -faktoren und Resultaten dar. Aus Effizienzgründen ist es deshalb nötig, statistische Planungsmethoden einzuführen. Design of Experiments (DoE) ist ein planmäßiger Ansatz, Ursache-Wirkung-Zusammenhänge zu untersuchen [Lazic, 2004]. Dabei sind folgende Punkte ausschlaggebend:

- Festlegung der zu untersuchenden Faktoren
- Verminderung bzw. Minimierung des Versuchsumfangs
- Gleichzeitige Veränderung aller festgelegten Faktoren
- Wahl einer klaren Strategie

Die systematische Darstellung der Ergebnisse ermöglicht eine bessere Ableitung von Maßnahmen aus den Ergebnissen und erleichtert die Dokumentation der Ergebnisse und damit der Übertragung auf zukünftige Entwicklungen und andere Benutzer.

In der vorliegenden Arbeit wurde mit zentral zusammengesetzten Versuchsplänen gearbeitet. Diese werden dann eingesetzt, wenn die quantitative Abhängigkeit einer oder auch mehrerer Zielgrößen von einigen wenigen Faktoren im Detail bestimmt werden soll.

Versuchspläne

Es ist bekannt, dass die Prozesstemperatur und deren Einwirkzeit, die Geschwindigkeit der Luft und deren Taupunkttemperatur beziehungsweise Feuchte die Haupteinflussgrößen auf die Qualität eines biologischen Trocknungsgutes sind. Die kombinierten Einflüsse dieser Faktoren sind bisher jedoch nur wenig untersucht.

In der vorliegenden Arbeit werden diese kombinierten Einflüsse anhand zweier unterschiedlicher Regelstrategien untersucht und die daraus resultierenden Ergebnisse miteinander verglichen. Die Arten der Prozessführung sind hierbei die kategorischen Faktoren und werden in zwei unterschiedlichen Blöcken untersucht. Die Prozesstemperatur, die Taupunkttemperatur und die Luftgeschwindigkeit sind die drei Faktoren der zentral zusammengesetzten orthogonalen Versuchspläne. Die Trocknungszeit, die Flächenschrumpfung, der TCD und das Wiederbefeuchtungsverhalten sind die Zielgrößen.

Um einen drehbaren orthogonalen Versuchsplan zu erhalten, muss folgende Bedingung erfüllt sein [Kleppmann, 2004]:

$$\alpha^2 = \sqrt{2^{k-p}}$$

Gl. 12

für die Anzahl der Faktoren $k=3$ und der Anteil fehlerhafter Einheiten $p=0$ für einen vollständig fraktionellen Plan ergibt sich $\alpha=1,682$

Da im realen Trockner in der Regel nicht die relative Feuchte eingestellt wird, sondern diese sich aus der Taupunkttemperatur der Umgebungsluft und der Temperatur der Trocknungsluft ergibt, wurden für beide Regelungsstrategien dieselben Taupunkttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten verwendet. Die eingestellten Luft- bzw. Produkttemperaturen unterscheiden sich deutlich. Tabelle 3 gibt eine Übersicht der untersuchten Faktoren und deren eingestellten Niveaus für beide Arten der Prozessführung. Der zentrale Versuch n_0 , in Tabelle 3 als Niveau 0 bezeichnet, wurde zur statistischen Absicherung gegen zufällige Schwankungen mit 6 Wiederholungen durchgeführt. Zur Erstellung der Pläne und späteren Auswertung, Modellbildung sowie Optimierung (Kapitel 5.5.2) der Prozesseinstellungen wurde die Software Design Expert[®] 7 verwendet.

Tabelle 3. Übersicht Faktoren und Faktorniveaus

Niveau	ϑ_L [°C]	ϑ_P [°C]	ϑ_{Tp} [°C]	v_L [m/s]
- α	35	35	5	2,0
- 1	45	40	10	2,6
0	60	47,5	17,5	3,4
+ 1	75	55	25	4,2
+ α	85	60	30	4,8

5.5 Auswertung

5.5.1 Bildauswertung

5.5.1.1 Farbwahrnehmung

Ein optischer Reiz (Farbreiz) entsteht durch Auftreffen einer Strahlung auf die Netzhaut des Auges. Die auftreffende Strahlung bewirkt eine visuelle Empfindung. Die Strahlung lässt sich zwar mit physikalischen Methoden erfassen, die Wirkung des Reizes, die Farbempfindung, jedoch nicht. Sie ist keine physikalische Größe, hängt jedoch von vielen physikalischen Faktoren ab [Figura, 2004]:

- Beleuchtungsstärke
- Lichtart
- Beleuchtungswinkel
- Beobachtungswinkel
- Oberflächenbeschaffenheit

Das menschliche Auge bewertet Farbreize nach mehreren verschiedenen spektralen Empfindungsfunktionen, jedoch werden einzelne Erregungen zu einer einheitlichen Empfindung, der Farbvalenz, zusammengesetzt. Das Farbsehen beruht auf der Wahrnehmung von Rot- (600 nm), Blau- (350 nm) und Grün-Reizen (550 nm). Aus der Messung der Empfindlichkeit der drei Zapfen des menschlichen Auges lässt sich ein physiologischer Farbraum bestimmen [Sturm & Hofacker, 2009].

5.5.1.2 RGB-Farbraum

Der RGB-Farbraum wird für selbstleuchtende (farbdarstellende) Systeme verwendet, die dem additiven Farbmodell unterliegen. Nach den Graßmann'schen Gesetzen lassen sich Farben durch drei Angaben definieren. Im RGB-Farbraum sind dies der Rot-, Grün- und Blauanteil. Die konkrete Form des Farbraums hängt dabei vom jeweils konkreten technischen System ab, für das der jeweilige Farbraum bestimmt wurde.

Grenzen der Anwendung findet der RGB Farbraum in wahrnehmungsphysiologischen Problemen. Im RGB-Farbraum sind nicht alle Farbvalenzen enthalten. Die menschliche Wahrnehmung ist nicht unabhängig von der absoluten Helligkeit, da die Erregung der Zapfen eine Mindestanzahl an Photonen erfordert. Wird diese unterschritten, nehmen die Zäpfchen nur Hell-Dunkel-Reize wahr. Die Farbwahrnehmung ist auf der Netzhaut nicht gleich verteilt, periphere Bereiche sehen anders als das zentrale Gesichtsfeld. Sie hängt ebenfalls von Umgebungslicht und Umgebungsfarben ab.

Ein RGB-Farbraum ist ein auf wenige, definierte Parameter begrenzter Ausschnitt der Wirklichkeit. Die Wahrnehmung eines bunten Lichts oder einer Oberfläche umfasst weitere Effekte. So könnte die Definition einer Farbe durch

drei Zahlen die falsche Erwartung wecken, eine Farbe wäre in ihrer Wahrnehmung absolut bestimmt. Tatsächlich ist die Farbwirkung einer numerisch bestimmten RGB-Farbe dagegen vom konkret vorhandenen technischen System abhängig, das die Farbe wiedergibt oder aufnimmt und auch von den internen und externen Umgebungsbedingungen [Abbot, 1999].

5.5.1.3 L*a*b* Farbraum

Der L*a*b*-Farbraum ist ein internationaler Standard, der 1976 von der Commission Internationale d'Eclairage (CIE) entwickelt wurde. Er ist geräteunabhängig und beschreibt die Wahrnehmung des menschlichen Auges am genauesten. In ihm sind alle anderen Farbräume enthalten.

Die L*a*b*-Farbskala wird durch ein dreidimensionales Koordinatensystem beschrieben. Die L-Achse gibt die Helligkeit wieder (0 bis 100), die a-Achse das Verhältnis zwischen Grün und Rot (-120 bis +120) und die b-Achse das Verhältnis zwischen Blau und Gelb (-120 bis +120). Durch diese Einteilung entsteht ein Farbraum, in dem alle Farben dargestellt werden können (Bild 9).

Allerdings ist der L*a*b*-Farbraum dadurch so umfassend, dass kein Scanner oder Monitor ihn erfassen kann. Es ist jedoch möglich, die erhaltenen RGB-Farbwerte umzurechnen. Dazu werden diese zunächst in den CIE-XYZ-Farbraum transformiert welcher die menschliche Farbwahrnehmung berücksichtigt. Anschließend werden die XYZ-Werte in L*a*b*-Werte umgerechnet. Die entsprechenden Transformationen sind dabei durch mathematische Operationen genau definiert und werden von Sturm & Hofacker (2009) beschrieben.

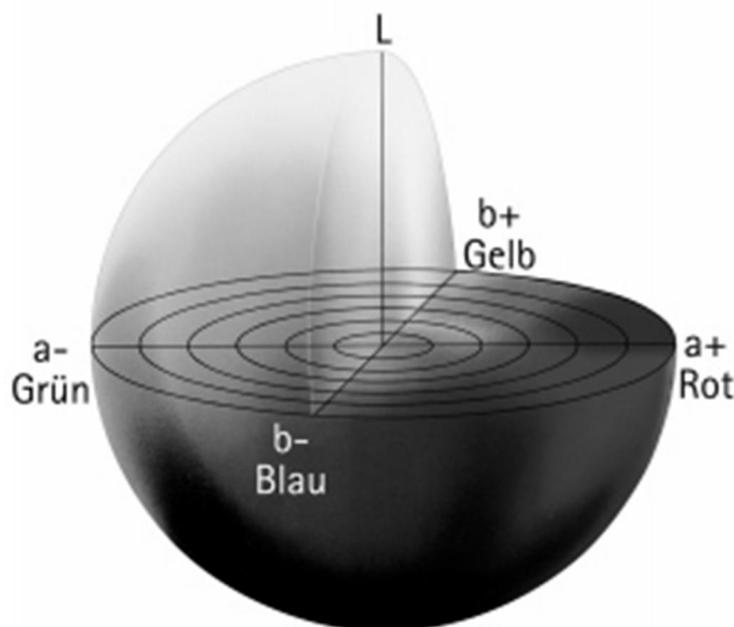


Bild 9. Darstellung des L*a*b* Farbraumes [Abbot, 1999]

5.5.1.4 Funktionsweise des Auswerteprogrammes

Die Bilddaten wurden mit einem in der Arbeitsgruppe entwickelten Programm ausgewertet. Das Programm ermöglicht es, Referenzweiß, den zu analysierenden Bereich und den Hintergrund festzulegen. Im ausgewählten Bereich werden alle Pixel ausgewertet, die dunkler als die Referenz, aber heller als der festgelegte Hintergrund sind. Aus den Farbwerten der ausgewerteten Pixel werden die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte für RGB berechnet. Aus den Mittelwerten werden zunächst die XYZ- und anschließend die L*a*b*-Werte berechnet [Sturm & Hofacker, 2009]. Zur Bestimmung der Partikelfläche wird die Anzahl der ausgewerteten Objektpixel ermittelt. Durch Bezug auf die ursprüngliche Anzahl belegter Pixel kann somit sehr einfach die Flächenschrumpfung bestimmt werden [Sturm & Hofacker, 2009]. Die ermittelten L*-, a*- und b*-Werte der verschiedenen Prozesszeitpunkte werden miteinander in Bezug gesetzt und schlussendlich daraus der TCD bestimmt (siehe Kapitel 5.5.1.5).

Gegenüber der klassischen kolorimetrischen Bestimmung der Farbveränderung ergeben sich klare Vorteile. Einerseits wird der Prozess nicht unterbrochen, was mit einem Abkühlen der Probe einherginge. Andererseits wird nicht nur ein kleiner Ausschnitt sondern die ganze Probenoberfläche untersucht. Dadurch werden die zufälligen Fehler durch Festlegung eines bestimmten Bereiches eliminiert.

Die beschriebene Methode eignet sich nicht zur Bestimmung von Absolutwerten, was jedoch auch nicht das Ziel ist. Es soll ermöglicht werden, ausschließlich die Verhältniswertbildung zwischen Anfangszustand und aktuellem Zustand umzusetzen. Ein Absolutwertvergleich zwischen unterschiedlichen Proben ist bei heterogenen Rohmaterialien wie Obst und Gemüse nur bedingt aussagekräftig, da sich diese bei identischen Bedingungen stark unterscheiden können. Um Ergebnisse vergleichbar zu machen, müssen die Relativwerte miteinander verglichen werden, wozu das eingesetzte System entwickelt wurde.

5.5.1.5 Total Colour Difference (TCD)

Durch die Temperatureinwirkung während der Trocknung von biologischen Gütern verändern sich vor allem die a- und b-Werte. Um eine Aussage über die gesamte Farbveränderung des Gutes machen zu können, müssen auch die L-Werte berücksichtigt werden. Der TCD berücksichtigt die Veränderung aller drei Werte. Er wird aus der Wurzel der Summe der Fehlerquadrate gebildet [Chutintrasri & Noomhorm, 2007]:

$$TCD = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta a^*)^2}$$

Gl. 13

5.5.1.6 Exemplarische Darstellung der Farbverläufe

Die Bewertung der Trocknung wurde, am Beispiel einer Apfelscheibentrocknung, anhand der Veränderung des TCD durchgeführt, in den die Informationen über die Änderungen aller drei Faktoren des $L^*a^*b^*$ -Farbraums einfließen. In Bild 10 sind exemplarisch die Verläufe der L^* -, a^* - und b^* -Werte sowie des daraus resultierenden TCD dargestellt.

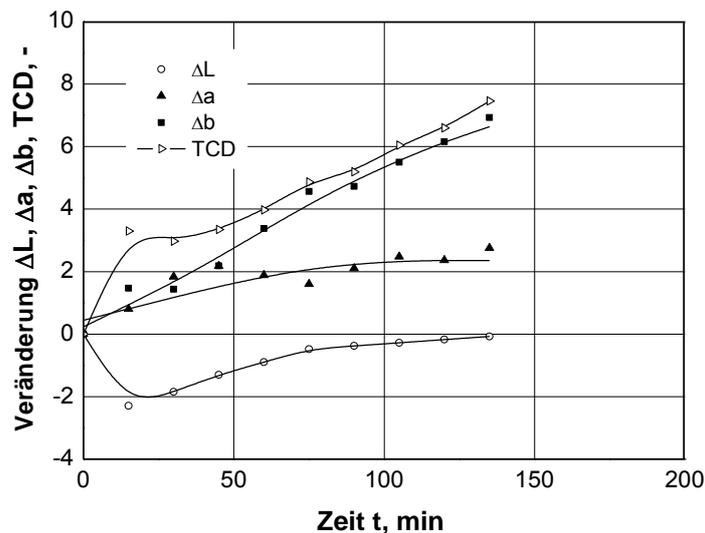


Bild 10. Verlauf der L^* -, a^* - und b^* -Werte und des daraus resultierenden TCD als Funktion der Zeit, $\vartheta_L=75\text{ °C}$ ($v_L=4,3\text{ m/s}$, $\vartheta_{TP}=25\text{ °C}$)

Es ist klar zu erkennen, dass sich die b^* -Werte am stärksten verändern und während des gesamten Trocknungsverlaufes kontinuierlich zunehmen. Während der L^* -Wert zunächst abnimmt, beginnt er nach etwa 25 % der Gesamttrocknungsdauer wieder zu steigen um in der zweiten Hälfte der Trocknung gegen Null zu laufen. Der a^* -Wert ändert sich zunächst deutlich, bleibt jedoch in der zweiten Hälfte der Trocknung konstant. Der zunächst deutliche Anstieg und anschließende scheinbare Verharrungszustand des TCD sind auf Veränderungen des L^* -Wertes zurückzuführen.

In der Literatur wird die Entwicklung des TCD bzw. der Einzelfaktoren L^* , a^* , b^* während der Trocknung in der Regel als Funktion der Trocknungszeit angegeben. Alle relevanten Modelle zur Vorhersage von Verlaufsform und Betrag der Veränderungen werden über der Zeit aufgetragen [Mujumdar, 2000]. Diese Darstellung jedoch hat nur eine eingeschränkte Aussagekraft bei der Beurteilung der Wirkung bestimmter Einstellungen während der unterschiedlichen Phasen des Trocknungsprozesses auf das Produkt. Erst die Darstellung der Farb- sowie der Temperaturveränderungen als Funktion des Feuchtegrades erlaubt eine klare Abschätzung der Auswirkungen auf das Produkt (Bild 11).

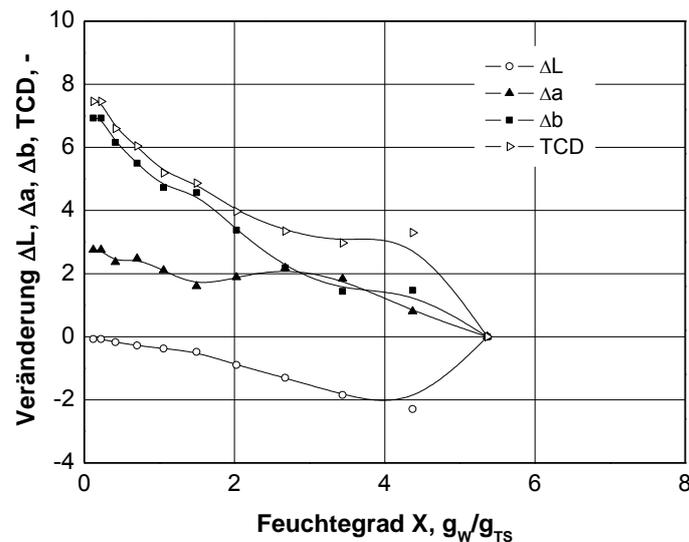


Bild 11. Verlauf der L^* -, a^* - und b^* -Werte und des daraus resultierenden TCD als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L=75\text{ °C}$ ($v_L=4,3\text{ m/s}$, $\vartheta_{TP}=25\text{ °C}$)

Aus dieser Darstellung geht klar hervor, dass der TCD nach einem anfänglichen steilen Anstieg eine Phase der Stagnation durchläuft, um dann wieder in einen steilen Anstieg überzugehen. Dieses Verhalten konnte bis auf wenige Ausnahmen für alle Proben bei Anwendung beider Strategien beobachtet werden.

Bei allen Versuchen änderte sich das Verhältnis zwischen Blau und Gelb am stärksten, während die Veränderungen des Verhältnisses zwischen Rot und Grün vergleichsweise gering ausfielen (Bild 11). Dies stimmt mit den Beobachtungen von Chua et al. (2000c) für Bananen, Fernandez et al. (2005) und Krokida et al. (1998) für Äpfel überein.

5.5.1.7 Bestimmung der Flächenschrumpfung

Zur Bestimmung der Flächenschrumpfung wird das Verhältnis zwischen der Anzahl der vorhandenen Produktpixel und der ursprünglichen Anzahl der Produktpixel zu Beginn der Trocknung ermittelt [Sturm & Hofacker, 2008b]. Dieses Vorgehen ist gültig, bis der erfasste Körper beginnt, sich in einer weiteren Dimension zu verändern. Der Zeitpunkt, zu dem die Veränderung in einer weiteren Dimension einsetzt, kann nicht eindeutig an Eigenschaften der Rohware oder den Trocknungsbedingungen fest gemacht werden.

5.5.2 Statistische Ergebnisauswertung, Modellbildung und Optimierung

Im Regelfall ist die Wirkung einzelner Faktoren in so komplexen Prozessen wie der Trocknung von biologischen Gütern nicht unabhängig vom Niveau der anderen untersuchten Faktoren. In diesem Fall spricht man von Wechselwirkungen. Eine Wechselwirkung zwischen zwei Faktoren bedeutet, dass der Effekt des einen Faktors vom Niveau des anderen abhängt.

Wechselwirkungen sind weit verbreitet. Es ist normal, dass der Effekt eines Faktors davon abhängt, welchen Wert ein anderer Faktor hat. Bei den meisten Anwendungen sollen mehrere Zielgrößen gleichzeitig optimiert werden. Dabei treten häufig Zielkonflikte auf. Einstellungen, die für eine Zielgröße günstig sind, können für andere ungünstig sein. Auf der Grundlage der Kenntnis der quantitativen Abhängigkeit aller Zielgrößen von allen Faktoren kann man bei solchen Zielkonflikten nach Kompromissen suchen.

Zur detaillierten Bestimmung der quantitativen Abhängigkeit einer oder auch mehrerer Zielgrößen von einigen wenigen Faktoren reicht eine lineare Näherung nicht aus. Die Nichtlinearität ist entscheidend, wenn die Lage eines Maximums oder Minimums gesucht ist. Meist wird ein quadratisches Modell zur empirischen Beschreibung der Abhängigkeiten der Zielgröße y von den Faktoren verwendet. Bei zwei Faktoren x_1 und x_2 erhält man beispielsweise

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_{11} x_{1i}^2 + \beta_{12} x_{1i} x_{2i} + \beta_{22} x_{2i}^2 + \varepsilon_i \quad \text{Gl. 14}$$

Dabei stehen β_j für die jeweiligen Regressionskoeffizienten. Dieses Modell kann auf k Faktoren verallgemeinert werden.

Zunächst wird für jede Zielgröße getrennt ein empirisches Modell an die Daten angepasst. Dabei werden nur signifikante Abhängigkeiten zwischen Zielgrößen und Faktoren berücksichtigt. Die Software überprüft die Signifikanz unterschiedlicher Modellansätze (linear, 2 Faktoren-Interaktion (FI), quadratisch und kubisch) anhand einer Varianzanalyse. Entscheidungskriterium für die Signifikanz eines Modelles ist die Voraussetzung, dass der Anteil fehlerhafter Einheiten $p < 0,05$ ist. Weiterhin muss das statistische Rauschen nichtsignifikant sein. Nichtsignifikante Faktoren beziehungsweise Wechselwirkungen können aus dem Modell entfernt werden um dessen Genauigkeit zu erhöhen.

Anschließend werden schrittweise optimale Einstellungen für alle Faktoren gesucht. Ausgehend von Faktoren mit großen Wechselwirkungen werden die einzelnen Zielgrößen in Abhängigkeit von jeweils zwei Faktoren grafisch dargestellt. Bei der Optimierung wird berücksichtigt wie stark jede Zielgröße von den einzelnen Faktoren abhängt, wie wichtig jede Zielgröße für das Optimierungsziel ist und inwieweit der Zielwert für jede Zielgröße durch Optimierung der anderen Faktoren erreicht wurde.

Die Zusammenfassung mehrerer Zielgrößen wird mit Hilfe der Wunschfunktion (desirability function) quantitativ beschrieben. Für jede Größe kann mit dem angepassten Modell der erwartete Wert für beliebige Faktorstufenkombinationen berechnet werden. Die Gesamt-Erwünschtheit entspricht dem geometrischen Mittelwert der Erwünschtheit aller Zielgrößen.

Die Versuchsergebnisse werden mit einem empirischen Modell beschrieben, das aufgrund des gewählten Versuchsplans nur im untersuchten Raum Gültigkeit besitzt. Daher ist keine Extrapolation zulässig. Im untersuchten Bereich erhält man meist eine gute Beschreibung der Zusammenhänge. Deshalb ist es von entscheidender Wichtigkeit, den Versuchsraum durch entsprechende Vorversuche und Literaturrecherche so zu definieren, dass die zu erwartenden optimalen Bedingungen im Versuchsraum enthalten sind. Manche Arten der Abhängigkeit einer Zielgröße von den Faktoren lassen sich nur unvollkommen abbilden.

Die statistische Auswertung; Modellierung und Optimierung wurden, wie schon die Planung, mit der DoE Software Design Expert[®] 7 durchgeführt. Die für beide Strategien aufgestellten Modelle (Tabelle 4 und Tabelle 9) für die Trocknungsdauer wurden an den erhaltenen experimentellen Ergebnissen für die Veränderung der Einzelfaktoren überprüft. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung sogar in den Randbereichen (siehe Kapitel 6.2 und 6.3).

5.5.3 Schrumpfung und Wiederbefeuchtung

5.5.3.1 Zulässigkeit der ermittelten Schrumpfungsdaten

Das Schrumpfungsverhalten der Proben wurde kontinuierlich über die zweidimensionale Flächenschrumpfung ermittelt. Die erhaltenen Daten sind gültig, solange das betrachtete Objekt tatsächlich nur schrumpft. Sobald das Objekt zusätzlich anfängt, sich in einer weiteren Dimension zu verändern, kann anhand der belegten Pixelzahl nicht mehr zwischen tatsächlicher und scheinbarer, durch Verwerfungen verursachter Flächenschrumpfung unterschieden werden.

Bild 12 zeigt eine Apfelscheibe zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Trocknung. Zunächst findet eine reine Flächenschrumpfung statt (a, b). Im Laufe der Trocknung setzt jedoch eine nichtisometrische Größenveränderung ein [Lewicki & Jakubczyk, 2004], die zum Zusammenziehen und schließlich zur Wellenbildung in der Apfelscheibe führt (c, d). Die betroffenen Bereiche sind mit Pfeilen markiert.

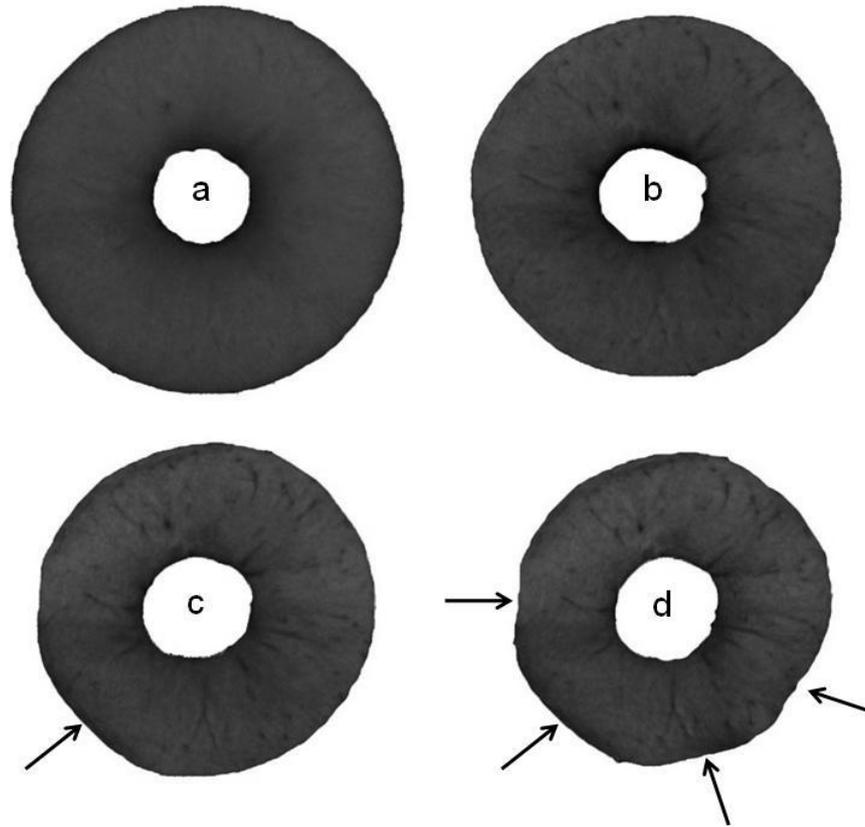


Bild 12. Zustand einer Apfelscheibe zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Trocknung

Bis zum Einsetzen dieser Verformungen ist die Verwendung der erhaltenen Flächendaten zur Bestimmung der Flächenschrumpfung erlaubt. Danach müssen die erhaltenen Daten verworfen werden. Die Zulässigkeitsprüfung wurde durch Betrachtung der Einzelbilder durchgeführt.

Bis auf zwei Ausnahmen hat sich bei allen Versuchen gezeigt, dass die Nutzung der ermittelten Daten bis zu einem Feuchtegrad von $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ zulässig ist, bei einigen sogar bis zu einem Feuchtegrad von $X=1 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$. Dies gilt unabhängig von den Prozessbedingungen und der Trocknungsdauer. Der Zeitpunkt des Beginns der Veränderung in der dritten Dimension kann nicht auf Prozesseinstellungen oder den Anfangsfeuchtegrad der Proben zurückgeführt werden.

Die Schrumpfung senkrecht zur Schnittfläche wurde durch Messung der Dicke vor und nach der Trocknung bestimmt und kann somit zur Bestimmung der Güte des Prozesses herangezogen werden. Um zufällige Fehler so weit wie möglich zu eliminieren, wurden zwei Scheiben pro Probe an jeweils vier Stellen vermessen und aus den acht Ergebnissen der Mittelwert gebildet. Da in diesem Fall nur Anfangs- und Endzustand bekannt sind, kann keine Aussage über die Entwicklung der Schrumpfung senkrecht zur Schnittfläche getroffen werden. Es sind weiterhin keine auf die Trocknungsbedingungen zurückzuführenden Aussagen möglich. Lediglich die Mittelwerte für die beiden angewandten Verfahren unterscheiden sich. Während das durchschnittliche Verhältnis

zwischen Anfangs- und Endfeuchte bei der stationären Trocknung bei $0,34 \pm 0,03$ liegt, beträgt es bei der produkttemperaturgesteuerten Trocknung lediglich $0,31 \pm 0,04$.

5.5.3.2 Signifikanz der ermittelten Wiederbefeuchtungsdaten

Zur Bestimmung des Wiederbefeuchtungsverhaltens der getrockneten Apfelscheiben wurden zwei Scheiben aus jedem Versuch für zwei Stunden in 30 °C warmem vollentsalztem Wasser in einem Becherglas unter ständigem Rühren (Rührerdrehzahl: 150 min^{-1}) wiederbefeuchtet. Zur Bewertung der Wiederbefeuchtungsrate wurde das Gewicht nach der Wiederbefeuchtung mit dem vor der Trocknung ins Verhältnis gesetzt.

Es gibt erkennbare Schwankungen zwischen Proben, die unter identischen Bedingungen getrocknet wurden und einen unterschiedlichen Anfangsfeuchtegrad aufwiesen. Diese liegen jedoch im Vertrauensbereich für die Messwerte (Kapitel 6.2.5 und 6.3.5). Die Ergebnisse wurden gemeinsam mit den Daten für Trocknungszeit, Farbveränderungen und Schrumpfungen statistisch ausgewertet. Die unterschiedlichen Trocknungsbedingungen haben deutlich unterschiedliche Auswirkungen auf die Wiederbefeuchtungswerte (Kapitel 6.2.5.4 und 6.3.5.4).

5.6 Versuchsdurchführung

5.6.1 Versuchsgut

Als Versuchsgut kamen Äpfel der Sorte Jonagold zum Einsatz. Sie wurde von einem lokalen Hersteller bezogen (Bodensee). Die Äpfel lagerten bei 4 °C im Kühlschrank. Alle verwendeten Äpfel zur Durchführung der Lufttemperatur sowie der produkttemperaturgesteuerten Versuche stammten aus derselben Charge, die Vergleichsproben für die lufttemperaturgesteuerten Versuche aus einer Charge, die 2 Monate früher bezogen worden war.

5.6.2 Vorbereitung

Für die Vor- und Hauptversuche wurden die Äpfel mit einer gewerblichen Wurstschnidemaschine (Graeff DB 300) in $2,8\text{ mm}$ bzw. $3,8\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ dicke Scheiben geschnitten, was handelsüblichen Bedingungen entspricht. Bei allen Versuchen lagen die Scheiben auf der beim Schneiden zur gekrümmten Seite der Schneide hin zeigende Fläche. Zur Entfernung des Kerngehäuses und des über den gewünschten Außendurchmesser hinausgehenden Materials kamen zwei zylindrische Matrizen mit Außendurchmesser 20 mm beziehungsweise Innendurchmesser 72 mm zum Einsatz.

Nur Früchte mit gleichem Reifegrad, der aus der Grundfarbe (Grün-zu-Gelb-Verhältnis) ermittelt wurde, fanden Verwendung. Die Äpfel hatten ausnahmslos einen maximalen Durchmesser zwischen 90 und 95 mm .

Um eine gute Reproduzierbarkeit zu erreichen, wurden bei jedem Versuch die entsprechend gleichen Apfelscheiben für den gleichen Zweck verwendet, zur Erfassung der Bilddaten grundsätzlich aus dem obersten Bereich der Frucht.

5.6.3 Trocknung

Zur Durchführung der einzelnen Versuche wurden immer Scheiben aus einem einzigen Apfel verwendet. Das Versuchsgut lag in zwei Reihen vor dem Luftaustritt des Überströmkanals. Bild 13 zeigt die Anordnung der einzelnen Scheiben, deren weitere Verwendung im Folgenden beschrieben wird.

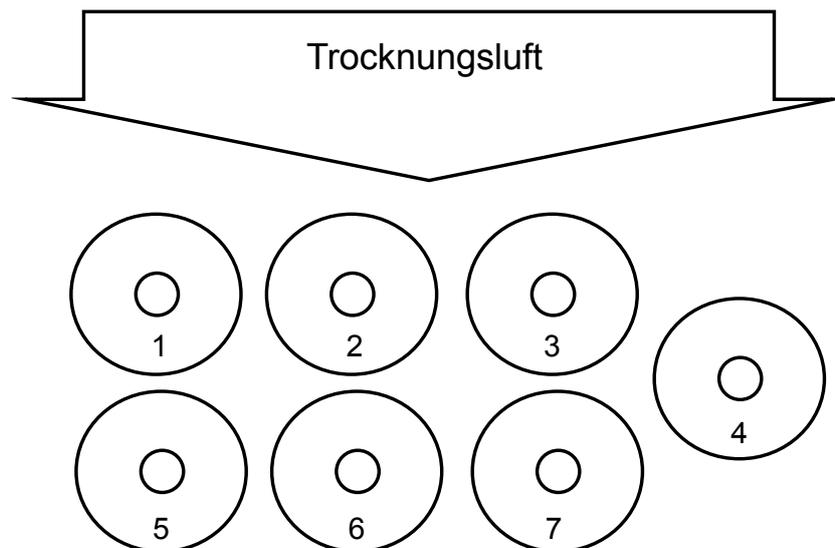


Bild 13. Anordnung des Versuchsgutes in der Trocknungskammer:
1: Anfangs- und Enddicke sowie Anfangsgewicht, Wiederbefeuchtung (WB)
2: Produkttemperatur
3: Trockensubstanz (TS) Bestimmung
4: Bilddatenauswertung, Anfangs- und Enddicke
5: TS Bestimmung
6: Oberflächenbeschaffenheit
7: Bestimmung Anfangs- und Enddicke sowie Anfangsgewicht, WB

Mit dem Einschalten des Luftstroms begann die Datenerfassung. Die Intervallzeit zwischen der Aufzeichnung der Messdaten betrug 30 Sekunden bzw. eine Minute bei Langzeitversuchen. Das Ende eines Versuches war erreicht, wenn die Oberflächentemperatur des Trocknungsgutes mit der Lufttemperatur übereinstimmte bzw. das Gewicht über längere Zeit konstant blieb. Bei allen Versuchen wurde sowohl die Luft- als auch die Produkttemperatur gemessen.

Die Trocknungsparameter Temperatur, Taupunkttemperatur und Luftgeschwindigkeit konnten entsprechend der Versuchsplanung gewählt werden, während der Anfangsfeuchtegrad der Äpfel vom Erntezeitpunkt und der Lagerdauer abhängig. Bei den Versuchen betrug die Temperatur der Trocknungsluft zwischen 35 °C und 85 °C bei Regelung der Lufttemperatur und zwischen 35 °C und 100 °C bei Regelung der Produkttemperatur.

Vor Beginn der eigentlichen Trocknungsversuche wurden die Dicken von Apfelscheiben (AS) 1, 4 und 7 sowie das Gewicht von AS 1 und AS 7 (vergleiche Bild 13) bestimmt. Die Bestimmung der Dicke erfolgte mittels Messschieber. Pro Scheibe wurden vier Messwerte genommen und daraus später ein Durchschnittswert gebildet. Am Ende des Versuches wurden abermals Dicke und Gewicht der Proben bestimmt. AS 3 und AS 5 wurden eingewogen und bei 70 °C für 48 Stunden zur Endfeuchtegehaltsbestimmung getrocknet.

Alle Scheiben bis auf AS 3 und AS 5 wurden nach Versuchsende luftdicht verpackt und für die weitere Nutzung dunkel und kühl gelagert. AS 6 wurde zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit topographisch vermessen (Kapitel 6.1.3.1), AS 1 und AS 7 zur Bestimmung des Wiederbefeuchtungsverhaltens herangezogen. AS 2, und AS 4 wurden als Rückstellproben für eventuell später nötige Untersuchungen eingelagert.

5.6.4 Endfeuchtegehaltsbestimmung

Zur Bestimmung des Feuchtegehaltes am Ende der Trocknung wurden Proben in den Trockenschrank bei 70 °C für 48 Stunden getrocknet. Es wurde nicht auf die Standardmethode 105 °C für 24 Stunden zurückgegriffen [AOAC, 1980], da Vorversuche zeigten, dass die Äpfel sich während dieses Prozesses sehr stark veränderten und es zu Veränderungen der Trockensubstanzzusammensetzung durch Oxidation gekommen war.

Die Proben kühlten für eine Stunde in einem Exsikkator ab. Danach wurden sie mit einer Präzisionswaage (Precisa XB 220A) ausgewogen. Aus den erhaltenen Gewichtsdaten vor und nach der Endtrocknung wurde der Endwasser-gehalt bestimmt und daraus auf Grundlage der erhaltenen Gewichtsdaten der Feuchtegradverlauf berechnet.

5.6.5 Bilddatenerfassung

Die Bilddaten wurden mit einer handelsüblichen USB-CCD-Industriekamera (The ImagingSource DFK 31BU03.H) im Fünf-Minuten-Takt aufgenommen. Um den Einfluss von eventuell einfallendem Streulicht auszuschließen, befand sich der Trockner in einer Dunkelkammer. Die Trockenkammer wurde mit einem an die Kamera angeschlossenen LED-Ringlicht ausgeleuchtet. Das Licht kann in seiner Intensität eingestellt werden. Weiterhin bietet die vom Kamerahersteller mitgelieferte Software (IC Capture) eine Vielzahl von Einstellmöglichkeiten für Kamera und Beleuchtung. Um dennoch anfallende Schwankungen in der Beleuchtung zu eliminieren, wurde immer die Standardweißkachel (Minolta) mit aufgenommen. Die Ringbeleuchtung kann nicht direkt auf die Probe gerichtet werden, da sonst zu Beginn der Versuche an der feuchten Oberfläche Reflexionen entstehen. Bild 14 zeigt Aufnahmen eines Apfels zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Trocknung. Es ist zu erkennen, dass sich die Größe verändert und bestimmte Elemente der Struktur stärker zur Geltung

kommen. Dies belegt die Notwendigkeit der Messung der gesamten Oberfläche anstelle eines kleinen ausgewählten Teilausschnittes.

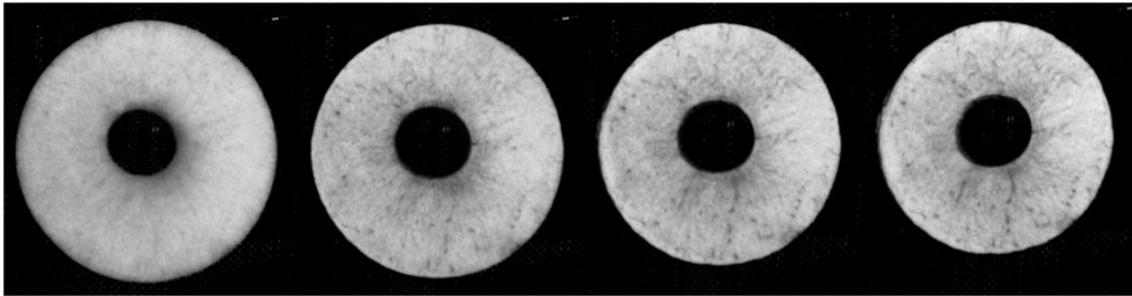


Bild 14. Zeitlicher Verlauf der Größenänderung einer Apfelscheibe während des Trocknungsprozesses, $X_0=5,8 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$ (links), $X_3=1,8 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$ (rechts)

5.6.6 Streifenlichtprojektion und Rasterelektronenmikroskopie

Zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit mittels Streifenlichtprojektion wurden die Apfelscheiben an drei Stellen markiert und auf einer Fläche von $12 \times 10 \text{ mm}$ vermessen. Die Apfelscheiben bedurften für diese Untersuchungen keiner weiteren Vorbereitung.

Für die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen der sichtbaren Fläche wurden aus der Apfelscheibe mit einem Skalpell Stücke mit den Kantenlängen $4 \times 4 \text{ mm}$ ausgeschnitten. Zur Untersuchung der vertikal zur sichtbaren Fläche liegenden Porenstruktur wurde zunächst eine 3 mm dicke Scheibe ausgeschnitten. Anschließend wurde die Scheibe auf eine der beiden entstandenen Schnittflächen gelegt und Stücke mit den Kantenlängen $4 \times 4 \text{ mm}$ präpariert. Zur Entfernung des Restwassers wurden die Proben 48 Stunden bei $70 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet. Die Proben kühlten im Exsikkator ab und wurden von dort direkt auf den Projektträger gegeben und anschließend mit Gold beschichtet und vermessen.

6 Ergebnisse

6.1 Gut- und Prozessparameter

6.1.1 Feuchteverteilung in einem Apfel

Zur Bestimmung der Feuchteverteilung in einem Apfel wurde ein Apfel in 3,8 mm dicke Scheiben geschnitten, das Kerngehäuse definiert ausgestanzt (20 mm) und der Außendurchmesser wie bei den Äpfeln für die Trocknungsversuche auf 72 mm gebracht. Die Scheiben wurden in jeweils vier Sektoren geschnitten und jeder einzelne Sektor nummeriert, eingewogen und dann für 48 Stunden bei 70 °C im Trockenschrank getrocknet (Bild 15).

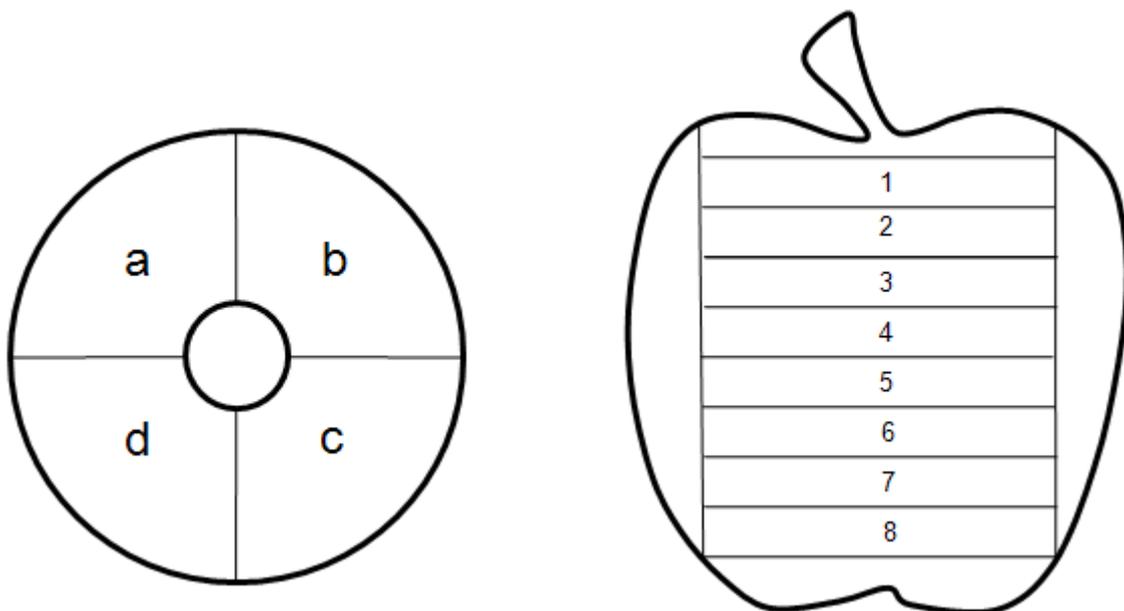


Bild 15. Aufteilung der Apfelscheiben in Sektoren und Anordnung der Scheiben im Apfel, links horizontal, rechts vertikal

Anschließend wurden die Sektoren abermals ausgewogen und daraus die Feuchteverteilung innerhalb einer einzelnen Scheibe sowie die Verteilung entlang der Mittelachse bestimmt. Es sind Schwankungen erkennbar, diese sind jedoch durch die natürliche Struktur des Apfels bedingt und nicht zu vermeiden. Weiterhin spielen sich die Schwankungen in einem sehr engen Rahmen ab, und die Mittelwerte der einzelnen Scheiben sind nahezu identisch ($X_0=86,7 \% \pm 0,8 \%$). Somit ist es zulässig, bei der Bestimmung des Endfeuchtegehaltes von den beiden untersuchten Scheiben auf den gesamten Apfel rückzuschließen.

6.1.2 Einfluss der Scheibendicke auf die Prozessdauer

Die Dicke der Trocknungsgutstücke hat einen signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer [Rahman & Kumar, 2007]. In Bild 16 ist die Auswirkung einer Verringerung der Scheibendicke von Apfelscheiben von 3,8 mm auf 2,8 mm für zwei unterschiedliche Trocknungsbedingungen dargestellt. In beiden Fällen führt diese Verringerung zu einer Reduktion der benötigten Trocknungszeit um etwa 50 %. Fernando et al. (2008) ermittelten vergleichbare Werte für Knoblauch- und Papayascheiben. Dissa et al. (2008) ermittelten für eine Verringerung der Dicke von Mangoscheiben von 16 mm auf 8 mm eine Reduktion der daraus resultierenden Trocknungsdauer von 62 %.

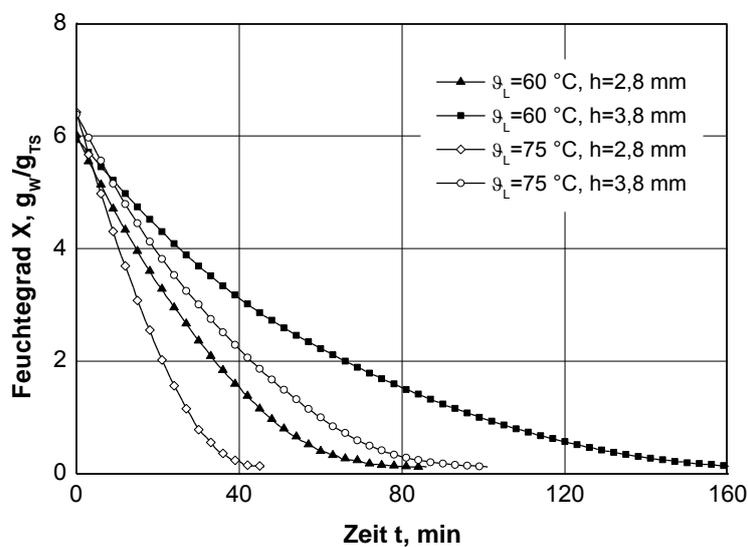


Bild 16. Trocknungsverlauf für Apfelscheiben unterschiedlicher Dicke bei unterschiedlichen Trocknungsparametern $\vartheta_L=60^\circ\text{C}$ ($v_L=3,4\text{ m/s}$, $\vartheta_{TP}=17,5^\circ\text{C}$), $\vartheta_L=75^\circ\text{C}$ ($v_L=4,3\text{ m/s}$, $\vartheta_{TP}=17,5^\circ\text{C}$)

Durch die deutliche Verkürzung der Trocknungsdauer wird die Einwirkzeit der Temperatur deutlich verkürzt, wodurch die thermische Schädigung reduziert werden kann. Bashir (1998) zeigte, dass die Dicke der Zwiebelringe bis 6 mm keinen negativen Einfluss auf die Farbveränderungen des Produktes hat, darüberhinaus jedoch aufgrund der längeren Einwirkzeit der Temperatur Schädigungen auftreten.

6.1.3 Einfluss des Anfangsfeuchtegehaltes und der Lagerdauer

Die verwendeten Äpfel stammten aus einem CA-Lager (*Controlled Atmosphere*), und die Chargen für Vor- und Hauptversuche wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten bezogen. Um den Einfluss der Einlagerungsdauer zu bestimmen, wurden Proben aus beiden Chargen unter identischen Bedingungen getrocknet. Zur Bestimmung des Einflusses des Anfangswassergehaltes auf die Trocknungsdauer und die während der Trocknung ablaufenden Verände-

rungen wurden Vergleichsversuche durchgeführt. Weiterhin erfordert die Implementierung verschiedener Trocknungsstrategien die Untersuchung von deren Einflüssen auf die Versuchsergebnisse.

6.1.3.1 Steuerung des Prozesses nach der Temperatur der Trocknungsluft

Zur Bestimmung des Einflusses des Anfangswassergehaltes wurde eine Reihe von Versuchen unter identischen Bedingungen ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$, $v_L=3,4\text{ m/s}$) durchgeführt. Der Einfluss der Lagerungsdauer wurde anhand zweier Chargen untersucht, die in einem zeitlichen Abstand von 2 Monaten aus dem CA-Lager bezogen wurden und vom gleichen Erntezeitpunkt stammen.

Bild 17 zeigt die Trocknungsverlaufskurven der Äpfel aus Charge 1. Die Anfangsfeuchte variiert zwischen den Proben sehr stark. Der maximale Anfangsfeuchtegrad beträgt dabei $8,3\text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ und der minimale $5,5\text{ g}_W/\text{g}_{TS}$. Alle Proben erreichen ungefähr nach der gleichen Trocknungszeit den angestrebten Endfeuchtegrad $X_E=0,13\text{ g}_W/\text{g}_{TS}$. Die Proben mit dem höchsten Anfangsfeuchtegrad waren sogar etwas schneller trocken als die mit niedrigerem. Diese Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen von Nguyen & Price (2007) für Bananen überein.

In Bild 18 sind die Trocknungsverläufe für Charge 2 dargestellt. Auch hier erreichen alle Proben ungefähr zum gleichen Zeitpunkt den Endfeuchtegrad $X_E=0,13\text{ g}_W/\text{g}_{TS}$. Dieser stimmt mit den Erkenntnissen aus der ersten Testreihe überein. Weiterhin zeigt sich, dass die Anfangsfeuchtegrade X_0 im Schnitt deutlich niedriger liegen als bei Charge 1. Die Äpfel haben während der längeren Lagerung deutlich an Wasser verloren.

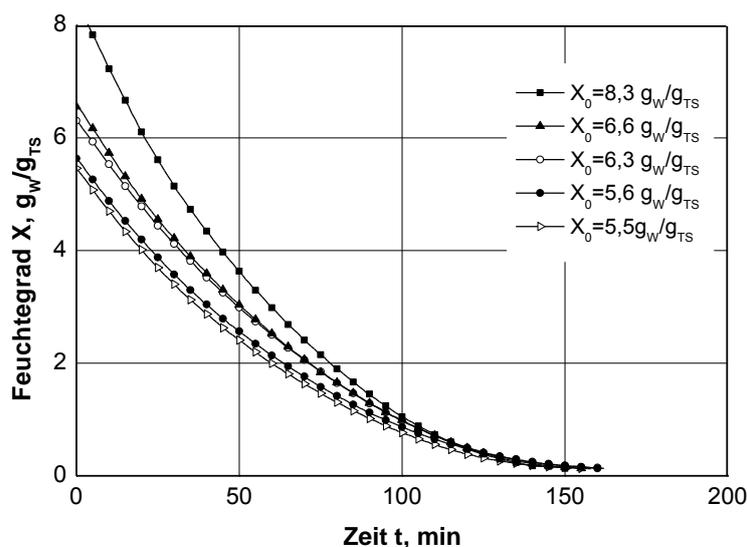


Bild 17. Trocknungsverlauf von Äpfeln unterschiedlicher Anfangsfeuchtegrade bei identischen Trocknungsbedingungen, Charge 1, $\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$, $v_L=3,4\text{ m/s}$

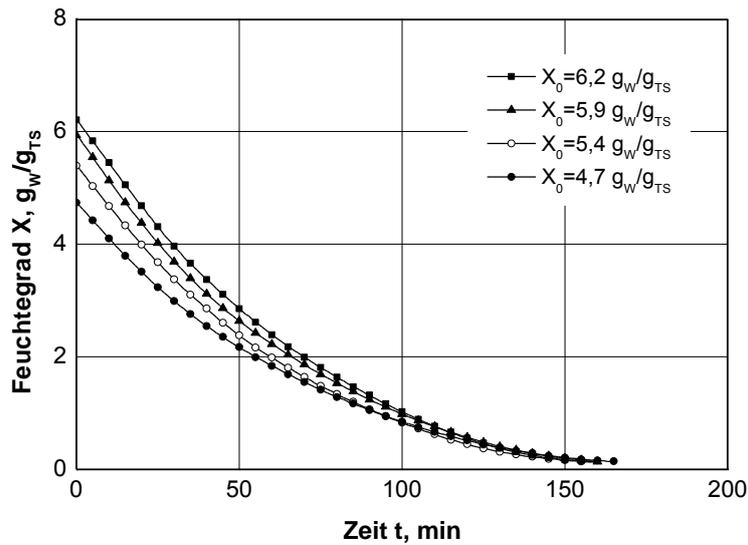


Bild 18. Trocknungsverlauf von Äpfeln unterschiedlicher Anfangsfeuchtegrade bei identischen Trocknungsbedingungen, Charge 2, Prozessbedingungen wie in Bild 17

Bild 19 zeigt die Gesamttrocknungszeit der einzelnen Proben als Funktion des Anfangswassergehaltes.

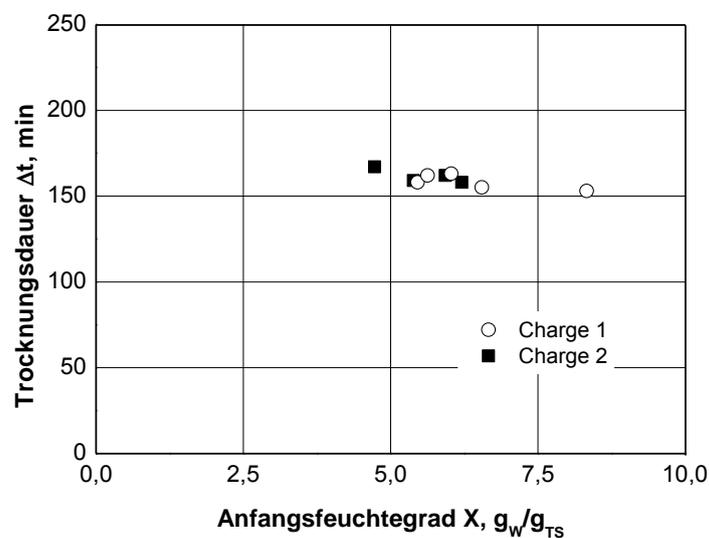


Bild 19. Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ in Abhängigkeit vom Anfangsfeuchtegrad, Prozessbedingungen wie in Bild 17

Bei der Auftragung der Trocknungsdauer über dem Anfangsfeuchtegrad wird deutlich, dass die Lagerdauer bei gleichem Anfangsfeuchtegrad keinen Einfluss auf die Trocknungsdauer hat. Alle untersuchten Proben wurden unabhängig vom Anfangsfeuchtegrad etwa zur gleichen Zeit trocken. Mit zunehmendem Anfangsfeuchtegrad sinkt die benötigte Trocknungsdauer leicht ab.

Die Trocknungsgeschwindigkeit (Bild 20) liegt bei den Proben mit höherem Anfangsfeuchtegrad bis zu einem Feuchtegrad von $X=0,4 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ höher als bei denen mit niedrigem.

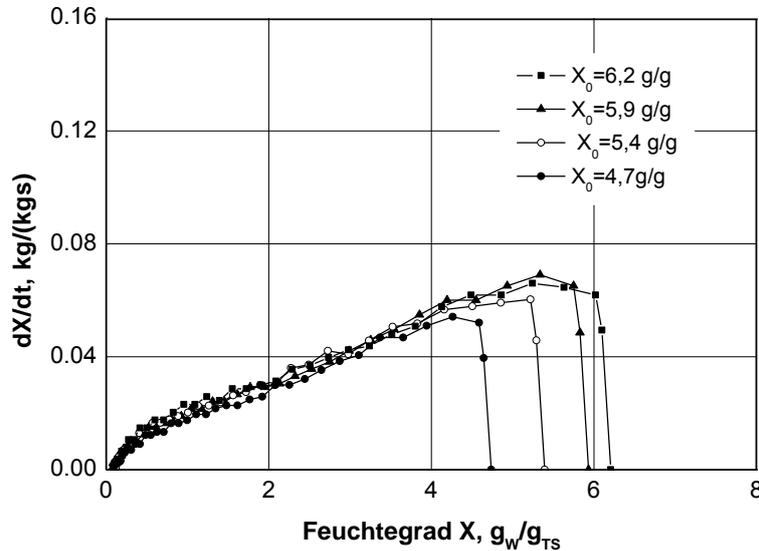


Bild 20. Trocknungsgeschwindigkeit für unterschiedliche Anfangsfeuchtegrade als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 17

Zur Bestimmung des Einflusses des Anfangsfeuchtegrades auf Temperatur- und Farbänderungen wurden diese in Bild 21 und Bild 22 zusammengestellt.

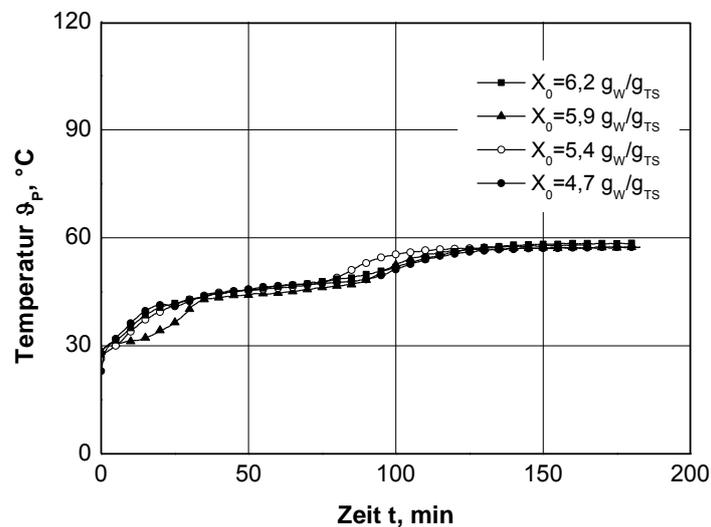


Bild 21. Einfluss des Anfangsfeuchtegrades X_0 auf die zeitliche Entwicklung der Produkttemperatur, Prozessbedingungen wie in Bild 17

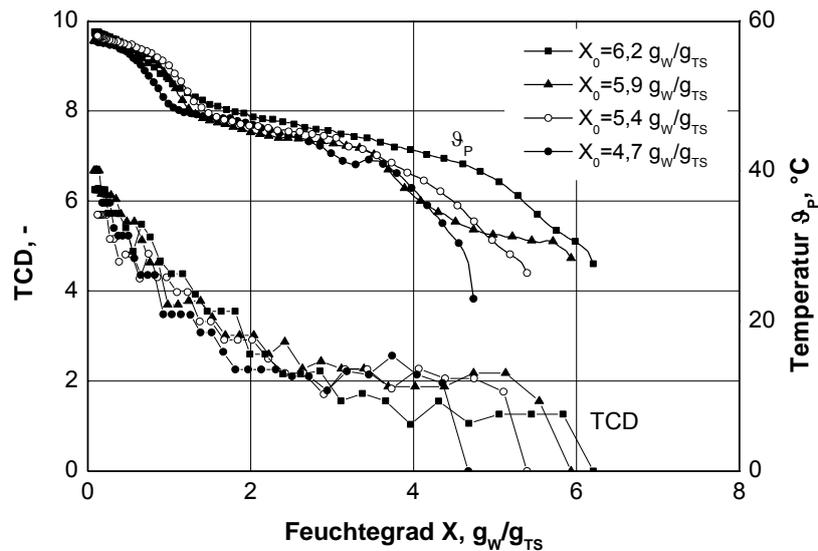


Bild 22. Produkttemperatur und TCD für unterschiedliche Anfangsfeuchtegrade X_0 als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 17

Es sind nur geringfügige Unterschiede in den Produkttemperatur- und Farbveränderungen erkennbar, die jedoch nicht klar auf die unterschiedlichen Anfangsfeuchtegrade zurückzuführen sind.

Bild 23 zeigt den Verlauf der Flächenschrumpfung als Funktion des Feuchtegrades. Die Verläufe sind für alle Proben ähnlich, hängen jedoch ebenfalls vom Anfangsfeuchtegrad ab, was zu einer Parallelverschiebung auf der x-Achse führt.

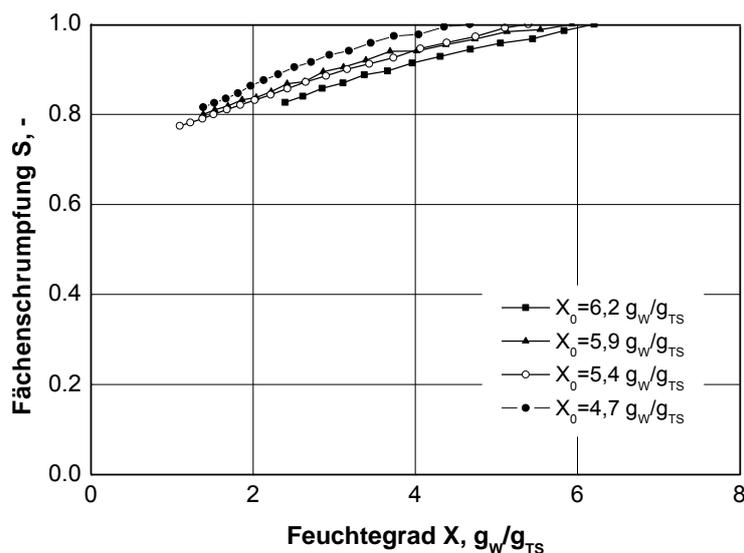


Bild 23. Flächenschrumpfung S für unterschiedliche Anfangsfeuchtegrade X_0 als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen siehe Bild 17

Zur Untersuchung der mikrostrukturellen Ursachen für die sehr unterschiedlichen Trocknungsgeschwindigkeiten wurden aus Charge 1 die beiden Proben mit dem höchsten (Probe 1, $X_0=8,3 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$) und niedrigsten (Probe 2, $X_0=5,5 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$) Anfangsfeuchtegrad topographisch (Bild 24 bis Bild 27) (GFM MicroCAD) und rasterelektronenmikroskopisch (Bild 28 bis Bild 31) (Zeiss DSM 940) untersucht.

Zur detaillierten Bestimmung der Rauigkeit der sichtbaren Oberfläche wurden in die topographischen Aufnahmen jeweils drei horizontale und zwei vertikale Linien gelegt und deren Verläufe analysiert. Maxima und Minima dieser Linien erlauben eine Aussage über die Rauigkeitstiefe und Häufigkeit der Rauigkeiten. Die in Bild 26 und Bild 27 dargestellten Linien entsprechen von oben nach unten zunächst den horizontalen Linien von oben nach unten und dann den vertikalen Linien von links nach rechts der jeweils zugehörigen topographischen Aufnahme (Bild 24 und Bild 25).

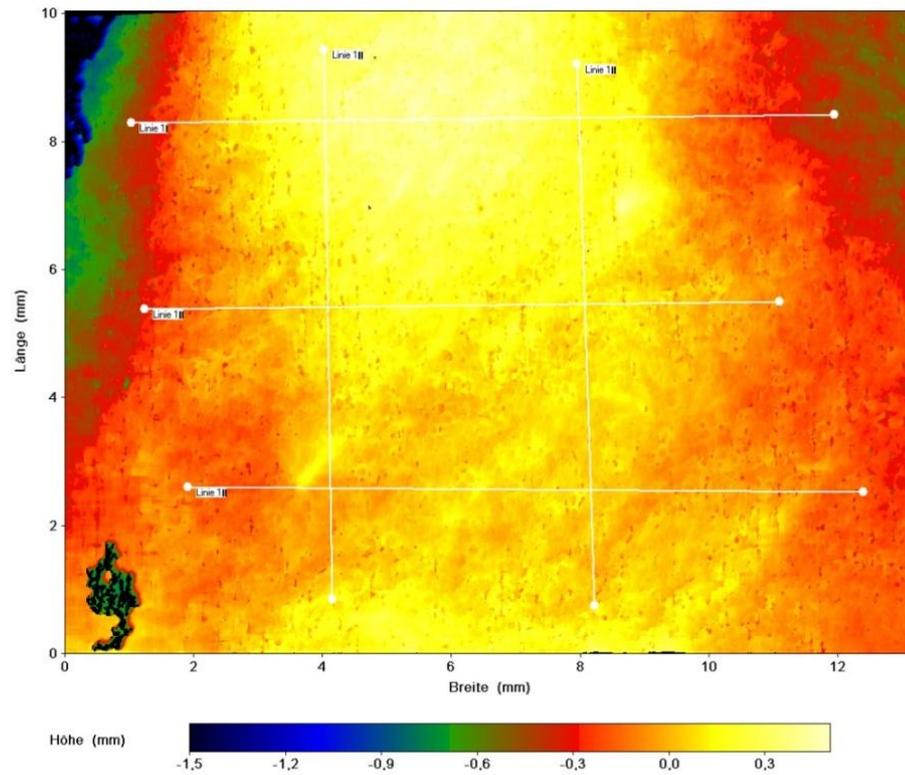


Bild 24. Topografische Aufnahme der Schnittfläche von Probe 1 ($X_0=8,3 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$) nach der Trocknung

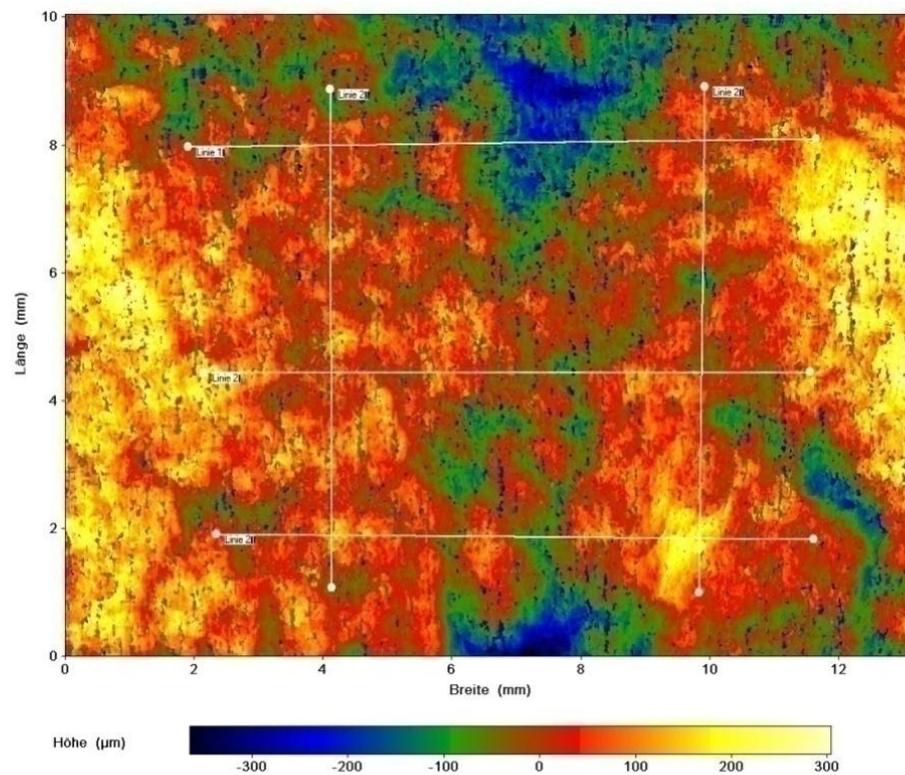


Bild 25. Topografische Aufnahme der Schnittfläche von Probe 2 ($X_0=5,5 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$) nach der Trocknung

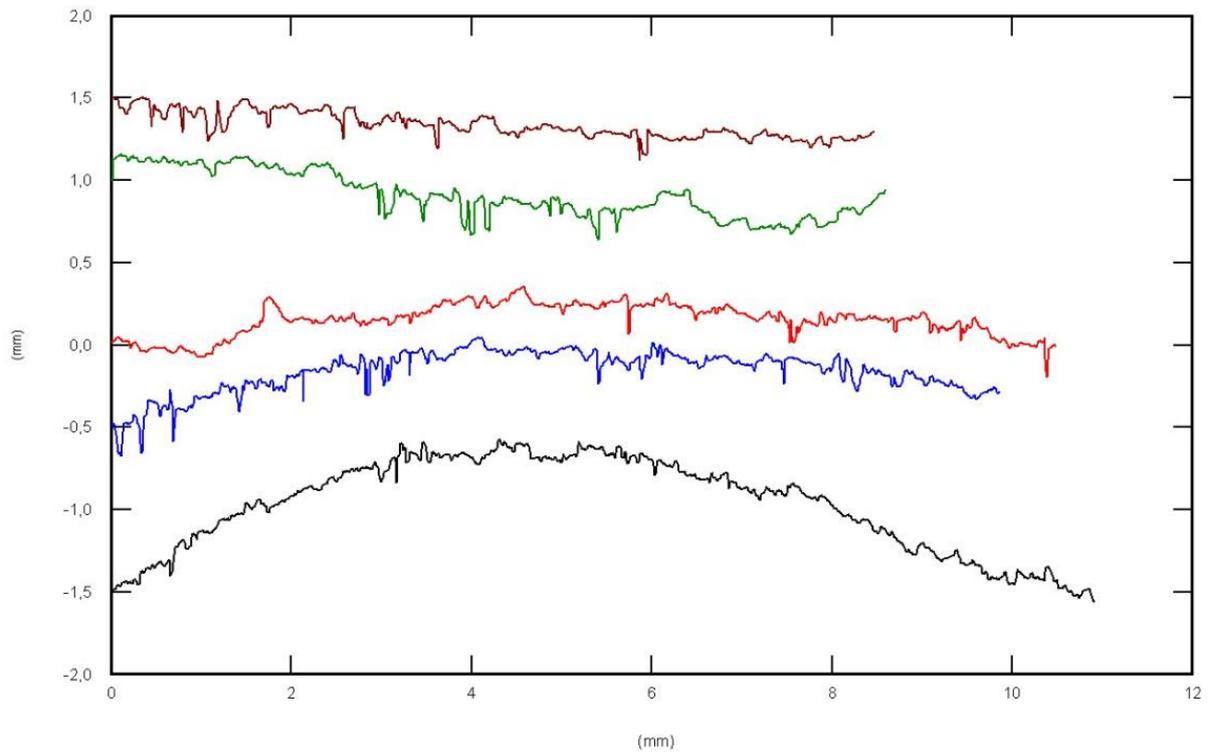


Bild 26. Rauigkeitswerte Probe 1, $X_0=8,3 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$

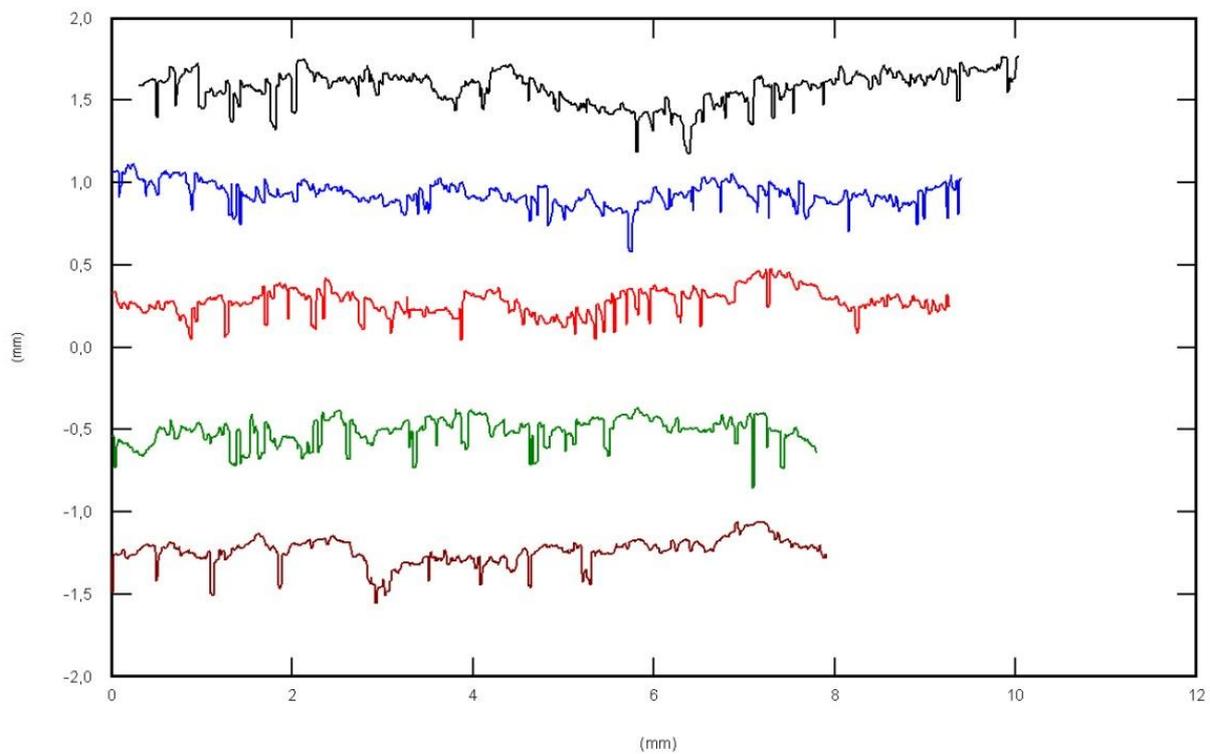


Bild 27. Rauigkeitswerte Probe 2, $X_0=5,5 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$

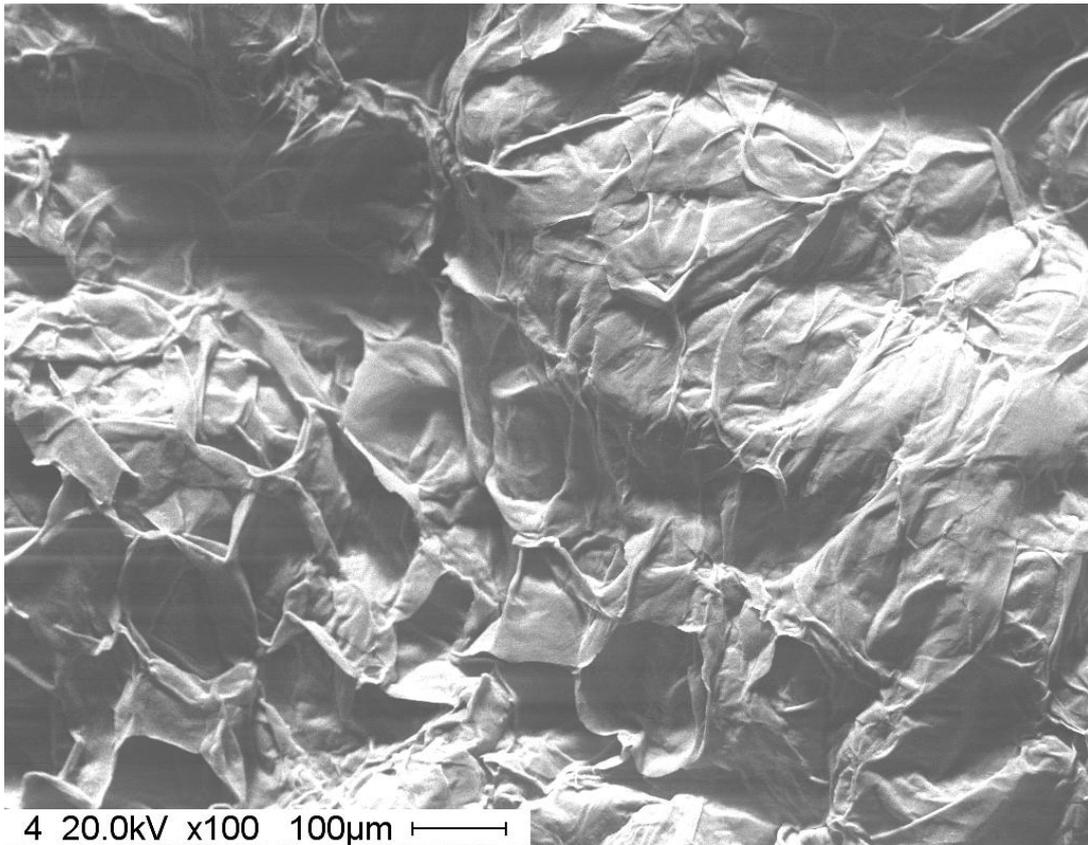


Bild 28. Sichtbare Oberfläche Probe 1, 100-fach vergrößert, $X_0=8,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$

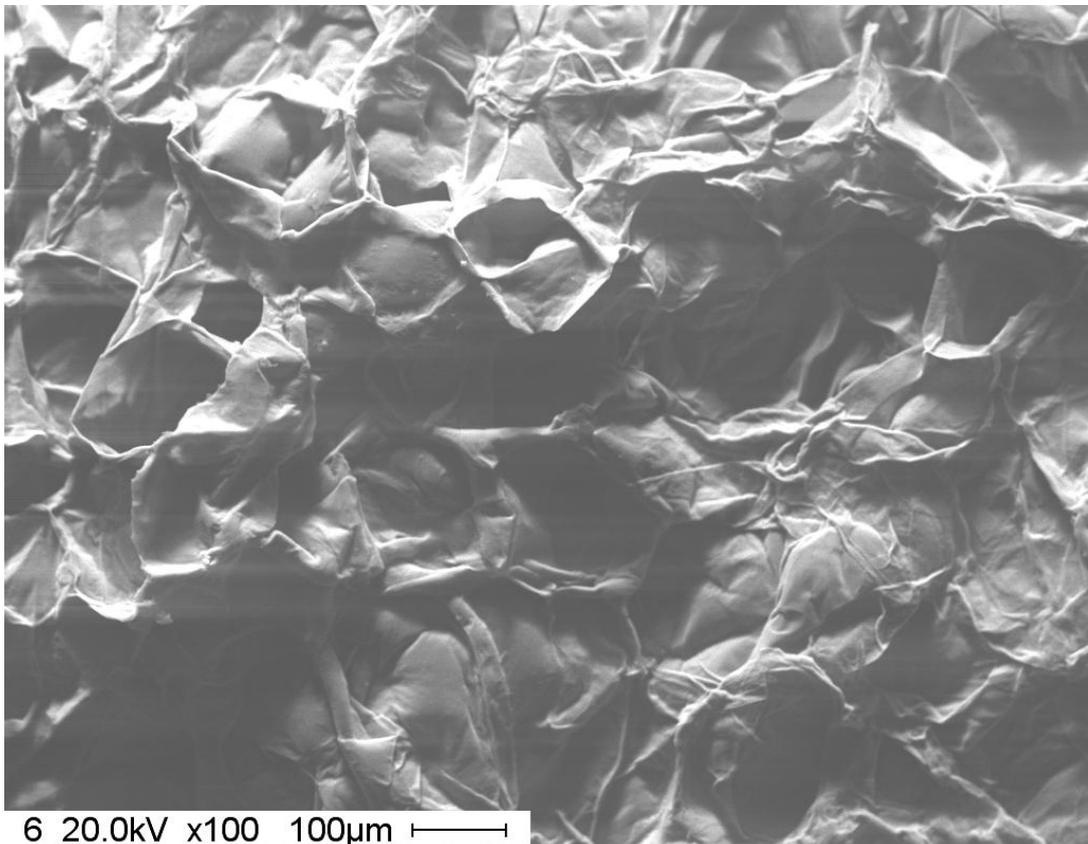


Bild 29. Sichtbare Oberfläche Probe 2, 100-fach vergrößert, $X_0=5,5 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$

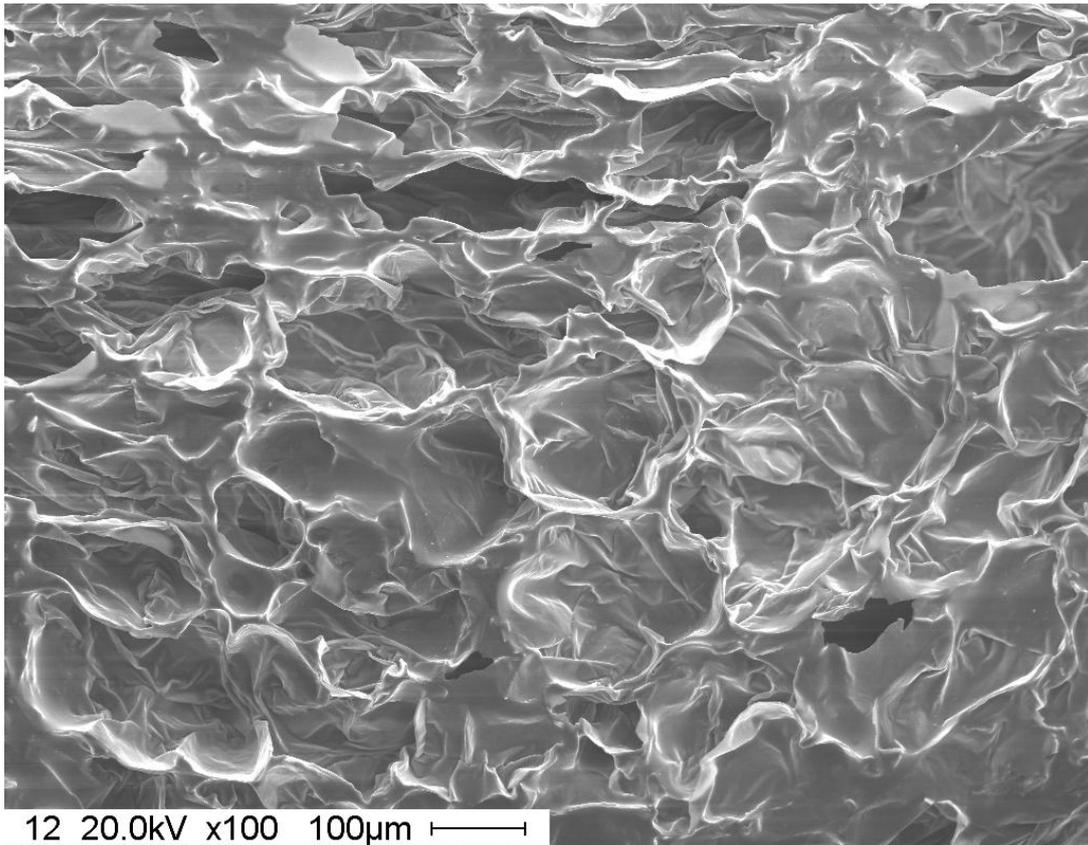


Bild 30. Vertikale Schnittfläche Probe 1, 100-fach vergrößert, $X_0=8,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$

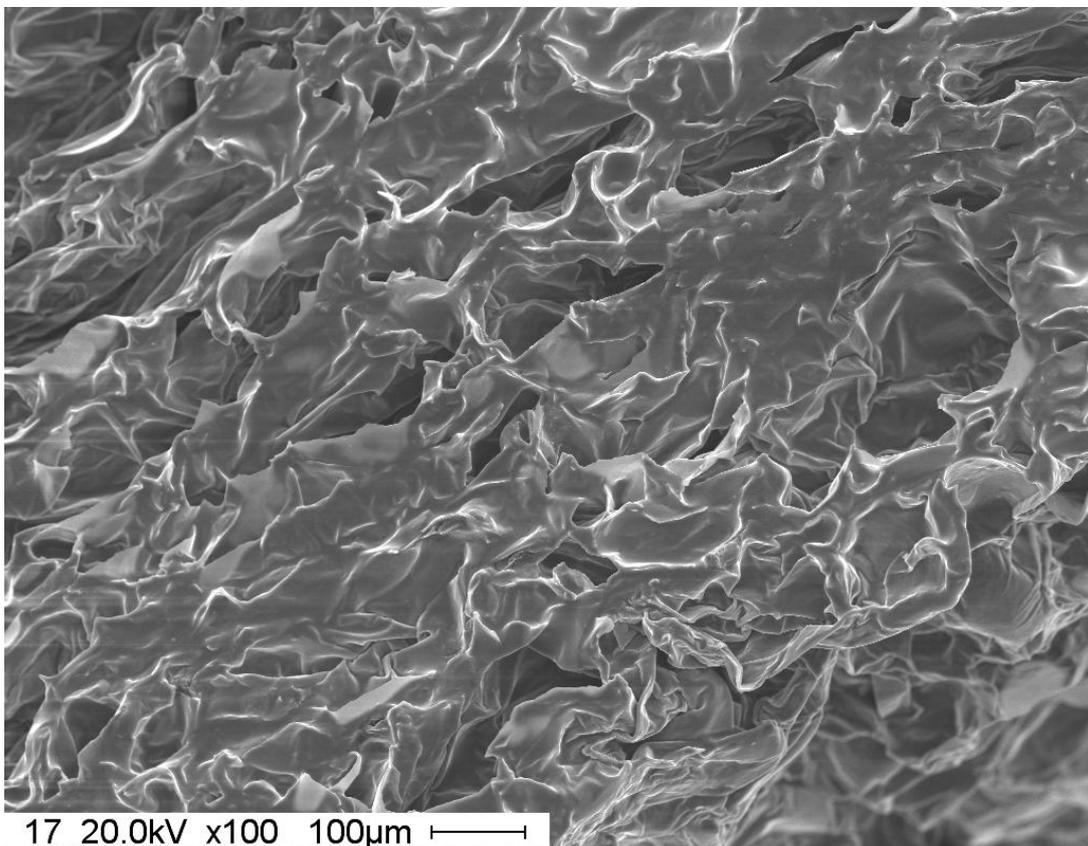


Bild 31. Vertikale Schnittfläche Probe 2, 100-fach vergrößert, $X_0=5,5 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$

Ein Vergleich der erhaltenen topografischen Daten zeigt klare Unterschiede zwischen den untersuchten Proben. Probe 1 weist nur wenige Rauigkeitspitzen auf, deren mittlere Tiefe bezogen auf die Vergleichsprobe gering ist (Bild 26). Probe 2 hingegen zeichnet sich durch eine erhöhte Rauigkeit aus (Bild 27). Anzahl und Ausprägung der Spitzen sind deutlich größer als bei der Vergleichsprobe.

Die REM-Aufnahmen (Bild 28 bis Bild 31) zeigen deutliche Unterschiede der Strukturen der Vergleichsproben. Bei Probe 1 (Bild 28) ist die Struktur sehr stark in sich zusammen gesackt, es gibt kaum Bereiche, in denen die Zellreste offen stehen, die Aufnahme vertikal zur Schnittfläche der Apfelscheibe zeigt sehr große Zellreste (Bild 30). Probe 2 (Bild 29) hingegen weist sich durch eine deutlich besser erhaltene Struktur aus. Viele Zellreste stehen offen, es gibt kaum Bereiche, die komplett in sich zusammengesackt sind. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Zellgröße bei Probe 1 deutlich größer ist als bei Probe 2. Weiterhin sind die Zellwände von Probe 1 deutlich dünner als von Probe 2. Die Aufnahmen zeigen, dass Proben mit niedrigem Anfangsfeuchtegrad deutlich stabilere Zellwände aufweisen als Proben mit hohem Anfangsfeuchtegrad. Dadurch wird die Diffusion durch die Zellwände erschwert. Weiterhin bedingen kleinere Zellen eine höhere Kapillarwirkung.

6.1.3.2 Steuerung des Prozesses nach der Temperatur des Produktes

Zur Bestimmung des Einflusses des Anfangsfeuchtegrades auf Trocknungskinetik und Produkteigenschaften bei Steuerung des Prozesses durch Konstanthalten der Produkttemperatur wurde eine Reihe von Versuchen unter identischen Bedingungen ($\vartheta_p=47,5\text{ °C}$, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$, $v_L=3,4\text{ m/s}$) durchgeführt. In Bild 32 sind die Trocknungsverlaufskurven dargestellt. Analog zu den Ergebnissen der lufttemperaturgesteuerten Versuche stellt sich auch hier eine nahezu identische Trocknungsdauer für alle Proben ein.

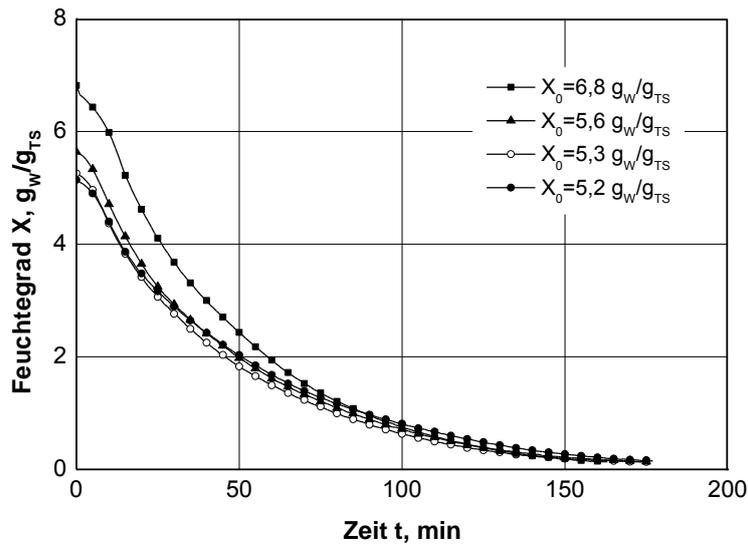


Bild 32. Trocknungsverlauf von Äpfeln unterschiedlicher Anfangsfeuchtegrade X_0 bei identischen Trocknungsbedingungen als Funktion der Zeit, $\vartheta_p=47,5\text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ }^\circ\text{C}$, $v_L=3,4\text{ m/s}$

In Bild 33 ist die Gesamttrocknungsdauer der untersuchten Proben dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die resultierenden Trocknungszeiten sehr eng beieinander liegen und die Proben mit hohem Anfangsfeuchtegrad eine kürzere Trocknungsdauer haben als die mit niedrigem Anfangsfeuchtegrad.

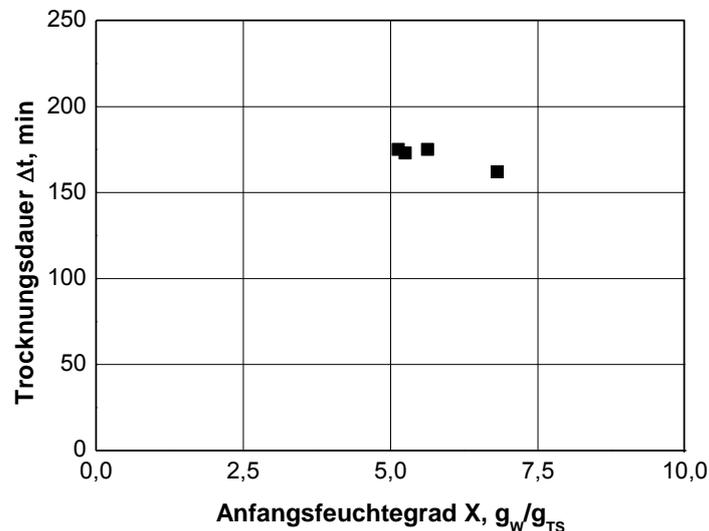


Bild 33. Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13\text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ in Abhängigkeit vom Anfangsfeuchtegrad, Prozessbedingungen wie in Bild 32

Die Trocknungsgeschwindigkeiten (Bild 34) unterscheiden sich von einander. Je höher der Anfangsfeuchtegrad ist, desto höher fallen mittlere und maximale Trocknungsgeschwindigkeit aus.

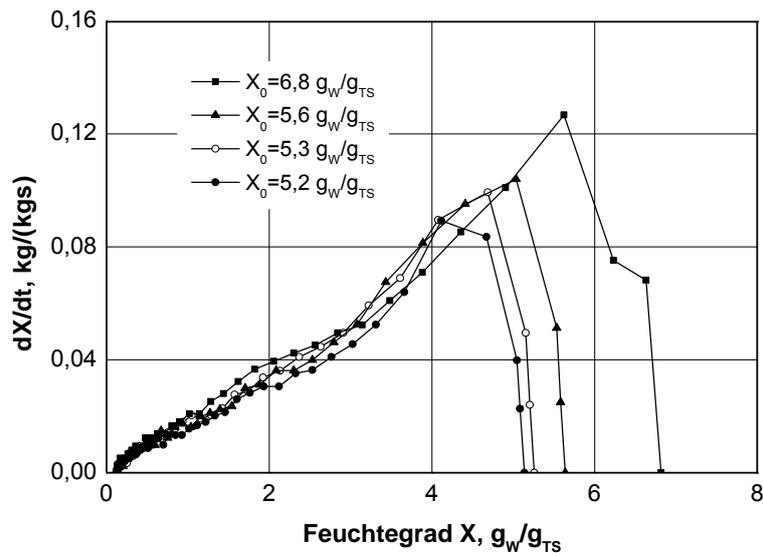


Bild 34. Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades von Äpfeln unterschiedlicher Anfangsfeuchte bei identischen Trocknungsbedingungen, Prozessbedingungen wie in Bild 32

Die zeitlichen Verläufe der Lufttemperatur (Bild 35) sind für alle Versuche ähnlich und nur leicht zueinander verschoben.

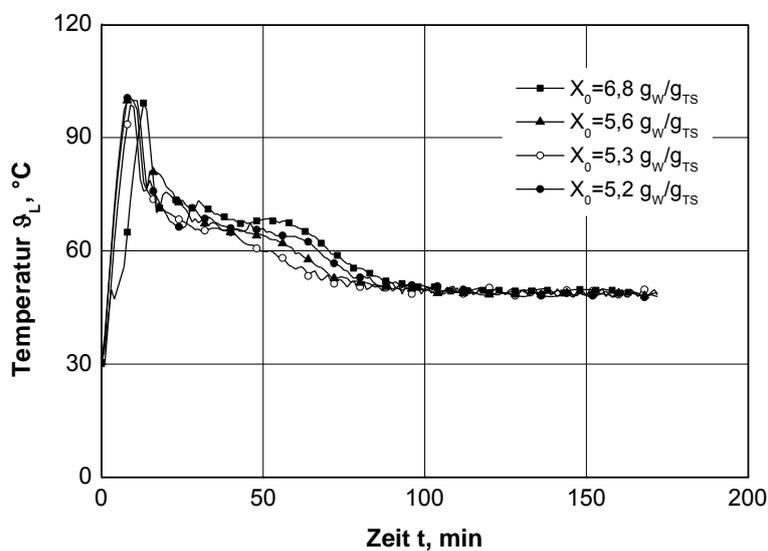


Bild 35. Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur, Prozessbedingungen wie in Bild 32

Wird die Lufttemperatur über den Feuchtegrad aufgetragen (Bild 36), ist erkennbar, dass die Temperaturverläufe ab einem Feuchtegrad von $X=3 \text{ g}_w/\text{g}_{\text{TS}}$ für alle untersuchten Proben nahezu identisch sind.

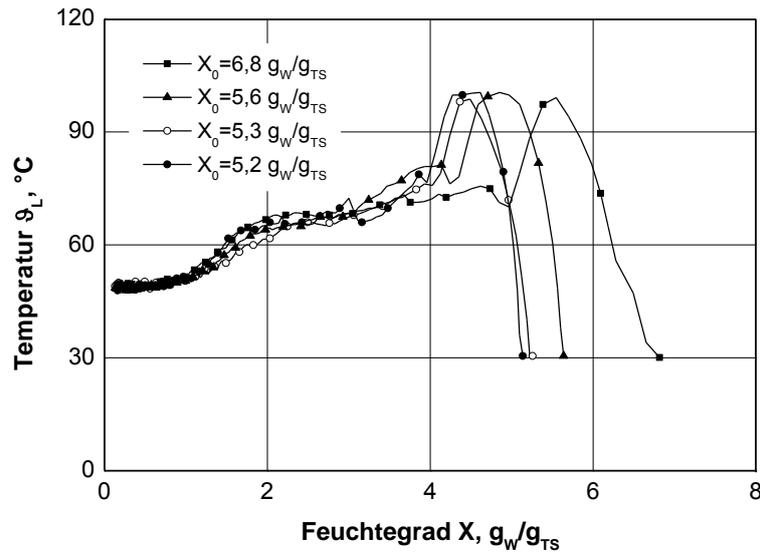


Bild 36. Lufttemperaturverlauf als Funktion des Feuchtegrades bei identischen Trocknungsbedingungen, Prozessbedingungen wie in Bild 32

Bild 37 stellt die Farbveränderungen der Proben als Funktionen des Feuchtegrades dar. Der grundsätzliche Verlauf aller Kurven ist ähnlich, die Streuung relativ groß, die maximale Veränderung jedoch geringer als bei der Regelung der Lufttemperatur (Bild 22).

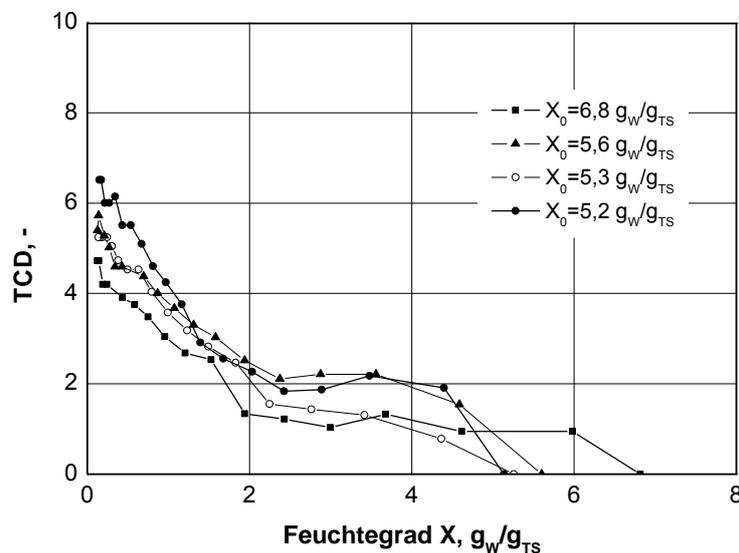


Bild 37. Farbveränderung als Funktion des Feuchtegrades von Äpfeln unterschiedlicher Anfangsfeuchtegrade bei identischen Trocknungsbedingungen, Prozessbedingungen wie in Bild 32

In Bild 38 ist die Flächenschrumpfung der Proben als Funktion des Feuchtegrades dargestellt.

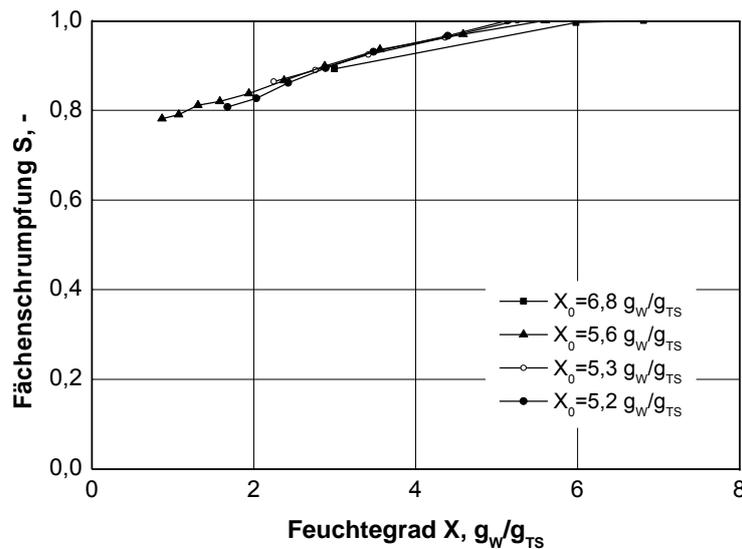


Bild 38. Flächenschrumpfung von Äpfeln unterschiedlicher Anfangsfeuchtegrade bei identischen Trocknungsbedingungen als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 32

Die Schrumpfungsverläufe liegen sehr nahe bei einander. Proben mit einem hohen Anfangsfeuchtegrad schrumpfen zunächst sehr langsam und der Verlauf ist ab einem Feuchtegrad von $X=4 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ praktisch identisch mit den Verläufen der anderen Proben.

6.1.3.3 Diskussion

Für beide untersuchten Trocknungsstrategien hat sich ergeben, dass die benötigte Trocknungsdauer unabhängig vom Anfangsfeuchtegrad bei identischen Einstellungen annähernd identisch ist. Proben mit hohem Anfangsfeuchtegrad besitzen während der gesamten Prozessdauer eine höhere Trocknungsgeschwindigkeit, die auf die strukturellen Unterschiede der verglichenen Proben zurückzuführen ist.

Die Temperaturentwicklungen sind bei beiden Strategien für alle Proben ähnlich, es gibt maximal eine kleine Verschiebung im Feuchtegrad, bei dem der Effekt auftritt. Die Farbergebnisse sind sehr einheitlich wobei die Farbverläufe durchaus unterschiedlich sein können. Dies wird besonders bei der produkttemperaturgesteuerten Trocknung deutlich.

Die Entwicklung der Flächenschrumpfung ist in beiden Fällen für alle Proben ähnlich. Die Steuerung des Prozesses nach der Produkttemperatur (Bild 38) liefert jedoch eine etwas geringere Schrumpfung für hohe Anfangsfeuchtegrade und eine geringere Streuung als die Vergleichsproben (Bild 23).

Auch bei unterschiedlichen Prozessbedingungen können Proben unterschiedlicher Anfangsfeuchtegrade miteinander verglichen werden, da sich die aufge-

nommenen Werte nur minimal im Betrag, nicht jedoch in der Orientierung des Verlaufs unterscheiden.

6.2 Steuerung des Prozesses nach der Temperatur der Trocknungsluft

6.2.1 Einfluss der Temperatur

Zur Untersuchung des Einflusses der Temperatur der Trocknungsluft auf das Trocknungsverhalten der Apfelscheiben wurden diese bei konstantem Luftdurchsatz und konstanter Taupunkttemperatur zwischen 35 °C und 85 °C auf drei Stufen variiert. In Bild 39 sind die Trocknungsverläufe dargestellt.

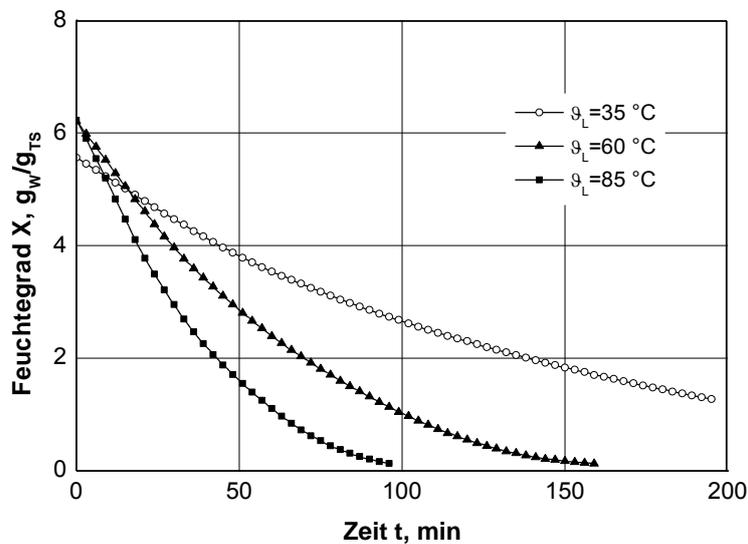


Bild 39. Einfluss der Lufttemperatur bei der Trocknung von Apfelscheiben auf den Trocknungsverlauf, $\vartheta_{TP}=17,5$ °C, $v_L=3,4$ m/s

In Bild 40 ist der Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und der Gesamttrocknungszeit aufgetragen. Neben den Ergebnissen für drei Temperaturniveaus ist der Verlauf des für die Trocknungsdauer aufgestellten Modells (Grundlagen siehe Kapitel 5.5.2, Modellparameter siehe Tabelle 4) dargestellt.

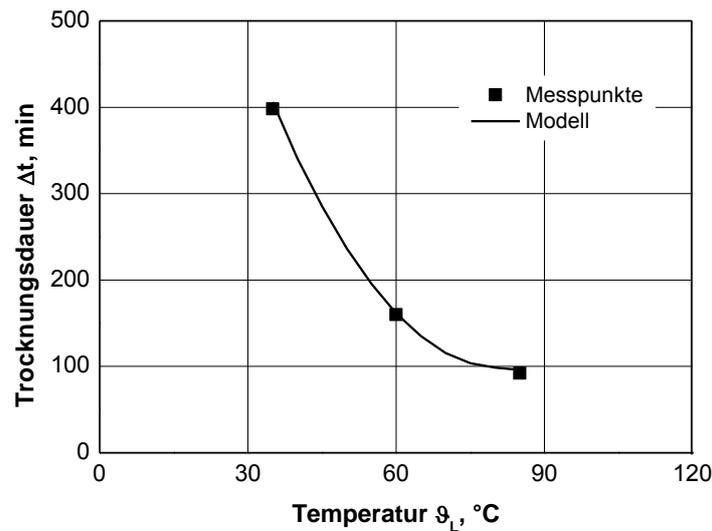


Bild 40. Gesamttrocknungszeit für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Lufttemperatur, Prozessbedingungen wie in Bild 39

Der Trocknungsprozess läuft bei höheren Temperaturen schneller ab. Diese Reduktion verläuft jedoch nicht linear mit der zunehmenden Temperatur der Trocknungsluft. Bei einer Temperatursteigerung von 35 °C auf 60 °C verkürzt sich die Trocknungszeit um 240 Minuten zum Erreichen des Endfeuchtegrades von $X_E=0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$. Eine weitere Steigerung von 60 °C auf 85 °C wirkt sich weniger stark aus, ist jedoch mit 65 Minuten immer noch deutlich. Es ist eine sehr gute Übereinstimmung des Modelles mit den experimentell ermittelten Daten zu erkennen.

Bild 41 zeigt die Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades. Sie ist für höhere Temperaturen immer größer als bei niedrigen Temperaturen.

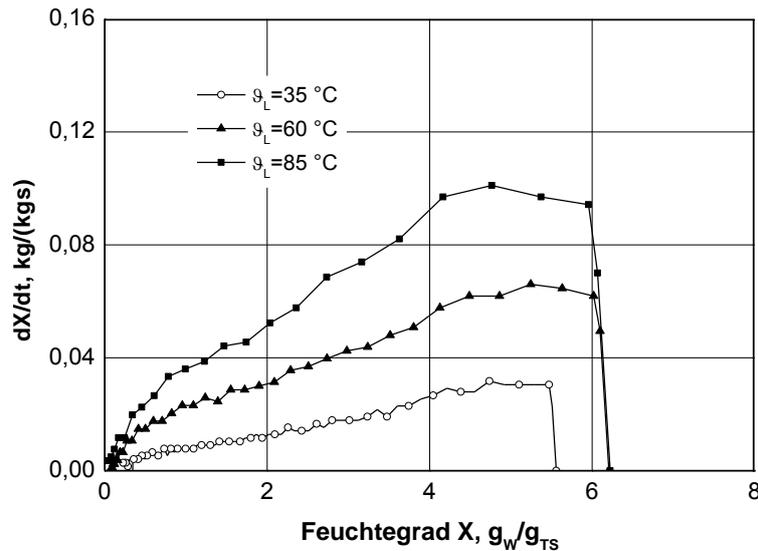


Bild 41. Trocknungsgeschwindigkeit von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Lufttemperaturen als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 39

Bild 42 zeigt den zeitlichen Verlauf der Produkttemperatur der Apfelscheiben bei unterschiedlichen Lufttemperaturen. In Bild 43 ist der Verlauf der Produkttemperatur als Funktion des Feuchtegrades aufgetragen.

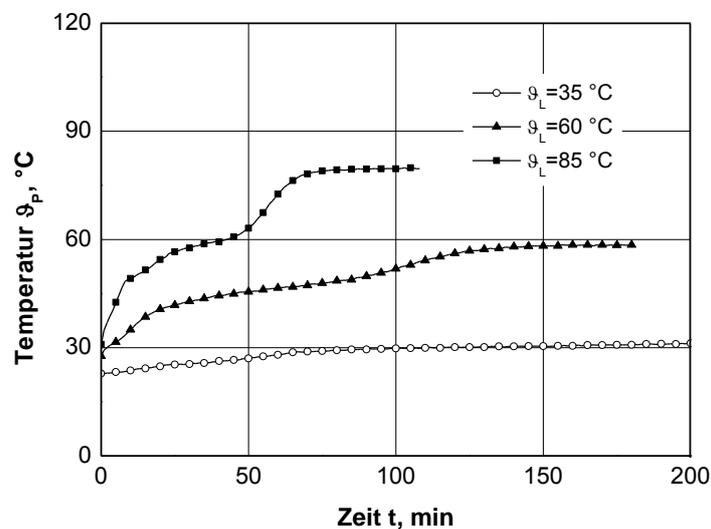


Bild 42. Einfluss der Lufttemperatur auf die Entwicklung der Produkttemperatur bei der Trocknung von Apfelscheiben als Funktion der Zeit, Prozessbedingungen wie in Bild 39

Die Aufwärmphase zeichnet sich durch einen, abhängig von der Trocknungstemperatur, mehr oder weniger ausgeprägten steilen Anstieg der Produkttemperatur aus. Anschließend steigt die Produkttemperatur nur langsam weiter an. In einem dritten Abschnitt erhöht sich die Geschwindigkeit der Temperatur-

änderung abermals, um schließlich in eine langsame Annäherung an die auf-geprägte Lufttemperatur überzugehen.

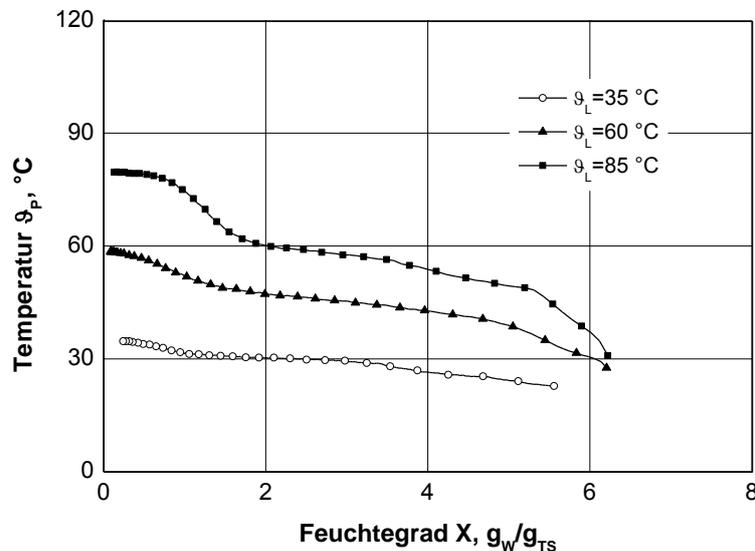


Bild 43. Einfluss der Lufttemperatur auf den Verlauf der Produkttemperatur als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 39

Die Betrachtung der Temperaturveränderung als Funktion des Feuchtegrades zeigt, dass die Lage dieser Abschnitte unabhängig vom Temperaturniveau ist. Zunächst ist ein steiler Anstieg auszumachen, der sich auf die Aufwärmung des Produktes zurückführen lässt. Danach steigt die Temperatur in allen Fällen nur langsam an. Kurz nach Unterschreiten eines Feuchtegrades von $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ ändert sich die Geschwindigkeit der Temperaturveränderungen in allen Fällen. Die Ausprägung des Anstiegs hängt dabei von der eingestellten Temperatur ab. Je höher die Temperatur, desto stärker die Ausprägung.

Bedingt durch die hohe Verdampfungsrate bei hohen Temperaturen wird den Apfelscheiben mehr Wärme durch den Phasenwechsel des Wassers entzogen als bei niedrigen Temperaturen. Dadurch ergibt sich eine größere Differenz zwischen der Produkttemperatur und der Trocknungsluft.

In Bild 44 ist der Verlauf der Farbveränderung der Scheibenoberfläche bei verschiedenen Lufttemperaturen über den Feuchtegrad aufgetragen.

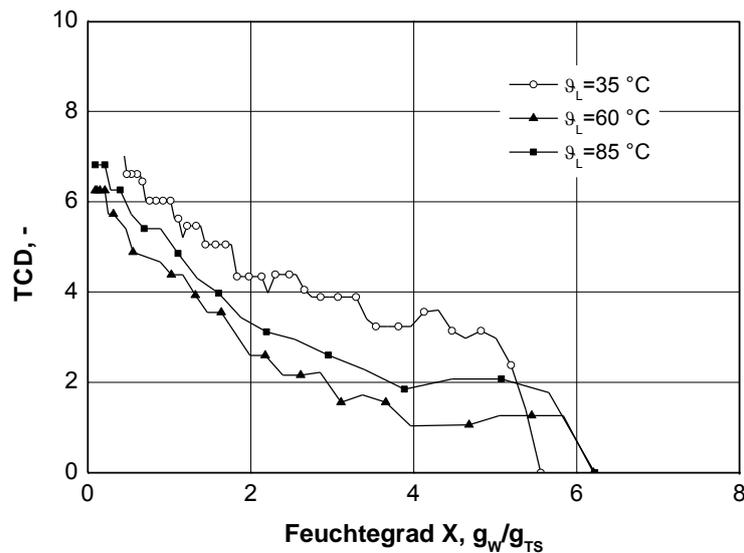


Bild 44. Einfluss der Lufttemperatur bei der Trocknung von Apfelscheiben auf den TCD als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 39

Bei 35 °C Trocknungstemperatur findet schon in der Anfangsphase des Prozesses eine starke Veränderung statt. Mit einem TCD von knapp 7 am Ende des Prozesses ($X=0,2 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$) ist die Farbveränderung geringfügig höher als bei den Vergleichsversuchen. Die geringste Farbveränderung wird bei 60 °C erreicht. Der TCD liegt jedoch mit etwa 6,2 nur knapp unter dem Ergebnis für 85 °C.

Bild 45 zeigt die Verläufe der Flächenschrumpfung der Proben als Funktion des Feuchtegrades.

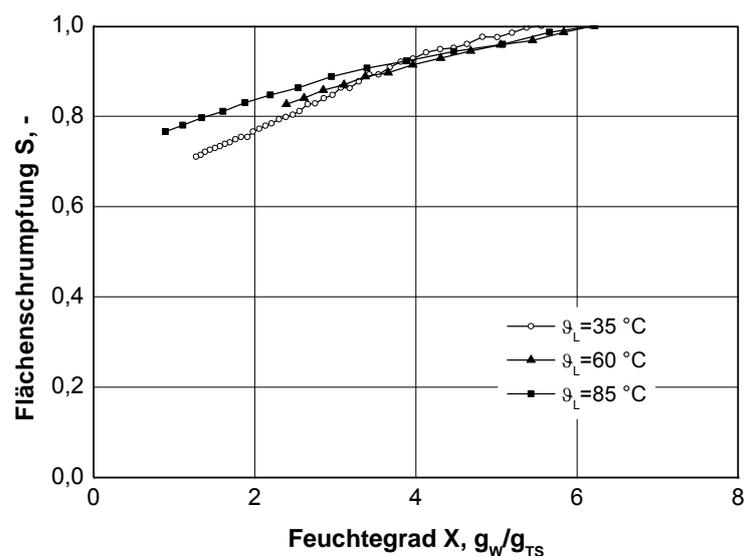


Bild 45. Schrumpfungsverhalten von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Temperaturen als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 39

Die Trocknungstemperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Trocknungsdauer und die untersuchten Qualitätskriterien. Die Veränderungen des Produktes verlangsamten sich bei mittleren Temperaturen, um anschließend wieder anzusteigen. Daraus wird ersichtlich, dass gewisse Temperaturgrenzen nicht überschritten werden dürfen, um die gewünschten Qualitätsmerkmale noch erreichen zu können.

6.2.2 Einfluss der Luftgeschwindigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses der Luftgeschwindigkeit auf das Trocknungsverhalten während der Überströmung wurde diese zwischen 2,0 m/s und 5,3 m/s variiert. Der Feuchtegradverlauf wird von der Geschwindigkeit stark beeinflusst, siehe Bild 46. Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 2,0 m/s auf 3,4 m/s reduziert die Trocknungszeit um 50 Minuten von 215 auf 165 Minuten. Bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit von 3,4 m/s auf 5,3 m/s verringert sich die Trocknungszeit um weitere 30 Minuten auf 135 Minuten.

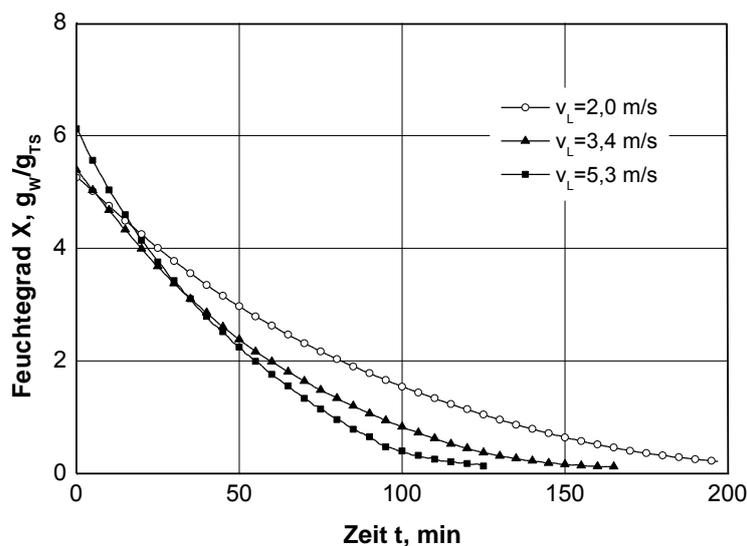


Bild 46. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf den zeitlichen Trocknungsverlauf bei der Trocknung von Apfelscheiben, $\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$

In Bild 47 ist die Gesamttrocknungszeit für die Trocknung von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten und sonst konstanten Bedingungen dargestellt.

Aus der Darstellung der Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades (Bild 48) geht hervor, dass die Trocknungsgeschwindigkeit bei hohen Luftgeschwindigkeiten während des überwiegenden Teils des Prozesses höher ist als bei niedrigen.

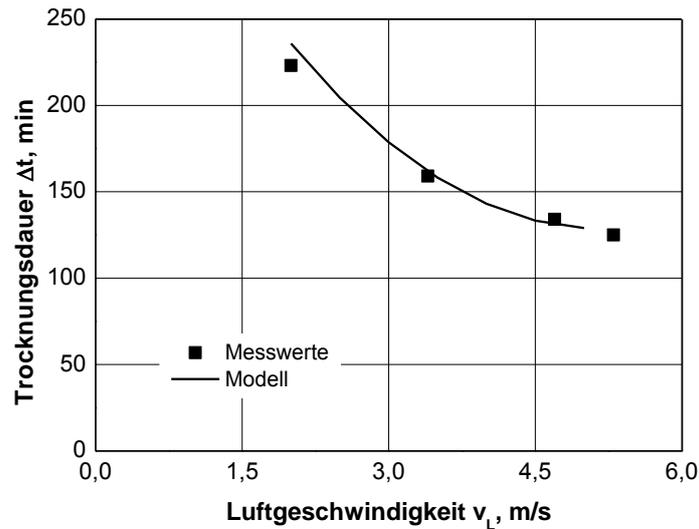


Bild 47. Gesamttrocknungszeit für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Luftgeschwindigkeit, Prozessbedingungen wie in Bild 46

Erst bei einem Feuchtegrad von circa $X=0,4 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ nähern sich die Verläufe an. Ab diesem Zeitpunkt spielt das Geschwindigkeitsniveau nur noch eine untergeordnete Rolle. Bis dahin wird jedoch die Trocknungsgeschwindigkeit wesentlich von der Luftgeschwindigkeit beeinflusst. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Velic et al. (2004), ebenfalls für Äpfel, überein. Somit zeigt sich, dass die Luftgeschwindigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die Trocknungsdauer hat.

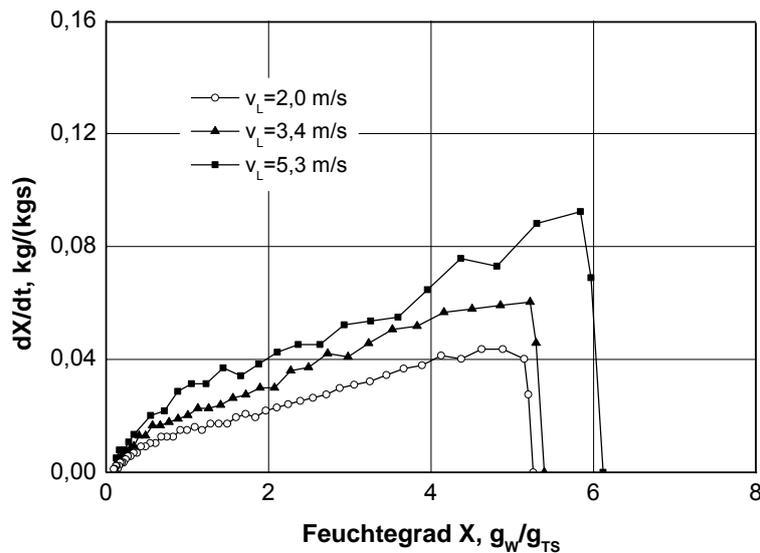


Bild 48. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit dargestellt als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 46

Auch die erfassten Produkttemperaturen weisen deutliche Unterschiede sowohl im zeitlichen (Bild 49) als auch im Verlauf über den Feuchtegrad auf, siehe Bild 50.

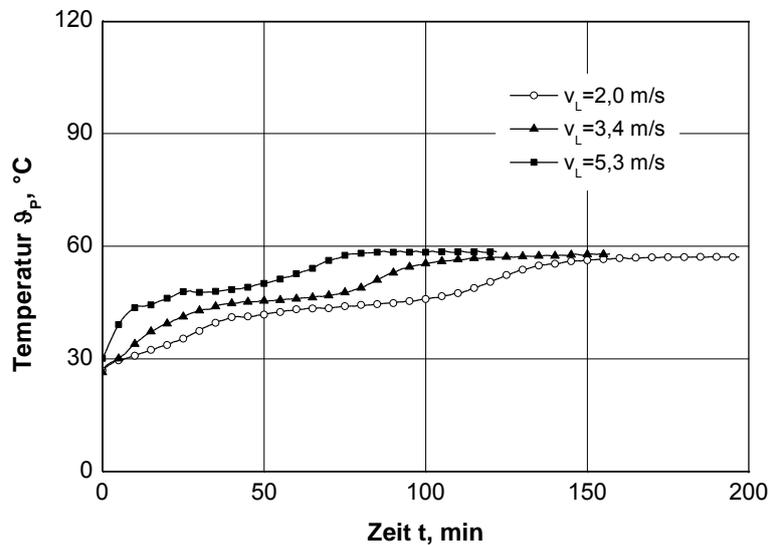


Bild 49. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die zeitliche Entwicklung der Produkttemperatur bei der Trocknung von Äpfeln, Prozessbedingungen wie in Bild 46

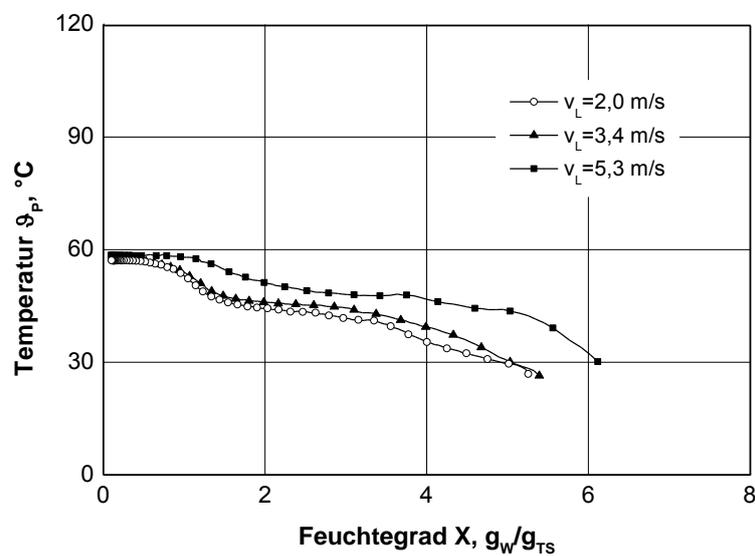


Bild 50. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Entwicklung der Produkttemperatur als Funktion des Feuchtegrades bei der Trocknung von Äpfeln, Prozessbedingungen wie in Bild 46

Je höher die Luftgeschwindigkeit, desto schneller erwärmt sich aufgrund des erhöhten Wärmeübergangs bei erhöhtem Luftmassenstrom das Gut. Bei der höchsten Geschwindigkeit liegt die Produkttemperatur bis zum Ende des Trocknungsprozesses deutlich über den Werten der Vergleichsproben. Auch zwischen den beiden niedrigeren Geschwindigkeiten ist im zeitlichen Verlauf ein klarer Un-

terschied erkennbar. Bei der Darstellung über dem Feuchtgrad jedoch ist er deutlich geringer.

Bild 51 zeigt die Farbveränderungen für die unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten.

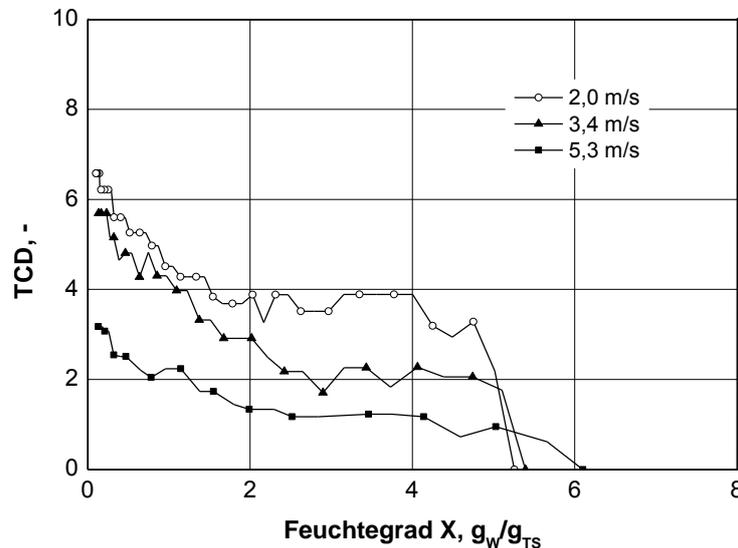


Bild 51. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Veränderung der Farbe als Funktion des Feuchtgrades, Prozessbedingungen wie in Bild 46

Der TCD hängt stark von der Luftgeschwindigkeit ab. Je höher die Geschwindigkeit, desto geringer der TCD. Bei 5,3 m/s ist er nur etwa halb so groß wie bei 2,0 m/s. Auch zwischen 2,0 m/s und 3,4 m/s sind zumindest in der ersten Phase bis zu einem Wassergehalt von etwa $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ deutliche Unterschiede erkennbar. Danach jedoch steigt der TCD der bei 3,4 m/s getrockneten Probe stärker an und führt dadurch zu einem fast identischen Ergebnis für beide Einstellungen. Der grundsätzliche Verlauf der Veränderungen ist jedoch ähnlich, und es sind zwei Phasen ganz klar abgrenzbar.

Bild 52 zeigt den Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Flächenschrumpfung als Funktion des Feuchtgrades.

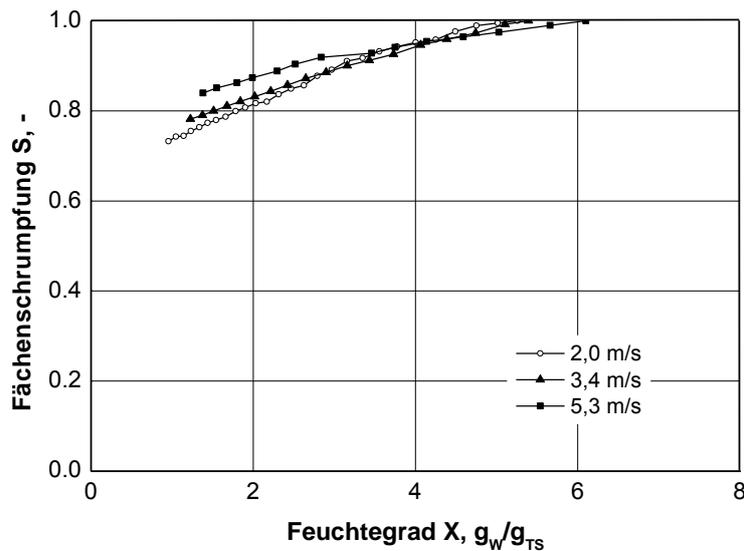


Bild 52. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Flächenschrumpfung, Prozessbedingungen wie in Bild 46

Die Luftgeschwindigkeit hat bei sehr hohen Geschwindigkeiten einen wesentlichen Einfluss auf die Flächenschrumpfung. Bei 5,3 m/s fällt die Schrumpfung deutlich geringer aus als bei den Vergleichsgeschwindigkeiten. Bei hohen Geschwindigkeiten kontrollieren die inneren Widerstände die Transportvorgänge im Produkt. Schon zu Beginn des Prozesses stellt sich eine sehr niedrige Oberflächenfeuchte am Produkt ein, dies könnte zu einer Versteifung der Oberfläche und einer Verminderung der Schrumpfung führen. Die erhaltenen Ergebnisse stimmen mit den Erkenntnissen von Ratti (1994) überein.

Die Luftgeschwindigkeit hat bei den gegebenen Prozessbedingungen ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$) einen entscheidenden Einfluss sowohl auf die Trocknungsdauer als auch die untersuchten Qualitätskriterien. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit führt zur Verkürzung der Trocknungszeit und einer Verbesserung der untersuchten Qualitätsparameter. Der Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf das Trocknungsergebnis hängt jedoch sehr stark vom jeweiligen Niveau der Trocknungslufttemperatur und der Taupunkttemperatur ab (siehe Kapitel 6.2.5.1).

6.2.3 Einfluss der Taupunkttemperatur

Die Taupunkttemperatur hat im untersuchten Temperaturbereich einen geringen Einfluss auf die Trocknungsdauer. In Bild 53 ist der zeitliche Verlauf des Feuchtegrades dargestellt.

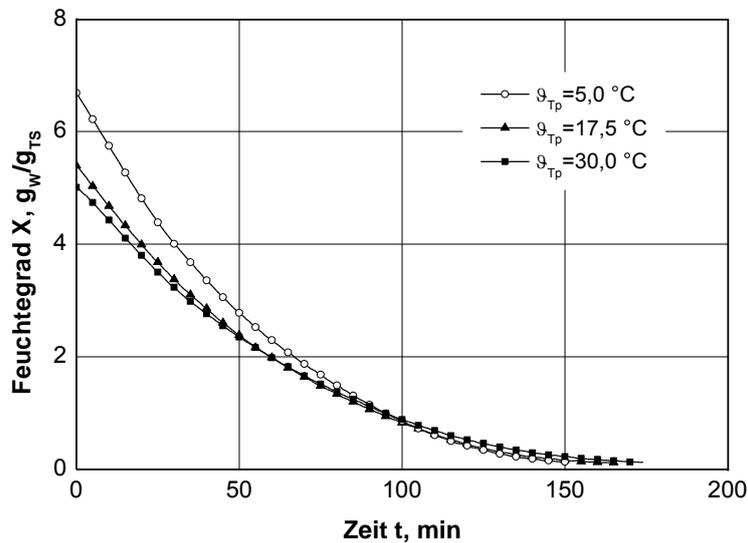


Bild 53. Einfluss der Taupunkttemperatur auf den Trocknungsverlauf für die Trocknung von Apfelscheiben, $\vartheta_L=60\text{ °C}$, $v_L=3,4\text{ m/s}$

Eine Erniedrigung der Taupunkttemperatur von $30,0\text{ °C}$ ($\varphi=21,3\%$ r. F.) auf $17,5\text{ °C}$ ($\varphi=10,0\%$ r. F.) resultiert in einer Verkürzung der Trocknungszeit um 10 min. Eine weitere Verringerung von $17,5\text{ °C}$ auf $5,0\text{ °C}$ ($\varphi=4,4\%$ r. F.) vermindert die Trocknungsdauer ebenfalls um 10 min.

Bild 54 zeigt die Gesamttrocknungsdauer für unterschiedliche Taupunkttemperaturen. Die Trocknungsdauer nimmt linear mit der Erhöhung der Taupunkttemperatur geringfügig zu.

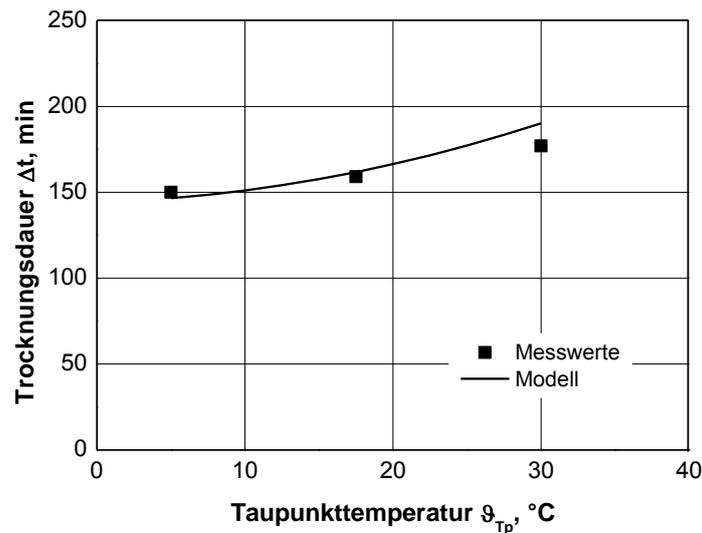


Bild 54. Gesamttrocknungszeit für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Taupunkttemperatur, Prozessbedingungen wie in Bild 53

Bild 55 stellt den Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Taupunkttemperaturen dar.

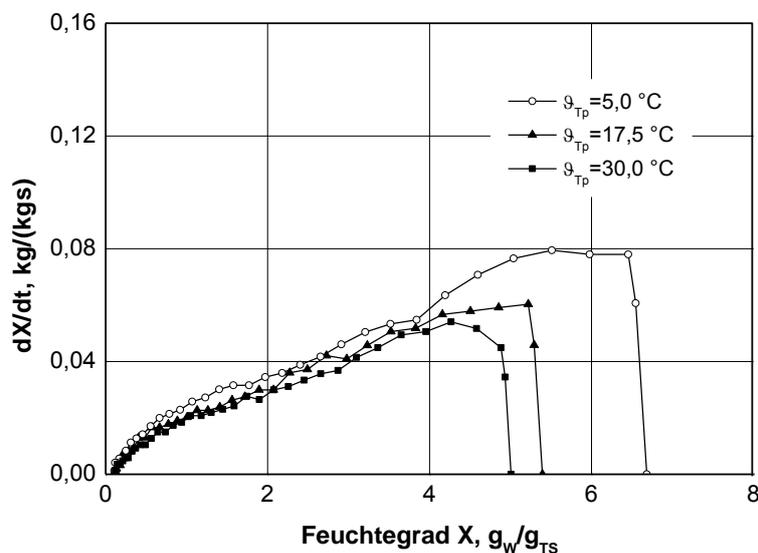


Bild 55. Einfluss der Taupunkttemperatur auf die Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 53

Die Trocknungsgeschwindigkeit ist bei niedriger Taupunkttemperatur höher als bei den Vergleichseinstellungen. Dies war zu erwarten, da das Trocknungsvermögen der feuchten Luft mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit sinkt. Ihr Betrag jedoch hängt neben den unterschiedlichen Prozesseinstellungen auch mit den unterschiedlichen Anfangsfeuchtegraden der Proben zusammen. Bei $17,5^\circ\text{C}$ und 30°C Taupunkttemperatur nähern sich die Trocknungsge-

schwindigkeiten bei einem Feuchtegrad von knapp $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ aneinander an, während sie bei 5 °C bis zu einem Feuchtegrad von etwa $X=0,4 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ deutlich höher liegt.

In Bild 56 ist der zeitliche Verlauf der Produkttemperatur von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Taupunkttemperaturen dargestellt. Der Temperaturverlauf bei einer Taupunkttemperatur von $5,0 \text{ °C}$ unterscheidet sich deutlich von den anderen beiden Einstellungen. Auch die Verläufe für $17,5 \text{ °C}$ und 30 °C unterscheiden sich, jedoch deutlich geringfügiger.

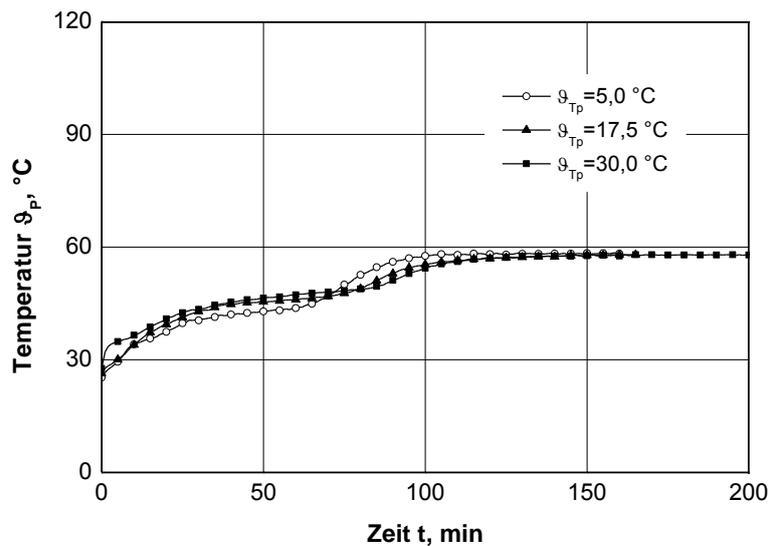


Bild 56. Einfluss der Taupunkttemperatur auf die zeitliche Entwicklung der Produkttemperatur, Prozessbedingungen wie in Bild 53

Durch die höheren Verdampfungsraten bei niedrigeren Taupunkttemperaturen stellt sich zunächst eine niedrigere Produkttemperatur ein. Die schnellere Trocknung führt zeitlich gesehen zu einem früheren Erreichen des Übergangs von einem Trocknungsabschnitt in den nächsten, was zu einer Umkehrung der Temperaturverhältnisse führt.

Bild 57 zeigt den Temperaturverlauf der untersuchten Proben als Funktion des Feuchtegrades.

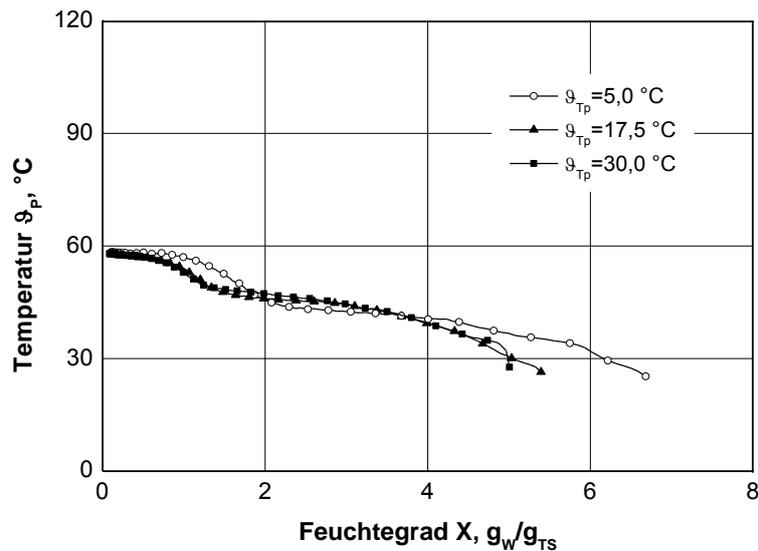


Bild 57. Einfluss der Taupunkttemperatur auf die Entwicklung der Produkttemperatur als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 53

Auch in dieser Darstellung ist der Unterschied deutlich erkennbar, wobei der frühere Übergang der Probe, die bei 30 °C Taupunkttemperatur getrocknet wurde, zumindest teilweise auf den deutlich höheren Anfangsfeuchtegrad zurückgeführt werden kann (vergleiche Bild 22).

Die Veränderung der Produktfarbe während der Trocknung hängt stark von der Taupunkttemperatur ab, siehe Bild 58.

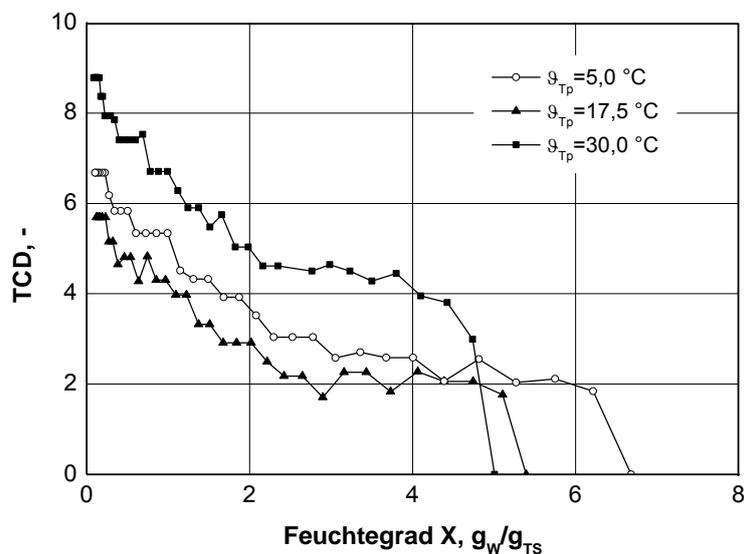


Bild 58. Einfluss der Taupunkttemperatur auf die Farbveränderungen als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 53

Während das Farbergebnis bei den niedrigen Taupunkttemperaturen ähnlich ist, resultiert eine hohe Taupunkttemperatur schon in der Anfangsphase in einer gesteigerten Farbveränderung. Eine Taupunkttemperatur von 30 °C entspricht bei einer Trocknungslufttemperatur von 60 °C jedoch lediglich einer relativen Luftfeuchtigkeit von 21 %. Dies bedeutet, dass ein gutes Trocknungsergebnis nur dann erreicht werden kann, wenn die relative Luftfeuchtigkeit sehr niedrig gehalten wird. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Bashir (1998) für Zwiebeln überein.

Das Schrumpfungsverhalten hängt stark von der eingestellten Taupunkttemperatur ab (Bild 59). Während sich bei 5 °C eine sehr flache Veränderungskurve ergibt, verläuft sie bei 30 °C Taupunkttemperatur sehr steil.

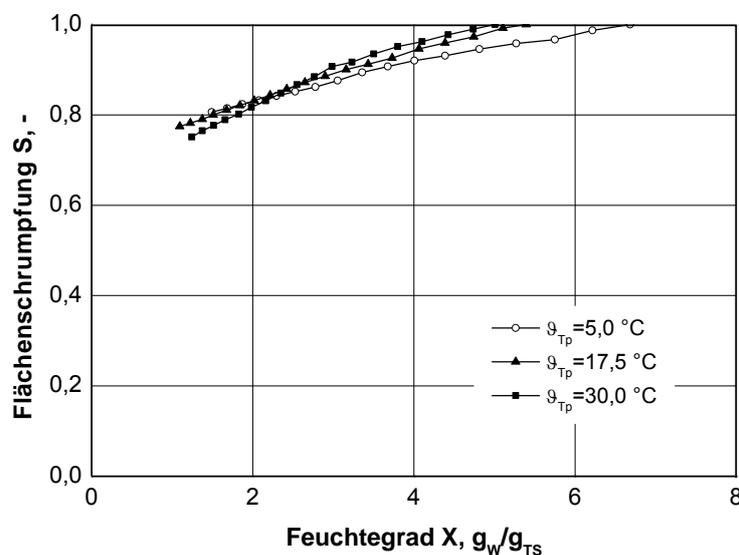


Bild 59. Schrumpfungsverhalten von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Taupunkttemperaturen als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 53

Die Taupunkttemperatur hat im untersuchten Bereich einen untergeordneten Einfluss auf die Gesamttrocknungsdauer. Die Qualitätsveränderungen hingegen hängen stark von ihr ab. Bei einer Taupunkttemperatur von 30 °C werden der mit Abstand größte TCD und die stärkste Schrumpfung hervorgerufen. Für eine optimierte Trocknung ist es entscheidend, die relative Luftfeuchtigkeit deutlich kleiner als 20 % zu halten, dies stimmt mit den Ergebnissen von Bashir (1998) für Zwiebeln überein und wird durch die Ergebnisse von Krokida et al. (1998) für Äpfel bestätigt.

6.2.4 Abhängige Effekte

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Entwicklung einzelner Zielgrößen von der gleichzeitigen Veränderung mehrerer Faktoren wurden auf zwei Temperaturniveaus Versuche mit zwei unterschiedlichen Taupunkttemperaturen und zwei Luftgeschwindigkeiten durchgeführt und verglichen. Bild 60 zeigt die Trocknungsverläufe auf dem unteren Temperaturniveau ($\vartheta_L=45\text{ °C}$), Bild 61 für das obere Temperaturniveau ($\vartheta_L=75\text{ °C}$). In Bild 62 sind die Gesamttrocknungszeiten für alle durchgeführten Versuche als Funktion der Luftgeschwindigkeit dargestellt.

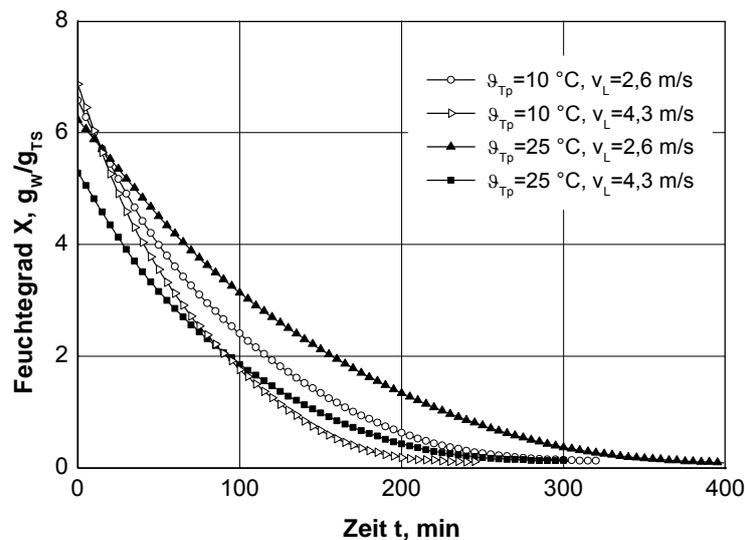


Bild 60. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderung auf den Trocknungsverlauf als Funktion der Zeit, $\vartheta_L=45\text{ °C}$

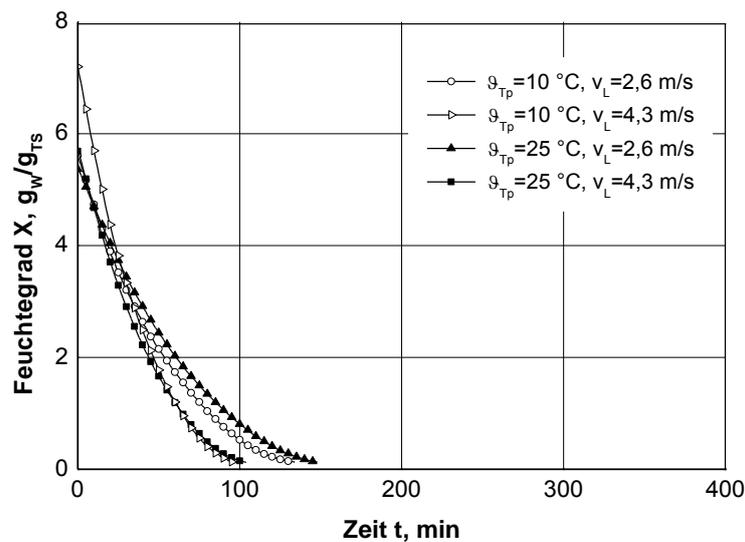


Bild 61. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderung auf den Trocknungsverlauf, $\vartheta_L=75\text{ °C}$

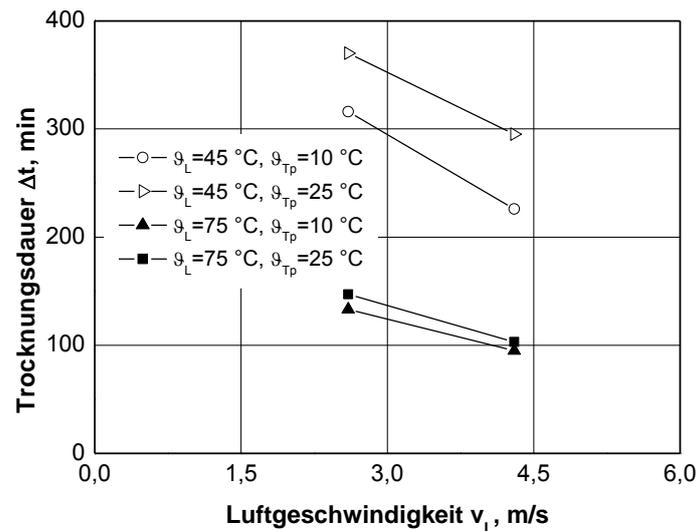


Bild 62. Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Temperaturen und Taupunkttemperaturen auf einen Endfeuchtegrad von $X_E = 0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Luftgeschwindigkeit

Bei einer Lufttemperatur von $\theta_L = 45^\circ\text{C}$ hat die Veränderung der Luftgeschwindigkeit bei niedriger Taupunkttemperatur einen größeren Einfluss als bei hoher Taupunkttemperatur. Eine Veränderung der Taupunkttemperatur hat bei beiden Geschwindigkeiten einen großen Einfluss auf die Trocknungszeit.

Bei einer Lufttemperatur von $\theta_L = 75^\circ\text{C}$ hat eine Veränderung der Luftgeschwindigkeit bei beiden Taupunkttemperaturen etwa den gleichen Einfluss auf das Trocknungsergebnis. Er ist deutlich geringer als bei 45°C . Der Einfluss der Taupunkttemperaturänderung ist gering, da die beiden eingestellten Taupunkttemperaturen bei 45°C relativen Luftfeuchten von $\varphi = 12,8\% \text{ r. F.}$ und $\varphi = 33,1\% \text{ r. F.}$ entspricht, während es bei 75°C lediglich $\varphi = 3,2\% \text{ r. F.}$ bzw. $\varphi = 8,2\% \text{ r. F.}$ sind.

Den Verlauf der Trocknungsgeschwindigkeit über dem Feuchtegrad geben die Kurven in Bild 63 und Bild 64 wieder. Die Verläufe unterscheiden sich fast über den gesamten Trocknungsprozess deutlich voneinander. Auf dem hohen Trocknungstemperaturniveau laufen die Kurven für hohe bzw. niedrige Luftgeschwindigkeit bei einem Feuchtegrad von $X = 0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ paarweise zusammen.

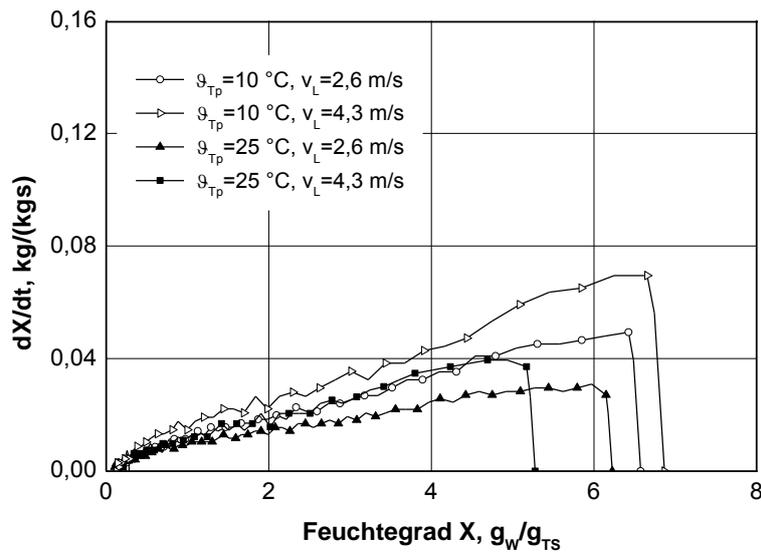


Bild 63. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderung auf die Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L = 45\text{ °C}$

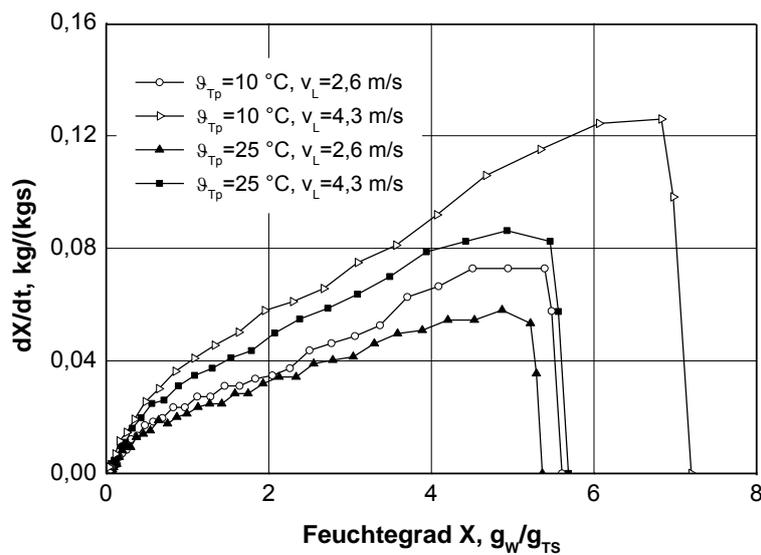


Bild 64. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf die Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L = 75\text{ °C}$

In Bild 65 ist der zeitliche Verlauf der Produkttemperaturen für 45 °C Lufttemperatur dargestellt, in Bild 66 für 75 °C .

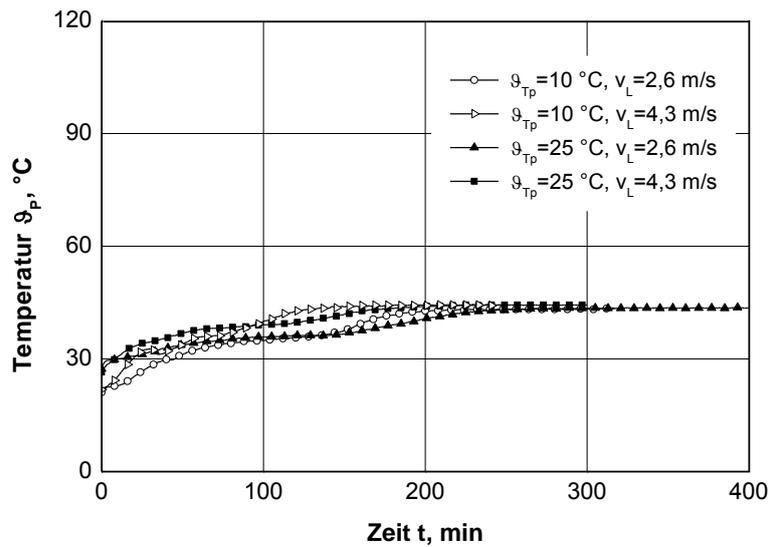


Bild 65. Einfluss der Luftgeschwindigkeit und der Taupunkttemperatur auf den zeitlichen Verlauf der Produkttemperatur, $\vartheta_L=45\text{ °C}$

Bei niedriger Taupunkttemperatur liegt die Produkttemperatur bei 45 °C Lufttemperatur zunächst deutlich niedriger als bei hoher Taupunkttemperatur, was durch die Verschiebung der Kühlgrenztemperatur bei Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit zu erklären ist. Entsprechend des Trocknungsverlaufs steigen die Produkttemperaturen für die unterschiedlichen Bedingungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten an.

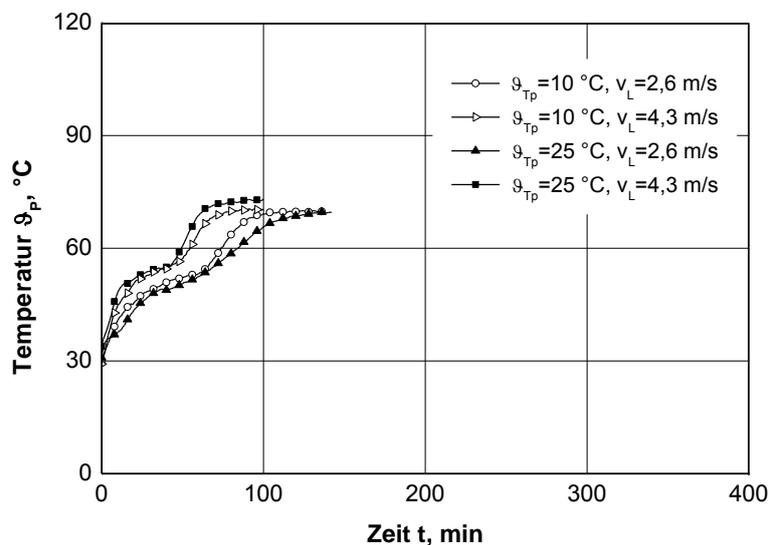


Bild 66. Einfluss der Luftgeschwindigkeit und der Taupunkttemperatur auf den zeitlichen Verlauf der Produkttemperatur, $\vartheta_L=75\text{ °C}$

Bei 75 °C Lufttemperatur liegen die Trocknungszeiten (Bild 62) für gleiche Geschwindigkeit sehr nahe zusammen. Dies zeigt sich auch in der Betrachtung

der Temperaturentwicklungen über der Zeit. Die Taupunkttemperatur spielt dabei kaum eine Rolle.

Die Betrachtung der Produkttemperaturverläufe als Funktion des Feuchtegrades zeigt, dass sich die Temperaturverläufe bei niedriger Lufttemperatur (Bild 67) für alle Einstellungen kaum unterscheiden. Bei hoher Lufttemperatur hingegen sind deutliche Unterschiede in der Produkttemperatur auszumachen (Bild 68). Dies betrifft lediglich das Temperaturniveau, nicht jedoch Lage und Verlauf der Anstiege.

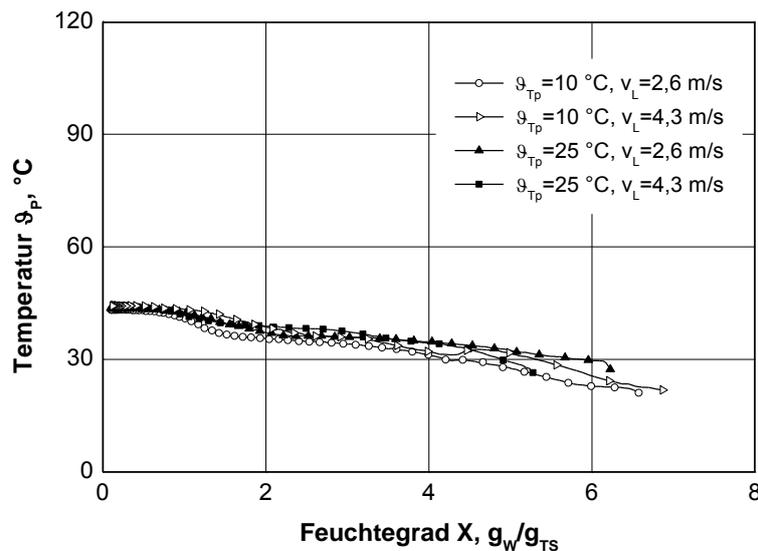


Bild 67. Einfluss von Taupunkttemperatur und Geschwindigkeitsveränderungen auf den Produkttemperaturverlauf als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L = 45\text{ °C}$

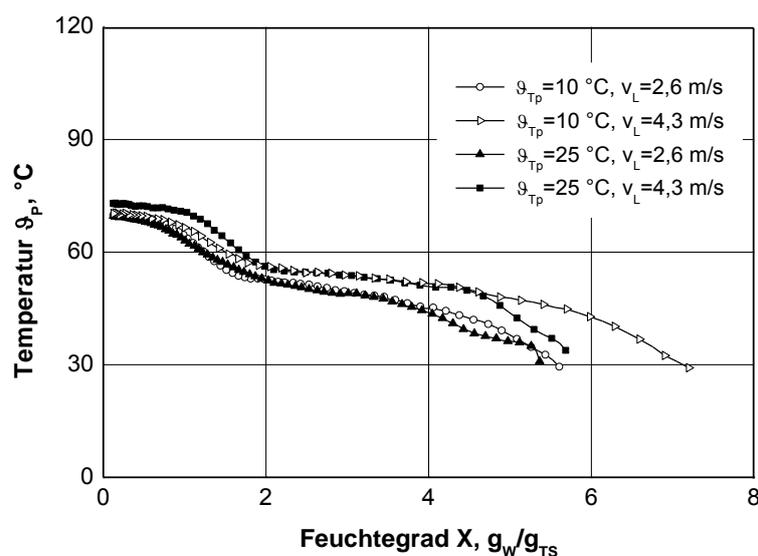


Bild 68. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den Produkttemperaturverlauf als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L = 75\text{ °C}$

Bild 69 und Bild 70 zeigen die Verläufe der Farbveränderung als Funktion des Feuchtegrades für 45 °C und 75 °C Lufttemperatur.

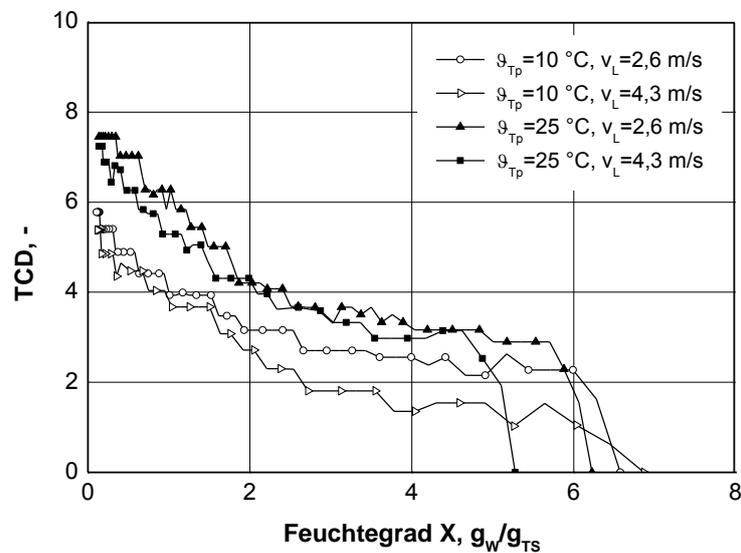


Bild 69. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den TCD als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L=45\text{ °C}$

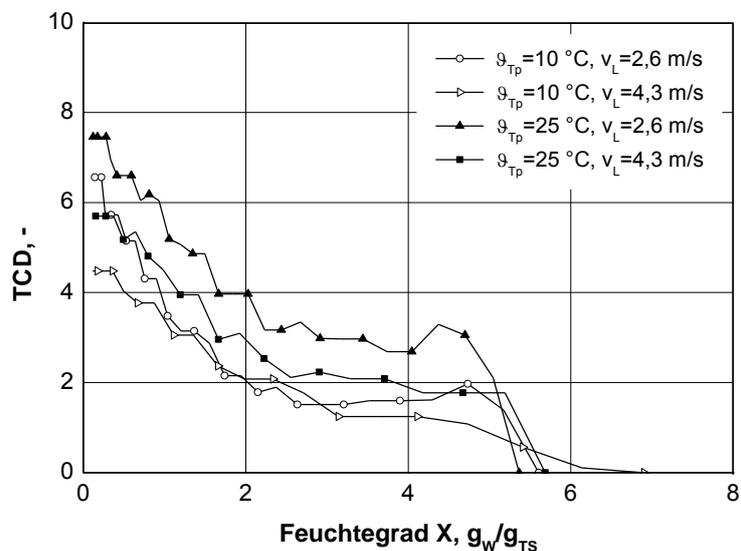


Bild 70. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den TCD als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L=75\text{ °C}$

In beiden Fällen ist deutlich erkennbar, dass eine hohe Taupunkttemperatur einen negativen Einfluss auf die Entwicklung der Farbe hat, wobei dieser Einfluss bei 75 °C aufgrund der viel niedrigeren relativen Luftfeuchtigkeit deutlich weniger ins Gewicht fällt als bei 45 °C. Zusätzlich verschlechtert sich das Ergebnis durch Absenkung der Luftgeschwindigkeit bei hoher Lufttemperatur deutlich und ist auch bei 45 °C zumindest erkennbar. In allen Fällen jedoch

beginnt die Phase des steilen Anstiegs der Farbveränderung bei einem Feuchtegrad von etwa $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$.

Die Betrachtung der Flächenschrumpfung zeigt deutliche Unterschiede für die beiden untersuchten Temperaturniveaus, Bild 71 und Bild 72.

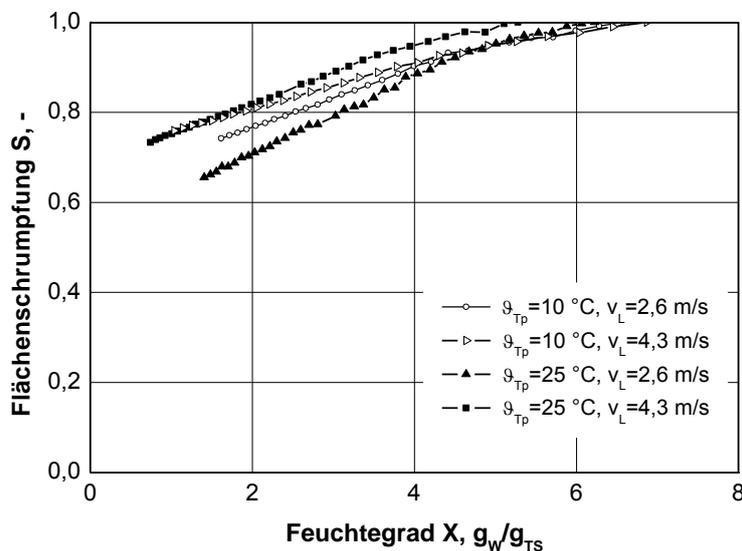


Bild 71. Flächenschrumpfung für unterschiedliche Taupunkttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten bei konstanter Lufttemperatur als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L = 45 \text{ °C}$

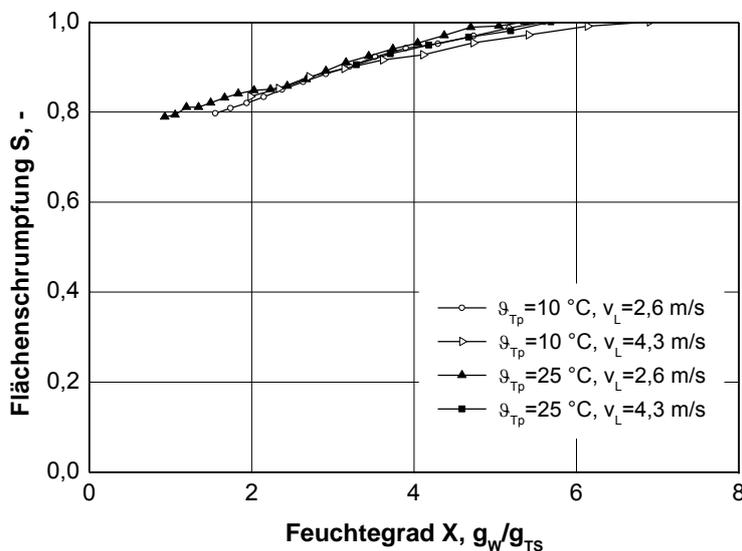


Bild 72. Flächenschrumpfung für unterschiedliche Taupunkttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_L = 75 \text{ °C}$

Während, wie in Bild 71 dargestellt, bei niedriger Temperatur die Grade der Schrumpfung sehr stark variieren, ergibt sich bei hoher Temperatur ein sehr gleichmäßiges Bild (Bild 72). In Bild 71 ist deutlich zu erkennen, dass sich eine

hohe Geschwindigkeit und eine niedrige Luftfeuchtigkeit sehr positiv auf die Flächenschrumpfung auswirken.

Die Trocknungstemperatur hat einen starken Einfluss auf die Trocknungszeit sowie auf die Qualitätsveränderungen, v. a. die Gleichmäßigkeit und den Betrag der Flächenschrumpfung. Die Taupunkttemperatur hat bei niedriger Lufttemperatur einen großen Einfluss auf die Trocknungsdauer und auf den TCD, während sie bei der Schrumpfung eine untergeordnete Rolle spielt. Die Luftgeschwindigkeit hat sowohl auf die Trocknungszeit als auch auf die Qualitätsveränderungen einen wesentlichen Einfluss.

6.2.5 Statistische Auswertung

Während in den bisherigen Kapiteln die Einflüsse der Prozesseinstellungen auf die Trocknungsverläufe, Qualitätsveränderungen und Temperaturverläufe untersucht wurden, sollen bei der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse die Einflüsse auf das Trocknungsergebnis analysiert werden. In Tabelle 4 sind die für die Analyse der einzelnen Zielgrößen verwendeten Modelltypen und deren Kenngrößen beschrieben.

Tabelle 4. Beschreibung der verwendeten Modelle und deren Kenngrößen bei der produkttemperaturgesteuerten Trocknung

Zielgröße	Modell	p	R ²	Mittelwert	Standardabweichung
Trocknungsdauer	Quadratisch	<0,05	0,99	195	14
Farbveränderung	Quadratisch	<0,05	0,95	6,4	0,4
Schrumpfung	2 FI	<0,05	0,58	0,82	0,03
Wiederbefeuchtung	2 FI	<0,05	0,66	0,63	0,03

6.2.5.1 Trocknungsdauer

In Bild 73 sind die Abhängigkeiten der Trocknungsdauer von den Wechselwirkungen der gleichzeitigen Änderung von ϑ_L und v_L dargestellt, in Anlage 1 für ϑ_L und ϑ_{TP} und in Anlage 2 für ϑ_{TP} und v_L . Der dritte Faktor wurde immer auf dem Standardwert festgehalten ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$ und $v_L=3,4\text{ m/s}$).

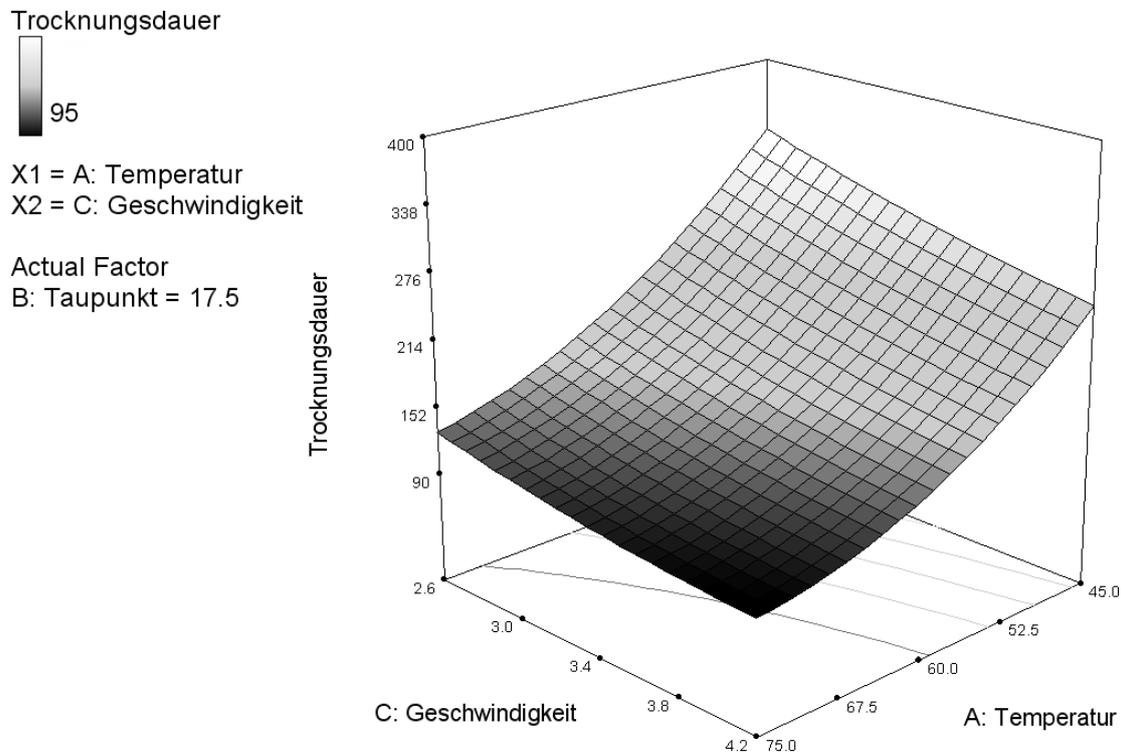


Bild 73. Abhängigkeit der Trocknungsdauer von der gleichzeitigen Änderungen der Lufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit ($\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$)

Aus der dreidimensionalen Darstellung (Bild 73) geht klar hervor, dass die Änderung der Temperatur den wesentlichen Einfluss auf die Trocknungsdauer hat. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 2,6 m/s reduziert sich die Trocknungsdauer bei einer Erhöhung von 45 °C auf 75 °C um 60 % von 330 min auf 130 min, bei 4,2 m/s um 64 % von 251 min auf 90 min. Bei 45 °C bewirkt eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 2,6 m/s auf 4,2 m/s zu einer Reduktion der Trocknungsdauer um 25 % von 332 min auf 251 min, während sie sich bei 75 °C um 30 % von 130 min auf 90 min reduziert.

Während im niedrigen Lufttemperaturbereich die eingestellte Taupunkttemperatur einen großen Einfluss auf die Trocknungsdauer hat, nähern sich diese im oberen untersuchten Bereich an. Dies ist mit der Verringerung der Unterschiede der relativen Luftfeuchtigkeit zu erklären. Bei einer Lufttemperatur von 45 °C entsprechen Taupunkttemperaturen von 10 °C bzw. 25 °C relativen Luftfeuchtigkeiten von $\varphi=12,8\text{ % r. F.}$ und $\varphi=33,1\text{ % r. F.}$, bei 75 °C sind es hingegen lediglich $\varphi=3,2\text{ % r. F.}$ bzw. $\varphi=8,2\text{ % r. F.}$ Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht linear (Anlage 1), was aus den Ergebnissen in Kapitel 6.2.4 nicht ersichtlich ist. Auch hier ist klar zu erkennen, dass die Änderung der Lufttem-

peratur den größten Einfluss auf die Veränderung der Trocknungsdauer hat. Eine Erhöhung der Lufttemperatur von 45 °C auf 75 °C resultiert bei 10 °C Taupunkttemperatur in einer Reduktion der Trocknungsdauer um 59 % von 267 min auf 110 min, bei 25 °C sogar um 66 % von 314 min auf 107 min. Bei 45 °C Lufttemperatur resultiert die Erniedrigung der Taupunkttemperatur von 25 °C auf 10 °C in einer Reduktion der Trocknungszeit um 15 % von 314 min auf 267 min und bei 75 °C sind die Trocknungsdauern mit 107 min und 110 min nahezu identisch.

Die gleichzeitige Änderung der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit bei konstanter Lufttemperatur (Anlage 2) hat im Vergleich zu den beiden anderen betrachteten Fällen lediglich einen untergeordneten Einfluss auf die Trocknungsdauer. Eine Erhöhung der Taupunkttemperatur von 10 °C auf 25 °C bei 2,6 m/s resultiert in einer Verlängerung der Trocknungszeit um 10 % von 193 min auf 213 min, während bei 4,2 m/s eine Verlängerung um 15 % von 131 min auf 155 min entsteht.

6.2.5.2 Farbveränderung

Die Farbveränderungen hängen stark von den gewählten Prozesseinstellungen ab. In Bild 74 sind die Abhängigkeiten der Trocknungsdauer von den Wechselwirkungen der gleichzeitigen Änderung von ϑ_L und v_L dargestellt.

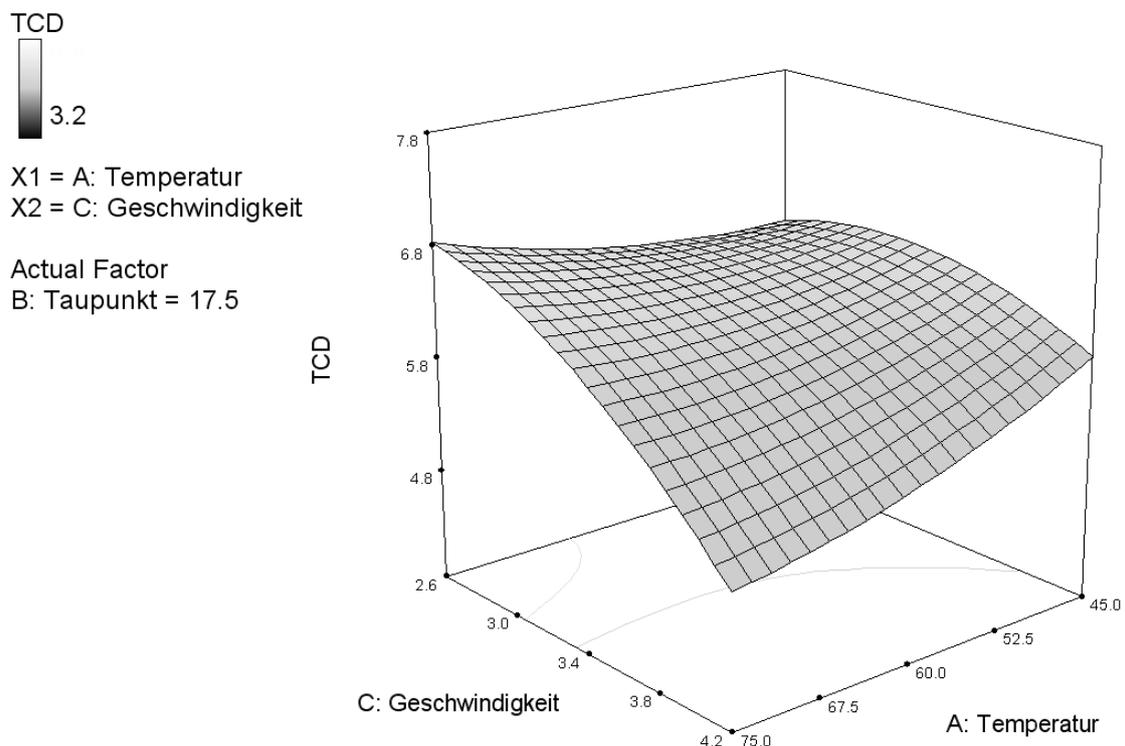


Bild 74. Abhängigkeit der Farbveränderung von der gleichzeitigen Änderungen der Lufttemperatur und der Geschwindigkeit ($\vartheta_{TP}=17,5$ °C)

Die Luftgeschwindigkeit hat einen starken Einfluss auf den Grad der Farbveränderungen. Unter sonst gleichen Bedingungen wirkt sich eine Erhöhung der

Geschwindigkeit sehr positiv auf das Ergebnis aus (Anlage 4, Bild 74). Eine Erhöhung der Taupunkttemperatur wirkt sich sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Luftgeschwindigkeiten negativ auf das Farbergebnis aus, wobei das Ausmaß bei hoher Geschwindigkeit größer ist, obwohl das Produkt dem Prozess kürzer ausgesetzt wird (Anlage 4). Eine hohe Taupunkttemperatur wirkt sich sowohl bei niedrigen als auch hohen Lufttemperaturen negativ auf das Trocknungsergebnis aus (Anlage 3). Dieser Einfluss nimmt jedoch mit Erhöhung der Lufttemperatur ab, was mit der Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit zu erklären ist.

Die geringsten Farbveränderungen werden bei hohen Lufttemperaturen und hohen Strömungsgeschwindigkeiten sowie niedrigen Taupunkttemperaturen erreicht.

6.2.5.3 Schrumpfung

In Bild 75 ist die Abhängigkeit der Flächenschrumpfung der Apfelscheiben bei gleichzeitiger Änderung der Lufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit dargestellt.

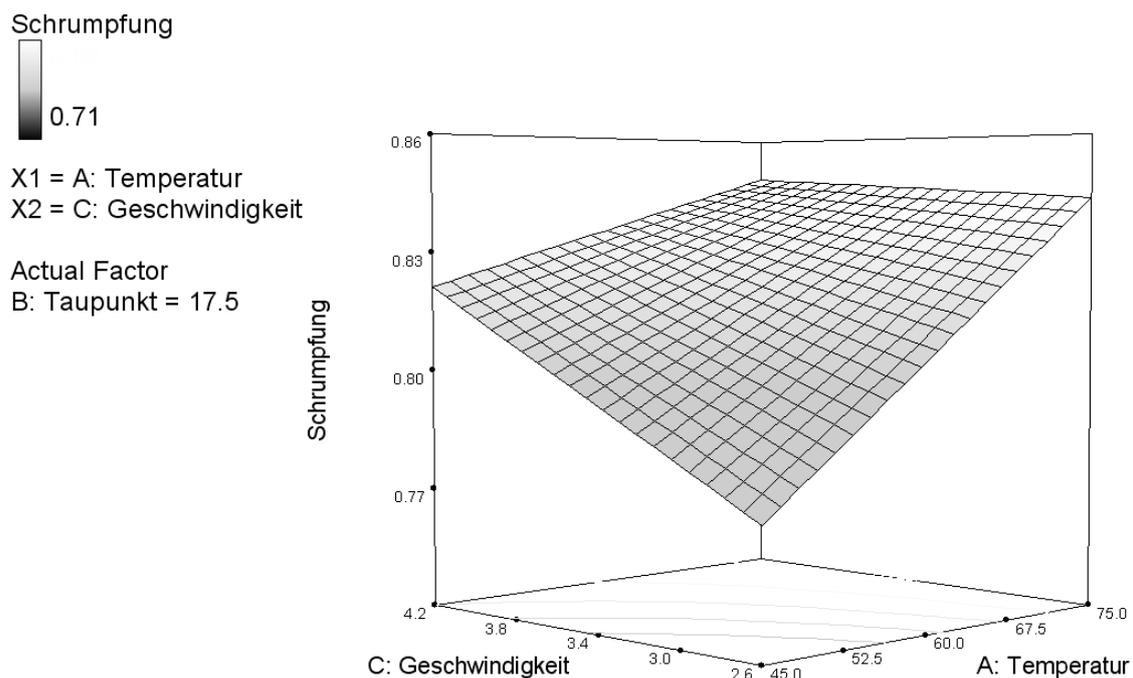


Bild 75. Abhängigkeit der Flächenschrumpfung von der gleichzeitigen Änderungen der Lufttemperatur und der Geschwindigkeit ($\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$)

Es ist klar ersichtlich, dass sowohl Temperatur als auch Geschwindigkeit der Trocknungsluft einen wesentlichen Einfluss auf die Schrumpfung haben. Der Einfluss der Lufttemperatur ist jedoch bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten deutlich größer als bei hohen Luftgeschwindigkeiten. Während bei 2,6 m/s eine Erhöhung der Lufttemperatur von 45 °C auf 75 °C eine Verringerung der Schrumpfung von 0,77 auf 0,84 nach sich zieht, beträgt sie bei 4,2 m/s ledig-

lich 0,82 auf 0,85. Das Ausmaß der Schrumpfung nimmt bei niedriger Temperatur durch Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 0,77 bei 2,6 m/s auf 0,82 bei 4,2 m/s stark ab, während bei hohen Temperaturen die Werte mit 0,84 und 0,85 fast identisch sind.

Die Betrachtung der Auswirkungen von Luft- und Taupunkttemperaturveränderungen (Anlage 5) auf die Schrumpfung der Apfelscheiben zeigt bei niedrigen Taupunkttemperaturen eine leichte Verringerung des Ausmaßes der Schrumpfung mit Zunahme der Lufttemperatur von 0,81 auf 0,83, während das Ausmaß bei hohen Taupunkttemperaturen deutlich größer ist (0,78 auf 0,86). Weiterhin hat die Höhe der Taupunkttemperatur bei den unterschiedlichen Lufttemperaturen eine konträre Auswirkung auf das Ausmaß der Schrumpfung. Bei 45 °C ist die Schrumpfung bei einer hohen Taupunkttemperatur mit 0,78 größer als bei 10 °C, während bei 75 °C die Schrumpfung bei 10 °C mit 0,83 deutlich größer ist als bei 25 °C mit 0,86.

Während die Schrumpfung mit zunehmender Taupunkttemperatur leicht ansteigt, nimmt sie im untersuchten Raum mit Zunehmen der Geschwindigkeit und vor allem der Temperatur stark ab.

6.2.5.4 Wiederbefeuchtungsrate

In Bild 76 ist die Abhängigkeit der Wiederbefeuchtungsrate von der gleichzeitigen Veränderung der Lufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit dargestellt.

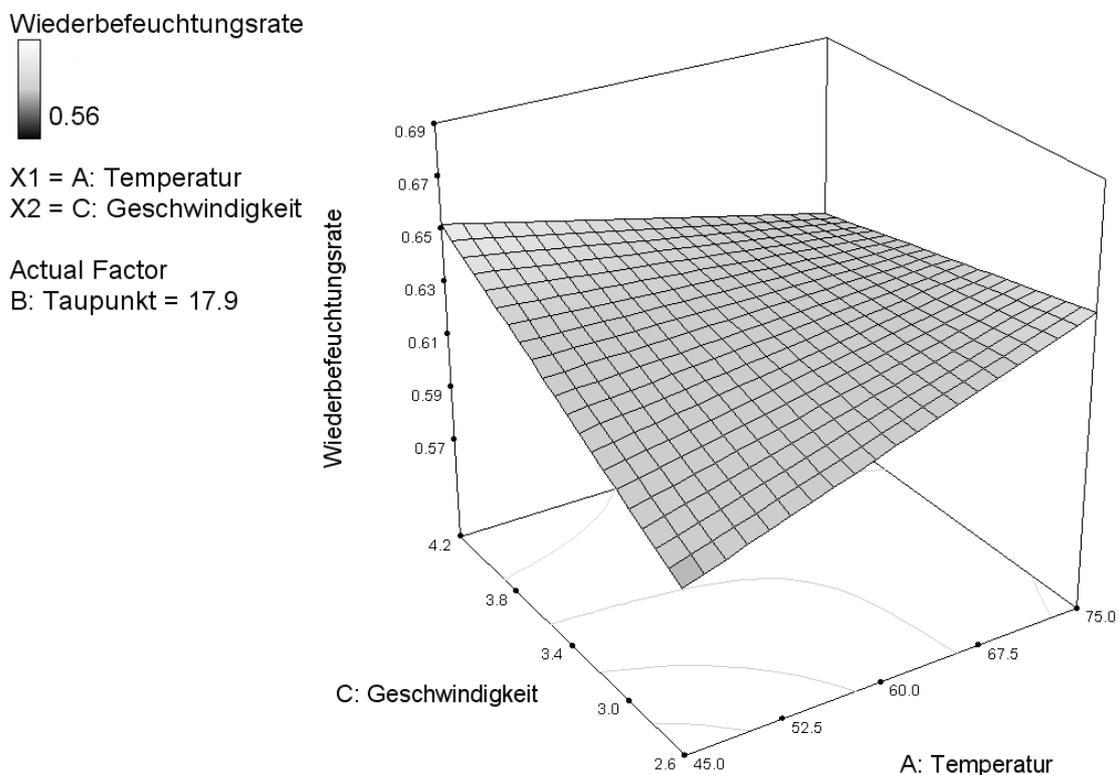


Bild 76. Abhängigkeit der Wiederbefeuchtungsrate von der gleichzeitigen Änderungen der Lufttemperatur und der Geschwindigkeit ($\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$)

Bei niedrigen Lufttemperaturen hat eine hohe Geschwindigkeit bei konstanter Taupunkttemperatur einen positiven Effekt auf das Wiederbefeuchtungsverhalten, während dieser bei hohen Temperaturen negativ ist.

Die Lufttemperatur hat bei gleichzeitiger Veränderung der Taupunkttemperatur (Anlage 7) praktisch keinen Einfluss auf das Ergebnis der Wiederbefeuchtung, während deren Rate auf allen Lufttemperaturniveaus stark von der eingestellten Taupunkttemperatur abhängt. Bei einer Taupunkttemperatur von 10 °C stellt sich sowohl bei 45 °C als auch bei 75 °C Lufttemperatur eine Wiederbefeuchtungsrate von 0,59 ein. Eine Erhöhung der Taupunkttemperatur auf 25 °C führt zu einer Erhöhung der Wiederbefeuchtungsrate auf 0,65 bzw. 0,67.

Während sich bei niedrigen Taupunkttemperaturen eine hohe Geschwindigkeit (Anlage 8) negativ auf das Wiederbefeuchtungsverhalten der Äpfel auswirkt, wird dieser Effekt schon ab einer Taupunkttemperatur von circa 14 °C umgekehrt. Betrachtet man das Wiederbefeuchtungsverhalten der Proben bei 10 °C Taupunkttemperatur, erhält man für eine Geschwindigkeit von 2,6 m/s eine Wiederbefeuchtungsrate von 0,60, während sie bei 4,2 m/s lediglich 0,58 beträgt. Bei 25 °C Taupunkttemperatur erhält man jedoch auf dem niedrigen Geschwindigkeitsniveau lediglich 0,63, während es auf dem hohen Niveau 0,69 sind. Eine Erhöhung der Taupunkttemperatur hat grundsätzlich einen positiven Einfluss auf das Wiederbefeuchtungsvermögen.

6.2.6 Diskussion der Ergebnisse

Zur Erreichung einer minimalen Trocknungsdauer ist es nötig, die Lufttemperatur möglichst hoch einzustellen, mit einer sehr hohen Luftgeschwindigkeit zu arbeiten und abhängig von der eingestellten Lufttemperatur die richtige Taupunkttemperatur zu wählen, um das kritische Niveau der relativen Luftfeuchtigkeit nicht zu überschreiten.

Für eine möglichst geringe Farbveränderung wiederum ist es nötig, hohe Luftgeschwindigkeiten zu wählen und gleichzeitig die Taupunkttemperatur möglichst niedrig einzustellen. Auch eine hohe Lufttemperatur wirkt sich positiv auf das Farbergebnis aus, da die Einwirkdauer der Trocknung verkürzt wird.

Zur Minimierung der Schrumpfung hingegen können zwar hohe Lufttemperaturen und -geschwindigkeiten verwendet werden, das Ergebnis hängt jedoch deutlich von der eingestellten Taupunkttemperatur ab und diese wirkt sich unterschiedlichen Temperaturniveaus gegensätzlich auf das Trocknungsergebnis aus.

Das Wiederbefeuchtungsverhalten der Proben hängt in erster Linie von der eingestellten Taupunkttemperatur und in zweiter Linie von der Luftgeschwindigkeit ab. Die Lufttemperatur hat einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Wiederbefeuchtungsverhalten.

Aus der Literatur ist bekannt, dass es bestimmte Temperaturgrenzen für den Erhalt von wertgebenden Inhaltsstoffen in biologischen Produkten gibt. Marfil et al. (2008) haben für die Trocknung von Tomaten einen Erhalt des ursprünglich enthaltenen Vitamin C von 44 % bei 50 °C Lufttemperatur, 40 % bei 60 °C und 28 % bei 70 °C ermittelt und somit nachgewiesen, dass die für den Erhalt des Vitamin C kritische Temperatur zwischen 60 °C und 70 °C liegt. Miranda et al. (2009) konnten für die Trocknung von Aloe-vera-Gel bis 70 °C einen nahezu konstanten Vitamin-C-Gehalt im getrockneten Gut nachweisen, während dieser oberhalb dieses Temperaturbereiches stark abnahm. Für Äpfel gibt es teilweise widersprüchliche Angaben zu Grenztemperaturen in der Literatur. Die Keimfähigkeit von Getreide nach der Trocknung wird wesentlich vom Temperaturniveau der Trocknungsluft beeinflusst. Hofacker (1986) trocknete Getreide bei 70 °C, 80 °C und 100 °C und untersuchte anschließend den prozentualen Anteil keimfähiger Körner. Während von den bei 70 °C getrockneten Körnern 95 % noch keimfähig waren, reduzierte sich die Keimfähigkeit der bei 80 °C getrockneten Proben in den ersten 40 min der Trocknung auf weniger als 50 %. Bei 100 °C war bereits nach 5 min keine Keimfähigkeit mehr vorhanden.

Eine wirksame Optimierung der Trocknung von Agrarprodukten setzt die genaue Kenntnis der tatsächlichen Zielgrößen und deren Wichtigkeit voraus. Aus den oben aufgeführten Ergebnissen und der betrachteten Literatur geht klar hervor, dass zur Erreichung bestimmter Produktmerkmale teilweise konträre Einstellungen gewählt werden müssen.

6.2.7 Statistische Optimierung

Zur Optimierung der Trocknungsbedingungen wurden die statistischen Auswertungen (Kapitel 6.2.5) für die Abhängigkeiten der Zielgrößen von den untersuchten Faktoren herangezogen. Bei einem Vergleich der Auswirkungen der drei Faktoren auf die Zielgrößen wird schnell deutlich, dass die Optimierung des Prozesses eine Kompromisslösung sein muss. Dieser Forderung wird Rechnung getragen, indem die Zielgrößen nach ihrer Wichtigkeit (1-5) gewichtet werden können bzw. die Möglichkeit besteht, den Prozess nur hinsichtlich bestimmter Zielgrößen zu optimieren. Entscheidend für die Gewichtung der Zielgrößen ist der jeweilige Markt, der mit dem hergestellten Produkt bedient werden soll. Also legen im Endeffekt Handel und Konsumverhalten des Endverbrauchers die Bedingungen fest.

Zur Veranschaulichung dieser Optimierungsoptionen werden im Folgenden beispielhaft Ergebnisse für die in Tabelle 5 dargestellten Zielvorgaben, Grenzen und Gewichtungen untersucht. Im Folgenden werden die dargestellten Zielvorgaben mit „gewichtet“ bezeichnet. Daneben werden für jede Zielgröße gesondert die Prozessbedingungen optimiert. Diese wird dann mit der Wich-

tigkeit 5 eingestuft, während den jeweils anderen drei Zielgrößen eine Wichtigkeit von 1 zugewiesen wird.

Tabelle 5. Beschreibung der Faktoren und Zielgrößen, deren Zielbereiche, Grenzen und Wichtigkeit für die Optimierungsfunktion

Größe	Ziel	Untere Grenze	Obere Grenze	Wichtigkeit
ϑ_L [°C]	im Bereich	45	60 bzw. 75	3
ϑ_{Tp} [°C]	im Bereich	10	15 bzw. 25	3
v_L [m/s]	im Bereich	2	3,4 bzw. 4,8	3
t_{Tr} [min]	minimieren	70	200	3
TCD [-]	minimieren	3,2	8,8	5
S [-]	maximieren	0,8	0,88	5
WB [-]	maximieren	0,56	0,70	3

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Optimierung zunächst für die einzelnen Zielgrößen und anschließend für die gewichtete Funktion. Die oberen Grenzen der Faktoren waren wie folgt festgelegt: $\vartheta_L=75$ °C, $\vartheta_{Tp}=25$ °C und $v_L=4,8$ m/s.

Tabelle 6. Lösungen für die Optimierung des einstufigen Trocknungsprozesses bei einer maximalen Lufttemperatur von 75 °C mit unterschiedlichen Gewichtungsfunktionen, Vorgaben siehe Tabelle 5

Faktor	Lösung	ϑ_L [°C]	ϑ_{Tp} [°C]	v_L [m/s]	t_{Tr} [min]	TCD [-]	S [-]	WB [-]	Erwünschtheit
t_{Tr}	1	75,0	23,3	4,8	92	4,4	0,88	0,66	0,827
	2	75,0	23,7	4,8	93	4,5	0,88	0,66	0,827
	3	75,0	24,2	4,8	93	4,6	0,89	0,67	0,826
TCD	1	75,0	21,8	4,8	91	4,1	0,87	0,65	0,810
	2	75,0	21,5	4,8	91	4,1	0,87	0,64	0,810
	3	75,0	22,5	4,8	92	4,3	0,88	0,65	0,809
S	1	75,0	25,0	4,8	95	4,7	0,89	0,68	0,915
	2	74,3	25,0	4,8	96	4,8	0,89	0,68	0,914
	3	75,0	24,4	4,8	94	4,6	0,89	0,67	0,914
WB	1	66,1	25,0	4,8	118	5,2	0,88	0,70	0,877
	2	65,3	25,0	4,8	121	5,2	0,88	0,70	0,877
	3	64,5	25,0	4,8	124	5,3	0,88	0,70	0,876
gewichtet	1	74,1	24,4	4,8	95	4,6	0,89	0,67	0,876
	2	73,4	23,3	4,8	95	4,5	0,88	0,66	0,873
	3	67,0	23,8	4,8	112	4,9	0,88	0,68	0,831

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Ergebnisse für die alleinige Optimierung der Trocknungsdauer, des TCD und der Schrumpfung sowie für die gewichteten Zielgrößen kaum voneinander unterscheiden. Lediglich zum Erreichen einer hohen Wiederbefeuchtungsrate ist es nötig, eine niedrigere Temperatur bei einer dann vergleichsweise hohen relativen Luftfeuchtigkeit zu wählen.

Zur weitergehenden Untersuchung wurde nach der gleichen Vorschrift die Optimierung der Trocknung auf einem maximalen Temperaturniveau von 60 °C durchgeführt, siehe Tabelle 7.

Tabelle 7. Lösungen für die Optimierung des einstufigen Trocknungsprozesses bei einer maximalen Lufttemperatur von 60 °C mit unterschiedlichen Gewichtungsfunktionen, Vorgaben siehe Tabelle 5

Faktor	Lösung	ϑ_L [°C]	ϑ_{TP} [°C]	v_L [m/s]	t_{Tr} [min]	TCD [-]	S [-]	WB [-]	Erwünschtheit
t_{Tr}	1	60,0	19,0	4,8	132	4,4	0,85	0,65	0,580
	2	60,0	19,8	4,8	134	4,5	0,85	0,66	0,579
	3	60,0	18,1	4,8	130	4,3	0,85	0,65	0,578
TCD	1	60,0	18,7	4,8	131	4,4	0,85	0,65	0,706
	2	60,0	18,3	4,8	131	4,3	0,85	0,65	0,706
	3	59,8	19,2	4,8	133	4,5	0,85	0,66	0,704
S	1	60,0	25,0	4,8	147	5,5	0,87	0,71	0,788
	2	60,0	25,0	4,8	147	5,6	0,87	0,71	0,778
	3	60,0	24,2	4,8	145	5,4	0,87	0,70	0,777
WB	1	60,0	24,1	4,8	144	5,3	0,87	0,70	0,832
	2	60,0	24,4	4,8	145	5,4	0,87	0,70	0,830
	3	59,4	25,0	4,8	150	5,6	0,87	0,71	0,817
gewichtet	1	60,0	24,1	4,8	144	5,3	0,87	0,70	0,732
	2	60,0	20,4	4,8	135	4,6	0,86	0,67	0,705
	3	57,2	25,0	4,8	164	5,7	0,87	0,71	0,651

Auf diesem Temperaturniveau unterscheiden sich die vorgeschlagenen optimierten Trocknungsbedingungen lediglich im Niveau der Taupunkttemperatur, ansonsten sind sie identisch. Vergleicht man die Erwünschtheitswerte der gewichteten Funktionen mit denen aus

Tabelle 6, wird der Einfluss der Temperatur sehr deutlich. Während man bei 75 °C eine maximale Gesamterwünschtheit von 87,6 % erreicht, sind es bei 60 °C lediglich 73,2 %.

In Tabelle 8 sind für beide Temperaturniveaus die Ergebnisse für eine Reduktion der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit dargestellt.

Tabelle 8. Lösungen des einstufigen Trocknungsprozesses bei unterschiedlichen Lufttemperaturen und Variation der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit, Vorgaben siehe Tabelle 5

Faktor	ϑ_{LGrenz} [°C]	Lösung	ϑ_L [°C]	ϑ_{TP} [°C]	v_L [m/s]	t_{Tr} [min]	TCD [-]	S [-]	WB [-]	Erwünschtheit
ϑ_{TP} [°C]	75	1	65,6	15,0	4,8	105	3,8	0,83	0,61	0,569
		2	63,9	15,0	4,8	110	3,8	0,83	0,61	0,568
		3	67,4	15,0	4,8	100	3,7	0,84	0,60	0,568
	60	1	60,0	15,0	4,8	126	4,0	0,83	0,62	0,557
		2	60,0	15,0	4,8	126	4,1	0,83	0,62	0,551
		3	60,0	15,0	4,7	126	4,2	0,83	0,62	0,545
v_L [m/s]	75	1	75,0	21,4	3,4	104	6,6	0,85	0,65	0,560
		9	74,2	20,8	3,4	105	6,5	0,85	0,65	0,552
		3	75,0	24,7	3,4	106	7,2	0,86	0,67	0,544
	60	1	60,0	16,5	3,4	160	6,1	0,82	0,62	0,353
		2	60,0	17,4	3,4	161	6,2	0,82	0,62	0,352
		3	59,9	17,1	3,4	161	6,2	0,82	0,62	0,352

Eine Reduktion der maximal zulässigen Taupunkttemperatur führt in beiden Fällen zu einer deutlichen Verschlechterung des Optimierungsergebnisses. Die resultierenden Erwünschtheitswerte sind mit 56,9 % und 55,7 % annähernd identisch. Es ist auffällig, dass bei dem vorgegebenen Grenzwert von 75 °C dieser Wert bei allen vorgeschlagenen Einstellungen deutlich unterschritten wird. Dies lässt den Schluss zu, dass eine bestimmte Grenze der relativen Luftfeuchtigkeit nicht unterschritten werden darf, wenn alle Zielgrößen

optimiert werden sollen. Während der TCD in beiden untersuchten Fällen deutlich geringer ausfällt als unter Standardbedingungen, treten eine verstärkte Schrumpfung und eine Reduktion der Wiederbefeuchtung auf.

Eine Verringerung der maximalen Luftgeschwindigkeit führt vor allem bei 60 °C zu einer massiven Verschlechterung der Qualität der Trocknung. Mit 35,3 % ist die Erwünschtheit nicht einmal halb so groß wie bei 4,8 m/s maximaler Luftgeschwindigkeit. Auch auf dem oberen Temperaturniveau stellt sich eine Reduktion um 35 % von 87,6 % auf 56,0 % ein. In beiden Fällen werden bei der Empfehlung die maximal zulässigen Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten erreicht. Die Reduktion von 4,8 m/s auf 3,4 m/s hat sehr starke Auswirkungen auf die Trocknungsdauer sowie den TCD.

Alle vorgeschlagenen Lösungen haben eine hohe Lufttemperatur und eine hohe Luftgeschwindigkeit gemeinsam. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit liegt in den betrachteten Fällen bei 15 % bzw. 8 % also auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Bashir (1998) beobachtete bei Zwiebeln, dass die Luftfeuchtigkeit bis $\varphi=20\%$ keinen Einfluss auf das Bräunungsverhalten von Zwiebel hat, darüber wird diese jedoch deutlich begünstigt. Krokida et al. (1998) ermittelten für Äpfel einen Anstieg der Bräunung bei Erhöhung der relativen Luftfeuchte in einem Bereich zwischen 15 % und 40 %. Diese Obergrenze wird auch durch die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse unterstrichen, es zeigte sich jedoch auch, dass eine sehr niedrige relative Luftfeuchtigkeit ebenfalls negative Auswirkungen auf das Trocknungsergebnis haben kann, wenn Schrumpfung minimiert und Wiederbefeuchtung maximiert werden sollen. Somit ist es für den Trocknungserfolg entscheidend, die Luftfeuchtigkeit gering zu halten um eine durch hohe relative Luftfeuchtigkeiten hervorgerufene Beschädigung des Produktes zu verhindern.

6.3 Steuerung des Prozesses nach der Temperatur des Produktes

Im Unterschied zu den in Kapitel 6.2 diskutierten Versuchen wurde die Produkttemperatur als Führungsgröße gewählt und nach einer Aufwärmphase konstant gehalten, während sich die Lufttemperatur kontinuierlich verändert.

6.3.1 Einfluss der Temperatur

Apfelscheiben wurden auf drei unterschiedlichen Temperaturniveaus bei sonst gleichen Bedingungen getrocknet. Die Trocknungsverläufe hängen, wie zu erwarten war, stark vom Temperaturniveau ab. In Bild 77 sind die Trocknungsverläufe dargestellt.

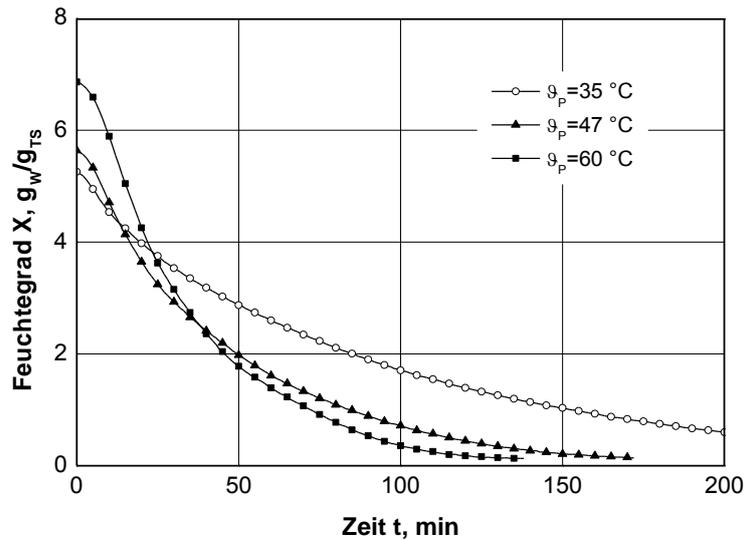


Bild 77. Einfluss der Produkttemperatur bei der Trocknung von Apfelscheiben auf den zeitlichen Verlauf des Feuchtegrades, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$, $v_L=3,4\text{ m/s}$, maximal zulässige Lufttemperatur 100 °C

Die Auftragung der Gesamttrocknungszeit über der Produkttemperatur (Bild 78) zeigt deutlich, dass sich die Trocknungsdauer nicht linear mit der Temperatur verändert.

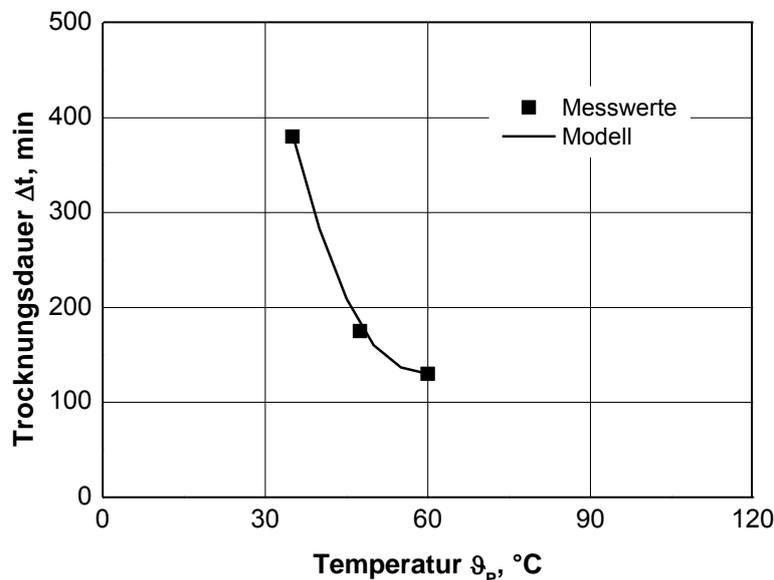


Bild 78. Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13\text{ g}_w/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Produkttemperatur, Prozessbedingungen wie in Bild 77

Während die Steigerung der Temperatur von 35 °C auf $47,5\text{ °C}$ eine Verringerung der Trocknungsdauer um 58% von knapp 220 min nach sich zieht, verringert sie sich bei einer Steigerung von $47,5\text{ °C}$ auf 60 °C lediglich um etwa

30 min (19 %). Dies hängt jedoch mit der gewählten Luftgrenztemperatur von 100 °C zusammen. Andernfalls würde der ermittelte Unterschied deutlich größer ausfallen [Sturm, 2006].

Die Trocknungsgeschwindigkeit ist während des gesamten Trocknungsprozesses für hohe Temperaturen höher als für niedrigere. Bild 79 zeigt die Trocknungsverläufe für unterschiedliche Produkttemperaturniveaus. Erst bei einem Feuchtegrad von etwa $X=0,5 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ nähern sich die Verläufe an, um dann bei $X=0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ zusammenzulaufen.

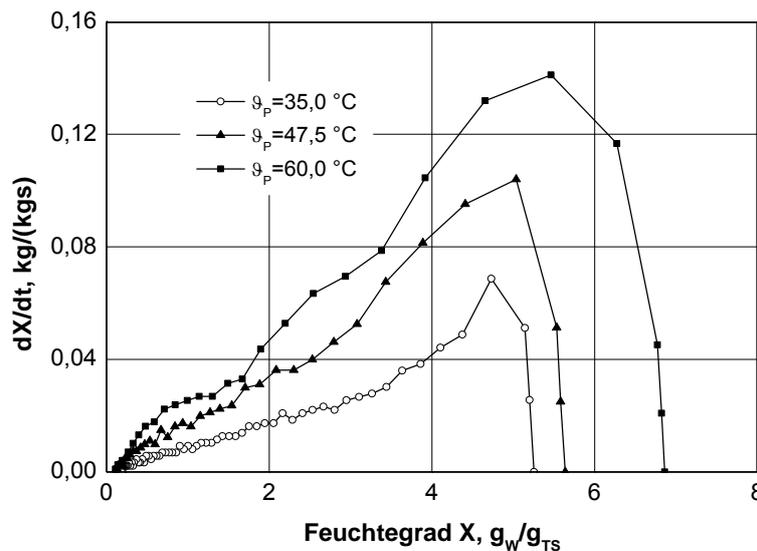


Bild 79. Trocknungsgeschwindigkeit von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Produkttemperaturen als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 77

Der zeitliche Verlauf der Lufttemperaturkurven ist, wie in Bild 80 dargestellt, während der Aufwärmphase für alle drei eingestellten Temperaturen praktisch identisch. Entspricht die Oberflächentemperatur des Produktes der eingestellten Produkttemperatur, beginnt die Lufttemperatur entsprechend der sich ändernde Temperaturdifferenz zum trocknenden Gut (Kühlgrenztemperaturen) zu sinken.

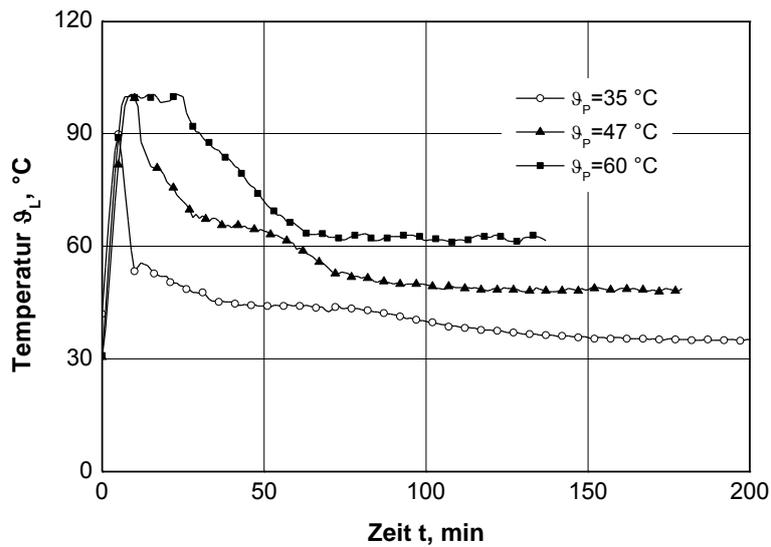


Bild 80. Einfluss der Produkttemperatur auf die Entwicklung der Lufttemperatur bei der Trocknung von Apfelscheiben als Funktion der Zeit, Prozessbedingungen wie in Bild 77

Die Lufttemperatur erreicht lediglich bei 47,5 °C und 60 °C Produktsolltemperatur ihren eingestellten Maximalwert von 100 °C. Bei einer Produktsolltemperatur von 35 °C wird diese erreicht, bevor die Luftgrenztemperatur erreicht werden kann.

Der Verlauf der Lufttemperatur über dem Feuchtegrad, dargestellt in Bild 81, zeigt, dass unabhängig vom Temperaturniveau verschiedene Phasen durchlaufen werden, die sich in Art und Lage relativ zum Feuchtegrad ähneln.

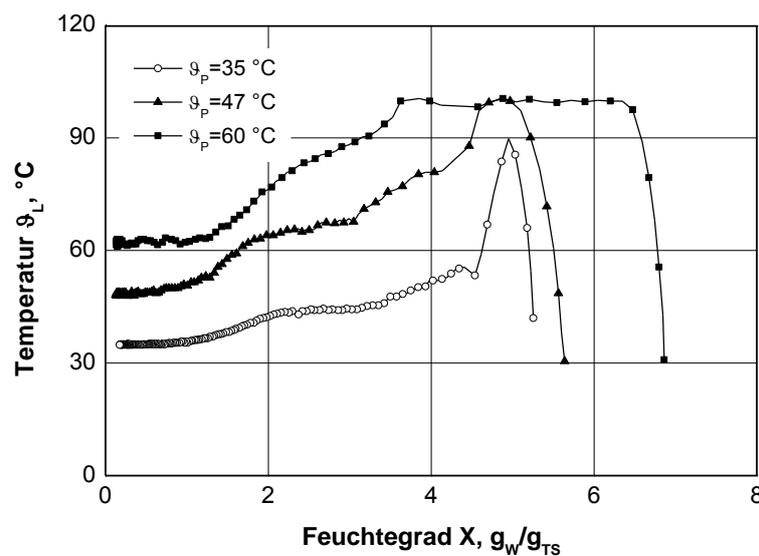


Bild 81. Einfluss der Produkttemperatur auf die Entwicklung der Lufttemperatur bei der Trocknung von Apfelscheiben als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 77

Anfänglich steigt die Temperatur stark an. Ist die Produktsolltemperatur erreicht, fällt die Lufttemperatur ab. Bei einem Feuchtegehalt von etwa $X=4 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$ verlangsamt sich die Temperaturabnahme, um dann bei circa $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$ wieder deutlich zuzunehmen. Der Betrag ist dabei vom Temperaturniveau abhängig. Nach dieser Übergangsphase beträgt der Unterschied zwischen Produkt- und Lufttemperatur nur noch wenige Grad. Die zweite Phase der schnelleren Temperaturabnahme ist durch den Übergang vom zweiten in den dritten Trocknungsabschnitt zu erklären. Es ist zu vermuten, dass die erste Phase des starken Temperaturrückgangs den Übergang vom ersten auf den zweiten Trocknungsabschnitt darstellt.

In Bild 82 sind die Verläufe des TCD über dem Feuchtegrad dargestellt.

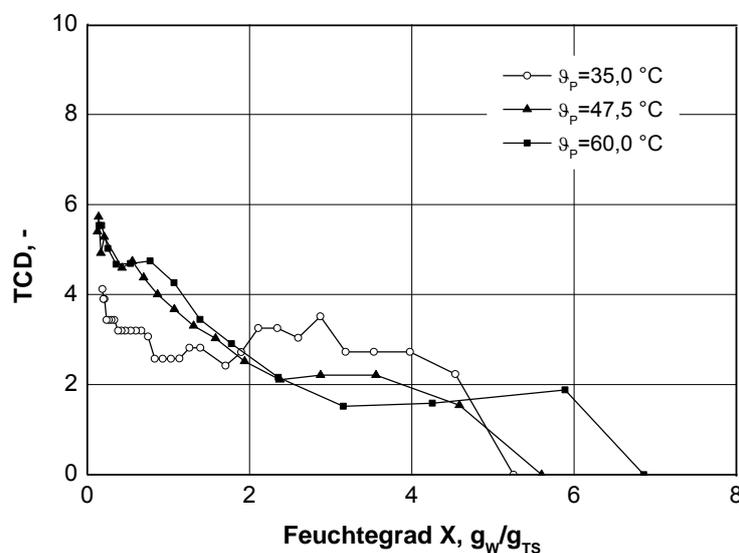


Bild 82. Einfluss der Produkttemperatur bei der Trocknung von Apfelscheiben auf den TCD als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 77

Die Proben machen zunächst eine Phase der starken Veränderung durch, die kurz nach dem Erreichen der Produktsolltemperatur abgeschlossen ist. Danach beginnt eine Phase, während der sich der TCD kaum verändert ($X=4 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$ bis $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$); dies ist mit den in Kapitel 5.5.1.6 beschriebenen Entwicklungen der L^* -, a^* - und b^* -Werte zu erklären. Sobald ein Feuchtegrad von $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$ erreicht ist, beginnt erneut eine Phase der starken Veränderung der Farbwerte. Es wird deutlich, dass sich eine hohe Produkttemperatur im Bereich bis $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{\text{TS}}$ nicht negativ auf die Farbentwicklung auswirkt.

Die Flächenschrumpfung hängt ebenfalls vom Temperaturniveau ab, Bild 83. Je höher die Solltemperatur ist, desto geringer fällt die Flächenschrumpfung aus. Der Gesamtbetrag der Schrumpfung jedoch hängt auch vom Anfangsfeuchtegrad des Produktes ab.

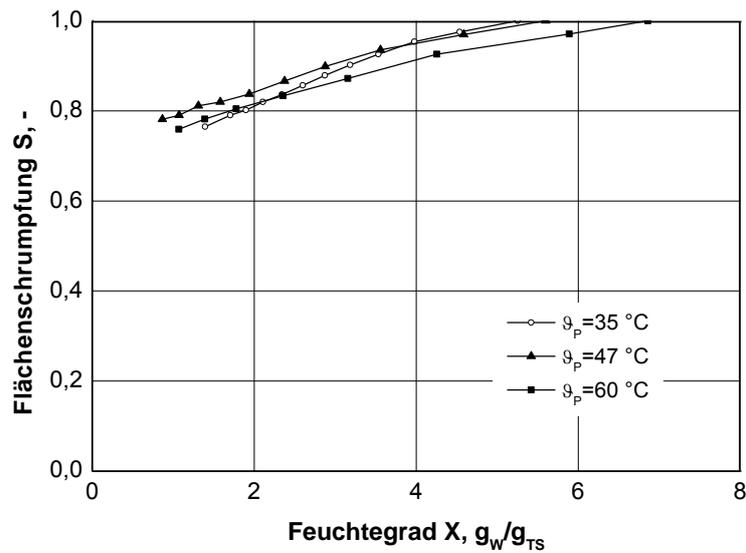


Bild 83. Schrumpfungsverhalten von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Produkttemperaturen als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 77

6.3.2 Einfluss der Luftgeschwindigkeit

Zur Bestimmung des Einflusses der Luftgeschwindigkeit wurde diese auf drei gleichabständigen Niveaus eingestellt. Bild 84 zeigt die Ergebnisse für die Untersuchung der zeitlichen Abhängigkeit der Trocknungsverläufe von der Luftgeschwindigkeit.

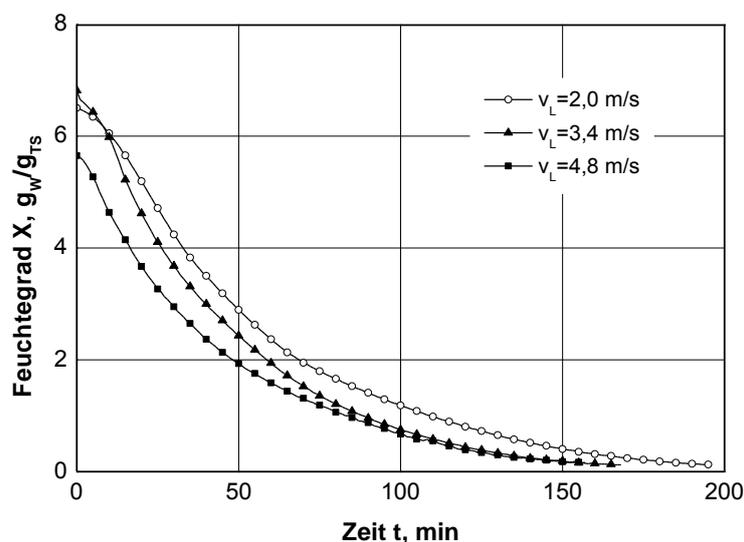


Bild 84. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf den Trocknungsverlauf als Funktion der Zeit, $\vartheta_P=47,5\text{ °C}$, $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$

Die Unterschiede im Verlauf der Feuchtegrade hängen bei den beiden höheren Geschwindigkeiten stärker mit dem unterschiedlichen Anfangsfeuchtegehalt zusammen als mit den unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten.

Betrachtet man die Gesamttrocknungsdauer, die in Bild 85 dargestellt ist, wird deutlich, dass sich die Trocknungszeiten für die oberen beiden Niveaus kaum unterscheiden. Lediglich die Trocknungszeit der Probe, die bei 2 m/s Luftgeschwindigkeit getrocknet wurde, unterscheidet sich erkennbar, jedoch nicht signifikant.

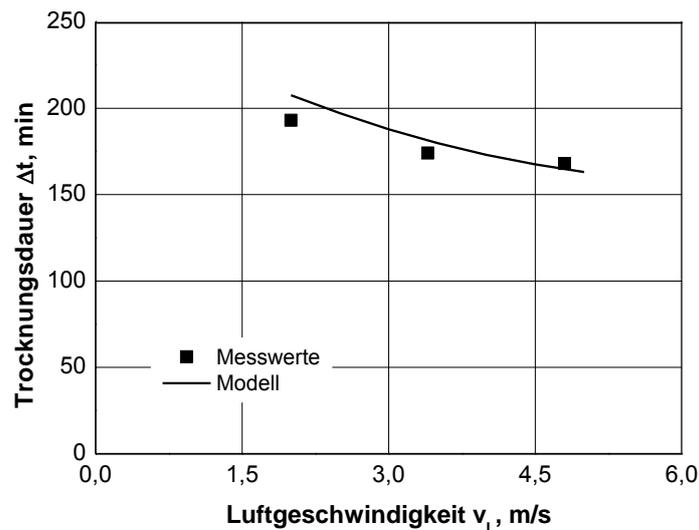


Bild 85. Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X=0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Luftgeschwindigkeit, Prozessbedingungen wie in Bild 84

Die Trocknungsgeschwindigkeit bei 2 m/s unterscheidet sich von den anderen beiden bei hohen Feuchtegraden deutlich. Bei einem Feuchtegrad von etwa $X=0,8 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ laufen alle drei Kurven zusammen, Bild 86.

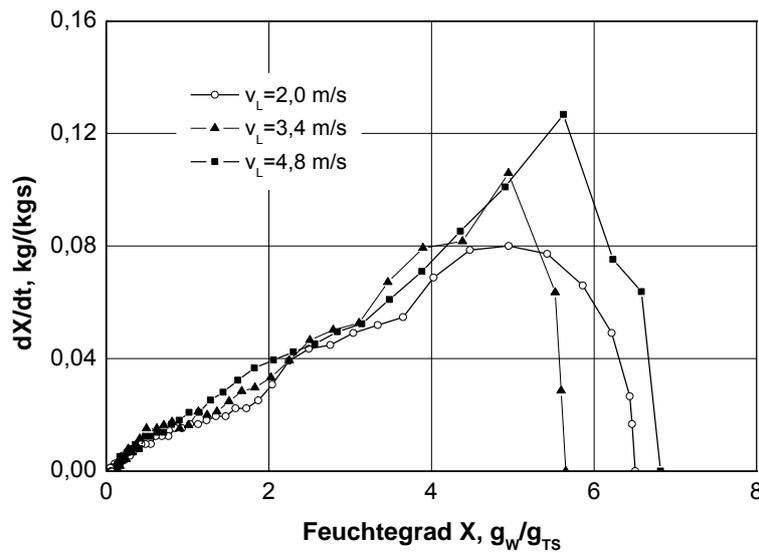


Bild 86. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Trocknungsgeschwindigkeit, dargestellt als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 84

Bei der Darstellung der Temperaturverläufe über der Zeit (Bild 87) und über dem Feuchtegrad (Bild 88) wird deutlich, weshalb sich die Trocknungszeiten so wenig unterscheiden.

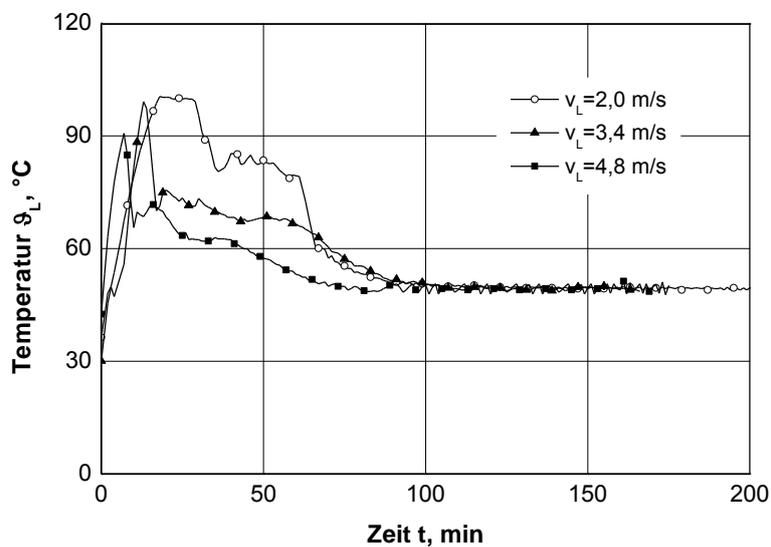


Bild 87. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die zeitliche Entwicklung der Lufttemperatur bei der Trocknung von Äpfeln, Prozessbedingungen wie in Bild 84

Die zeitlichen Unterschiede des Anstieges der Lufttemperatur für die unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten sind bauartbedingt und durch den größeren Wärmebedarf bei höheren Massenströmen zu erklären.

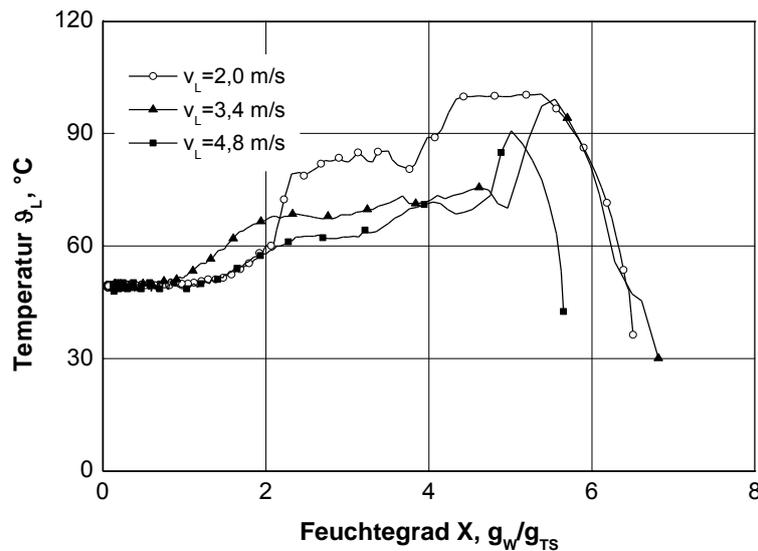


Bild 88. Einfluss der Geschwindigkeit auf die Entwicklung der Lufttemperatur als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 84

Während bei 4,8 m/s die Solltemperatur des Produktes sehr schnell erreicht wird und somit die Lufttemperatur sehr schnell zurückgeht, wird bei den geringeren Strömungsgeschwindigkeiten eine höhere maximale Lufttemperatur erreicht und länger gehalten. Die Einwirkung der höheren Temperatur über einen längeren Zeitraum kompensiert den niedrigeren Massenstrom und den positiven Effekt, der durch höhere Luftgeschwindigkeiten erreicht wird.

Die Farbverlaufskurven zeigen, dass eine sehr niedrige Strömungsgeschwindigkeit eine etwas größere Veränderung der Farbe mit sich bringt und der Übergang früher einsetzt als bei höheren Geschwindigkeiten. Dieser Unterschied fällt jedoch im untersuchten Bereich sehr gering aus, siehe Bild 89.

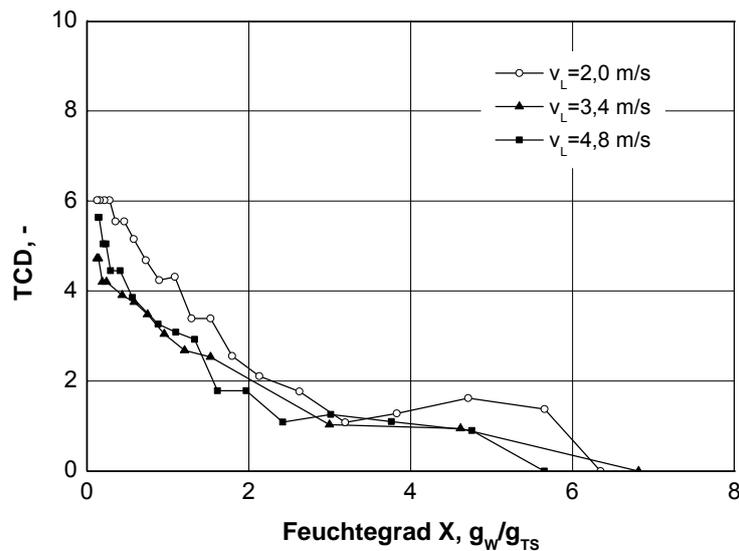


Bild 89. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Veränderungen des TCD als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 84

Bild 90 zeigt den Verlauf der Flächenschrumpfung für die unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten als Funktion des Feuchtegrades.

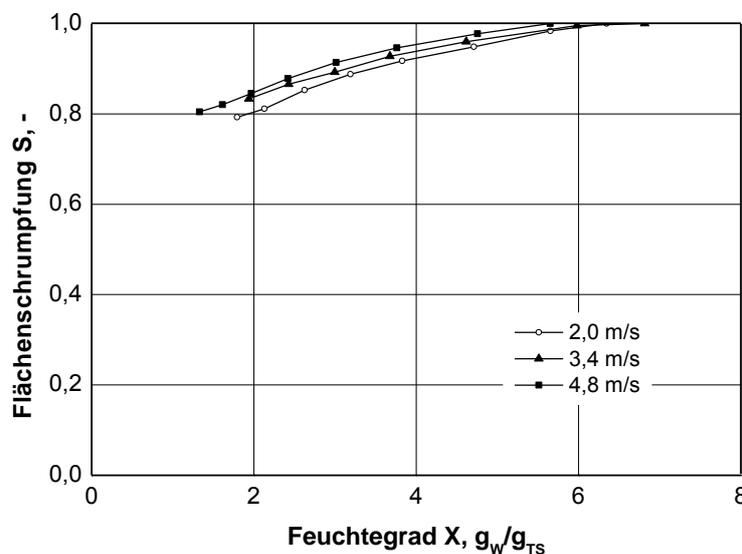


Bild 90. Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf die Flächenschrumpfung als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Prozessbedingungen wie in Bild 84

Analog zur Entwicklung der Farbe ergibt auch hier die niedrigste Strömungsgeschwindigkeit das schlechteste Ergebnis. Für die beiden anderen Geschwindigkeiten verläuft die Veränderung deutlich flacher. Die kann möglicherweise durch eine einsetzende Verhärtung der Oberfläche begründet sein.

Die Änderung der Luftgeschwindigkeit hat nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Trocknungszeit und die resultierenden Qualitätsveränderungen.

6.3.3 Einfluss der Taupunkttemperatur

Zur Untersuchung des Einflusses der Taupunkttemperatur auf das Trocknungsergebnis wurde diese auf drei Stufen bei sonst konstanten Bedingungen untersucht. Bild 91 gibt einen Überblick über die Trocknungsverläufe. Es ist erkennbar, dass sich die Feuchtegrade der Proben bei 5 °C und 17,5 °C Taupunkttemperatur annähernd identisch verhalten. Die Probe bei 30 °C Taupunkttemperatur verhält sich bis zu einem Feuchtegrad von $X=3,5 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ ähnlich, entwickelt sich dann aber langsamer.

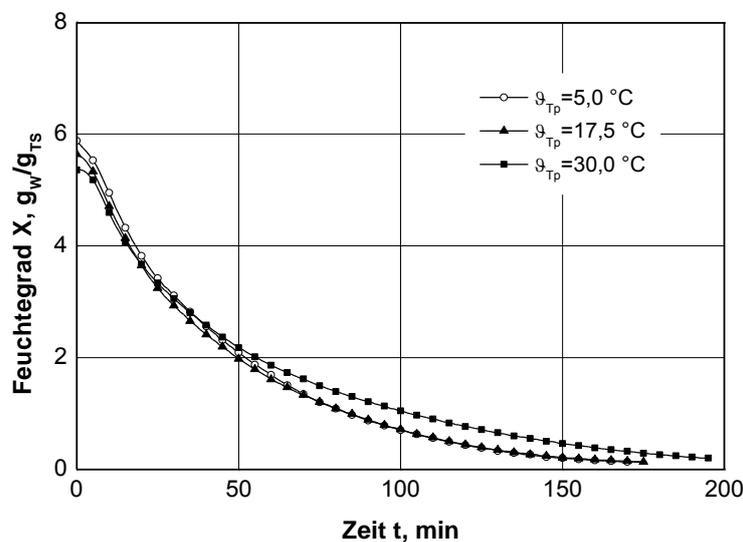


Bild 91. Einfluss der Taupunkttemperatur auf den zeitlichen Verlauf der Trocknung, $\vartheta_P=47,5 \text{ °C}$, $v_L=3,4 \text{ m/s}$

Bei der Gegenüberstellung der Gesamttrocknungsdauer wird oben beschriebene Entwicklung noch deutlicher. Während sich eine Taupunkterhöhung von 5 °C auf 17,5 °C nicht auf die Dauer der Trocknung auswirkt, führt die weitere Erhöhung von 17,5 °C auf 30 °C zu einer Verlängerung der Trocknungsdauer um 50 min. Bild 92 zeigt die Gesamttrocknungsdauer für die unterschiedlichen Taupunkttemperaturen für die Trocknung der Proben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Taupunkttemperatur.

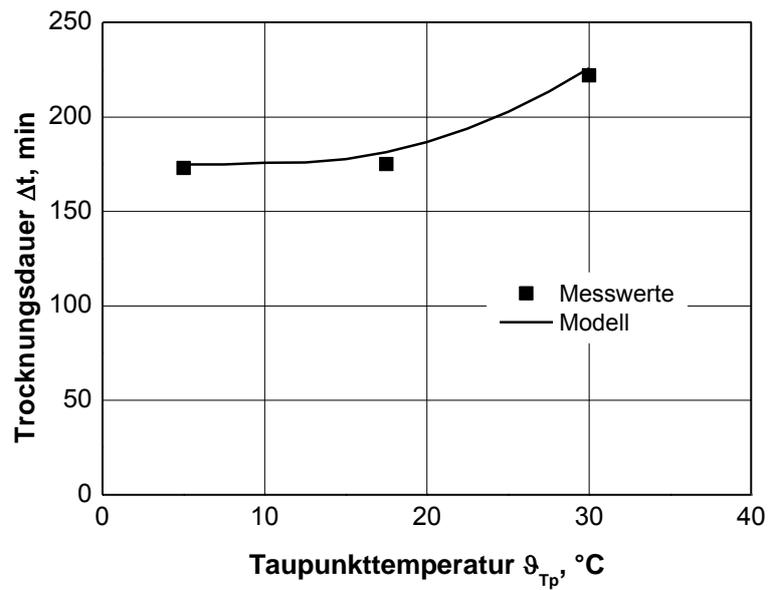


Bild 92. Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Taupunkttemperatur, Prozessbedingungen wie in Bild 91

Die Entwicklung der Trocknungsgeschwindigkeiten (Bild 93) zeigt, dass sich ab einem Feuchtegrad von etwa $X=4 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ die Kurve der bei $\Theta_{TP}=30 \text{ °C}$ getrockneten Probe deutlich stärker von den Vergleichsproben unterscheidet als diese untereinander.

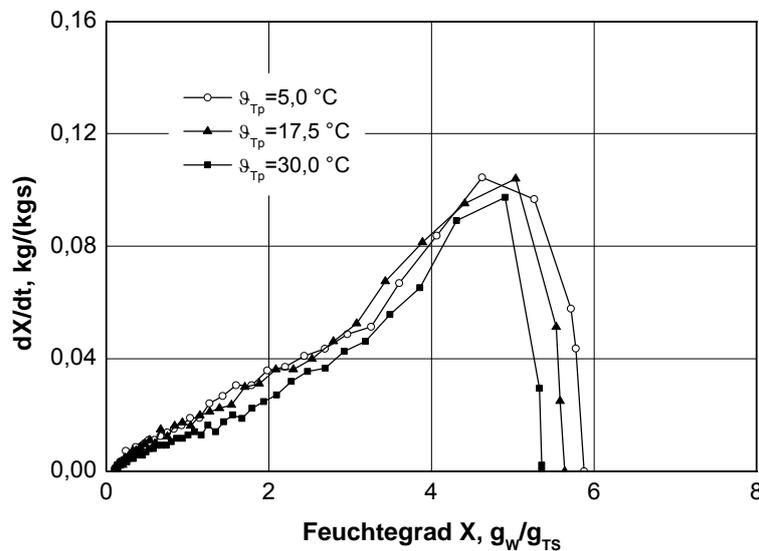


Bild 93. Einfluss der Taupunkttemperatur auf die Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 91

Die zeitlichen Verläufe der Lufttemperaturen sind zunächst fast identisch, siehe Bild 94. Erst die Phase der zweiten steilen Abnahme unterscheidet sich für die unterschiedlichen Einstellungen.

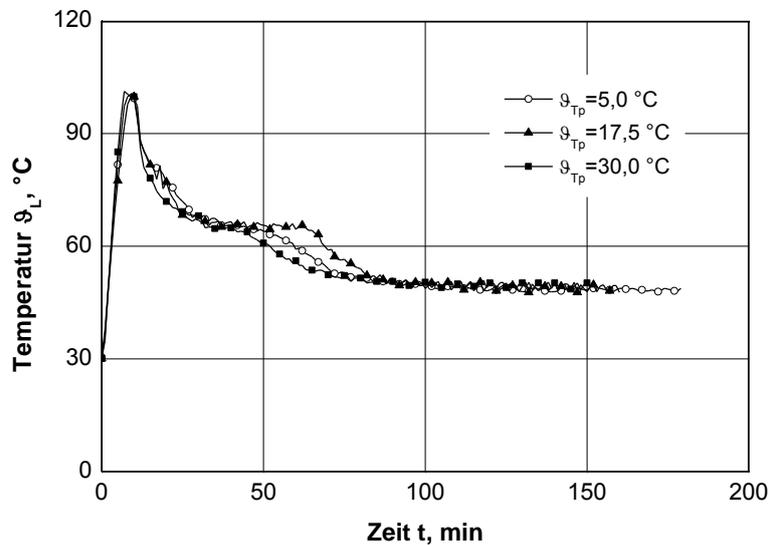


Bild 94. Einfluss der Taupunkttemperatur auf die zeitliche Entwicklung der Lufttemperatur, Prozessbedingungen wie in Bild 91

Da die Verläufe der Produkt- und somit in Konsequenz der Lufttemperatur sowohl von der eingestellten Taupunkttemperatur als auch vom Anfangsfeuchtegrad abhängen, wurden zur besseren Beurteilung der Ursachen dieser Verschiebung die Temperaturkurven in Bild 95 über dem Feuchtegrad aufgetragen. Hier wird einerseits deutlich, dass die Verläufe über der Zeit nicht widersprüchlich, sondern auf die unterschiedlichen Anfangsfeuchtegrade zurückzuführen sind. Andererseits zeigt sich, dass sich die Phase der steilen Abnahme, also des Übergang vom zweiten zum dritten Trocknungsabschnitt, verschiebt. Dies ist damit zu erklären, dass die Gleichgewichtsfeuchte von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt. Diese beträgt in den betrachteten Fällen kurz vor der steilen Temperaturabnahme $\varphi=3,3\%$ bei $\vartheta_{TP}=5\text{ °C}$, $\varphi=7,4\%$ bei $\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$ und $\varphi=16,2\%$ bei $\vartheta_{TP}=30\text{ °C}$.

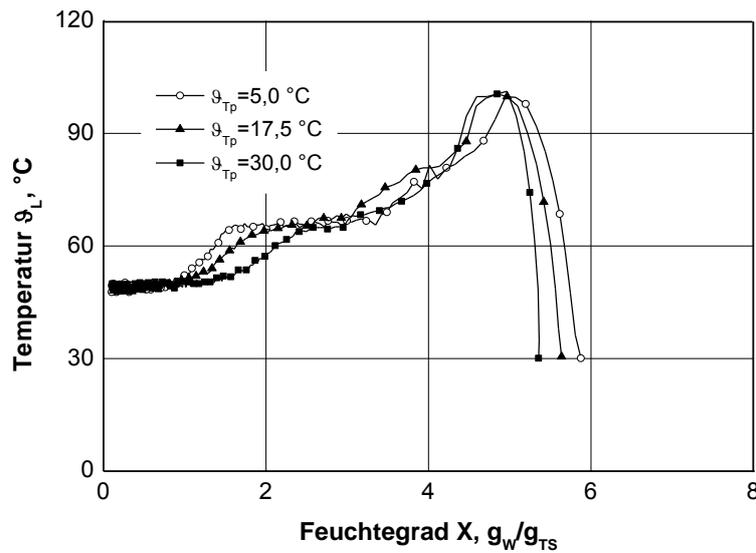


Bild 95. Einfluss der Taupunkttemperatur auf die Entwicklung der Produkttemperatur als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 91

In Bild 96 sind die Farbveränderungen über dem Feuchtegrad dargestellt. Es wird deutlich, dass die Taupunkttemperatur im untersuchten Bereich keinen eindeutigen Einfluss auf die Entwicklung der Produktfarbe hat.

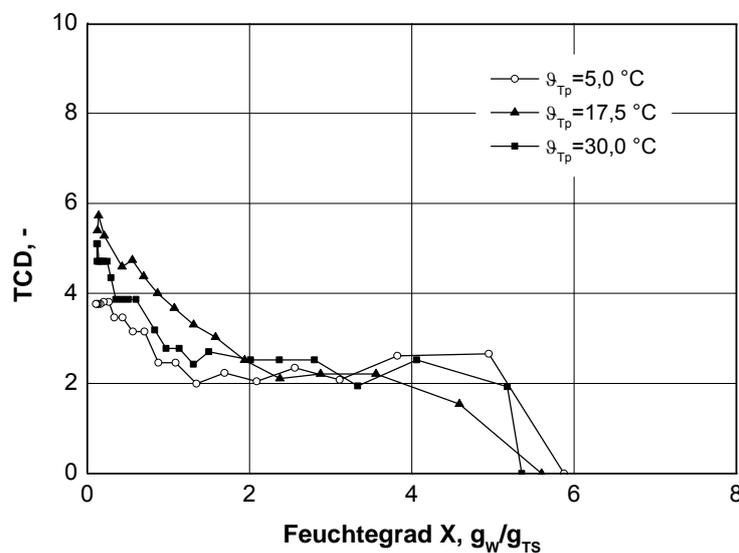


Bild 96. Einfluss der Taupunkttemperatur auf die Farbveränderung als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 91

Die Flächenschrumpfung ist für alle Einstellungen ähnlich, siehe Bild 97. Die Kurven laufen, nach einer Anfangsphase, fast parallel zueinander und liegen sehr nahe beieinander.

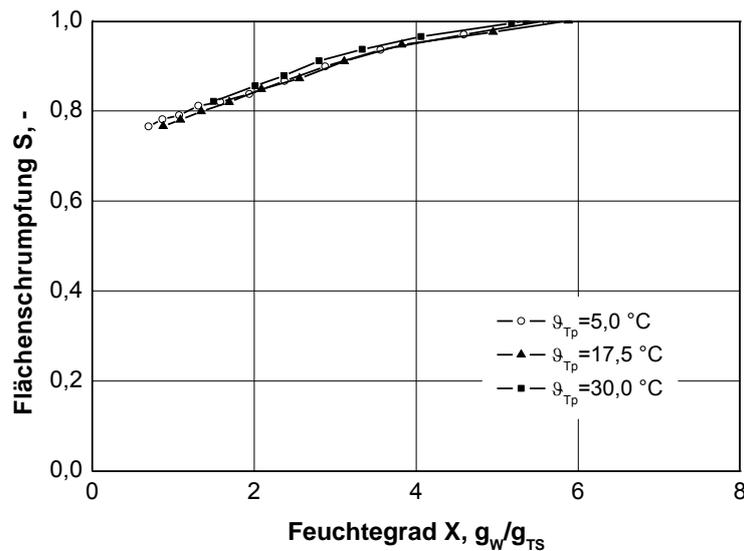


Bild 97. Schrumpfungsverhalten von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Taupunkttemperaturen als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 91

Die Taupunkttemperatur hat erst ab einem höheren Niveau oberhalb von 20 °C einen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit und auch dann erst ab einem Feuchtegrad von $X=3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$. Die Übergangsphase vom zweiten zum dritten Trocknungsabschnitt verschiebt sich mit zunehmender Taupunkttemperatur hin zu einem höheren Feuchtegrad, was möglicherweise durch die Verschiebung der Gleichgewichtsbedingungen und somit einer veränderten Kühlgrenztemperatur zu erklären ist. Der TCD folgt im untersuchten Bereich keinem klaren Verlauf. Die Flächenschrumpfung ist im untersuchten Bereich weitgehend unabhängig vom Niveau der Taupunkttemperatur.

6.3.4 Abhängige Effekte

Analog zu den Untersuchungen bei der Steuerung der Lufttemperatur wurden auf zwei Temperaturniveaus Versuche mit unterschiedlichen Taupunkttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten durchgeführt.

Bild 98 zeigt die Trocknungsverläufe auf dem unteren Temperaturniveau ($\vartheta_p=40 \text{ °C}$), Bild 99 für das obere Temperaturniveau ($\vartheta_p=55 \text{ °C}$). In Bild 100 sind die Gesamttrocknungszeiten für alle durchgeführten Versuche als Funktion der Luftgeschwindigkeit dargestellt.

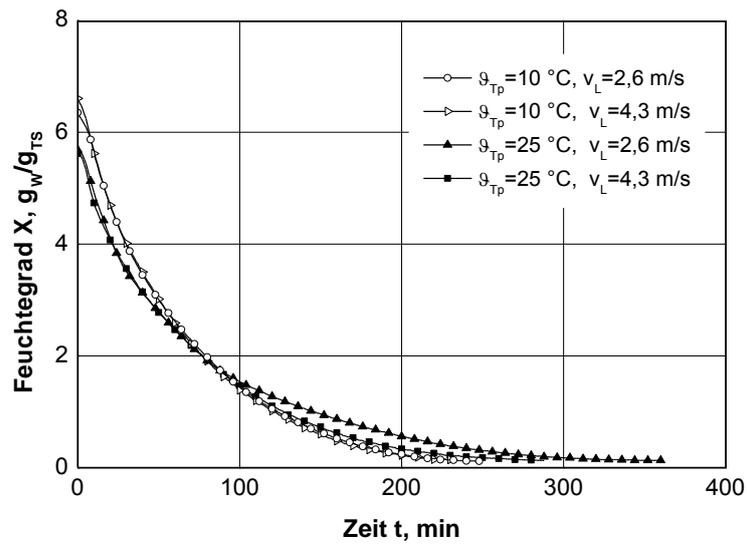


Bild 98. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den Trocknungsverlauf als Funktion der Zeit, $\vartheta_p=40\text{ °C}$

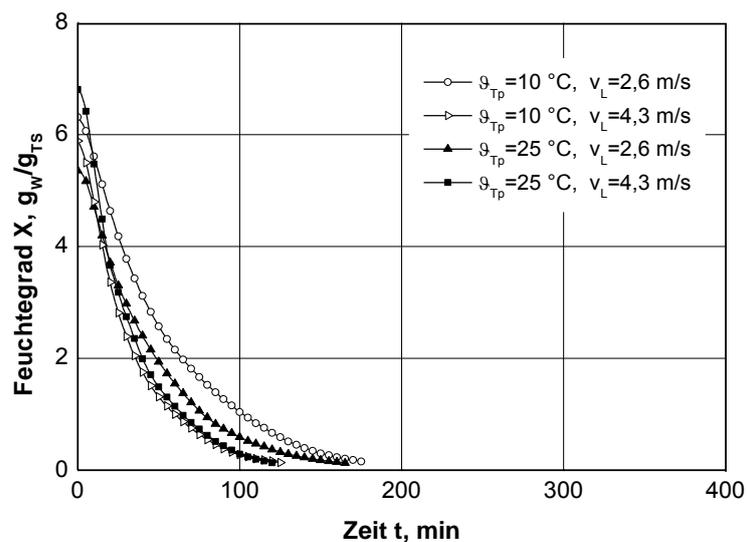


Bild 99. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den Trocknungsverlauf als Funktion der Zeit, $\vartheta_p=55\text{ °C}$

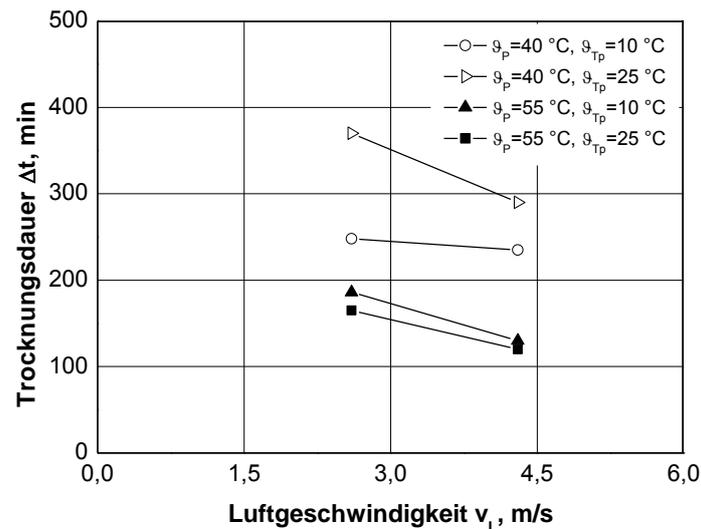


Bild 100. Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Produkt- und Taupunkttemperaturen auf einen Endfeuchtegrad von $X_E = 0,13 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ als Funktion der Luftgeschwindigkeit

Bei einer Produkttemperatur von $\theta_p = 40\text{ °C}$ hat bei der niedrigen Taupunkttemperatur die Veränderung der Geschwindigkeit praktisch keinen Einfluss auf die Trocknungsdauer. Auf dem oberen Taupunkttemperaturniveau jedoch hat sie einen starken Einfluss. Bei 55 °C Produkttemperatur trocknen die Proben bei einer hohen Taupunkttemperatur schneller als die bei der niedrigen Taupunkttemperatur. Dies kann möglicherweise durch eine durch Oberflächenverhärtung verursachte, erschwerte Diffusion bei niedriger Taupunkttemperatur erklärt werden. Bei 55 °C entsprechen die beiden verwendeten Taupunkttemperaturen 8 bzw. 20 % r. F.

In Bild 101 sind die Trocknungsgeschwindigkeiten der bei $\theta_p = 40\text{ °C}$ getrockneten Proben dargestellt.

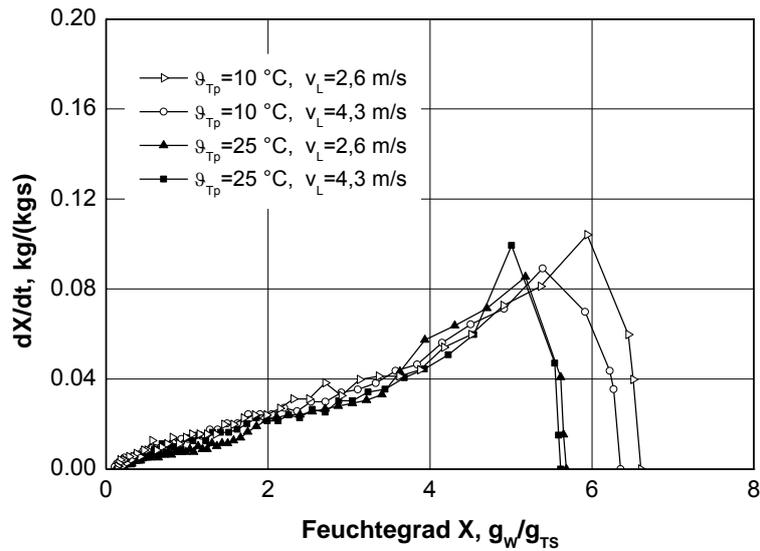


Bild 101. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf die Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_p = 40\text{ °C}$

Aus Bild 102 wird deutlich, dass die Trocknungsgeschwindigkeit auf dem hohen Produkttemperaturniveau in erster Linie von der eingestellten Luftgeschwindigkeit abhängt. Es fällt auf, dass die Trocknungsgeschwindigkeit bei hoher Taupunkttemperatur in beiden Fällen über weite Strecken höher liegt als bei den Vergleichsproben.

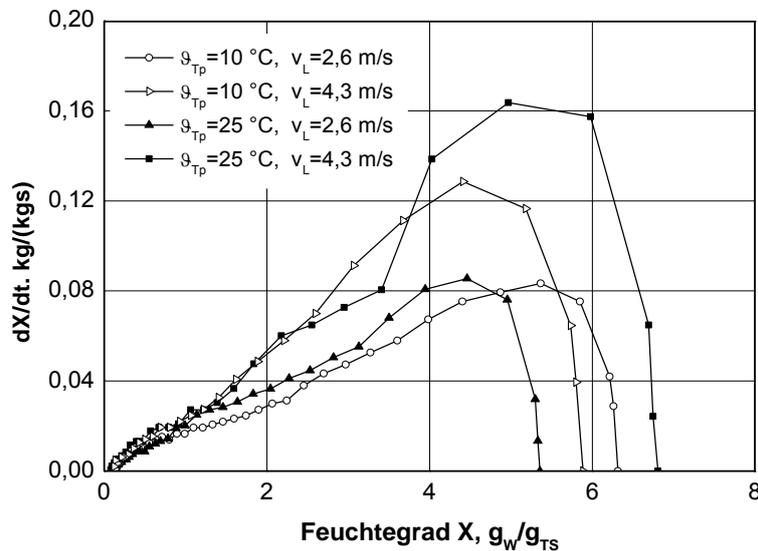


Bild 102. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf die Trocknungsgeschwindigkeit als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_p = 55\text{ °C}$

Bei einer Produkttemperatur von $\vartheta_p = 55\text{ °C}$ hat eine Veränderung der Geschwindigkeit auf beiden untersuchten Taupunkttemperaturniveaus etwa den gleichen Effekt. Es ist jedoch auffällig, dass die Proben, die bei hoher Tau-

punkttemperatur getrockneten wurden, eine kürzere Gesamttrocknungszeit aufweisen als die Vergleichsproben.

In Bild 103 sind die zeitlichen Verläufe der Lufttemperatur für die bei $\vartheta_p=40\text{ °C}$ durchgeführten Versuche dargestellt, in Bild 104 für $\vartheta_p=55\text{ °C}$.

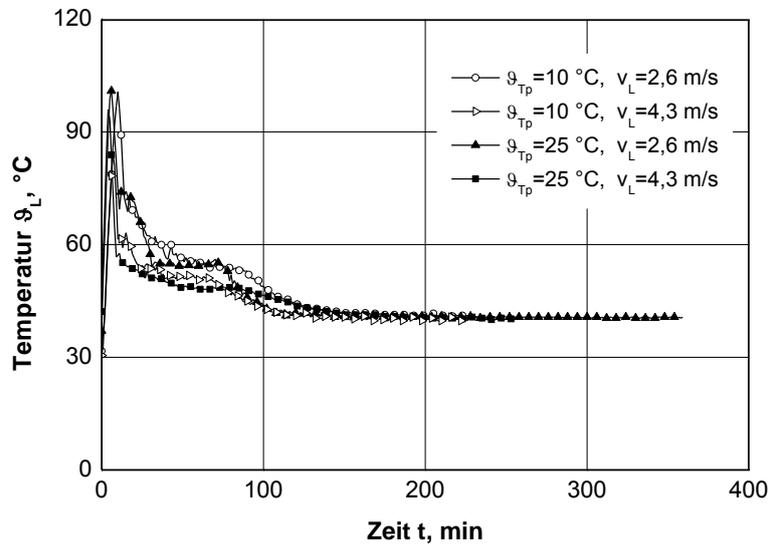


Bild 103. Einfluss der Luftgeschwindigkeit und der Taupunkttemperatur auf den zeitlichen Verlauf der Lufttemperatur, $\vartheta_p=40\text{ °C}$

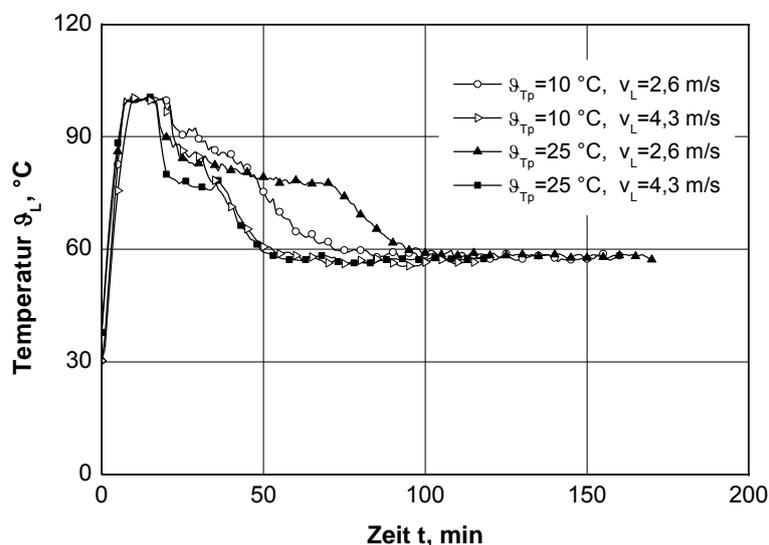


Bild 104. Einfluss der Luftgeschwindigkeit und der Taupunkttemperatur auf den zeitlichen Verlauf der Lufttemperatur, $\vartheta_p=55\text{ °C}$

Bei $\vartheta_p=40\text{ °C}$ unterscheiden sich die Verläufe der Temperaturentwicklungen während der Aufwärmphase kaum voneinander. Erst wenn die Produktsolltemperatur erreicht ist, entwickeln sich die Kurven unterschiedlich weiter. Es

ist klar zu erkennen, dass hierbei die Luftgeschwindigkeit einen größeren Einfluss hat als das Niveau der Taupunkttemperatur.

Im Gegensatz zum niedrigeren Temperaturniveau teilt sich die Aufwärmphase bei $\vartheta_p=55\text{ °C}$ in einen Bereich des starken Anstieges und einen Bereich der konstanten Lufttemperatur nach Erreichen der eingestellten Grenztemperatur. Ihre Dauer hängt dabei in erster Linie von der eingestellten Taupunkttemperatur ab. Im weiteren Verlauf jedoch spielt die Luftgeschwindigkeit eine wesentliche Rolle, was zu einem fast identischen Verlauf der Kurven bei hoher Strömungsgeschwindigkeit führt, bei niedriger Geschwindigkeit jedoch unterscheiden sich die Kurven deutlich voneinander.

Die Temperaturverläufe als Funktion des Feuchtegrades zeigen, dass bei niedrigen Produkttemperaturen (Bild 105) Höhe und Art des Verlaufes hauptsächlich von der Luftgeschwindigkeit beeinflusst werden.

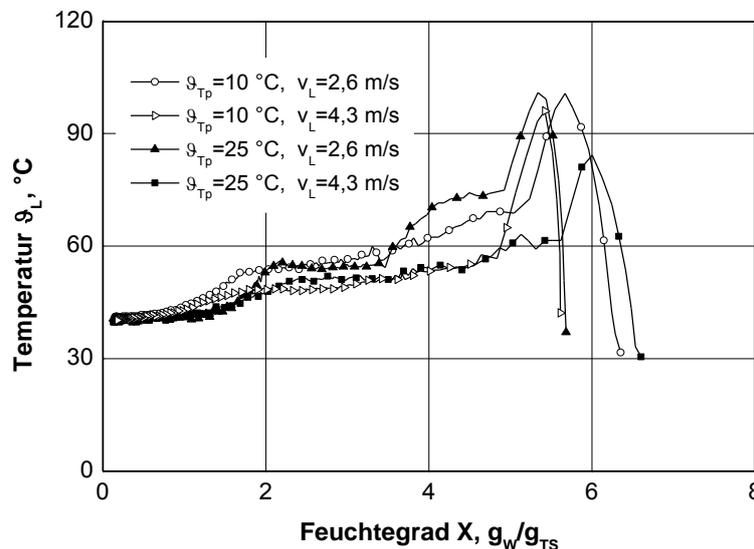


Bild 105. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den Lufttemperaturverlauf als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_p\ 40\text{ °C}$

Bei hohen Temperaturen (Bild 106) jedoch spielt die Taupunkttemperatur bei niedrigen Geschwindigkeiten vor allem beim Übergang in den dritten Trocknungsabschnitt eine entscheidende Rolle. Bei hohen Geschwindigkeiten hingegen liegen die Übergänge sehr nahe zusammen.

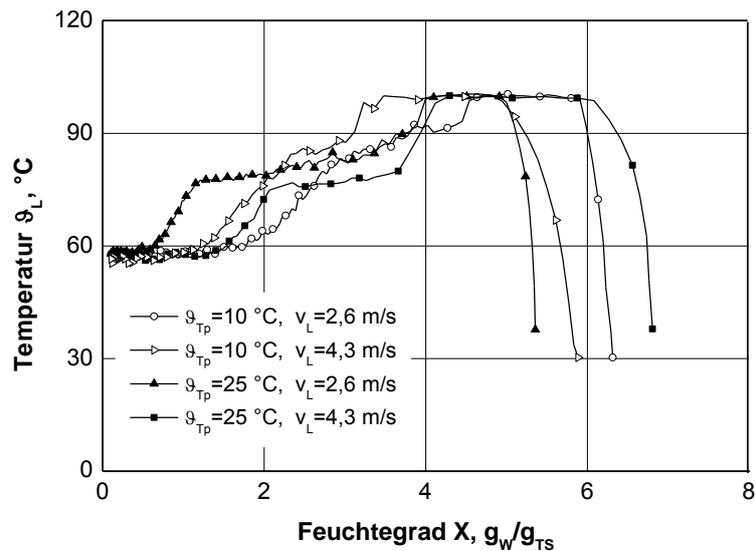


Bild 106. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den Lufttemperaturverlauf, ϑ_P 55 °C

In Bild 107 ist der Verlauf des TCD für die Trocknung bei $\vartheta_P=40$ °C dargestellt. Die Beträge der Veränderungen sind in allen Fällen vergleichsweise gering. Bei der niedrigen Taupunkttemperatur liegen die Verläufe eng beieinander, während sie bei der hohen Taupunkttemperatur einen deutlichen Abstand haben.

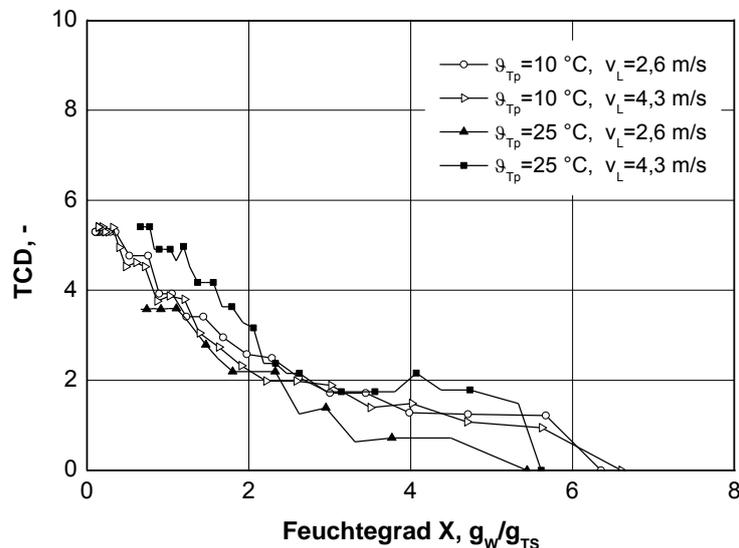


Bild 107. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den TCD als Funktion des Feuchtegrades, ϑ_P 40 °C

Bei den Versuchen mit $\vartheta_P=55$ °C streuen die Farbergebnisse stark, siehe Bild 108.

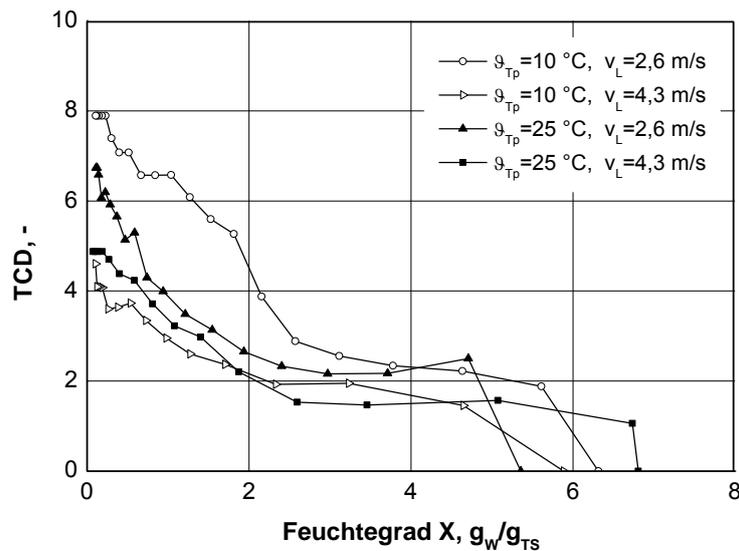


Bild 108. Einfluss von Taupunkttemperatur- und Geschwindigkeitsveränderungen auf den TCD als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_p = 55\text{ °C}$

Im Gegensatz zur niedrigen Trocknungstemperatur liegen die Ergebnisse der Versuche mit niedriger Taupunkttemperatur weit auseinander. Die Farbveränderung bei niedriger Strömungsgeschwindigkeit liegt hier fast doppelt so hoch als bei hoher Geschwindigkeit. Die Ergebnisse für die hohe Taupunkttemperatur liegen hingegen eng zusammen.

Die Flächenschrumpfung ist bei niedriger Produkttemperatur für alle Proben bis auf die mit niedriger Taupunkttemperatur und niedriger Luftgeschwindigkeit sehr ähnlich. Bei letztgenannter Probe ist der Verlauf deutlich steiler, siehe Bild 109.

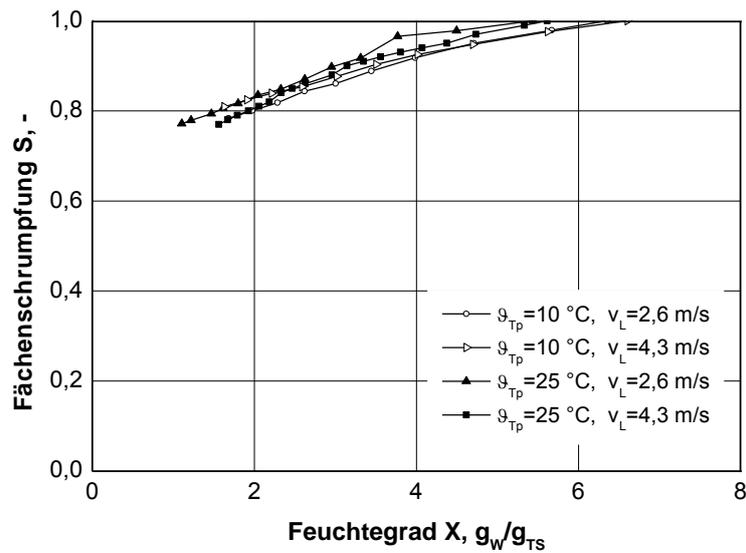


Bild 109. Flächenschrumpfung für unterschiedliche Taupunkttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten bei konstanter Produkttemperatur als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_P 40\text{ °C}$

Bei einer hohen Produkttemperatur wirkt sich eine hohe Geschwindigkeit positiv auf die Schrumpfung aus. Eine niedrige Taupunkttemperatur ist einer hohen vorzuziehen (Bild 110).

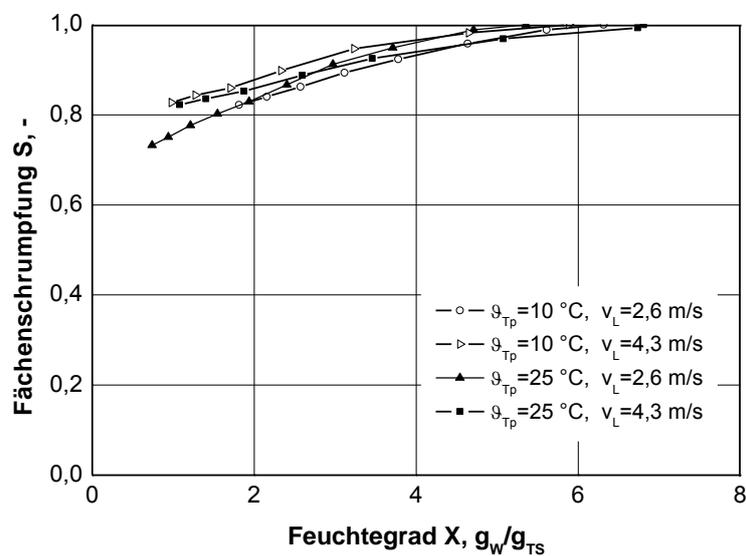


Bild 110. Flächenschrumpfung für unterschiedliche Taupunkttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten bei konstanter Produkttemperatur als Funktion des Feuchtegrades, $\vartheta_P 55\text{ °C}$

6.3.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse wurde analog zur Auswertung in Kapitel 6.2.5 durchgeführt. In Tabelle 9 sind die für die Analyse der Zielgrößen verwendeten Modelltypen und deren Kenngrößen beschrieben.

Tabelle 9. Beschreibung der verwendeten Modelle und deren Kenngrößen bei der Trocknung mit der Produkttemperatur als Führungsgröße

Zielgröße	Modell	p	R ²	Mittelwert	Standardabweichung
Trocknungsdauer	Quadratisch	<0,05	0,95	207	22
Farbveränderung	-	-	-	-	-
Schrumpfung	Quadratisch	<0,05	0,78	0,84	0,01
Wiederbefeuchtung	Quadratisch	<0,05	0,72	0,64	0,03

6.3.5.1 Trocknungsdauer

In Bild 111 ist die Abhängigkeit der Trocknungsdauer von der gleichzeitigen Änderungen der Produkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit dargestellt.

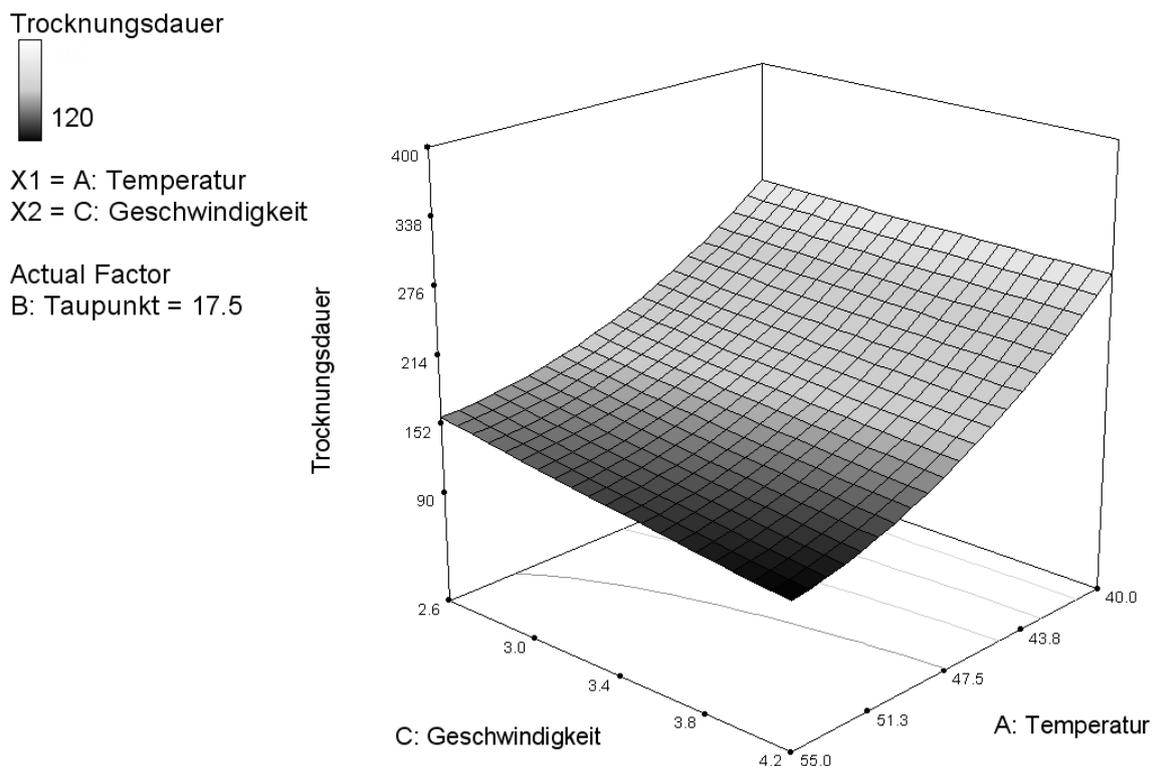


Bild 111. Abhängigkeit der Trocknungsdauer von der gleichzeitigen Änderungen der Produkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit ($\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$)

Bei niedrigen Produkttemperaturen hat die Luftgeschwindigkeit praktisch keinen Einfluss auf die Trocknungsdauer. Eine Luftgeschwindigkeit von 2,6 m/s resultiert bei 40 °C in eine Trocknungsdauer von 287 min, während es bei ei-

ner Luftgeschwindigkeit von 4,2 m/s 282 min sind. Bei hohen Produkttemperaturen hingegen wirkt sich die Veränderung der Luftgeschwindigkeit deutlicher aus. Durch Erhöhung der Produkttemperatur auf 55 °C wird bei 2,6 m/s eine Reduktion der Trocknungsdauer von 44 % auf 160 min erreicht, während es bei 4,2 m/s 59 % (116 min) sind.

Eine Erhöhung der Taupunkttemperatur (Anlage 9) bei 40 °C Produkttemperatur von 10 °C auf 25 °C führt zu einer Verlängerung der Trocknungsdauer von 257 min auf 325 min. Bei 55 °C führt diese Erhöhung jedoch zu einer Reduktion der benötigten Trocknungsdauer von 152 min auf 137 min. Die Erhöhung der Produkttemperatur führt bei niedriger Taupunkttemperatur zu einer Reduktion der benötigten Trocknungszeit von 40 % während sich bei der höheren Taupunkttemperatur eine Reduktion von 58 % einstellt.

Die Erhöhung der Taupunkttemperatur (Anlage 10) führt bei 2,6 m/s zu einer stark ausgeprägten Verlängerung der Trocknungsdauer von 174 min auf 232 min während sie bei 4,2 m/s mit 182 min und 176 min praktisch konstant bleibt.

Die Produkttemperatur hat den größten Einfluss auf die Trocknungsdauer. Die Verkürzung der benötigten Trocknungsdauer bei hohen Produkt- und Taupunkttemperaturen wird mit einer Reduktion der Oberflächenverhärtung durch ein feuchteres Trocknungsklima zu erklären sein.

6.3.5.2 Farbveränderungen

Die absolute Farbveränderungen während der instationären Trocknung mit Führung des Prozesses nach der Produkttemperatur, folgt keiner erkennbaren Regel. Bei identischen Trocknungsbedingungen hat schon der Anfangsfeuchtegrad einen großen Einfluss auf den TCD (Bild 37). Bei unterschiedlichen Luftgeschwindigkeiten (Bild 89) sind die Verläufe für zwei der drei untersuchten Niveaus fast identisch. Aus diesem Grund ist keine statistische Auswertung möglich.

6.3.5.3 Flächenschrumpfung

Die Flächenschrumpfung hängt in starkem Maß von den gewählten Einstellungen ab, Bild 112.

Während bei niedrigen Produkttemperaturen die Luftgeschwindigkeit kaum eine Rolle spielt, erweist sich bei hohen Temperaturen eine hohe Luftgeschwindigkeit als positiv. Bei 40 °C resultiert die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 2,6 m/s auf 4,2 m/s in keine Änderung der Schrumpfung. In beiden Fällen beträgt sie 0,82. Eine Erhöhung der Temperatur auf 55°C jedoch zieht eine Reduktion der Schrumpfung von 0,83 und 0,86 nach sich.

Schrumpfung



0.8

X1 = A: Temperatur

X2 = C: Geschwindigkeit

Actual Factor

B: Taupunkt = 17.5

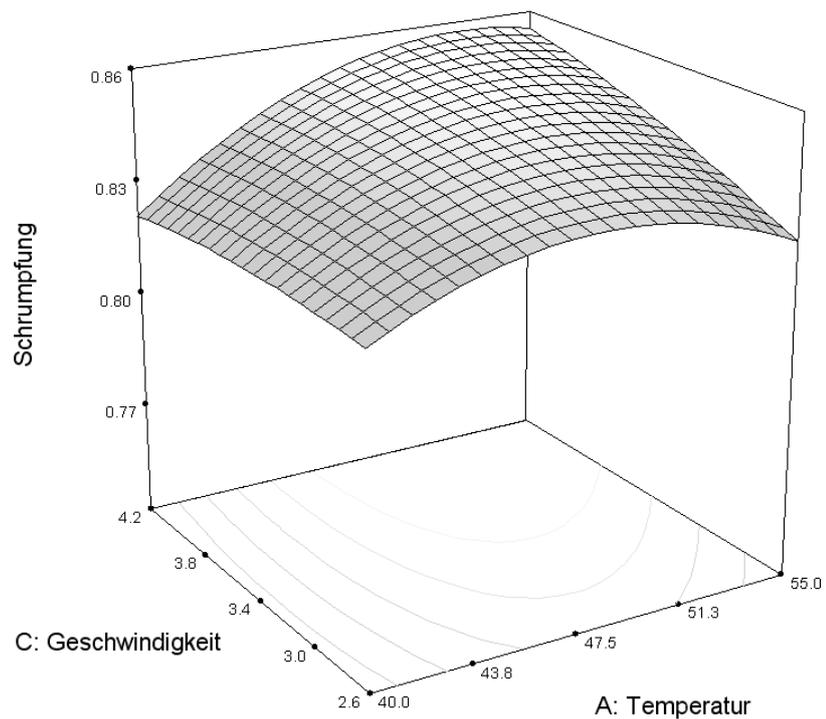


Bild 112. Abhängigkeit der Flächenschrumpfung von Änderungen der Produkttemperatur und der Geschwindigkeit ($\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$)

Bei niedrigen Produkttemperaturen (Anlage 11) wirkt sich eine hohe Taupunkttemperatur positiv auf das Ergebnis aus (0,82 zu 0,83). Bei hohen Produkttemperaturen jedoch fällt sie nicht ins Gewicht (0,85). Die Erhöhung der Taupunkttemperatur jedoch hat einen positiven Einfluss auf die Reduktion der Schrumpfung.

Bei niedrigen Taupunkttemperaturen (Anlage 12) ist der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit ebenfalls offensichtlich (0,83 zu 0,86), während er bei hohen Taupunkttemperaturen nicht ins Gewicht fällt (0,85).

6.3.5.4 Wiederbefeuchtungsrate

In Bild 113 ist die Abhängigkeit der Wiederbefeuchtungsrate von der gleichzeitigen Änderung der Produkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit dargestellt.

Die Wiederbefeuchtungsrate hängt sehr stark von der eingestellten Luftgeschwindigkeit ab. Während sich die Ergebnisse bei den niedrigen und hohen Niveaus kaum unterscheiden, gibt es bei einer Luftgeschwindigkeit von circa 3,4 m/s ein deutliches Maximum. Die Veränderung der Produkttemperatur hat nur einen untergeordneten Effekt.

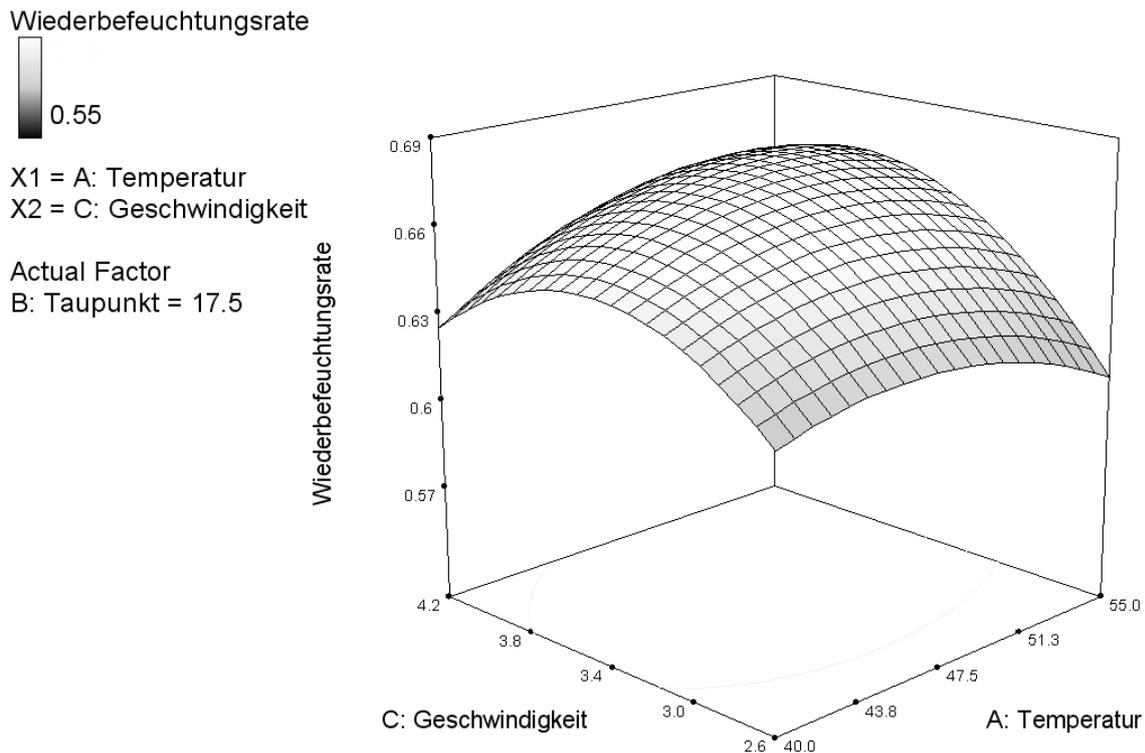


Bild 113. Abhängigkeit der Wiederbefeuchtungsrate von Änderungen der Produkttemperatur und der Geschwindigkeit ($\vartheta_{TP}=17,5\text{ °C}$)

Die Taupunkttemperatur (Anlage 13) hat einen großen Einfluss auf die Entwicklung der Wiederbefeuchtungsrate. Eine hohe Taupunkttemperatur führt zu einer erhöhten Wiederbefeuchtung.

6.3.6 Diskussion der Ergebnisse

Die Produkttemperatur hat den größten Einfluss auf die Trocknungsdauer des Produktes und die resultierende Schrumpfung. Die Farbveränderungen können nicht eindeutig den Trocknungsbedingungen zugewiesen werden. Die Wiederbefeuchtung hängt in starkem Maß von der eingestellten Luftgeschwindigkeit ab. Die Verläufe der Lufttemperatur und der Farbveränderungen können sehr gut erkannt und korreliert werden.

Die statistische Optimierung auf Grundlage der vorliegenden Daten ist nur bedingt sinnvoll. Es hat sich gezeigt, dass die klar abgrenzbaren Phasen der Trocknung einen deutlichen sehr unterschiedlichen Einfluss auf das Endergebnis haben. Zur Optimierung des Prozesses müssen die Prozessbedingungen stufenweise geändert und die statistische Optimierung auf Grundlage der daraus erhaltenen Ergebnisse durchgeführt werden.

6.4 Einfluss der Regelungsstrategie

Zur Ermittlung des Einflusses der Strategie auf das Trocknungsergebnis bezüglich Trocknungsdauer und Qualität wurden die Ergebnisse für gleiche maximale Produkttemperatur (L_{60} , P_{60}) bei Verwendung der beiden unterschiedlichen Prozessstrategien und die Ergebnisse für ähnliche Trocknungsdauer verglichen (L_{60} , $P_{47,5}$). Die Kurven werden zum besseren Verständnis entsprechend der Strategie mit L (Lufttemperatur als Führungsgröße) und P (Produkttemperatur als Führungsgröße) gekennzeichnet. Der tiefgestellte Index steht dabei für das jeweils eingestellte Temperaturniveau.

Da im Folgenden ähnliche Trocknungsdauern verglichen werden sollen, wurden für $P_{47,5}$ Ergebnisse aus einem Versuch verwendet, bei dem die Lufttemperatur zunächst nur langsam stieg, also eine andere Entwicklung durchlief als die Probe P_{60} . Obwohl zunächst deutlich weniger Wasser verdampft wurde als in den Vergleichsversuchen bei identischen Prozesseinstellungen, war diese Probe am schnellsten trocken.

6.4.1 Trocknungsverlauf

Trocknungsverlauf und Trocknungszeit sind zwei wesentliche Größen der Optimierung eines Trocknungsprozesses. In Bild 114 sind die Trocknungsverläufe für die drei verglichenen Einstellungen dargestellt.

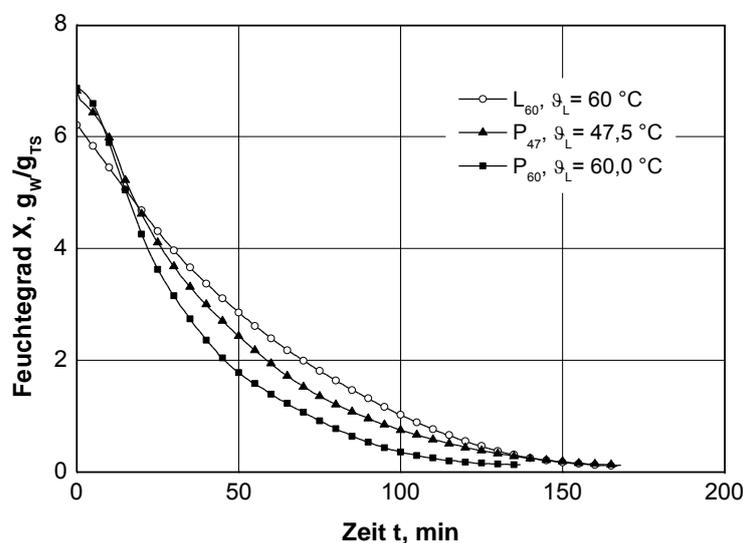


Bild 114. Trocknungsverläufe für gleiche maximale Produkttemperatur ($\vartheta_L=60 \text{ °C}$, $\vartheta_P=60 \text{ °C}$) und annähernd gleiche Trocknungsdauer ($\vartheta_L=60 \text{ °C}$, $\vartheta_P=47,5 \text{ °C}$), $\vartheta_{TP}=17,5 \text{ °C}$, $v_L=3,4 \text{ m/s}$

Zunächst sind die Trocknungsverläufe für die beiden Versuche mit Produkttemperatursteuerung (P_{60} , $P_{47,5}$) annähernd identisch. Dies ist durch die Aufwärmphase bis zum Erreichen der Produktsolltemperatur zu erklären. Sobald

die Probe mit niedrigerer Solltemperatur diese erreicht hat, verlangsamt sich aufgrund der niedrigeren anliegenden Lufttemperatur (Bild 117) die Verdunstungsrate.

Während des überwiegenden Teiles des Trocknungsprozesses liegt die Trocknungsverlaufskurve für $P_{47,5}$ unter der von L_{60} , was ebenfalls mit der im Vergleich höheren Lufttemperatur zu erklären ist. Erst wenn die Lufttemperatur bei $P_{47,5}$ unter die von L_{60} fällt, nähern sich die beiden Kurven an.

In Bild 115 sind die Gesamttrocknungszeiten für Versuche der beiden unterschiedlichen Arten der Prozessführung als Funktion des Temperaturniveaus dargestellt.

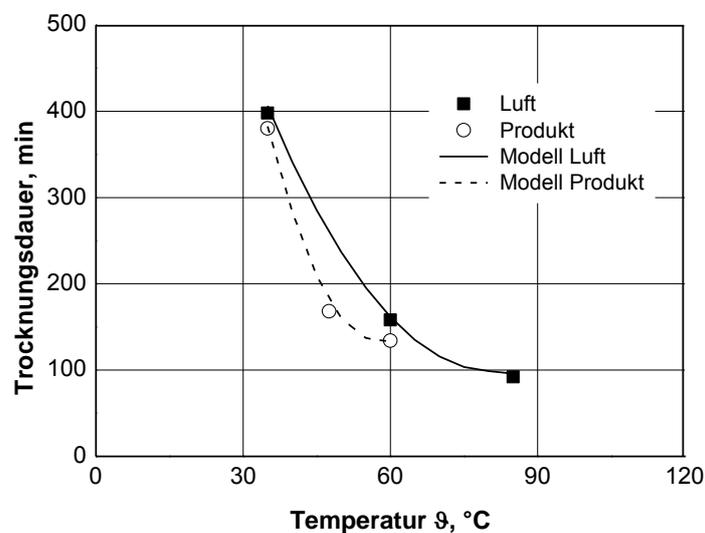


Bild 115. Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben bei unterschiedlichen Führungsstrategien auf einen Endfeuchtegrad von $X=0,13 \text{ g}_w/\text{g}_{T_S}$ als Funktion der Temperatur, $\vartheta_{TP}=17,5 \text{ °C}$, $v_L=3,4 \text{ m/s}$

Aus Bild 115 geht deutlich hervor, dass bei gleicher maximaler Produkttemperatur die Proben bei der Steuerung des Prozesses mit der Produkttemperatur als Führungsgröße immer schneller trocknen als die Vergleichsproben. Die relativ geringfügige Zeitersparnis bei 60 °C hängt mit der Begrenzung der Temperatur der Trocknungsluft auf 100 °C zusammen. Ohne Temperaturbegrenzung würde sie deutlich höher ausfallen [Sturm, 2006].

Bei beiden untersuchten Regelungsstrategien hat die vorgegebene Temperatur den wesentlichen Einfluss auf die Trocknungsdauer. Während bei der lufttemperaturgesteuerten Trocknung die Luftgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Trocknungsdauer hat (Bild 47), fällt dieser bei der Führung des Prozesses nach der Produkttemperatur vergleichsweise gering aus (Bild 85), da bei identischer vorgegebener Prozesstemperatur bei niedrigeren Geschwindigkeiten länger eine höhere Lufttemperatur anliegt und somit der Wärmestrom nahezu identisch wird (Bild 87). Die Taupunkttemperatur hat in

beiden betrachteten Fällen einen erkennbaren Einfluss, der jedoch deutlich geringer ausfällt als der der Prozesstemperatur. Aus der statistischen Auswertung geht jedoch klar hervor, dass der Einfluss der drei Einzelfaktoren stark vom Niveau der anderen Beiden abhängt und diese nicht getrennt betrachtet werden sollten (Kapitel 6.2.5. und 6.3.5).

6.4.2 Trocknungsgeschwindigkeit

Die Trocknungsgeschwindigkeit ist in der Anlaufphase für P_{60} und $P_{47,5}$ nahezu identisch (Bild 116). Erst wenn die Probe $P_{47,5}$ die Produkolltemperatur erreicht, beginnen sie sich wesentlich zu unterscheiden, und das Niveau von P_{60} bleibt während des gesamten restlichen Prozesses deutlich höher als die der Vergleichsproben.

$P_{47,5}$ besitzt bis zum Erreichen des Übergangs zum dritten Trocknungsabschnitt eine höhere Trocknungsgeschwindigkeit als L_{60} . Danach dreht sich das Verhältnis um.

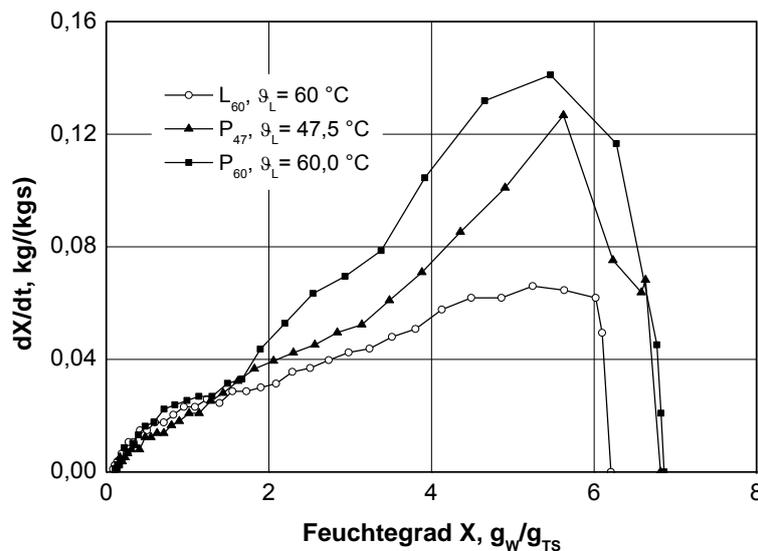


Bild 116. Entwicklung der Trocknungsgeschwindigkeit für gleiche maximale Produkttemperatur ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_P=60\text{ °C}$) und vergleichbarer Trocknungsdauer ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_P=47,5\text{ °C}$) als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 114

Dieses Verhalten ist durch den erhöhten Wärmetransport und die daraus resultierende höhere Verdampfungsrate bei höheren anliegenden Lufttemperaturen zu erklären. Beim Übergang in den dritten Trocknungsabschnitt sinkt die Lufttemperatur bei $P_{47,5}$ unter das Niveau von L_{60} und somit fällt auch die Verdampfungsrate darunter.

6.4.3 Temperaturentwicklung

Zur Bestimmung des Einflusses des Trocknungsverfahrens und der unterschiedlichen Temperaturniveaus wurden sowohl Luft- als auch Produkttemperaturen über der Zeit (Bild 117 und Bild 119) und über dem Wassergehalt (Bild 118 und Bild 120) aufgetragen.

Bei der Steuerung des Prozesses nach der Produkttemperatur steigt in beiden betrachteten Fällen die Lufttemperatur zunächst stark an. Bei $P_{47,5}$ wird die Grenztemperatur nicht erreicht, da kurz zuvor die Produkttemperatur den Sollwert erreicht. Im Gegensatz dazu erreicht die Lufttemperatur bei P_{60} den Grenzwert und verharrt auf diesem Niveau, bis der Sollwert erreicht ist, erst dann fällt sie wieder ab. Bei der Steuerung der Lufttemperatur wird diese konstant auf 60 °C gehalten.

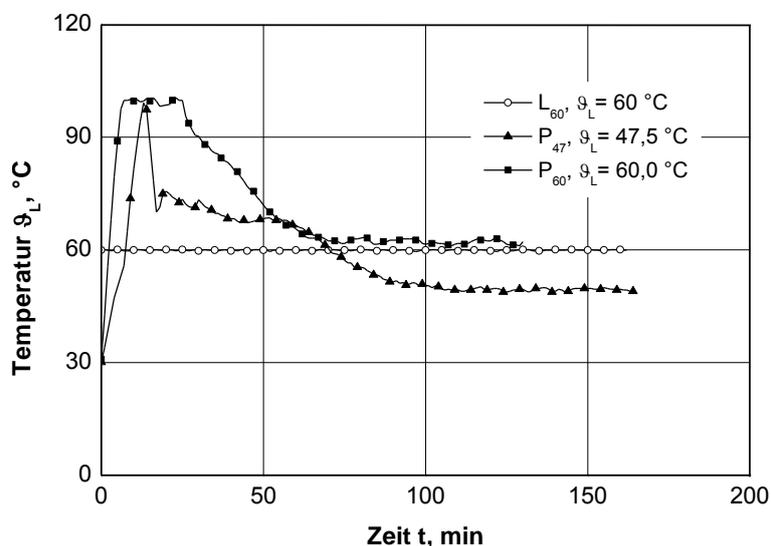


Bild 117. Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur für gleiche maximale Produkttemperatur und unterschiedliche Strategien ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_P=60\text{ °C}$) und vergleichbare Trocknungsdauer und unterschiedliche Strategien ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_P=47,5\text{ °C}$), Prozessbedingungen wie in Bild 114

Beim Vergleich des Lufttemperaturverlaufs von $P_{47,5}$ und L_{60} , wird deutlich, dass sich das Temperaturniveau von $P_{47,5}$ die ersten 70 Minuten über dem von L_{60} befindet und danach darunter liegt. An diesem Punkt ändert sich auch das Verhältnis der Trocknungsgeschwindigkeiten zueinander (Bild 116), und die Produkttemperatur von L_{60} überschreitet die von $P_{47,5}$ (Bild 119), wobei die Trocknung von $P_{47,5}$ zu diesem Zeitpunkt schon deutlich weiter fortgeschritten ist als die der Vergleichsprobe.

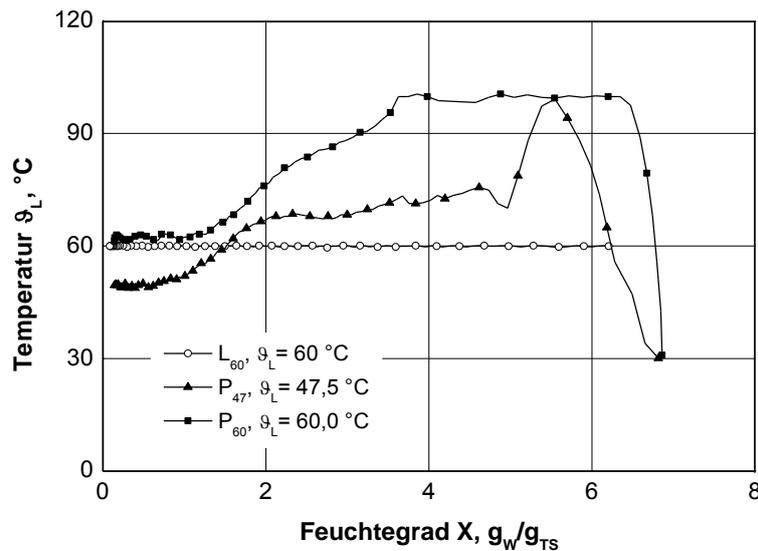


Bild 118. Entwicklungen der Lufttemperatur für gleiche maximale Produkttemperatur ($\theta_L=60$ °C, $\theta_P=60$ °C) und vergleichbarer Trocknungsdauer ($\theta_L=60$ °C, $\theta_P=47,5$ °C) als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 114

In Bild 119 sind die Produkttemperaturverläufe für die verglichenen Proben dargestellt. Bei Steuerung der Produkttemperatur wird der eingestellte Sollwert nach einer kurzen Anlaufphase erreicht und dann auf diesem Niveau konstant gehalten. Im Gegensatz dazu steigt bei der Steuerung der Lufttemperatur die Produkttemperatur kontinuierlich an und gleicht sich gegen Ende der Trocknung an das Lufttemperaturniveau an.

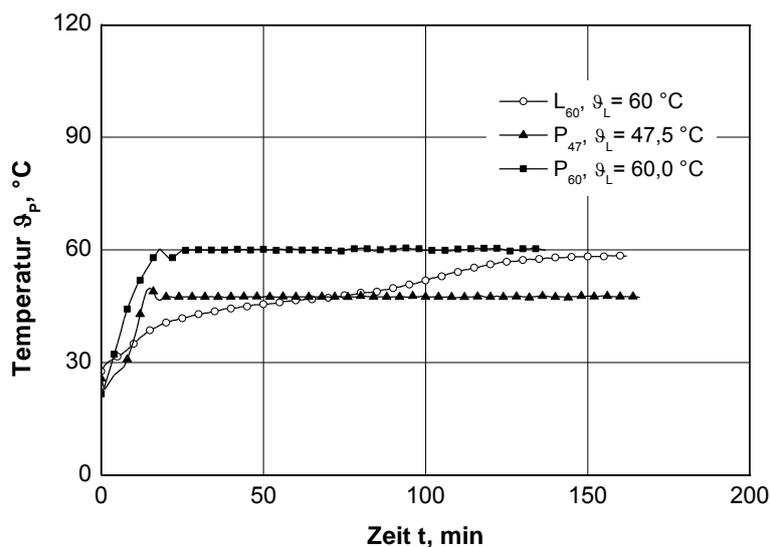


Bild 119. Zeitlicher Verlauf der Produkttemperaturen bei gleicher maximaler Produkttemperatur ($\theta_L=60$ °C, $\theta_P=60$ °C) und annähernd gleicher Trocknungsdauer ($\theta_L=60$ °C, $\theta_P=47,5$ °C), Prozessbedingungen wie in Bild 114

Während der ersten 70 Minuten liegt das Temperaturniveau der L_{60} -Probe deutlich unter dem der $P_{47,5}$ -Probe und nähert sich dieser langsam an. Nach Erreichen dieser Marke beschleunigt sich die Temperaturänderung aufgrund des Übergangs in den dritten Trocknungsabschnitt und nähert sich schließlich an das eingestellte Lufttemperaturniveau an. Dies bedeutet bei vergleichbaren Trocknungszeiten eine höhere Belastung für das thermisch labile Produkt bei Trocknung mit der Lufttemperatur als Führungsgröße.

In Bild 120 sind die Temperaturverläufe der Proben über dem Feuchtegrad dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Temperatur der bei 60 °C Lufttemperatur getrockneten Probe bei einem Feuchtegrad von $X=2 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ in den dritten Trocknungsabschnitt übergeht.

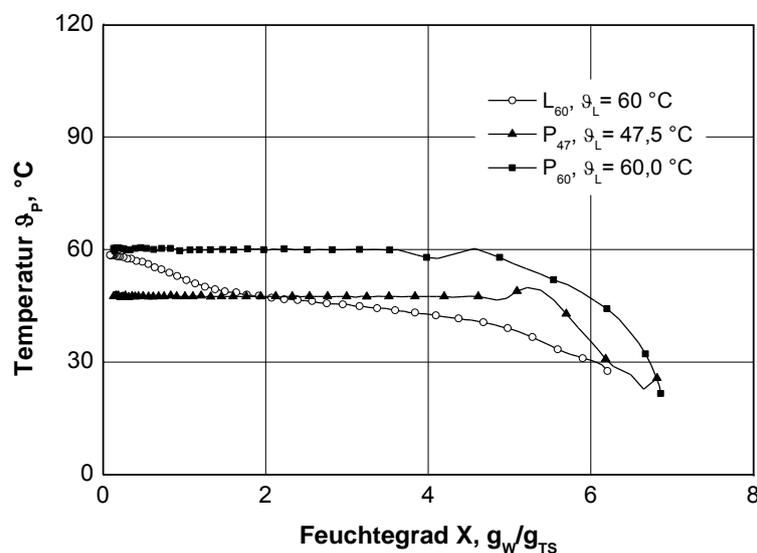


Bild 120. Entwicklungen der Produkttemperatur für gleiche maximale Produkttemperatur ($\vartheta_L=60 \text{ °C}$, $\vartheta_P=60 \text{ °C}$) und vergleichbarer Trocknungsdauer ($\vartheta_L=60 \text{ °C}$, $\vartheta_P=47,5 \text{ °C}$) als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 114

Aus den dargestellten Temperaturverläufen geht deutlich hervor, dass unabhängig von der Strategie der Übergang von einer in die nächste Phase der Trocknung ohne großen Aufwand anhand der Temperaturverläufe ermittelt werden kann: bei der Steuerung des Prozesses mit der Lufttemperatur als Führungsgröße aus dem Verlauf der Produkttemperatur und analog dazu bei der Steuerung der Produkttemperatur aus dem Verlauf der Lufttemperatur.

6.4.4 Farbveränderung und Schrumpfung

Die Gegenüberstellung der Farbveränderungen (Bild 121) und der Flächenschrumpfung (Bild 122) zeigt deutlich, dass die Qualität der Proben nicht unter den eingangs sehr hohen Lufttemperaturen leidet.

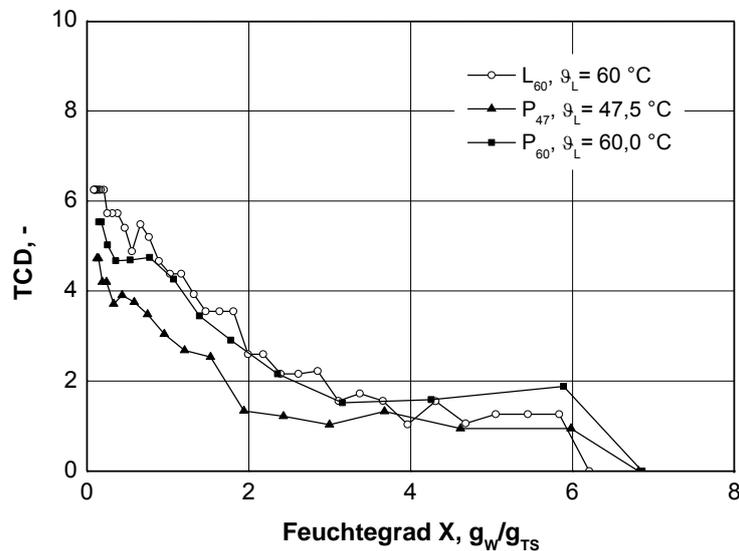


Bild 121. TCD für gleiche maximale Produkttemperatur ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_P=60\text{ °C}$) und vergleichbarer Trocknungsdauer ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_P=47,5\text{ °C}$) als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 114

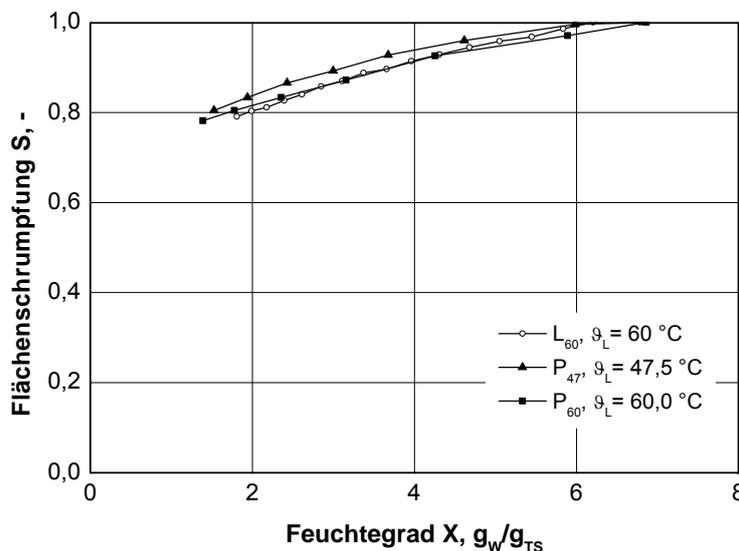


Bild 122. Entwicklung der Flächenschrumpfung für gleiche maximale Produkttemperatur ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_P=60\text{ °C}$) und vergleichbarer Trocknungsdauer ($\vartheta_L=60\text{ °C}$, $\vartheta_P=47,5\text{ °C}$) als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Bild 114

Bei Vergleich der Farbwerte für gleiche Trocknungszeiten lässt sich eine Verringerung der Farbveränderung für die Regelung der Produkttemperatur er-

kennen. Bei gleicher maximaler Trocknungstemperatur sind das Farbergebnis und sogar der Verlauf der Farbveränderungen sehr ähnlich.

Die Flächenschrumpfung ist bei Probe P_{47,5} am geringsten und bei Probe L₆₀ am stärksten ausgeprägt.

6.4.5 Diskussion der Ergebnisse

Die beiden betrachteten Trocknungsstrategien wirken sich grundsätzlich unterschiedlich aus, dies sowohl auf den Trocknungsverlauf und die Entwicklung der Produkteigenschaften während der Trocknung als auch auf deren Qualität nach Beendigung des Prozesses.

Die benötigten Trocknungszeiten liegen bei der Steuerung des Prozesses nach den verschiedenen Produkttemperaturen enger zusammen als bei einer Führung nach der Lufttemperatur. Die untersuchten Faktoren wirken sich deutlich anders auf das Trocknungsergebnis aus als bei der Steuerung des Prozesses mit der Lufttemperatur als Führungsgröße.

Die Nutzung der Produkttemperatur als Führungsgröße wirkt sich positiv auf die optischen Eigenschaften des Produktes aus. Durch ein niedrigeres Temperaturniveau bei gleicher Trocknungszeit kann davon ausgegangen werden, dass zusätzlich die wertvollen Inhaltsstoffe wie Vitamine und Aromen geschont werden (Kapitel 4.2).

Das Wiederbefeuchtungsvermögen liegt bei der produkttemperaturgesteuerten Trocknung höher als bei der Steuerung der Lufttemperatur.

7 Diskussion

Die Nutzung der Produkttemperatur als Führungsgröße bei der konvektiven Trocknung ist ein neuer Ansatz zur schonenden Konservierung empfindlicher biologischer Güter. Arbeiten von Chou & Chua (2003), Chua et al. (2000c), Ho et al. (2002) und anderen Autoren, die sich mit der Trocknung unter zeitlich veränderlichen Bedingungen beschäftigen, haben gezeigt, dass Produkte mit sehr hohem Anfangsfeuchtegrad ($X_0 > 3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$) zu Beginn der Trocknung hohen Lufttemperaturen ausgesetzt werden können, ohne qualitativ darunter zu leiden. Die Differenz zwischen Luft- und Produkttemperatur ist in dieser Phase noch sehr groß, das Produkt befindet sich also noch weit von der Beschädigungsgrenze entfernt. In allen oben genannten Fällen wurde die Lufttemperatur vorgegeben. Um eine Beziehung zwischen der neuen Strategie unter Nutzung der Produkttemperatur als Führungsgröße und der klassischen einstufigen Konvektionstrocknung herstellen zu können, war es nötig, beide Strategien unter sonst identischen Bedingungen (Taupunkttemperatur, Luftgeschwindigkeit) mit Material vergleichbarer Rohstoffqualität zu untersuchen.

Der zu diesem Zweck entwickelte Versuchsaufbau hat sich für die durchgeführten Überströmversuche bewährt. Die Genauigkeit der eingesetzten Messgeräte erwies sich als ausreichend. Die vergleichsweise komplizierte Einrichtung zur Regelung der Luftgeschwindigkeit gestattet es nicht nur alle Einflüsse der Zustandsänderungen der Trocknungsluft zu kompensieren. Durch die Messung in der Ansaugleitung, also auf der kalten Seite des Prozesses, kann die Anlage auch mit sehr hohen Temperaturen, z. B. zur Durchführung von Trocknungsversuchen mit Mais, betrieben werden ohne die Messtechnik thermisch zu schädigen. Für Anwendungsbereiche mit niedrigen Maximaltemperaturen kann auf eine Messung nach der Luftkonditionierung zurückgegriffen werden. Dann ist es möglich, die erhaltenen Werte direkt zu nutzen und eine einfache PID-Regelung einzusetzen. Anstelle der verwendeten USB-Kamera, die sich bewährt und die berührungslose Onlinemessung der Farbe und Form der Proben ermöglicht hat, könnte zukünftig auch eine netzwerkfähige Kamera eingesetzt werden. Dadurch würde die Bilddatenübertragung stark vereinfacht. Das Auswerteprogramm sollte auf den Anwendungsfall hin modifiziert und weiterentwickelt werden, um eine kontinuierliche und automatisierte Bilddatenauswertung zu ermöglichen.

Äpfel der Sorte Jonagold haben sich wegen ihrer im Jahresverlauf guten lokalen Verfügbarkeit in konstanter Qualität sowie der bei dieser Varietät breiten Datenbasis aus der Literatur als geeignetes Modellgut erwiesen. Zur Untersuchung der Farbveränderungen wären jedoch Sorten die schnell und deutlich stärker bräunen wie beispielsweise Boskoop geeigneter. Da diese jedoch oft eine sehr eingeschränkte Lagerfähigkeit haben ist deren Nutzung in langen Versuchsreihen schwierig. Eine Vergrößerung des Probenumfangs und dadurch die Erhöhung der Genauigkeit der Messungen ist kaum möglich, da

dazu mehr als ein Apfel pro Versuch notwendig wäre. Die Schwankungen des Ausgangszustandes von Äpfeln sind jedoch sehr hoch. Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass sich die unterschiedlichen Anfangsfeuchtegrade nicht signifikant auf die Trocknungsdauer auswirken. Jedoch unterscheiden sich die Trocknungsverläufe und auch die Verläufe der Veränderungen der untersuchten Qualitätskriterien sehr stark. Rasterelektronenmikroskopische und topografische Untersuchungen nach der Trocknung an Äpfeln mit hohem bzw. niedrigem Anfangsfeuchtegrad haben ergeben, dass sich der Feuchtegrad sehr stark auf den strukturellen Aufbau der Frucht auswirkt. Während die Probe mit hohem Anfangsfeuchtegrad kaum Rauigkeitsspitzen aufweist und die Struktur stark in sich zusammengefallen ist, zeichnet sich die Probe mit niedrigem Anfangsfeuchtegrad durch eine deutlich besser erhaltene Struktur aus. Weiterhin sind bei hohem Anfangsfeuchtegrad die Zellwände deutlich dünner und die Zellen im Mittel größer als bei niedrigem Anfangsfeuchtegrad. Dadurch wird die Diffusion durch die Zellwände bei niedrigem Anfangsfeuchtegrad erschwert. Die erhöhte Rauigkeit von Proben mit niedrigem Anfangsfeuchtegrad kann einerseits mit dem größeren Widerstand gegen das Schneiden von dicken und stabilen Zellwänden erklärt werden. Andererseits bewirkt ihre Stabilität auch eine höhere Resistenz gegen den Kollaps während der Trocknung. Die stark ausgeprägten Rauigkeitsspitzen entstehen durch einen offen stehenden Rest einer aufgeschnittenen Zelle. Eine einzelne Rauigkeitsspitze entspricht etwa der Größe einer Zelle (6.1.3.1). Schwach ausgeprägte Minima repräsentieren eher kollabierte Zellreste. Bai et al. (2002) untersuchten den Einfluss der Trocknungstemperatur auf die resultierende Mikrostruktur von Äpfeln nach der Trocknung und erhielten für 60 °C Lufttemperatur vergleichbare Ergebnisse zu den in dieser Arbeit präsentierten.

Der Anfangsfeuchtegrad hat somit bei der lufttemperaturgesteuerten Trocknung keinen Einfluss auf die Trocknungsdauer und die Qualitätsveränderungen, jedoch einen signifikanten Einfluss auf die Struktur und die Trocknungsgeschwindigkeit des Apfels.

Die zentral zusammengesetzten Versuchspläne und die festgelegten Bereiche der drei Faktoren waren richtig gewählt. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche haben wichtige Hinweise über die Einflüsse der Prozessführung und der Faktoreinstellungen geliefert. Die Optimierung der Prozessbedingungen für die einstufige Trocknung deckt jedoch nur einen Teilbereich ab. Eine wirkungsvolle Optimierung bedarf der abschnittsweisen Betrachtung der Trocknung. Auch hierfür kann grundsätzlich ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan verwendet werden.

Die erhaltenen Ergebnisse geben wertvolle Hinweise auf das Trocknungsverhalten von Äpfeln unter verschiedensten Trocknungsbedingungen und bei unterschiedlicher Prozessführung. Sie zeigen jedoch auch, dass eine Korrelation zwischen Produktfarbe und Gehalt an wertgebenden Inhaltsstoffen nicht ohne

weiteres möglich ist, da bisher davon ausgegangen wird, dass hohe Temperaturen zu einer Erhöhung des Verlustes an wertgebenden Inhaltsstoffen führen. Die geringsten Farbveränderungen jedoch wurden bei hohen Temperaturen (75 °C) und/oder hohen Luftgeschwindigkeiten gemessen.

Die erhaltenen Ergebnisse sind nicht ohne Weiteres auf andere Produkte übertragbar, geben jedoch wertvolle Hinweise. Eigene Untersuchungen an Pilzen haben gezeigt, dass die bei Äpfeln gemachten Beobachtungen auch für diese Gültigkeit haben (Sturm, 2006). Im Rahmen von Vorversuchen an Ananas, Mangos, Papayas und Zwiebeln stellte sich heraus, dass für alle diese Früchte ebenfalls klar abgrenzbare Phasen ermittelt werden können, sie sich also zumindest was die Temperaturentwicklung betrifft ähnlich verhalten wie die untersuchten Äpfel und Pilze.

Die technische Umsetzung der vorgeschlagenen Regelstrategie ist nicht ohne Weitere Untersuchungen möglich. Im Technikumshordentrockner gestaltet sich vor allem die Positionierung des Sensors, welcher die Produkttemperatur ermittelt, schwierig. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob ein nichtinvasives oder ein invasives Gerät eingesetzt werden soll. Es bildet sich eine Trocknungsfront aus, wobei Partikel, die am Einlass der Luft liegen schneller trocknen als in anderen Zonen. Deshalb ist es nötig Korrelationen zwischen Position und Trocknungsverlauf zu ermitteln, um zu verhindern, dass die Prozessparameter zu ungeeigneten Zeitpunkten umgestellt werden. Es müssen optimierte Verfahrensparameter gefunden werden, durch welche die positionsbedingten Einflüsse auf die Messwerte möglichst minimiert werden. Erste Vorversuche im Technikumsmaßstab haben ergeben, dass dies durch entsprechende Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit in der Trocknungskammer erreicht werden kann. Die Positionierung hängt nicht nur von der Trocknungsfront ab. Die Heterogenität des Gutes und dessen Trocknungsverhalten beeinflussen die Positionierung des Sensors zusätzlich. Beispiele für sehr heterogene Produkte mit hohem Anfangsfeuchtegrad sind: Äpfel, Mangos, Papayas und Tomaten. Wird ein Produktpartikel mit verhältnismäßig niedrigem Anfangsfeuchtegrad gemessen, können die sich dadurch ergebenden Trocknungsbedingungen negative Auswirkungen auf Partikel mit hohem Anfangsfeuchtegrad haben und umgekehrt.

Eine Vielzahl von Veröffentlichungen geht auf die Abhängigkeit des Trocknungsergebnisses von Lebensmitteln, speziell auch Äpfeln, von den Trocknungsbedingungen ein. Es ist daher bekannt, dass die Lufttemperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Trocknungsdauer und die im Produkt ablaufenden Qualitätsveränderungen hat. Weiterhin wird der Luftfeuchtigkeit eine wichtige Rolle zugesprochen. Nur wenige Veröffentlichungen jedoch gehen auf den Effekt der Luftgeschwindigkeit auf das Ergebnis ein. Vor allem in Bereichen der Überströmtrocknung mit Geschwindigkeiten >2 m/s gibt es kaum Angaben. Der Verlauf der Qualitäts- und Temperaturveränderungen während

des Prozesses ist in der Regel unbekannt oder wird invasiv bestimmt, was zu Verfälschungen der Ergebnisse führt.

Die Ergebnisse der eigenen Versuche, bei denen die Lufttemperatur als Führungsgröße verwendet wurde, stimmen bezüglich der Einflüsse von Temperatur und Luftfeuchtigkeit größtenteils mit der Literatur überein. Es zeigt sich jedoch, dass keiner der genannten Faktoren unabhängig betrachtet werden darf, da ihre Effekte immer von den eingestellten Werten der anderen Faktoren abhängen. Weiterhin konnte analog zu den Ergebnissen von Velic et al. (2004) nachgewiesen werden, dass die Geschwindigkeit der Luft einen viel größeren Einfluss auf das Trocknungsergebnis hat als bisher von der Mehrheit der Autoren angenommen und dass dieser bis weit über das Ende des ersten Trocknungsabschnittes hinaus, bis zu einem Feuchtegrad von etwa $X=0,4 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$, vorhanden ist. Unter sonst konstanten Trocknungsbedingungen ($\vartheta_L=60 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_{Tp}=17,5 \text{ }^\circ\text{C}$) verringert sich die Gesamttrocknungsdauer bei einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit von 2 m/s auf 4,8 m/s um 40 % von 225 min auf 135 min.

Durch die kontinuierliche Messung der gewählten Größen konnten klare Phasen eingegrenzt werden, in denen sich die gegebenen Prozesseinstellungen unterschiedlich auf das Produkt auswirken. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Bashir (1998) überein, der nachgewiesen hat, dass sich bei der Trocknung von Zwiebeln die Veränderungen im Produkt in verschiedene Phasen unterteilen, wobei sich hohe Temperaturen und hohe Luftfeuchtigkeiten unterhalb eines bestimmten Grenzwassergehaltes negativ auf das Trocknungsergebnis auswirken. Die Temperaturverläufe stimmen mit den Ergebnissen von Velic et al. (2004) und Müller (1992) überein. Die genannten Autoren haben jedoch die Veränderungen der Qualitätskriterien nicht kontinuierlich gemessen, und deshalb waren keine Rückschlüsse aus den Temperaturveränderungen auf diese möglich.

Bei Veränderungen der Lufttemperatur entwickelt sich die Produkttemperatur entsprechend dem eingestellten Niveau. Je höher die Trocknungslufttemperatur ist, desto größer wird die Differenz, die sich zwischen Luft- und Produkttemperatur einstellt. Die Art des Verlaufs und der Beginn des Übergangs von einer Phase in die nächste werden dadurch bei sonst gleichen Bedingungen nicht beeinflusst.

Die Farbe, charakterisiert durch den TCD, durchläuft ebenfalls klar definierte Phasen, die mit den Beobachtungen bei der Entwicklung der Produkttemperatur einher gehen. Während der Aufwärmphase ist eine starke Veränderung auszumachen, danach verändert sich der TCD über einen weiten Bereich des Feuchtegrades praktisch nicht, um dann, gleichzeitig mit der Veränderung der Produkttemperatur in eine Phase des starken Anstiegs überzugehen, der bei einem Feuchtegrad von circa $X=0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ abgeschlossen ist. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die a^* - und b^* -Werte sich kontinuierlich

verändern, während der ΔL zunächst stark zunimmt, um dann wieder abzunehmen. Hierdurch entsteht ein scheinbarer Beharrungszustand der Veränderungen nach der Aufwärmphase. Die grundsätzlichen Verläufe stimmen mit der Literatur überein. Analog zu den Ergebnissen von Fernandez et al. (2005) und Krokida et al. (1998) wurde eine deutlich stärkere Veränderung des b^* -Wertes, also des Verhältnisses von Blau zu Gelb, als des a^* -Wertes ermittelt. In der Literatur finden sich ausschließlich Darstellungen der Veränderungen von L^* , a^* und b^* als Funktionen der Zeit. Hier ist es nur schwer möglich, den tatsächlichen Verlauf bezogen auf den Feuchtegrad zu ermitteln. Deshalb wurde in der vorliegenden Arbeit der TCD als Funktion des Feuchtegrades aufgetragen. Nur so ist es beispielsweise möglich, zuverlässig den Zusammenhang zwischen Produkttemperatur, deren Veränderung und Auswirkung auf die Farbveränderung zu ermitteln.

Die Flächenschrumpfung verläuft bei hohen Feuchtegraden annähernd linear mit dem abnehmenden Feuchtegrad, bei niedrigen Feuchtegraden erhöht sie sich. Bei Feuchtegraden $< 3,5 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ fällt sie umso geringer aus, je höher Luft- und Taupunkttemperaturen sowie die Luftgeschwindigkeit sind. Dies wird gegebenenfalls durch eine Verhärtung der Oberfläche verursacht. Bai et al. (2002) beobachteten bei hohen Temperaturen ($65 \text{ }^\circ\text{C}$) eine Verhärtung der Oberfläche, deren Ursache sie in der erhöhten Verdampfungsrate am Anfang des Prozesses vermuten. Diese Beobachtung kann nicht bestätigt, jedoch auch nicht widerlegt werden, da die Untersuchung der Verhärtung des Produktes nicht Gegenstand dieser Arbeit war. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei hohen Temperaturen eine Erhöhung der Taupunkttemperatur die Schrumpfung weiterhin minimiert. Dies jedoch spricht deutlich gegen die Annahme, dass lediglich die Oberflächenverhärtung für eine verringerte Schrumpfung verantwortlich sei, denn sonst müsste diese bei niedrigen Luftfeuchtigkeiten deutlich geringer ausfallen. Lewicki & Jakubczyk (2004) untersuchten das Schrumpfungsverhalten von Äpfeln in einem Temperaturbereich zwischen $50 \text{ }^\circ\text{C}$ und $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Sie stellten fest, dass die Volumenschrumpfung bis zur Temperaturgrenze von $70 \text{ }^\circ\text{C}$ linear und danach progressiv abnimmt. Diese Beobachtung konnte durch die durchgeführten Versuche bestätigt werden. Die Autoren ermittelten eine nichtisometrische Schrumpfung, die sie unter anderem auf die sehr heterogene Struktur der Äpfel zurückführten. Bei der Trocknung von Apfelscheiben handelt es sich eindeutig um eine anisotrope Schrumpfung. Während die Fläche lediglich um 12 % bis 29 % schrumpft, beträgt die Verringerung vertikal zur Schnittfläche 65 % bis 73 %. Lewicki & Jakubczyk (2004) gehen davon aus, dass eine langsame Trocknung die inneren Spannungen vermindert, die Schrumpfung deshalb jedoch sehr stark ausfällt, während bei hohen Temperaturen große Spannungen entstehen. Gleichzeitig sorgt die schnelle Trocknung zu einer mechanischen Festigung der Oberfläche. In der Literatur gibt es jedoch widersprüchliche Angaben zu den Trocknungsbedingungen, bei denen diese einsetzt und zum Schrumpfungsverhalten allgemein.

Die eingestellte Luftgeschwindigkeit hat einen wesentlichen Einfluss sowohl auf die Trocknungsdauer als auch auf die untersuchten Parameter. Entgegen den Beobachtungen Bashirs (1998) und anderer Autoren, dass eine weitere Erhöhung der Luftgeschwindigkeit über 1 m/s hinaus keine Auswirkung auf die Trocknungsgeschwindigkeit mehr hat, konnte für die Überströmtrocknung von Apfelscheiben gezeigt werden, dass auch bei deutlich höheren Geschwindigkeiten die Trocknungsdauer stark beeinflusst wird. Es konnten Einflüsse der Luftgeschwindigkeit bis zum maximalen eingestellten Wert (5,3 m/s) ermittelt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Geschwindigkeit auch darüber hinaus einen Einfluss auf das Trocknungsverhalten hat. Dies kann durch den erhöhten Wärmeübergang bei höheren Geschwindigkeiten erklärt werden. Bei der Überströmung ist generell eine höhere Luftgeschwindigkeit zur Erreichung eines guten Trocknungsergebnisses nötig als bei der Durchströmung was die Untersuchungen von Bashir (1998) bestätigen. Die erhaltenen Ergebnisse stimmen mit den Erkenntnissen von Velic et al. (2004) für Äpfel überein. Auch bezüglich Temperaturentwicklung und Lage der Knickpunkte der Temperaturentwicklung kann eine Übereinstimmung festgestellt werden. Während Velic et al. (2004) jedoch keine klare Abhängigkeit des Wiederbefeuchtungsverhaltens von der Luftgeschwindigkeit ermitteln konnten, war es möglich, diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit nachzuweisen (Bild 76, Anlage 8). Ebenso konnte der Einfluss auf Farbveränderungen und Schrumpfungsverhalten ermittelt und quantifiziert werden. Eine hohe Luftgeschwindigkeit ist einer niedrigen vorzuziehen. Während die Geschwindigkeit nur einen untergeordneten Einfluss auf die Lage der Phasen hat, unterscheiden sich das erreichte Temperaturniveau und die Trocknungsdauer deutlich. In allen Abschnitten des Prozesses hat die Geschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Farbentwicklung. Während der TCD bei hohen Luftgeschwindigkeiten in allen Phasen sehr gering ausfällt, liegt er für den unteren untersuchten Bereich im ersten Abschnitt bei Werten, die mehr als doppelt so hoch sind als die der Vergleichsproben. Auch die Schrumpfung wird wesentlich durch hohe Geschwindigkeiten positiv beeinflusst (Bild 52). Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass eine hohe Verdampfungsrate zu Beginn des Trocknungsprozesses (Bild 48) einen positiven Einfluss auf die Entwicklung der Produkteigenschaften hat und es von entscheidender Bedeutung ist, dass das an die Oberfläche transportierte Wasser schnell entfernt wird.

Die eingestellte Taupunkttemperatur spielt im untersuchten Bereich (bis 30 °C) eine untergeordnete Rolle bezüglich der Trocknungsdauer und auch dem Verlauf der Temperaturentwicklung. Die Produktfarbe jedoch hängt stark von der eingestellten Taupunkttemperatur und der daraus resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit ab und reagiert auch schon auf geringe Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit empfindlich (30 °C Taupunkttemperatur entsprach einer relativen Luftfeuchtigkeit von 21 % bei 60 °C Lufttemperatur). Dieser Einfluss ist sowohl in der ersten als auch der zweiten Phase der Trocknung deutlich erkennbar. Bashir (1998) fand einen ähnlichen Einfluss und konnte für die

Trocknung von Zwiebeln eine Grenzfeuchtigkeit von 20 % ermitteln, unterhalb derer die Luftfeuchtigkeit praktisch keinen Einfluss auf den TCD hat, während er ab diesem Punkt mit zunehmender Luftfeuchtigkeit steigt. Krokida et al. (1998) ermittelten für die Trocknung von Äpfeln mit steigender Luftfeuchtigkeit eine Abnahme der Veränderung des a-Wertes und eine Zunahme des b-Wertes. Ihre Ergebnisse in Bezug auf eine Zunahme beider Werte bei Erhöhung der Lufttemperatur konnten jedoch nicht bestätigt werden.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Kenntnis der Verläufe von Temperaturen und der gewählten Produktmerkmale während des einstufigen konvektiven Trocknungsprozesses von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der ablaufenden Vorgänge ist. Durch die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse konnte verdeutlicht werden, dass die Prozessparameter Trocknungs-, Taupunkttemperatur und Luftgeschwindigkeit nicht unabhängig voneinander zu betrachten sind, da ihr Einfluss auf die Zielgrößen des Prozesses wesentlich vom jeweiligen Niveau der anderen Parameter abhängen kann.

Bei der Nutzung der Produkttemperatur als Führungsgröße des Prozesses hat das Temperaturniveau vor allem im unteren betrachteten Bereich einen starken Einfluss auf das Trocknungsergebnis. Im oberen Bereich nähern sich die Ergebnisse aufgrund der Begrenzung der Lufttemperatur (100 °C) aneinander an. Die Luftgeschwindigkeit hat lediglich einen untergeordneten Einfluss auf die Trocknungsdauer. Eine mögliche Erklärung hierfür sind die sehr unterschiedlichen Temperaturverläufe (Bild 88). Je höher die Strömungsgeschwindigkeit und somit der Luftmassenstrom mit dem das Produkt in Berührung kommt, desto schneller sinkt die Temperatur. Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten hingegen bleibt das Temperaturniveau sehr lange hoch, wodurch ein ähnlich großer Wärmeübergang entsteht wie bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und niedrigen Temperaturen. Der Einfluss der Taupunkttemperatur auf das Trocknungsergebnis ist stark abhängig von der eingestellten Produkttemperatur und dem Niveau der Taupunkttemperatur selbst und der daraus resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit. Bei niedrigen Prozesstemperaturen hat die eingestellte Taupunkttemperatur praktisch keine Auswirkung auf das Ergebnis. Bei hohen Prozesstemperaturen hingegen ist ihr Einfluss sehr gut erkennbar.

Hohe Produkttemperaturen führen in der ersten Phase zu keiner verstärkten Veränderung der Farbe als niedrige, teilweise wird diese sogar durch die höhere Temperatur verringert. In der zweiten Phase jedoch steigt der sich aus der Farbveränderung ergebende TCD schneller an. Es kann davon ausgegangen werden, dass höhere Verdampfungsraten in der ersten Phase des Trocknungsprozesses keinen negativen Einfluss auf die stattfindenden Veränderungen im Produkt haben. Taupunkttemperatur und Luftgeschwindigkeit haben

keinen eindeutigen Einfluss auf die resultierenden Farbveränderungen während der Trocknung.

Die Flächenschrumpfung wird deutlich vom eingestellten Temperaturniveau beeinflusst. Zunächst findet eine lineare Schrumpfung statt, die in einer späteren Phase zunimmt. Je höher die eingestellte Produkttemperatur ist, desto geringer fällt die resultierende Schrumpfung aus. Neben den Trocknungsbedingungen spielt der Anfangsfeuchtegrad eine wesentliche Rolle bei der absoluten Schrumpfung und der Lage des Knickes in der Schrumpfungskurve. Hohe Luftgeschwindigkeiten führen tendenziell zu einer Verringerung der beobachteten Schrumpfung. Der Einfluss der Taupunkttemperatur auf die Schrumpfung ist vernachlässigbar klein.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Führung des Prozesses durch Regelung der Produkttemperatur wesentlich von der traditionellen einstufigen Regelung der Lufttemperatur unterscheidet. Die erhaltenen Trocknungsverläufe stimmen im Wesentlichen mit den Ergebnissen von Srikiatden & Roberts (2005) für die isotherme Trocknung von Äpfeln überein. Während sich die Trocknungsverläufe bei der lufttemperaturgesteuerten Trocknung mit dem Fick'schen Diffusionsmodell beschreiben lassen, ist dies bei der produkttemperaturgesteuerten Trocknung nicht möglich. Bei der Regelung der Produkttemperatur werden zunächst sehr hohe Trocknungsgeschwindigkeiten erreicht, was auf die damit einhergehenden hohen Lufttemperaturen zurückzuführen ist. Nach Erreichen der Produktsolltemperatur nehmen sie mit abnehmender Lufttemperatur stark ab. Vor allem nach dem Übergang in die zweite Phase (3. Trocknungsabschnitt) liegt die Lufttemperatur nur noch knapp über der Produkttemperatur, was bei zu niedrigen eingestellten Temperaturen zu einer unnötigen Verlängerung des Prozesses führt.

Während bei der lufttemperaturgesteuerten Trocknung Taupunkttemperatur und Luftgeschwindigkeit teilweise wesentlichen Einfluss auf Verlauf und Ergebnis des Trocknungsvorganges haben, kann dies bei der produkttemperaturgesteuerten Trocknung nur in deutlich geringerem Maß beobachtet werden. Analog zur beobachteten Beschleunigung des Anstieges der Produkttemperatur bei der Steuerung des Prozesses über die Lufttemperatur ist ein beschleunigter Abfall der Lufttemperatur zu beobachten. Auch hier hängen die Farbveränderungen direkt mit dieser Entwicklung zusammen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Kenntnis der Produkttemperatur und deren Entwicklung maßgeblich für eine Optimierung von Trocknungsprozessen ist. In der Regel werden Qualitätsveränderungen durch Vergleich der Werte vor und nach der Trocknung beurteilt. Die zeitlichen Verläufe bzw. die Entwicklung über den abnehmenden Feuchtegrad der Veränderungen während der unterschiedlichen Phasen des Prozesses können dabei nicht berücksichtigt werden, da diese nicht bekannt sind. Durch kontinuierliche Messung der Farb- und Formveränderungen einerseits und der Entwicklung der Luft- bzw. Pro-

dukttemperatur andererseits können mit geringem messtechnischem Aufwand Zusammenhänge ermittelt und zur Optimierung des Prozesses genutzt werden.

Die Veränderungen des TCD werden bei der produkttemperaturgesteuerten Trocknung in einem geringeren Maß von den eingestellten Prozessparametern beeinflusst als bei der verglichenen Strategie. Sie liegen dabei zumeist deutlich niedriger. Auch die Flächenschrumpfung wird weniger von den Einstellungen beeinflusst und ist deutlich geringer. Beim Wiederbefeuchtungsverhalten sind ähnliche Tendenzen erkennbar.

Eine Führung des Prozesses durch Konstanthalten der Produkttemperatur bis zum Übergang in die zweite Phase zeichnet sich durch geringe Farbveränderungen bei sehr hohen Trocknungsraten aus. Das Einstellen einer konstanten Luftgeschwindigkeit ist in diesem Fall nicht nötig, da es sich erwiesen hat, dass sich bei dieser Art der Prozessführung die Luftgeschwindigkeit kaum auf das Trocknungsergebnis auswirkt, gleichzeitig erzielten hohe Luftgeschwindigkeiten bei der lufttemperaturgesteuerten Trocknung eine Verbesserung der optischen Qualität.

Die Trocknung unter konstant gehaltenen Bedingungen (Luft- bzw. Produkttemperatur) über den gesamten Prozess ergab in beiden betrachteten Fällen einen negativen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Zur wirkungsvollen Optimierung eines Trocknungsprozesses muss dieser stufenweise verändert werden. Grundsätzlich kann hierfür entweder die Produkttemperatur oder die Lufttemperatur vorgegeben werden. Sogar eine Kombination beider Verfahrensführungen ist denkbar. Wichtig ist jedoch in allen Fällen die Kenntnis der signifikanten Übergänge, die sich sehr einfach und effektiv aus den Temperaturveränderungen bestimmen lassen.

In der ersten Phase der Trocknung können hohe Lufttemperaturen angesetzt werden. Sie sind sogar wünschenswert, da die Schrumpfung des Produktes in diesem Fall reduziert wird. Diese Reduktion ist gegebenenfalls auf die hohen Verdampfungsraten zu Beginn des Trocknungsprozesses zurückzuführen. Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der Untersuchungen von Bai et al. (2002) für Äpfel gestützt. Ist der Verlauf der Produkttemperatur bekannt, kann der Übergang in die zweite Phase entweder anhand eines Zeitfensters, eines Produkttemperaturfensters oder vorzugsweise an der Beschleunigung der Temperaturveränderung erkannt und zur Änderung der Prozessbedingungen verwendet werden. Im Labortrockner kann letztgenannte Art der Prozessführung mit geringem Aufwand durch Einsatz einer SPS realisiert werden. Die SPS vergleicht kontinuierlich die momentane Temperatur mit der Temperatur des letzten Zeitinkrements. Sobald die Temperaturveränderung eine vorher festgelegte Schwelle überschreitet, wird in die folgende Prozessphase umgeschaltet.

Die Farbveränderungen während der zweiten Phase sind für die Mehrzahl der gewählten Einstellungen nahezu identisch. Die besten Farbergebnisse wurden für hohe Temperaturen und hohe Luftgeschwindigkeiten erreicht. Vorversuche im Labor- und auch Technikumsmaßstab haben ergeben, dass sich beide beschriebenen Vorgehensweisen grundsätzlich zur Prozessoptimierung eignen. Ist die Farbe das alleinentscheidende Qualitätsmerkmal, kann am Ende der Trocknung in einer dritten Phase die Temperatur wieder erhöht werden, da ab dem Ende des Übergangs vom zweiten in den dritten Trocknungsabschnitt praktisch keine Farbveränderungen mehr auftreten bzw. für alle Einstellungen näherungsweise identisch sind. Erste Vorversuche für die Farbveränderungen von Äpfeln haben gezeigt, dass es möglich ist, am Ende des Prozesses die Temperatur wieder zu erhöhen, ohne wesentliche Farbveränderungen zu riskieren. Eine erneute Erhöhung der Lufttemperatur bei $X=0,5 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ führte zu einem ausgezeichneten Farbergebnis und einer Verkürzung des Prozesses.

Die statistische Optimierung des Trocknungsprozesses auf Grundlage der in der vorliegenden Arbeit angesetzten Prozessbedingungen ist aus o. g. Gründen nur bedingt sinnvoll. Die Auswertung der Temperatur- und Qualitätsveränderungen hat gezeigt, dass zwischen den zwei Hauptphasen eine Parameteränderung stattfinden muss, um optimale Bedingungen zu erhalten. Trotzdem liegt auch ein gewisses Potential in der Optimierung der einstufigen Führung des klassischen konvektiven Trocknungsprozesses durch Anpassung der Temperaturen und vor allem der Luftgeschwindigkeit für bereits bestehende Anlagen, bei denen eine Änderung der Prozesstechnik nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand umsetzbar wäre.

Die Vorbereitung der Rohware für die Weiterverarbeitung, in diesem Fall das Schneiden, hat einen wesentlichen Einfluss auf die optische Qualität und die Textur der Oberfläche. Durch richtige Auswahl des Vorbereitungsverfahrens und gutem Zustand der Schneide kann das Gesamtergebnis der Konservierung ohne großen Aufwand deutlich verbessert werden.

Durch geeignete Wahl des Vorbereitungsverfahrens und eine optimierte Trocknung kann teilweise oder ganz auf die chemische oder thermische Vorbehandlung des Produktes bei gleicher oder besserer optischer Qualität, die durch eine Verringerung der Bräunungsreaktionen erzielt wird, verzichtet werden.

Die Steuerung des Trocknungsprozesses anhand der Verfolgung und/oder Regelung der Produkttemperatur erlaubt es, auf technisch einfach umsetzbare Weise Trocknungsprozesse bezüglich der Trocknungszeit und der Qualitätsveränderungen zu optimieren. Die berührungslose Temperaturmessung kann mit vergleichsweise geringem Aufwand auch in schon bestehende Trockner integriert und die erhaltenen Daten direkt zur Verbesserung der Prozessführung herangezogen werden. Auch eine Integration in die bestehende Regelung ist denkbar und mit geringem Aufwand umsetzbar.

Eine Verkürzung der Trocknungszeit lässt auf eine Reduktion der benötigten thermischen Energie schließen. Nicht zuletzt kann durch die kleineren Dimensionen industrieller Trockner sowohl die Verlustenergie als auch die benötigte Energie zum Bau der eigentlichen Anlage reduziert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Trocknung ist ein weit verbreitetes Verfahren der Konservierung von Lebensmitteln. Vor allem im Bereich der landwirtschaftlichen Güter, die in großen Mengen anfallen und deren Verarbeitung mit einer geringen spezifischen Wertschöpfung einhergeht, ist die Konvektionstrocknung von großer Bedeutung.

Landwirtschaftliche Güter sind temperaturempfindlich. Weiterhin wird ihre Qualität durch lange Trocknungszeiten zusätzlich vermindert. Gleichzeitig hängt die Trocknungsdauer wesentlich von der angesetzten Temperatur ab. Mittlerweile ist bekannt, dass auch empfindliche Güter zu Beginn des Trocknungsprozesses hohen Lufttemperaturen ausgesetzt werden können, ohne geschädigt zu werden. Die funktionalen Zusammenhänge zwischen Dauer der Beaufschlagung mit bestimmten Eigenschaften des Trocknungsmediums (Temperatur, Feuchte, Geschwindigkeit), der Entwicklung der Produkttemperatur und der Qualitätsveränderungen während des Prozesses hingegen sind kaum erforscht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zwei unterschiedliche Arten der Prozessführung bei der Konvektionstrocknung empfindlicher biologischer Güter untersucht und die erhaltenen Ergebnisse miteinander verglichen. Bei den betrachteten Strategien handelt es sich zum einen um die einstufige Trocknung mit konstanter Lufttemperatur während der gesamten Prozessdauer und zum anderen um die Nutzung der Produkttemperatur als Regelgröße, die dann nach einer kurzen Anlaufphase während des gesamten Prozesses konstant gehalten wird.

Ziel war es einerseits, durch kontinuierliche Messung vorher festgelegter Größen die funktionalen Zusammenhänge zwischen Art und Dauer bestimmter Prozesseinstellungen und den sich daraus ergebenden Veränderungen der gewählten Produktmerkmale zu untersuchen und auf dieser Grundlage die Prozessbedingungen zu optimieren. Andererseits sollten in einem zweiten Schritt die Ergebnisse für beide untersuchten Regelungsstrategien miteinander verglichen und deren Einfluss auf die untersuchten Faktoren bestimmt werden.

Um für beide Strategien einen großen Parameterraum der ausgewählten Faktoren Temperatur, Geschwindigkeit und Taupunkttemperatur untersuchen und gleichzeitig statistisch absichern zu können, wurden Versuchsplanung, Modellierung, Auswertung und Optimierung mit Methoden der statistischen Versuchsplanung unter Verwendung eines kommerziellen Programmes durchgeführt. Dadurch war es auch möglich Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren zu ermitteln und eine Optimierung mit variabler Zielwertvorgabe für die ausgewählten Zielgrößen durchzuführen.

Die für dieses Projekt entwickelte Prozessanlage erlaubt die simultane nichtinvasive Untersuchung sämtlicher wesentlicher Temperaturen, der Gewichtsveränderung und der optischen Qualitätskriterien, diese anhand regelmäßig aufgenommener Digitalbilder. Gleichzeitig ist es möglich, entweder die Lufttemperatur oder die Temperatur des Produktes zu regeln, während die jeweils andere Größe als Messwert erfasst wird. Es kann zwischen Durch- und Überströmung gewählt werden. Bei Regelung der Produkttemperatur wird die Leerrohrgeschwindigkeit der Trocknungsluft im Trockner konstant gehalten. Dazu wird abhängig von der Differenz zwischen Trocknungsluft- und Umgebungstemperatur die Ventilatorleistung nachgeregelt und somit der Wärmeausdehnung der Luft Rechnung getragen.

Die Messgrößen wurden danach ausgewählt, ob sie kontinuierlich erfasst werden können und ob sie für die Probe repräsentativ sind. Da optische Qualitätskriterien einen wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanz der Verbraucher haben, in direktem Zusammenhang mit anderen Faktoren stehen und mit der verfügbaren Technik leicht messbar sind, wurden Farbveränderung und Schrumpungsverhalten für die durchgeführten Versuche als Indikatoren für die Güte des Prozesses eingeführt. Die untersuchten Regelungsstrategien wirken sich grundsätzlich unterschiedlich auf den Trocknungsverlauf und die Veränderung der gewählten Qualitätsmerkmale aus. Es konnte gezeigt werden, dass sich hohe Lufttemperaturen zu Beginn des Prozesses nicht zwingend negativ auf die optische Qualität des Produktes auswirken. Durch die anfänglich hohen Temperaturen wird die Schrumpfung verringert, was zu einem gleichmäßigeren Trocknungsergebnis im betrachteten Bereich führt als bei konstanter Lufttemperatur. Weiterhin stellte sich heraus, dass bei konstanter Lufttemperatur die Luftgeschwindigkeit im gesamten untersuchten Parameterraum einen wesentlichen Einfluss nicht nur auf die Trocknungsdauer, sondern auch und vor allem auf die Qualität des Produktes hat. Während sich bei 2 m/s Luftgeschwindigkeit ein TCD von 6,5 einstellte lag dieser bei 5,3 m/s bei lediglich 3,8. Es zeigte sich zudem, dass mit konstant hohen Temperaturen und gleichzeitig hohen Luftgeschwindigkeiten ein ausgezeichnetes Farbergebnis bei sehr geringer Trocknungsdauer erzielbar ist.

Es sind jedoch bei beiden gewählten Strategien deutlich zwei unterschiedliche Phasen im Trocknungsverlauf und in der Veränderung der ausgewählten Qualitätskriterien auszumachen. Der Übergang ist, abhängig von der Strategie, durch eine starke Veränderung der Produkt- respektive der Lufttemperatur gekennzeichnet. Analog zu diesen Veränderungen, unterteilen sich die Qualitätsveränderungen in klar abgrenzbare Phasen. Bei Kenntnis dieser Übergänge kann auf technisch einfache Art die Prozesssteuerung entsprechend den erwünschten Eigenschaften angepasst werden.

Voruntersuchungen an Ananas, Mangos, Papayas und Zwiebeln haben gezeigt, dass für alle diese Früchte ebenfalls klar abgrenzbare Phasen in der Temperaturentwicklung ermittelt werden können.

Weitere Arbeiten in diesem Bereich sollten sich aufbauend auf die erhaltenen Erkenntnisse mit der Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Farbveränderung und somit der enzymatischen und nichtenzymatischen Bräunung einerseits und Veränderung an wertgebenden Inhaltstoffen sowie der mechanischen Eigenschaften andererseits beschäftigen. Weiterhin ist es nötig die vorgeschlagenen Prozessoptimierungsansätze tiefergehend auf ihre tatsächliche Auswirkung auf die Trocknung und die Produktmerkmale zu untersuchen.

Die vorliegenden Ergebnisse erlauben es optimierte Prozessbedingungen abzuleiten. Dabei ist die Aufteilung des Trocknungsprozesses in aufeinanderfolgende, in den Trocknungsbedingungen und in Regelstrategie unterschiedliche Abschnitte sehr erfolgversprechend. Auch eine aktive Einbeziehung der Bild- und Daten in den Regelkreis sollte in Betracht gezogen werden.

Da die erhaltenen Ergebnisse voraussichtlich nicht ohne Weiteres verallgemeinerbar auf andere Produkte sind, ist es nötig weitere Produkte zu untersuchen.

Der Energiebedarf nimmt aus wirtschaftlichen und Umweltgründen eine immer wesentlichere Rolle in der industriellen Prozesstechnik ein. Deshalb ist es essentiell, den Energiebedarf und ggf. das Potential an Energieeinsparungen durch die Regelung der Produkttemperatur bzw. der stufenweisen Änderung der Trocknungsbedingungen auf Grundlage der Einbeziehung der Produkttemperatur in die Regelung des Prozesses zu ermitteln.

In der industriellen Praxis werden vielfach kontinuierliche Trocknungsanlagen eingesetzt. Aus diesem Grund muss das Potential der Integration der Produkttemperatur, z. B. durch Regelung des Gutdurchsatzes entsprechend der Oberflächentemperatur (Verweilzeitregelung) für diese Art der Prozessführung untersucht und angepasst werden [Hofacker & Sturm, 2007]. Für die diskontinuierliche Trocknung in Hordentrocknern ist auch denkbar, statt der nichtinvasiven Messung der Oberflächentemperatur eines Produktpartikels mit einem Kontaktthermometer direkt unter dessen Oberfläche zu messen. In diesem Anwendungsfall sind weitere Untersuchungen bezüglich der Positionierung des Messgerätes erforderlich.

9 Summary

Drying is one of the oldest and most important means of preserving food. Particularly in the field of agricultural products, which are produced in large quantities and of which processing adds a low net value, convective drying is of great importance.

Most biological products are heat sensitive and are additionally damaged by extended drying time. Concurrently, duration of drying depends strongly on the temperature level used. Therefore it is necessary to make sure that the product does not exceed critical temperatures during the drying process. Meanwhile it is well known that sensitive products may be exposed to high air temperatures during the first stage of drying without risking any damage. The functional relation between duration of impinging with certain conditions of the drying medium (temperature, humidity, and velocity), development of product temperature and changes the product undergoes during the process are scarcely researched.

Two different kinds of process control for convection drying of sensitive biological products were investigated and the results compared. The first strategy was a one-step drying process with constant air temperature throughout, whereas the second strategy used the product temperature to control the process. After a short warm up phase product temperature was kept constant during the rest of the process.

The aim of the work presented was the continuous measurement of previously chosen physical values and to predict interactions between type and duration of certain process settings and the changes that chosen quality aspects underwent. Based on those results, the optimisation of drying conditions has to be performed. Secondly results for both strategies should be compared and their influences on the quality aspects should be analysed.

To cover a large parameter space of the chosen factors (temperature, air velocity and dew point temperature) and to secure the results statistically planning, modelling and optimisation were utilised using a commercial programme (design of experiments). Additionally, interactions between factors could be analysed and optimisation with variable target values is possible.

The laboratory drier developed for this project allows the simultaneous non invasive measurement of all essential temperatures, change of weight and optical quality criteria based on digital images. At the same time air or product temperature can be controlled while the other value is measured. It is possible to select between through flow and over flow. When controlling product temperature, air velocity in the drier is kept constant. Ventilation performance is readjusted depending on the difference between drying air and ambient temperature. Hence, the thermal expansion of the air is compensated.

Measured variables were selected according to whether continuous measurement is feasible and by their representative character for the product. Optical quality attributes contribute strongly to consumers' acceptance of the product and are directly related to other factors. Therefore colour and shrinkage were chosen as indicators for process performance, which proved to be a simple measurement as well. Control strategies investigated, affected drying characteristics and changes of quality factors in fundamentally different ways. Initial application of high air temperatures minimised shrinkage, which also lead to a decreased variation compared to constant air temperatures within the area investigated. Furthermore, high air velocities, when drying with constant air temperature, unambiguously had an essential influence on the duration of drying and, in particular on quality changes. While 2 m/s air velocity lead to a Total Colour Difference (TCD) of 6,5 air velocity at 5,3 m/s resulted in a TCD as low as 3,8. Additionally constantly high temperatures (75 °C) and high air velocity resulted in a very low TCD and a short drying time.

At the same time there were two clearly visible phases characterised, separated by sizable changes of product, respectively air temperature. Analogously quality changes divide in clearly delimitable phases. If this transition recognised process control could be adjusted according to the product attributes desired.

Preliminary tests showed that pineapples, mangoes, papayas and onions also do have two clearly visible phases in temperature development.

Based on these findings, a logical next step would be to determine the functional context between colour changes and hence enzymatic and non enzymatic browning on the one hand, changes of valuable contents as well as mechanical properties on the other have to be determined. The basic approaches proposed for process optimisation have to be further investigated in regards of their actual effect on drying and product characteristics.

Results presented allow deduction for optimised process conditions. Segmentation of the drying process into phases with different drying conditions and control strategies is promising. Additionally, an active integration of picture data into the control system is conceivable.

The results presented are not applicable to other products without further investigation but they give valuable evidence.

Due to economic and environmental reasons the question of energy demand has been gaining importance in industrial process technologies. Therefore it is important to investigate the energy demand and potential energy savings opportunities by modifying product temperature as an essential process control.

In industrial applications belt dryers are often used. Therefore, the potential of integration of product temperature has to be investigated, e. g. by controlling

the throughput according to product temperature. For discontinuous drying in chamber driers, application of invasive instead of non invasive measurement would be possible. In the latter case further investigation in regards of position of the measurement device are necessary.

10 Literaturverzeichnis

- Abers, J. E. & R. E. Wrolstad. 1979. Causative factors of color deterioration in strawberry preserves during processing and storage. *Journal of Food Science* 44 (1): 75-78.
- Abbot, J. A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology* 15 (3): 207-225.
- Ackermann, J.; M. Fischer & R. Amado. 1992. Changes in sugars, acids, and amino acids during ripening and storage of apples (Cv Glockenapfel). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40 (7): 1131-1134.
- Aktan, B. 1990. The effects of high and very high temperature drying of pasta on quality and biochemical constituents. PhD. Thesis, North Dakota State University, Fargo, ND (USA).
- AOAC. 1980. Official Methods of Analysis, 13th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington D.C.
- Awuah, G. B.; H. S. Ramaswamy & A. Economides. 2007. Thermal processing and quality: Principles and overview. *Chemical Engineering and Processing* 46 (6): 584-602.
- Bai, Y.; M. S. Rahman; C. O. Perera; B. Smith & L. D. Melton. 2002. Structural Changes in Apple Rings during Convection Air-Drying with Controlled Temperature and Humidity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50 (11): 3179-3185.
- Bain, J. M. & R. N. Robertson. 1951. The physiology of growth in apple fruits. I. Cell size, cell number and fruit development. *Australian Journal of Biological Sciences* 4: 75-91.
- Balaban, M. & G. M. Pigott. 1986. A research note: Shrinkage in fish muscle during drying. *Journal of Food Science* 51 (2): 259-275
- Balaban, M. 1989. Effect of volume change in foods on the temperature and moisture content predictions of simultaneous heat and mass transfer models. *Journal of Food Process Engineering* 12: 67-88.
- Baltes, W. 2007. *Lebensmittelchemie*. 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Bashir, E. F. A. A. 1998. Solar Drying of Sliced Onion and Quality Attributes as Affected by the Drying Process and Storage Conditions, VDI-MEG 328. Dissertation, Universität Hohenheim.

- Beke, J. & A. Vas. 1994. Testing the drying process of shelled corn on aspects of nutritional quality and thermal efficiency. *Drying Technology* 5 (Special Issue):1007-1027.
- Beke, J. & A. S. Mujumdar. 1995. Drying of fresh and rewetted shelled corn in microwave fields. *Drying Technology* 13 (1-2): 463-475.
- Bennion, M. 1980. *The Science of Food*. John Wiley and Sons, New York (USA).
- Boudhrioua, N.; P. Giampaoli & C. Bonazzi. 2003. Changes in aromatic components of banana during ripening and air-drying. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 36 (6): 633-642.
- Brennan, J. G.; R. Jowitt & A. M. A. Mohamed. 1977. Instrumental measurement of fruit texture: a study
- Brennan, J. G. (Hg.) 2006. *Food Processing Handbook*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- Brosnan, T. & D.-W. Sun. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision – a review. *Journal of Food Engineering* 61 (1): 3-16.
- Chong, C. H.; C. L. Law; M. Cloke; C. L. Hii; L. C. Abdullah & W.R.W. Daud. 2008. Drying kinetics and product quality of dried Chempedak. *Journal of Food Engineering*. 88 (4): 522-527.
- Chou, S. K. & K. J. Chua. 2003. On the Study of the Drying Behavior of a Heat-Sensitive Biomaterial Undergoing Stepwise-Varying Temperature Schemes. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 42 (20): 4939-4952.
- Christen, D. S. 2005. *Praxiswissen der chemische Verfahrenstechnik*. Springer Verlag, Berlin.
- Chua, K. J.; S. K. Chou; J. C. Ho; A. S. Mujumdar & M. N. Hawlad. 2000a. Cyclic Air Temperature during drying of guave pieces: Effects on moisture and ascorbic acid contents. *Food and Bioproducts Processing* 78 (2): 28-72.
- Chua, K. J.; A. S. Mujumdar; S. K. Chou; M. N. Hawlad & J. C. Ho. 2000b. Heat pump drying systems: Principles, applications and potential. In: *Developments in Drying, Vol. 2*. Mujumdar, A. S. & S. Suvachittanont (Hgg.). Kasetsart University Press, Bangkok (Thailand), pp. 95-134.
- Chua, K. J.; A. S. Mujumdar; S. K. Chou; J. C. Ho & M. N. Hawlader. 2000c. Convective drying of banana, guave and potato pieces: Effect of cyclic variations of air temperature on convective food drying. *Drying Technology* 18 (4-5): 907-936.

- Chutintrasri, B. & A. Noomhorm. 2007. Color degradation kinetics of pineapple puree during thermal processing. *LWT - Food Science and Technology* 40 (2): 300-306.
- Cornwell, C. J. & R. E. Wrolstad. 1981. Causes of browning in pear juice concentrate during storage. *Journal of Food Science* 46 (2): 515-518.
- Crapiste G. H. 2000. Simulation of drying rates and quality changes during the dehydration of foodstuffs. In: *Trends in Food Engineering*. Lozano J.E.; C. Anon; E. Parada-Arias & G.V. Barbosa-Canovas (Hgg.). Technomic Publishing Co., INC Pennsylvania (USA).
- Cunningham, S. E.; W. A. M. McMinn; T. R. A. Magee & P. S. Richardson. 2008. Experimental study of rehydration kinetics of potato cylinders. *Food and Bioproducts Processing* 86 (1): 15-24.
- Dietl, C. 1994. Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Trocknungsverhalten kapillarporöser, hygroskopischer Stoffe. *VDI Forschungsberichte, Reihe 3: Verfahrenstechnik*, Nr. 393.
- Dissa, A. O.; H. Desmorieux; J. Bathiebo & J. Koulidiati. 2008. Convective drying characteristics of Amelia mango (*Mangifera Indica* L. cv. "Amelie") with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering* 88 (4): 429-437.
- Dufour, P. 2006. Control Engineering in Drying Technology: Review and Trends. *Drying Technology* 24 (7): 889-904.
- Fennema, O. R. (Hg.). 1985. *Food Chemistry*. 2. Auflage, Marcel Dekker, New York (USA).
- Fernandez, L.; C. Castellero & J. M. Aquilera. 2005. An application of image analysis to dehydration of apple discs. *Journal of Food Engineering* 67 (1-2): 185-193.
- Fernando, W. J. N.; A. L. Ahmad; S. R. Abd. Shukor & Y. H. Lok. 2008. A model for constant temperature drying rates of case hardened slices of papaya and garlic. *Journal of Food Engineering* 88 (2): 229-238.
- Figura, L. O. 2004. *Lebensmittelphysik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Gehrmann, D.; G. Esper & H. Schuchmann. 2009. *Trocknungstechnik in der Lebensmittelindustrie*. Behr's Verlag, Hamburg.
- Gerhards, C. 2002. Mikrowellentrocknung in der Lebensmittelindustrie. *Lebensmittel-Technologie* 35 (10): 364-366.
- Giowacka, M. & J. Malczewski. 1986. Oscillating temperature drying. In: *Drying of Solids: Recent International Developments*, Mujumdar, A. S. (Hg.). Wiley & Sons, New York (USA), pp. 77-83.

- Grassmann, P.; F. Widmer & H. Sinn. 1997. Einführung in die thermische Verfahrenstechnik. Gruyter Verlag, Berlin.
- Hawlander, M. D. A.; C. Perera; M. Tian & K. L. Yeo. 2006. Drying of guava and papaya: Impact of different drying methods. *Drying Technology* 24 (1): 77-87.
- Ho, J. C.; S. K. Chou; K. J. Chua; A. S. Mujumdar & M. N. A. Hawlader. 2002. Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. *Journal of Food Engineering* 51 (1): 65-75.
- Hofacker, W. 1986. Trocknungsverhalten und Qualitätsveränderungen von Weizen. Dissertation Universität Hohenheim.
- Hofacker, W. & B. Sturm. 2007. Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2007 020 837.7 „Verfahren und Vorrichtung zur Trocknung von Gut“. Hochschule Konstanz
- Hund, U. & R. Stösser. 1984. Einfluss der Blütenstellung innerhalb der Infloreszenz auf das Pollenschlauchwachstum und die Fruchtentwicklung beim Apfel. *Mitteilungen Klosterneuburg* 34: 261-268.
- Karabulut, I.; A. Topcu; A. Duran; S. Turan & B. Ozturk. 2007. Effect of hot air drying and sun drying on color values and β -carotene content of apricot (*Prunus armenica* L.). *LWT - Food Science and Technology* 40 (5): 753-758.
- Kaya, A.; O. Aydin & C. Demirtas. 2007. Drying Kinetics of Red Delicious Apple. *Biosystems Engineering* 96(4): 517-524.
- Kays, S. J. 1991. *Postharvest Physiology of Perishable Plant Products*. Van Nostrand Reinhold, New York (USA)
- Kleppmann, W. 2004. Taschenbuch Versuchsplanung, Produkte und Prozesse optimieren. 4. Auflage, Hanser Verlag, München, Wien.
- Krischer, O. & W. Kast. 1978. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Bd. 1. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Krokida, M. K. & C. Philippopoulos. 2005. Rehydration of Dehydrated Foods. *Drying Technology* 23 (4): 799-830.
- Krokida, M. K.; E. Tsami & Z. B. Maroulis. 1998. Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology* 16 (3-5): 667-685.
- Kröll, K. & W. Kast. 1989. *Trocknen und Trockner in der Produktion*, Bd. 3. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

- Krüger, B. 1986. Über die Beziehung zwischen Fruchtgröße, Struktur des Fruchtfleisches und Fruchtfestigkeit bei drei Apfelsorten. Dissertation, Universität Hohenheim.
- Labuza, T. P.; L. McNally; D. Gallagher; J. Hawkes & F. Hurtado. 1972. Stability of intermediate moisture foods. 1. Lipid Oxidation. *Journal of Food Science* 37 (1): 154-159.
- Lazic, Z.R. 2004. *Design of Experiments in Chemical Engineering*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- Lengyel, A. 2007. The Change of Body Temperature during Convective Drying of Cube-Shaped Apple Pieces. *Drying Technology* 25(7-9): 1275-1280.
- León, K; D. Mery; F. Pedreschi & J, León. 2006. Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International* 39: 1084-1091.
- Lewicki, P. P. 1998. Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: A review. *International Journal of Food Properties* 1: 1-22.
- Lewicki, P. P. & E. Jakubczyk. 2004. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. *Journal of Food Engineering* 64(3): 307-314.
- Lewicki, P. P. & G. Pawlak. 2003. Effect of Drying on Microstructure of Plant Tissue. *Drying Technology* 21 (4): 657-683.
- Lewicki, P. P. & J. Wiczowska. 2006. Rehydration of apple dried by different methods. *International Journal of Food Properties* 9(2): 217-226.
- Lewicki, P. P. 2006. Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology* 17 (4): 153-163.
- Lewis, M. & N. Heppell. 2000. *Continuous Thermal Processing of Food*. Aspen Publications, Gaithersburg, MD (USA).
- Lykow, A. W. 1958. *Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern*. Akademie-Verlag, Berlin.
- Marfil, P. H. M.; E. M. Santo & V. R. N. Telis. 2008. Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions. *LWT - Food Science and Technology* 41 (9): 1642-1647.
- Martynenko, A. 2008. *Computer Vision System for Ginseng Drying: Remote Sensing, Control and Optimization of Quality in Food Thermal Processing*. VDM Verlag, Saarbrücken
- Maskan, M. 2006. Effect of thermal processing on tristimulus colour changes of fruit. *Steward Postharvest Reviews* 2(5):1-8.

- Mayor, L. & A. M. Sereno. 2004. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering* 61 (3): 373-386.
- Mayor, L.; M. A. Silva & A.M. Sereno. 2005. Microstructural Changes during Drying of Apple Slices. *Drying Technology* 23 (9-11): 2261-2276.
- McMinn, W. A. M. & T. R. A. Magee. 1997. Physical characteristics of dehydrated potatoes-Part I. *Journal of Food Engineering* 3 (1-2): 37-48.
- Menges, H. O. & C. Ertekin 2006. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering* 77 (1): 119-125.
- Mersmann, A.; M. Kind & J. Stichlmair. 2005. *Thermische Verfahrenstechnik, Grundlagen und Methoden*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- Miranda, M.; H. Maureira; K. Rodríguez & A. Vega-Gálvez. 2009. Influence of temperature on the drying kinetics, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Aloe Vera (*Aloe Barbadensis* Miller) gel. *Journal of Food Engineering* 91 (2): 297–304.
- Modest, M. F. 1993. *Radiative Heat Transfer*. McGraw-Hill International Editions, New York (USA).
- Morris, N. J.; I. W. Lohmann; R. T. O'Connor & A.F. Freeman. 1953. Peanut Butter, IV. Determination of color of peanut butter by spectral reflectance method. *Food Technology* 7: 393-396.
- Müller, J. 1992. *Trocknung von Arzneipflanzen mit Solarenergie*. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, Dissertation Universität Hohenheim.
- Mujumdar, A. S. 2000. *Drying Technology in Agriculture and Food Science*. Science Publishers, Inc, Enfield (NH), USA.
- Mujumdar, A. S. 2007. *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, Boca Raton, New York, Oxon.
- Mujumdar, A. S. & W. Zhonghua. 2008. Thermal Drying Technologies – Cost-Effective Innovation Aided by Mathematical Modeling Approach. *Drying Technology* 26 (1-3): 145-153.
- Nguyen, M.-H. & W. E. Price. 2007. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *Journal of Food Engineering* 79 (1): 200-207.
- Palm, B. 2008. *Prozessoptimierung in der Porzellanproduktion mittels statistischer Versuchsplanung nach Taguchi*, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Grund- und Werkstoffe / Kunststoffe, VDI Verlag, Clausthal.

- Pedreschi, F.; J. León; M. Domingo & P. Moyano. 2006. Development of a computer vision system to measure the colour of potato chips. *Food Research International* 39 (10): 1092-1098.
- Perera, C. O. 2005. Selected Quality Attributes of Dried Foods. *Drying Technology* 23 (4): 717-730.
- Piotrowski, D. & A. Lenart. 1998. The Influence of Constant and Variable Conditions on the Drying Kinetics of Apples. *Drying Technology* 16 (3-5): 761-778.
- Pott, I.; S. Neidhart; W. Mühlbauer & R. Carle. 2005. Quality improvement of non-sulphited mango slices by drying at high temperatures. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 6 (4): 412-419.
- Prasanna, V.; T. N. Prabha & R. N. Tharanathan. 2007. Fruit Ripening Phenomena – An Overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 47 (1): 1-19.
- Prothon, F.; L. Ahrné & I. Sjöholm. 2003. Mechanisms and Prevention of Plant Tissue Collapse during Dehydration: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 43 (4): 447-479.
- Rahman, M. S. & P. L. Potluri. 1990. Shrinkage and density of squid flesh during air drying. *Journal of Food Engineering* 12 (2): 133-143.
- Rahman, N. & S. Kumar. 2007. Influence of Sample Size and Shape on Transport Parameters during Drying of Shrinking Bodies. *Journal of Food Process Engineering* 30 (2): 186-203.
- Ratti, C. 1994. Shrinkage during drying of food stuffs. *Journal of Food Engineering* 23: 91-105.
- Ratti, C. (Hg.) 2009. *Advances in Food Dehydration*. CRC Press, Boca Raton, Fla (USA).
- Resnik, S. & J. Chirife. 1979. Effect of moisture content and temperature on some aspects on non enzymatic browning in dehydrated apple. *Journal of Food Science* 44 (2): 601-605.
- Rovedo, C. O. & P. E. Viollaz. 1998. Prediction of degrading reactions during drying of solid foodstuff. *Drying Technology* 16 (3-5): 561-578.
- Rowland, S.P. (Hg.) 1980. *Water in Polymers*. ACS Symposium Serie 127. American Chemical Society, Washington, D.C. (USA).
- Ryley, J. & P. Kajada. 1994. Vitamins in thermal processing. *Food Chemistry* 49 (2): 119-129.

- Santos, P. H. S. & M. A. Silva. 2008. Retention of Vitamin C in Drying Processes of Fruits and Vegetables – A Review. *Drying Technology* 26 (12): 1421-1437.
- Schultz, E. L.; M. M. Mazzuco; R. A. F. Machado; A. Bolzan; M. B. Quadri & M. G. N. Quadri. 2007. Effect of pre-treatment of drying, density and shrinkage of apple slices. *Journal of Food Engineering* 78 (3): 1103-1110.
- Srikiatden, J. & J. S. Roberts. 2005. Moisture Loss Kinetics of Apple During Convective Hot Air and Isothermal Drying. *International Journal of Food Properties* 8 (3): 493-512.
- Sturm, B. 2006. Regelungsstrategien bei der Trocknung komplexer biologischer Güter. Master's Thesis. HTWG Konstanz.
- Sturm, B. & W. Hofacker. 2007. On the Improvement of Dried Agricultural Products Quality via Active Temperature Control. Proceedings of the 18th DAAAM Symposium, Zadar (Kroatien), pp. 723-724.
- Sturm, B. & W. Hofacker. 2008a. Optimisation of the Drying Process by Controlling Product Temperature. *Journal of EcoAgriTourism*, ISSN 1841-642X. 4(1-2), 2008: 261-265
- Sturm, B. & W. Hofacker. 2008b. Determination of Quality Changes during the Production of Dried Food Products using Colorimetry. Proceedings of the 19th DAAAM Symposium, Trnava (Slowakei), pp. 1329-1330.
- Sturm, B.; W. Hofacker & O. Hensel. 2009. Automatic Control of Drying Processes of Biological Materials using Optical Sensors to acquire Surface Temperature, Color and Shape. Annual International Meeting of the ASABE 2009, Paper number 096219, Reno, Nevada (USA) June 21 - June 24, 2009
- Sturm, B. & W. Hofacker. 2009. Optical Monitoring and Control of Drying Processes. In: DAAAM International Scientific Book 2009. B. Katalinic (Hg.), Published by DAAAM International, Wien (Österreich), pp. 501-512.
- Suarez, C. & P. E. Viollaz. 1991. Shrinkage effect on drying behaviour of potato slabs. *Journal of Food Engineering* 13(2): 103-114.
- Testo. 2005. Bedienungsanleitung testo 850.
- Thijssen, H. A. C. 1979. Optimization of process conditions during drying with regard to quality factors. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 12: 308-317.

- Timoumi, S.; D. Mihoubi & F. Zagrouba. 2007. Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices. *LWT - Food Science and Technology* 40 (9): 1648-1654.
- Troger, J. M. & J. L. Buttler. 1980. Drying peanuts with intermittent airflow. *Transactions of the ASAE* 23: 197-199.
- Troller, J. A. & J. H. B. Christian. 1978. *Water Activity and Food*. Academic Press, London (England).
- Vega-Galvez, A.; K. Di Scala; K. Rodriguez; R. Lemus-Mondaca; M. Miranda; J. Lopez & M. Perez-Won. 2009. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annum*, L. var. Hungarian). *Food Chemistry* 117 (4): 647-653.
- Velic, D.; M. Planinic; S. Tomas & M. Bilic. 2004. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying. *Journal of Food Engineering* 64(1): 97-102.
- Wall, M. M. & T. S. Gentry. 2007. Carbohydrate composition and color development during drying and roasting of macadamia nuts (*Macadamia integrifolia*). *LWT - Food Science and Technology* 40(4): 587-593.
- Wills, R. B. H.; P. A. Bambridge & K. J. Scott. 1980. Use of flesh firmness on other objective tests to determine consumer acceptability of Delicious apples. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry* 20: 252-256.
- Zhang, D. & J. B. Litchfield. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. *Drying Technology* 9 (1): 233-244.

11 Anhang

Anlage 1. Abhängigkeit der Trocknungsdauer von der gleichzeitigen Änderung der Luft- und der Taupunkttemperatur, $v_L=3,4$ m/s

Trocknungsdauer



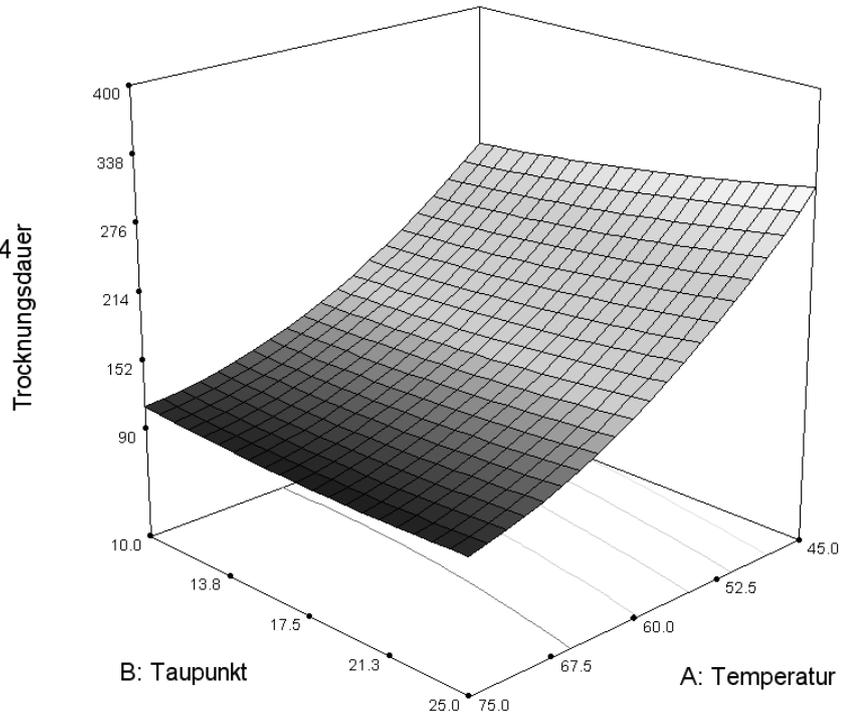
95

X1 = A: Temperatur

X2 = B: Taupunkt

Actual Factor

C: Geschwindigkeit = 3.4



Anlage 2. Abhängigkeit der Trocknungszeit von der gleichzeitigen Veränderung der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit, $\vartheta_L=60$ °C

Trocknungsdauer



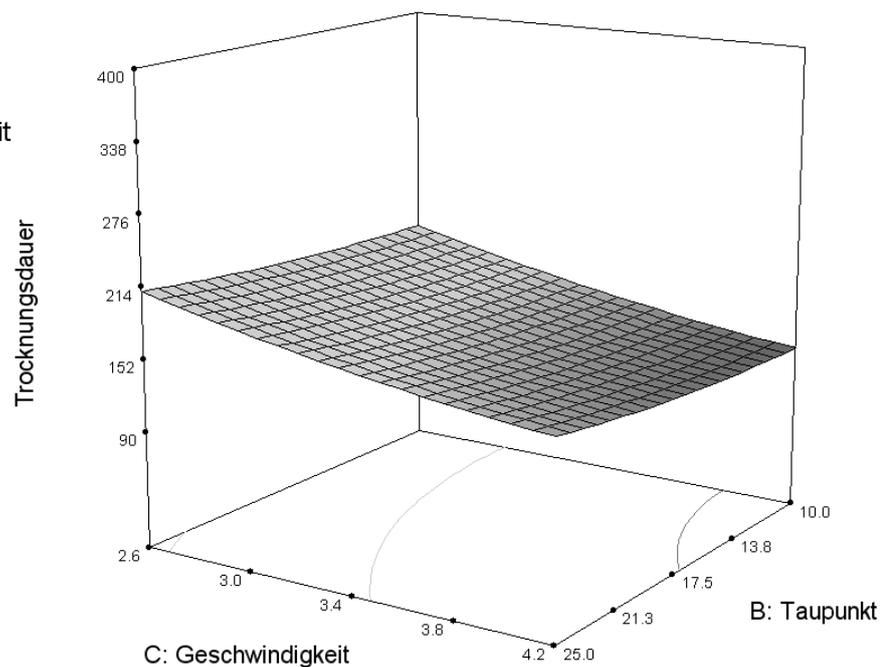
95

X1 = B: Taupunkt

X2 = C: Geschwindigkeit

Actual Factor

A: Temperatur = 60.0



Anlage 3. Abhängigkeit des TCD von der gleichzeitigen Veränderung der Luft- und Taupunkttemperatur, $v_L=3,4$ m/s

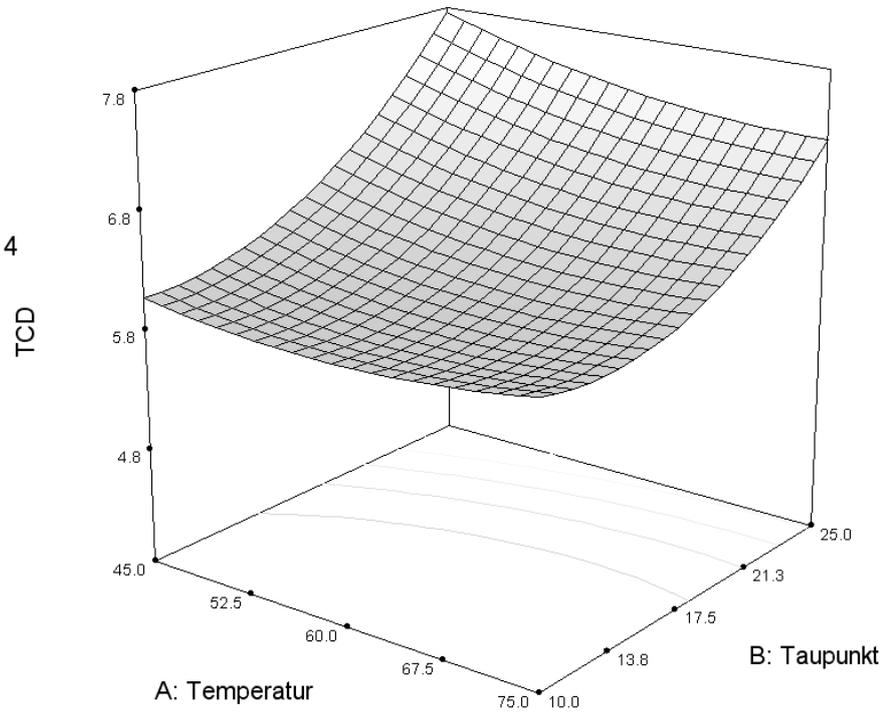
TCD



3.2

X1 = A: Temperatur
X2 = B: Taupunkt

Actual Factor
C: Geschwindigkeit = 3.4



Anlage 4. Abhängigkeit des TCD von der gleichzeitigen Änderung der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit, $\vartheta_L=60$ °C

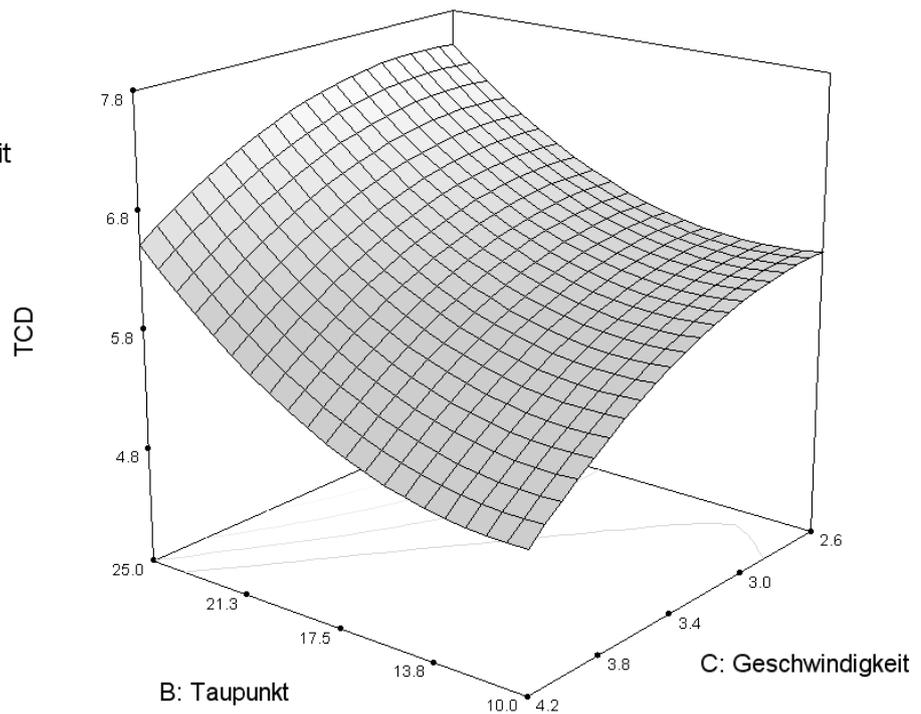
TCD



3.2

X1 = B: Taupunkt
X2 = C: Geschwindigkeit

Actual Factor
A: Temperatur = 60.0



Anlage 5. Abhängigkeit der Flächenschrumpfung von der gleichzeitigen Änderung der Luft- und Taupunkttemperatur, $v_L=3,4$ m/s

Schrumpfung



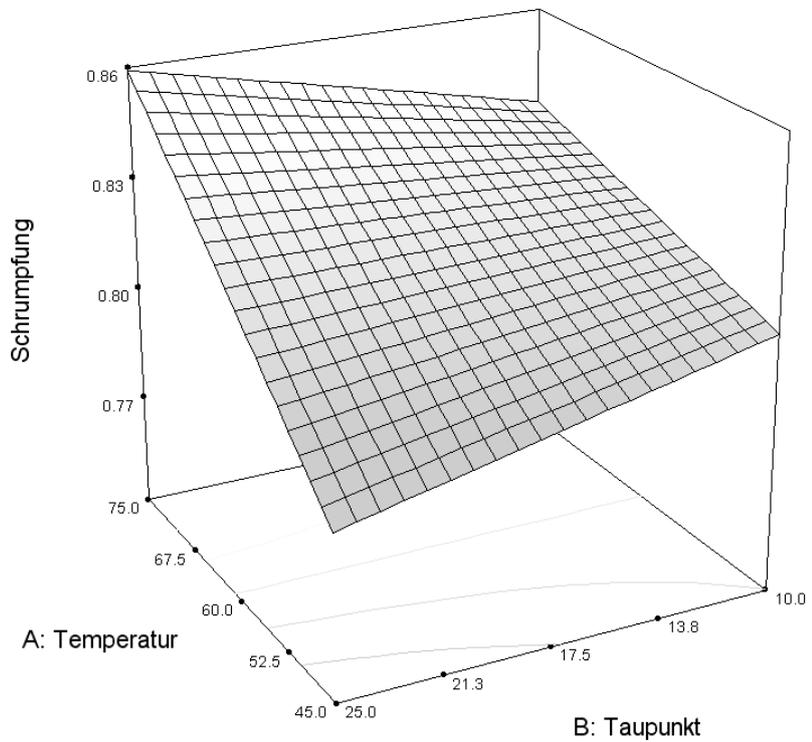
0.71

X1 = A: Temperatur

X2 = B: Taupunkt

Actual Factor

C: Geschwindigkeit = 3.4



Anlage 6. Abhängigkeit der Flächenschrumpfung von der gleichzeitigen Änderung der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit, $\vartheta_L=60$ °C

Schrumpfung



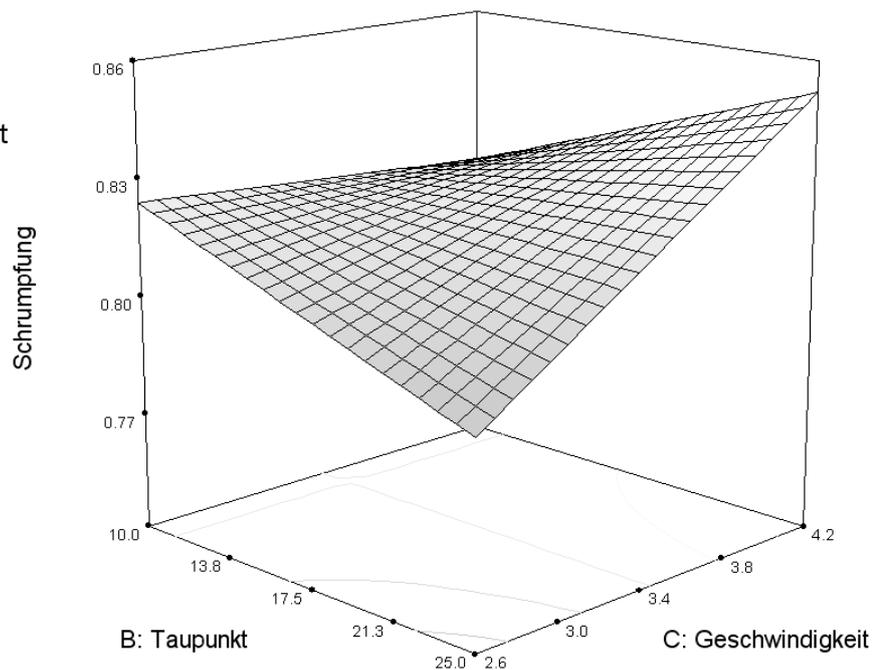
0.71

X1 = B: Taupunkt

X2 = C: Geschwindigkeit

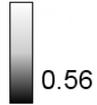
Actual Factor

A: Temperatur = 60.0



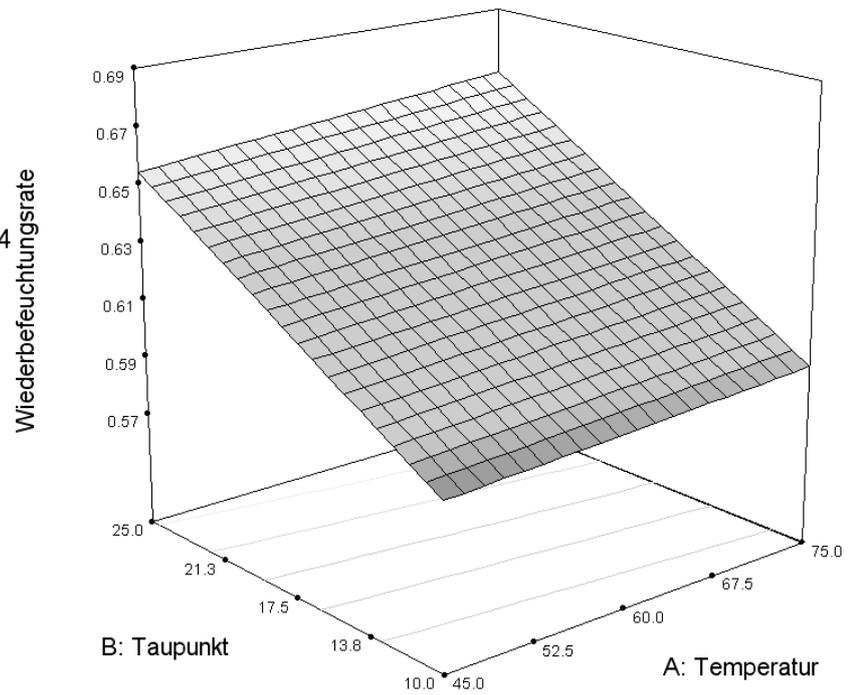
Anlage 7. Abhängigkeit des Wiederbefeuchtungsrate von der gleichzeitigen Änderung der Luft- und Taupunkttemperatur, $v_L=3,4$ m/s

Wiederbefeuchtungsrate



X1 = A: Temperatur
X2 = B: Taupunkt

Actual Factor
C: Geschwindigkeit = 3.4



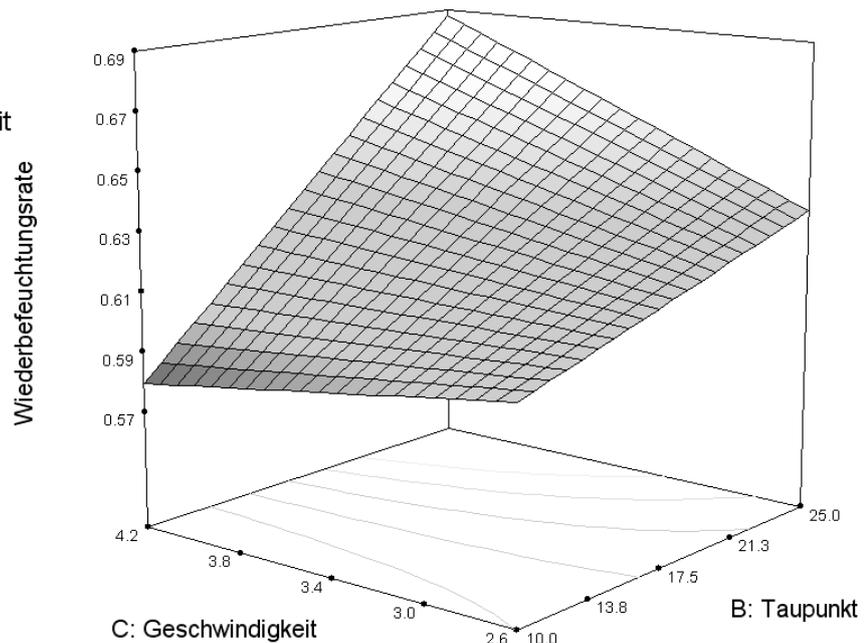
Anlage 8. Abhängigkeit der Wiederbefeuchtungsrate von der gleichzeitigen Änderung der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit, $\vartheta_L=60$ °C

Wiederbefeuchtungsrate



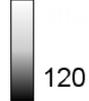
X1 = B: Taupunkt
X2 = C: Geschwindigkeit

Actual Factor
A: Temperatur = 60.0



Anlage 9. Abhängigkeit der Trocknungsdauer von der gleichzeitigen Änderung der Produkt- und Taupunkttemperatur, $v_L=3,4$ m/s

Trocknungsdauer

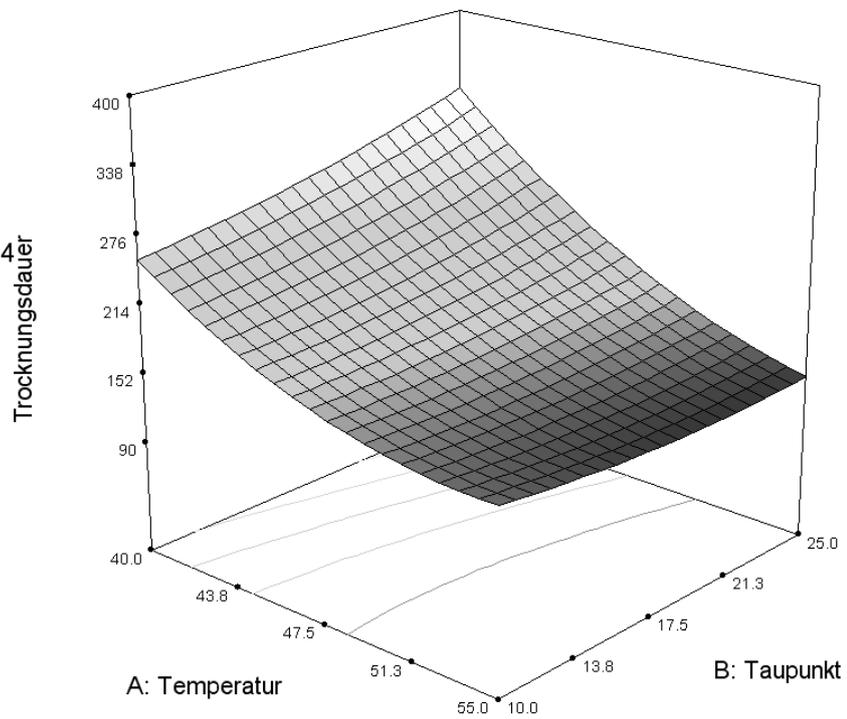


X1 = A: Temperatur

X2 = B: Taupunkt

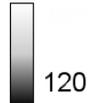
Actual Factor

C: Geschwindigkeit = 3.4



Anlage 10. Abhängigkeit der Trocknungsdauer von der gleichzeitigen Änderung der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit, $\vartheta_P=47,5$ °C

Trocknungsdauer

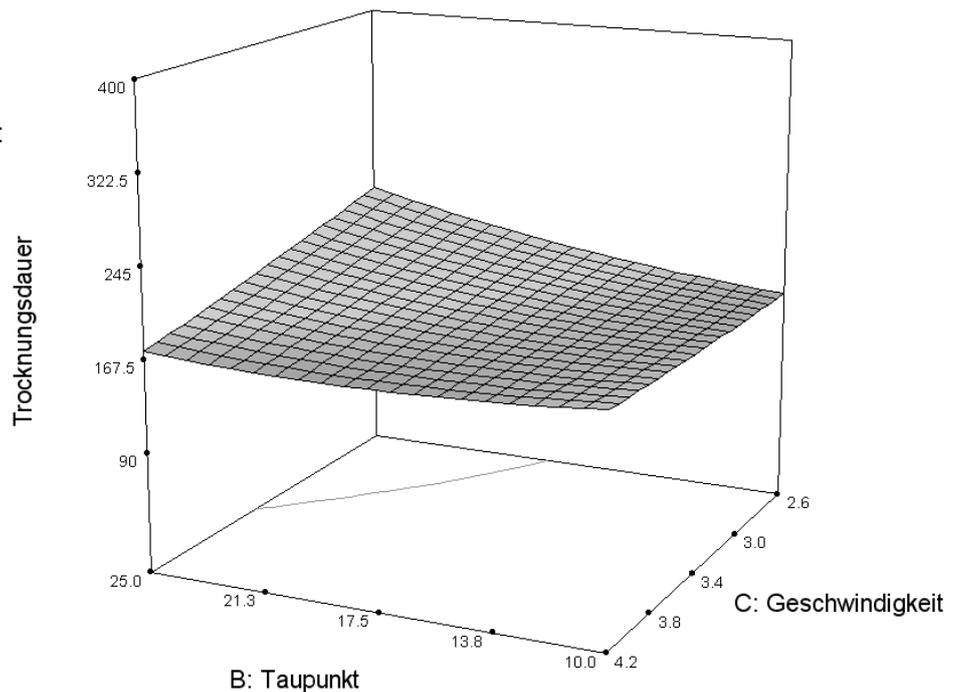


X1 = B: Taupunkt

X2 = C: Geschwindigkeit

Actual Factor

A: Temperatur = 47.5



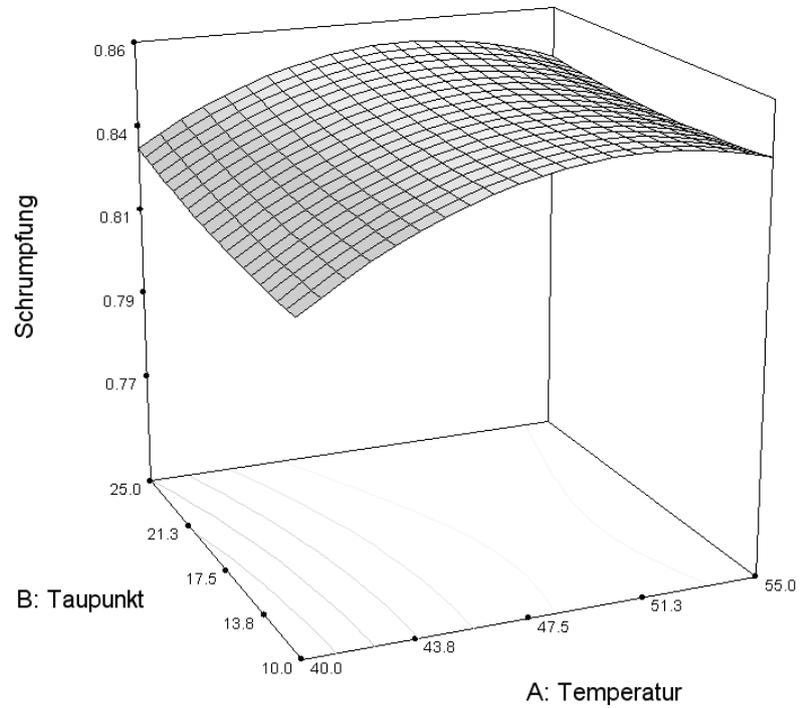
Anlage 11. Abhängigkeit der Flächenschrumpfung von der gleichzeitigen Änderung der Produkt- und Taupunkttemperatur, $v_L=3,4$ m/s

Schrumpfung



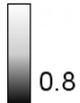
X1 = A: Temperatur
X2 = B: Taupunkt

Actual Factor
C: Geschwindigkeit = 3.4



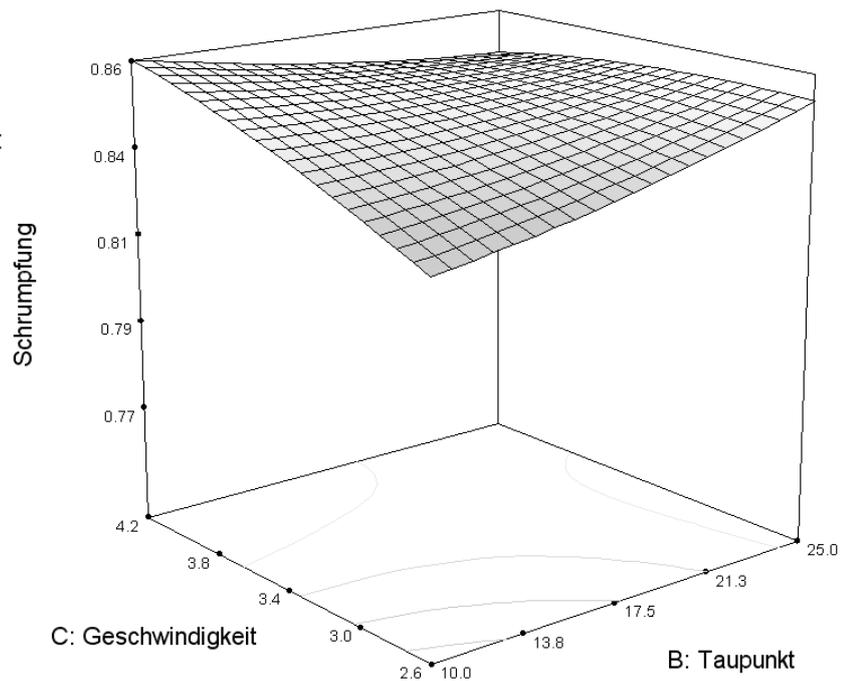
Anlage 12. Abhängigkeit der Flächenschrumpfung von der gleichzeitigen Änderung der Taupunkttemperatur und der Luftgeschwindigkeit, $\vartheta_p=47,5$ °C

Schrumpfung



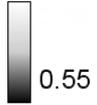
X1 = B: Taupunkt
X2 = C: Geschwindigkeit

Actual Factor
A: Temperatur = 47.5



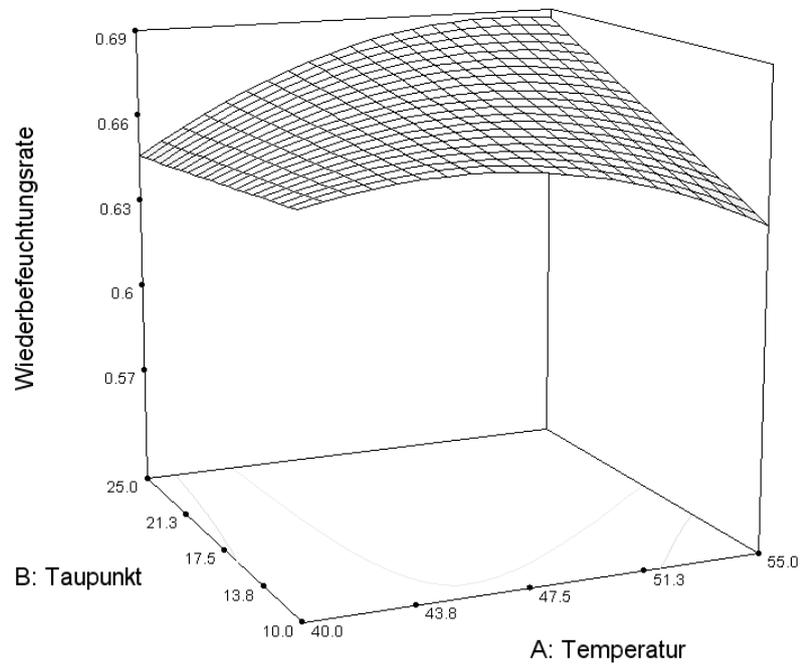
Anlage 13. Abhängigkeit des Wiederbefeuchtungsrate von der gleichzeitigen Änderung der Produkt- und Taupunkttemperatur, $v_L=3,4$ m/s

Wiederbefeuchtungsrate



X1 = A: Temperatur
X2 = B: Taupunkt

Actual Factor
C: Geschwindigkeit = 3.4



Anlage 14. Literaturlauswertung

Die Literaturlauswertung gliedert sich in die Art der Trocknung, untersuchte und für diese Arbeit wichtige Faktoren, Prozesseinstellungen und in die wesentlichen Ergebnisse. Für eine bessere Übersicht werden die ausschließlich in der Literaturlauswertung verwendeten Abkürzungen an dieser Stelle erläutert.

Abkürzungsverzeichnis

BZ	Blanchierzeit
D	Durchströmung
EZ	Einzelschicht
FB	Festbett
G	Gefriertrocknung
K	Konvektionstrocknung
MS	Membran Semipermeabilität
MW	Mikrowellentrocknung
NEB	nichtenzymatische Bräunung
Ofl.	Oberfläche
OS	osmotisch
OV	Oberflächenverhärtung
SF	Flächenschrumpfung
SV	Volumenschrumpfung
TK	Trocknungskinetik
Ü	Überströmung
V	Vakuumtrocknung
VB	Vorbehandlung
WB	Wiederbefeuchtung
d_s	Scheibendicke

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
Bai et al., 2002	Apfel	K	Mikrostruktur SV Porosität OV	ϑ_L : 20...65 °C v_L : 1,5 m/s φ : 20 %	<p>Trocknungsdauer t_{Tr} (20/40/60 °C): 10/4/2 h Keine signifikanten Unterschiede für t_{Tr} bei unterschiedlichen X_0</p> <p>Effekt Steigerung ϑ_L (20/40/60 °C): SV wird verringert OV bei hohen ϑ_L wegen hohem dX/dt am Anfang WB nach Trocknung mit hohen ϑ_L erhöht</p> <p>Struktur (REM): 20 °C: 3-D Struktur mit wenigen kollabierten Stellen 40 °C: stark ausgeprägter Kollaps 60 °C: Kollaps und Rissbildung</p> <p>Durchmesser: vor Trocknung 60/25 mm nach 46/20, 50/24, 52/26 mm Lineare Erhöhung der offensichtlichen Porosität mit abnehmendem X</p>
Bashir, 1998	Zwiebeln	K (D/Ü)	L, a, b Zucker Vit. C	ϑ_L : 30...90 °C v_L : 0,1...1,2 m/s φ : 8...60 %	<p>Trocknungsdauer t_{Tr}: ϑ_L: 30/90 °C Reduktion t_{Tr} um 96,3 %, φ: 8/60 % r. F. zur Erreichung $X_E=0,05 \text{ g}_w/\text{g}_{TS}$ Erhöhung t_{Tr} um den Faktor 4 D: v_L: Erhöhung 0,1/0,5 m/s = 43 % Reduktion Erhöhung 0,5/1,0 = 14,6 % Ü: über gesamten Bereich großer Einfluss v_L D/Ü: bei 50 °C 6/13,5 h, bei 80°C 2,5/4 h</p> <p>Farbveränderung: ϑ_L: 30...60 °C kein Einfluss; > 60 °C großer Einfluss φ: < 20 % kein Einfluss, > 20 % deutlich verstärkte Bräunung, kann an der verlängerten t_{Tr} liegen. v_L: nichtsignifikanter Einfluss d_s: 2...6 mm kein Einfluss, > 6 mm verstärkte Bräunung</p>

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					<p>gegen Ende der Trocknung steilerer Anstieg TCD bei allen Einstellungen</p> <p>Zuckergehalt: Glucose (0,132 g/g_{TS}) Fructose (0,099 g/g_{TS}) 40/90 °C: 0,125; 0,077 g/g_{TS} / 0,093; 0,069 g/g_{TS}</p> <p>Vit. C Verlust: ϑ_L: 69 % bei Erhöhung von 60 auf 80 °C d_s: 52 % wenn von 2 mm auf 6 mm erhöht</p> <p>ϑ_P-Verläufe: Phasen erkennbar, lange große Unterschiede zwischen ϑ_L und ϑ_P</p>
Boudhrioua et al., 2003	Banane	K	Aroma REM	ϑ _L : 40, 60, 80 °C	<p>Verlust an Aromastoffen: ϑ_L: Erhöhung führt zu Erhöhung des Verlusts in den ersten 2 h am gravierendsten, abhängig von ϑ_L Reaktionen zwischen Aminen und Carboxyl Gruppen bevorzugt bei t >60 °C und X < 0,5 g_w/g_{TS} führen zu Maillardreaktion am Ende der Trocknung bei 80 °C</p> <p>ϑ-Verläufe: nach 2 h bei allen ϑ_L ϑ_P gleich ϑ_L</p>
Chong et al., 2008	Brotfrucht		TK TCD mechan.	ϑ _L : 50, 60, 70 °C v _L : 0,03 m/s Y: ca. 0,01 kg/kg 4,0x3,0x0,3 cm 3,0x3,0x0,3 cm 2,0x3,0x0,3 cm	<p>Farbveränderung 50/60/70 °C: TCD: 17,59/17,89/28,42 L: 7/9,51/16,5 a: 6,48/9,47/13,6 b: 14,82/15,6/18,17</p> <p>Trocknungskinetik: dX/dt nimmt mit zunehmende Dicke ab wegen erhöhtem Ofl./V Verhältnissen</p> <p>mechanische Eigenschaften 50/60/70°C: Härte: steigt mit zunehmendem ϑ_L: 706,750/808,620/952,870 g Vergleich Literatur für Äpfel: K: 2960 g, G: 2230 g</p>

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					<p>Zähigkeit: (frisch: 3653) steigt mit ϑ_L 148720/191218/389593</p> <p>Elastizität: (frisch: 0,653) 0,999/0,955/0,714 kann an t_{Tr} liegen, da diese mit Erhöhung ϑ_L sinkt</p> <p>Kohäsionskraft: konstant</p>
Chou & Chua, 2003	Kartoffel	K stufenweise	TCD SV Vit. C a_w ϑ_p und ϑ_l	ϑ_L : 25...40 °C Y: 0,0074... 0,0103 kg _w /kg _L	<p>Farbveränderung: Konstante ϑ_L führen zu doppeltem TCD Wert verglichen zu stufenweisen Führung</p> <p>Inhaltstoffe: Profil mit Absenkung von ϑ_L führt zu einer zeitweisen Umkehrung des Wärmeflusses, die sich wiederum positiv auf den Erhalt von Vit. C auswirkt</p> <p>ϑ-Verläufe: lange starke Unterschiede zwischen ϑ_p und ϑ_l</p> <p>Energieverbrauch: Reduktion durch stufenweise Änderung der Trocknungs- bedingungen und somit Reduktion t_{Tr} Reduktion t_{Tr} kann bei stufenweiser Reduktion ϑ_L durch Absenken von φ erreicht werden</p>
Chua et al., 2000c	Banane Guave Kartoffel	K Zyklisch	TCD L, a, b	ϑ_L : 20...40°C	<p>Farbveränderung: TCD: Reduktion für sinusförmig gegenüber konstant Bananen: 63 % Guave 75 % Kartoffel 87 % Banane: Änderung von a sehr gering hauptsächlich Änderung von b,</p>
Crapiste, 2000	Apfel	K	SV MS	ϑ_L 20 °C...70 °C	<p>Volumenschrumpfung SV: lineare Korrelation mit X außer bei sehr niedrigen X, 75-80% SV Verlauf pseudo 1. Ordnung, 20/40/50/60 °C: 20/40/50/80 % SV</p>

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
Cunningham et al, 2008	Kartoffel	K MW	Struktur WB REM	ϑ_L : 60 °C, MW:250, 440, 600 W ϑ_W : 20...80 °C BZ: 0...7 min	Erhöhung der WB: Senkung ϑ_W (20 °C=5,97; 80 °C=5,03) Senkung des Durchmessers Erhöhung der BZ (ohne=4,8; 1 min=5,7; 7 min=7,2) Erhöhung der MW Leistung MW statt K (5,93 bei K, 7,39 bei MW (440 W)) Strukturveränderungen bei WB bei >60°C durch Brechen und Kollaps der Stärkekörnchen
Dissa et al., 2008	Mango	K	d_s SV TK	ϑ_L : 50, 60, 70 °C φ : 15...40 % v_L : 0,48, 0,8, 1,6 m/s d_s : 2,5, 5, 10°mm	Trocknungsdauer t_{Tr}: ϑ_L ($d_s=5$ mm): 250/166/83 min d_s : 666/250/83 min Volumenschrumpfung SV: unabhängig von ϑ_L klar erkennbare anisotrope Schrumpfung, jedoch isotrop gefittet Korrektur für SV: ohne Korrektur dX/dt unterbewertet und Diffusivität überbewertet
Fernandez et al. 2005	Apfel	K	L, a, b Form Bilderkennung	ϑ_L : 50 °C t_{Tr} : 14 h	Farbveränderung: L schwankt stark, unklares Verhalten, a und b steigen, $\Delta a=7$, $\Delta b=18$ Oberfläche nicht homogen Formveränderung: Umfang U/U_0 : 0,80 Fläche A/A_0 : 0,55 Radius R/R_0 : 0,75 invasiv gemessen
Hawlander et al., 2006	Papaya Guave	K (Luft, N ₂ , CO ₂) G V	TCD Textur WB Vit. C REM	ϑ_L : 45 °C φ : 10 % v_L : 0,7 m/s G: -20 °C, 24 h, 10 °C, 4,6 mm	Farbveränderung: TCD Guave K: 39; N ₂ : 27, CO ₂ : 36 V: 35; G: 6

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					<p>TCD Papaya K: 20; N: 14; CO₂: 16; V: 31; G: 35 Inertgase verursachen geringeren TCD als Luft, da Reaktionen abhängig von O₂, Enzymen, Kupfer und Substraten</p> <p>Struktur (REM): bei allen Verfahren rau, also offen stehend, Ausnahme K, kollabierte Oberflächenstruktur</p> <p>Wiederbefeuchtung WB: bei hohen ϑ_w schneller, Endergebnis jedoch unabhängig von ϑ_w, abhängig von Porosität: Porosität von Guaven steigt: K, N, CO₂, V, G,</p> <p>Vit. C (in % des Anfangsgehaltes): Papaya/Guave K: 75/25 N: 80/39 CO₂: 82/41 V: 86/58 G: 86/63</p> <p>Partikeldichte: G, V, K, N, CO₂ (Zunahme von links nach rechts)</p>
Ho et al, 2002	Kartoffel	K Zyklisch Sägezahn Rechteck sinusförmig	NEB ϑ_p, ϑ_l Verläufe	ϑ_L : 20 °C...35 °C, Y: 0,0074-0,0103 kg _w /kg _L	<p>Trocknungsdauer t_{Tr}: Rechteckfunktionen am schnellsten, jedoch dann NEB stark ausgeprägt</p> <p>ϑ-Verläufe: ϑ_l steigt kontinuierlich, beinahe nicht von Änderung von ϑ_L beeinträchtigt</p>
Kaya et al., 2007	Apfel	K (D)	TK Modelle	ϑ_L : 35, 45, 55 °C v_L : 0,2...0,6 m/s φ : 40, 55, 70 %	<p>Reduktion Trocknungsdauer t_{Tr}: Erhöhung ϑ_L: 13,8 und 27,6 % Erhöhung v_L: 6,9 % von 14,5 h auf 13.5 h Reduktion φ: (ϑ_L: 35 °C) 19,4 bzw. 51,7 %</p>

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
Krokida & Philippopoulos, 2005	Apfel Banane Erbsen Karotte Kürbis Mais Pilz Zwiebel	K G	Aroma Textur Porosität ρ	ϑ_L : 30, 50, 70 °C G: -35 °C, 48 h, 1 h flüssiger N ₂ , 24 h Trocknung	Verlust an Aromastoffen (Apfel): abhängig von ϑ abhängig vom Verfahren (bei G ist der Erhalt deutlich höher, von ϑ abhängig) Vergleich über Zeit nicht über Feuchtegrad! Wiederbefeuchtungsverhalten WB (Apfel): stark abhängig von ϑ_w G: Material hat die labilste Struktur K: WB geringer als bei G, mechanische Eigenschaften jedoch ähneln denen von frischem Apfel eher
Krokida et al., 1998	Apfel Banane Karotte Kartoffel	K V	L, a, b Hunter Modell	ϑ_L : 50, 70, 90 °C φ : 15, 30, 40 % p : 30 mbar k. A. zu v_L	Farbveränderung: ϑ_L beeinflusst a und b, nicht jedoch L, zeitlicher Verlauf von a und b folgen 1. Ordnung Steigerung ϑ_L und φ führt zu Erhöhung Farbveränderung Vakuum (Apfel): 50 °C: $\Delta a=1,8$, $\Delta b=4,0$; 70 °C: $\Delta a=6,2$, $\Delta b=9,8$; 90 °C: $\Delta a=10,1$, $\Delta b=15$ Konvektion (Apfel): 50 °C, 15 %: $\Delta a=2,4$, $\Delta b=7,3$; 70 °C, 15 %: $\Delta a=6,6$, $\Delta b=9,5$; 70 °C, 30 %: $\Delta a=4,4$, $\Delta b=12,5$; 70 °C, 40 %: $\Delta a=2,2$, $\Delta b=13$; 90 °C: $\Delta a=12,5$, $\Delta b=7,4$ k. A. zu t_R
Lengyel, 2007	Apfel	K	ϑ_p Zucker		ϑ Verläufe: ϑ_p : Jonathan vergleichbar mit eigenen Ergebnissen für Jonagold, Idared und Golden deutlich andere Verläufe Zucker karamellisiert bei 50 °C

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
Lewicki & Jakubczyk, 2004	Apfel	K	SV mech.	ϑ_L : 50, 60, 70, 80 °C, v_L : 1,7 m/s, ϕ : 50-60 % bei 20 °C	<p>Schrumpfungsverhalten: je höher ϑ_L desto geringer SV (inverses Verhältnis) linear bis zur Temperaturgrenze, danach stärkere Reduktion der Schrumpfung (70°C) SF 14-20 %, S in vertikaler Richtung 34% bei 50/60 °C, 39 % bei 70 °C, 30 % bei 80 °C nicht isometrisch S ,die auf Gradienten in Scheibe zurückgeführt wird</p> <p>Trocknungsdauer t_{Tr}: Lineare Abnahme mit ϑ_L 50/80 °C 310/150 min</p> <p>Mechanische Eigenschaften: Spannungen bis 70 °C unabhängig von ϑ_L, darüber starker Anstieg von 50 auf 150 kPa, Rissbildung langsame Trocknung reduziert entstehende Spannungen, jedoch starke SV der Zellen schnelle Trocknung resultiert in hohen inneren Spannungen, jedoch mechanische Festigung durch Bildung einer Art trockener Kruste</p>
Lewicki & Pawlak, 2003	Apfel	K G	Mikrostruktur	ϑ_L : 70 °C, v_L : 1,5 m/s G: -18 °C, 24 h, 20 °C, 24 h, 57 Pa	<p>Konvektion: starke Deformation, Volumenverlust 60 %, isotrope Schrumpfung Mikrostruktur durch Temperatur und Feuchtegradient beeinflusst, vergrößerte Kavitäten, gebrochene Zellwände 602-219 μm^2 Faltung, Spannungen, Brüche meiste Zellen kleiner als im rohen Apfel, also Schrumpfung der Zellen</p> <p>Gefriertrocknung: große unregelmäßige Kavitäten, zerstörte Zellwände offensichtlich,</p>

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					Verteilung in und auf dem Produkt identisch 2832-207 μm^2 Form und Größe durch Ausdehnung des Wassers beim Einfrieren bestimmt
Lewicki & Wiczowska, 2006	Apfel	K G	SV WB	ϑ_L : 70 °C, v_L : 1,5 m/s G: -21 °C, 20 h, 25 °C, 37 Pa	Volumenschrumpfung SV: K: starke Schrumpfung G: guter Formerhalt Wiederbefeuchtungsverhalten WB: K: Grad Wiederbefeuchtung 35% Reduktion der Zellwanddicke um 38% Struktur wieder hergestellt G: Grad Wiederbefeuchtung 76 % Reduktion der Zellwanddicke 14 % keine Wiederherstellung Struktur stärkere Zerstörung der Struktur durch Gefrieren höherer Verlust an gelösten Inhaltsstoffen während WB
Marfil et al., 2008	Tomate	K (Ü) OS VB	Vit. C	ϑ_L : 50, 60, 70 °C v_L : 1 m/s	Trocknungsdauer t_{Tr} (bis $X=1g_w/g_{TS}$): HT 16,73/10,20/7,09 h GT 27,79/20,56/12,55 h GTV 17,90/16,81/10,52 h Vit.-C-Gehalt (in % des Anfangsgehalts): HT (4,0 \pm 0,3 mg/g) 44/40/28 % GT (3,36 \pm 0,56 mg/g) 70/40/20 % (nicht für alle Einstellungen bis zum GGW dargestellt) GTV (2,9 \pm 0,24) mg/g 70/61/58 % Schälen reduziert Vit. C Gehalt um ca. 16 %, Vorbehandlung um 45 %
Martynenko, 2008	Ginseng	K mehrstufig	SV Farbe	ϑ_L : 38, 50 °C v_L : 1, 3 m/s φ : 12, 24 %	Trocknungsdauer t_{Tr}: ϑ_L : groß: 220/100 h klein 150/85 h φ : groß: 150/100 h klein: 94/84 h

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					<p> v_L: (38 °C): 231/131 h (50 °C): 100/38 h mit/ohne Haut groß: >200/61 klein: 116/11 </p> <p> Farbveränderung: Effekt φ abhängig von ϑ_L Algorithmus mit Hue-Sättigungs-Intensität </p> <p> Struktur (REM): SV geht mit Kompression und Verwinden der Zellen einher erste Phase Trocknung: Entfernen des Wassers aus großen dünnwandigen Zellen </p> <p> Schrumpfungsverhalten: bei $X=1 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$: nichtuniforme Schrumpfung Zellkollaps der großen Parenchymazellen, fast komplette Schrumpfung von 13 auf 10 mm dadurch zu erklären Xylemzellen Aufbau bleibt bestehen zwischen $X=1 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ und $X=0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ Kollaps des Xylemzellverbands, fast vollständige Zerstörung des inneren Zellverbands $X=0,1 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ innere Zellstruktur vollständig kollabiert nichtuniforme Schrumpfung der Wurzel ist abhängig vom Durchmesser SF der seitlichen Wurzeln schneller, da dünner SF folgt Kinetik 1. Ordnung </p> <p> Erfassung Flächenschrumpfung SF: Erfassung Fläche mit CCD-Kamera, 2-D Bilder; Flächenbestimmung aus Anzahl belegten Pixel des Binärbildes, Umrechnung in m^2 Bestimmung Stofftransport an OFL SF ist empfindlicher Faktor und repräsentiert </p>

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					<p>Änderungen im Feuchtegrad über ca. 75 % der t_{Tr}</p> <p>Regelungsstrategien: SF bis $X=0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ zuverlässiger Faktor für Feedback Regelung im untersuchten Bereich Farbe Hue-Algorithmus 3 stufig: bei $X=1 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ von 38 auf 50 °C, bei $X=0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ von 50 auf 38°C, Verfolgung Farbveränderung, wenn Veränderungsschwelle überschritten, dann sofortiges zurückschalten auf niedrigere Temperatur</p>
Menges & Ertekin, 2006	Apfel	K	TK Vergleich von 14 Modellen	ϑ_L : 60, 70, 80 °C v_L : 1, 2, 3 m/s	<p>Trocknungsdauer t_{Tr} (60/70/80) 10 %: 1 m/s: 3,2/2,0/1,8 h 2 m/s: 3,0/1,8/1,6 h 3 m/s: 2,8/1,6/1,4 h</p> <p>ϑ-Verläufe: Verläufe (1/2/3) für 70 und 80 °C nahezu identisch bis ϑ_P 55/55/50 °C</p>
Miranda et al, 2009	Aloe-vera-Gel	K	NEB TCD Vit. C, E Mineralien a_w	ϑ_L : 50...90 °C v_L : 2,0 m/s	<p>Trocknungsdauer t_{Tr}: lineare Abnahme (820 min... 220 min) Gleichgewichtsfeuchte (0,17g/g...0,077 g/g)</p> <p>Steigerung ϑ_L: Proteingehalt steigt (23,1...26,6 g/kg) Fettgehalt sinkt a_w sinkt (0,262...0,202)</p> <p>Vit. C (frisch 1250 mg/kg): 50/60/70/80/90 °C 250/265/264/226/171 mg Vit C Verlust $f(\vartheta, t)$</p> <p>Vit. E: 50/60/70/80/90 °C 6,83/5,63/1,72/2,62/3,3 mg</p>

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					Farbveränderung: TCD 50/60/70/80/90 °C 15/14/15/22/17 NEB 0,074...0,255 beste Trocknungsergebnisse bei 60 und 70 °C bezogen auf untersuchte Kriterien
Müller, 1992	Kamille Salbei	K	ϑ_p ätherische Öle Farbe	ϑ_L : 30...90 °C v_L : 0,2...0,6 m/s v_L : 0,1...0,4 m/s φ : 10...70 %	Salbei Trocknungsdauer t_{Tr}: ϑ_L (30/40/60/90 °C): 120/40/2/0,4 h φ (10/30/50/60/70 %): bis $\varphi=40$ % ähnliche Verläufe, danach starke Unterschiede bei $\varphi=70$ % wird Lagerfeuchtegehalt nicht erreicht bis 50 % annähernd lineare Zunahme von t_{Tr} danach exponentiell ϑ-Verläufe: ϑ_p : starker Anstieg anfangs dann Beharrungszustand bis 20 %, danach s-förmiger Anstieg ϑ_p Verlust ätherische Öle (11% Restfeuchte): ϑ_L (30/60/70/80/90): 0/0/18/22/27 φ : Verlust an ätherischen Ölen bei niedrigen Temperaturen größer als bei hohen Farbveränderung: bei Übertrocknung starker Anstieg 30...50 °C lineare Abnahme L, C* dann starke Abnahme, ab 60 °C wieder leichter Anstieg, Endwert jedoch deutlich niedriger als bei niedrigen ϑ_L 60 °C führt zu starker Verfärbung, während Ölgehalt noch sehr hoch ist

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					<p>Kamille Trocknungsdauer t_{Tr}: ϑ_L: (30/40/60/90 °C): 52/19/1,6/0,5 h φ: Einfluss bei niedriger Temperatur größer als bei höherer 10/60 bei 60 °C Verdoppelung t_{Tr} von 1,9 auf 3,8 h, bei 45 °C Steigerung um 120 % von 5,5 auf 12 h v_L: deutlicher Einfluss auf t_{Tr} (0,1/0,4 m/s): 2,0/1,4 h ϑ-Verläufe: ϑ_P-Verlauf analog zu Salbei Verlust ätherische Öle: φ: konstant bis $\varphi=50$ % ca. 25 % Verlust, danach exp. Anstieg ϑ_L: keine klaren Tendenzen erkennbar, Zusammensetzung ändert sich jedoch mit ϑ_L Farbveränderung: verläuft analog zu Verlust an ätherischen Ölen gesonderte Betrachtung jeder Pflanzenart nötig, v.a. was Korrelation zwischen Farbe und anderen Qualitätsmerkmalen betrifft</p>
Nguyen & Price, 2007	Banane	K	OV	ϑ_L : 30...70 °C (10 K Stufen) v_L : 1 m/s ϑ_{TP} : 18,1 °C	Trocknungsdauer t_{Tr} (1 cm): ϑ_L (30/40/50/60/70): 100/42/31/22/11 h ± 1 h X_0 : bei 60 °C gleiche t_{Tr} bei unterschiedlichen X_0 , höhere X_0 resultieren in höheren dX/dt , höhere ϑ_L unterstützt zusätzlich praktisch unabhängig von Reifegrad OV bei dünnen Scheiben schneller als bei dicken, wird auf erhöhte dX/dt am Anfang zurückgeführt
Piotrowski & Lenart, 1998	Apfel	K (konst, var)	Strategie auf TK und ϑ_P	ϑ_L : 50, 70, 90 °C ± 20 °C v_L : 0,7/1,5/3 m/s $\pm 0,8/1,5$ m/s	Trocknungsdauer t_{Tr} (50/90), (0,7/1,5/3): 6/3 h; ϑ-Verläufe: ϑ_L : Absenkung sehr schnelle Anpassung ϑ_P und ϑ_I

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
				10 mm Würfel	<p>klar abgrenzbare Phasen der ϑ-Entwicklung (analog zu eigenen Ergebnissen), Änderung der Geschwindigkeit des ϑ-Anstiegs bei $X=1,5 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ für 70 °C und 90 °C bei $\vartheta_L=70 \text{ °C}$ $\vartheta_{P,Ende}=68 \text{ °C}$ v_L: ϑ Verläufe überlappen fast, kein Einfluss als $f(X)$ Absenkung führt zu Abnahme ϑ_P und ϑ_I über lange Zeit ϑ_P und ϑ_I deutlich niedriger als ϑ_L</p> <p>Trocknungskinetik: stufenweise Änderung Trocknungsbedingungen hat Einfluss $X=1,5 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ Grenze für Veränderungen <i>Step Change</i> an dieser Stelle v_L hat starken Einfluss auf Trocknungsrate im ersten Abschnitt</p> <p>Regelungsstrategien: Mehrstufige Variation ϑ_L und/oder v_L</p>
Pott et al., 2005	Mango	K	Farbe Hygiene	ϑ_L : 30, 45, 60, 75, 90 °C v_L : 0,5/1,0/1,5 m/s ϑ_{TP} : 15, 20, 25 °C	<p>Trocknungsdauer t_{Tr}: 6 statt 9 h</p> <p>Farbveränderung: Reduktion Farbveränderungen durch verkürzte t_{Tr} keine Vorbehandlung nötig um gewünschte Farbqualität zu erreichen</p>
Prothon et al., 2003		K G	SV WB		<p>Detaillierte Beschreibung der chemischen und physikalischen Veränderungen in der Zellstruktur während der Trocknung Zellkollaps kann als irreversible Reduktion des Volumens betrachtet werden, verursacht durch Verarbeitung, Vorbereitung und/oder Lagerung SV Folge des Wasserverlustes, Wasser durch Zellwände und Interzellulare nach außen transportiert Dadurch Kollaps der Zellwände und konsequenterweise der Interzellularen</p>

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					zur Verhinderung des zellulären Kollapses z.B. G, dann gibt es jedoch andere Formen des Kollapses, Texturkollaps bei WB
Ratti, 1994	Apfel Karotte Kartoffel	K EZ, FB	SV	ϑ_L : 40, 50, 60 °C v_L : 1...5 m/s φ : 5...50 %	Volumenschrumpfung SV: v_L : Haupteinflussfaktor Erhöhung führt zur Verminderung der SV Einfluss der restlichen Faktoren vernachlässigbar niedriges v_L führt zu gleichmäßiger SV, da innere Spannungen aufgrund der flachen Feuchteprofile, minimal, Versteifung der OFL erst gegen Ende der Trocknung bei hohen v_L kontrolliert der innere Widerstand die Transportvorgänge, v.a. bei niedrigen X, die Oberfläche ist trockener als das Innere des Gutes, was zu einer ungleichmäßigen Schrumpfung führt bei hohen v_L führt der sehr niedrige X an der OFL schon zu Beginn des Prozesses zu einer Versteifung der OFL, welche die SV reduziert Änderungen Verhältnis A/V praktisch unabhängig von Prozesseinstellungen, abhängig von Geometrie des Körpers und Produkt
Resnik & Chiriffe, 1979	Apfel	K	Opt. Dichte: Indikator für HMF		Aufkonzentrieren löslicher Inhaltstoffe, thermische Schädigung, Umsetzung von Fruchtzuckern in HMF, katalysiert durch Fruchtsäuren
Santos & Silva, 2008	Apfel, Tomate, Mango, Feige Paprika	K IR	Vit. C D _s	Tomate ϑ_L : 42...110 °C Paprika ϑ_L : 55...75°C φ : 15...40 %	Vit. C-Verlust: abhängig von: pH, Temperatur, Lichteinwirkung, Gegenwart von Enzymen, Sauerstoff, metallische Katalysatoren, a_w aerobe oder anaerobe Zersetzung Struktur des Produktes spielt wichtige Rolle Trocknung: abhängig von φ , ϑ , t zu Beginn des Prozesses Effekte X dominant, später ϑ_L : Erhöhung bewirkt verstärkten Verlust

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
					<p>Kiwi (K): ϑ_L: 40/70 °C Erhöhung Verlustes um Faktor 3</p> <p>Tomate (K): halbiert: ϑ_L 80/110 °C, bei W 46 % 62/100 % Verlust Scheiben: ϑ_L 42 °C 23 % W 89 % erhalten mit zunehmender t_{Tr} Abnahme des Erhalts</p> <p>Paprika (K): φ: Einfluss bis ϑ_L 60 °C nicht signifikant, oberhalb führt Erhöhung zu Reduktion des Vit C Erhalts, eine möglichen Erklärung ist die verlängerte t_{Tr} variables ϑ_L führt zu Erhöhung des Erhalts schneiden und daraus resultierende Verkürzung der t_{Tr} bietet Möglichkeit Vit. C Erhalt zu erhöhen</p> <p>Zwiebeln (Kontaktrocknung): je dicker die Scheiben, desto geringer Vit. C Erhalt, klare Beziehung zu t_{Tr}</p> <p>Kartoffel (K/IR): höherer Verlust bei IR als bei K, Mikrostruktur beschädigt und/oder zerstört</p> <p>Apfel (K/IR): Verluste durch Strahlung vergrößert, Strahlungsdichte und Scheibendicke starken Einfluss, bei K: Einfluss ϑ_L und Dicke nicht signifikant</p> <p>Vergleich K, G: 90 % Erhalt bei G, 50 % bei K, generell unabhängig vom Produkt G bessere Ergebnisse als K</p> <p>Prozessschritte: Einflüsse der Vorbereitung, wichtig jeden Prozessschritt gesondert zu betrachten und Einfluss bestimmen</p>
Schultz et al., 2007	Apfel, Tomate, Mango, Feige	K stufenweise	TK ρ_{ap} SV	ϑ_L : 60, 70, 80 °C 120-60 °C 120-80 °C 140-80 °C	Trocknungsdauer t_{Tr}: (80/120-80/140-80): 1,6/1,1/0,9 h 3 Phasen der abnehmenden Trocknungsgeschwindigkeit nach Aufwärmphase

Autor	Gut	Verfahren	Merkmal	Einstellungen	Ergebnisse
				v_L : 1, 3, 6 m/s	Einfluss stufenweise Änderung: ρ nimmt mit ϑ_L ab und mit v_L zu bei 120-60 und 120-80 °C identische dX/dt ab $X/X_0=0,3 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$ 120-60 höheres dX/dt als 80 °C bis X_E bei einstufiger Trocknung keine Aussage über ρ , v_L und ϑ möglich
Srikiatden & Roberts, 2005	Apfel	K (stationär) K u MW (isotherm)	ϑ_P	ϑ_L : 40...70 °C v_L : 1,5, 3 m/s MW: 200...1750 W	Wärmeübertragung bei isothermer Trocknung limitierender Faktor, nicht interne Vorgänge, deshalb Fick'sches Modell nicht gültig Verlauf ϑ_L , ϑ_P vergleichbar mit eigenen Ergebnissen, v.a. auch die zusätzliche <i>falling rate</i> ϑ_L
Vega-Galvez et al, 2009	Rote Paprika	K	Vit. C TCD WB Physikalisch chemische Eigenschaften	ϑ_L : 50...90 °C v_L : 2 m/s	Vit. C (frisch 188,2 g): 84 % Verlust bei 50 °C 98,2 % Verlust bei 90 °C stark temperaturabhängig Wiederbefeuchtungsverhalten WB: nimmt mit steigendem ϑ_L ab (4,7...4,2 g/g) Farbveränderung: TCD (5,78...7,79) ϑ hat negativen Einfluss auf Fruchtfestigkeit
Velic et al., 2004	Apfel	K	v_L WB ϑ_P	ϑ_L : 60 °C v_L : 0,64...2,75 m/s φ : 9 %	Trocknungsdauer t_{Tr}: 245...145 min Einfluss Steigerung v_L: schnellerer Anstieg ϑ_P höheres dX/dt bis X ca. 0,3 g_W/g_{TS} α steigt fast proportional zur steigendem v_L keine klaren Abhängigkeiten des WB von v_L Knickpunkte erkennbar bei $X=1 \text{ g}_W/\text{g}_{TS}$

