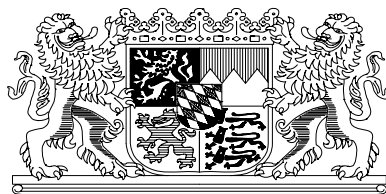


TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Modellierung und experimentelle
Überprüfung einer Pilotanlage zur
solaren Holz Trocknung

Stephan Benkert

Januar 1995



TECHNISCHE UNIVERSITÄT

MÜNCHEN

Diplomarbeit

Thema:

Modellierung und
experimentelle Überprüfung einer
Pilotanlage zur solaren Holztrocknung

Verfasser: Stephan Benkert, Januar 1995

Betreuer: Prof. Dr. H. Schön
Institut für Landtechnik Weihenstephan

Prof. Dr. F. E. Wagner
Physik-Department E 15 Garching

Danksagung

Für die Ermöglichung und Betreuung dieser Diplomarbeit bedanke ich mich bei Manfred Reuß, Prof. Dr. H. Schön und Prof. Dr. F. E. Wagner.

Für fachliche Hilfe, viele gute Tips und nette Gespräche bedanke ich mich außerdem bei:

- ▶ den übrigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Landtechnik Weihenstephan;
- ▶ den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Universidad Nacional del Nordeste in Resistencia, Argentinien, besonders bei Prof. Ing. A. Aeberhard, Noemi Sogari und Pablo Martina;
- ▶ Dr. G. Böhner und L. Wagner vom Holzforschungsinstitut der LMU München.

Für die ständige Unterstützung und vielfältige Hilfe bedanke ich mich schließlich auch bei:

- ▶ meiner Familie;
- ▶ meinen Freundinnen und Freunden.

Calvin and Hobbes

Bill Watterson, *Calvin and Hobbes*



Bill Watterson, *Calvin and Hobbes*

**One thing I have learned in a long life:
that all our science, measured against reality,
is primitive and childlike -
and yet it is the most precious thing we have.**

Albert Einstein

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Systembetrachtungen	
1.1 Systemdenken	3
1.2 Systemuntersuchung durch Modellierung	4
1.3 Modellierung - pro und contra	7
1.4 Modellierung mit TRNSYS	9
2 Holztrocknung als physikalischer Prozeß	
2.1 Feuchtebindung in Holz	13
2.2 Trocknungsabschnitte	14
2.3 Sorptionsisothermen	16
2.4 Stoff- und Wärmeübergang an Oberflächen	18
2.5 Stoff- und Wärmetransport in Holz	25
3 Modellierung der Holztrocknung	
3.1 Prinzip der Modellierung	31
3.2 Aufbau der TRNSYS Komponente "Holztrocknung"	34
3.3 Einbindung in ein TRNSYS Deck	41
3.4 Informationsflußdiagramm	45

4 Holztrocknung als industrieller Vorgang

4.1	Gründe für die Holztrocknung	47
4.2	Verfahren der Holztrocknung	47
4.3	Einflüsse von Holzart und Stapelung	51
4.4	Qualität der Trocknung	53
4.5	Planung von Trocknungsanlagen	53
4.6	Solare Aufwindtrocknung in Resistencia, Argentinien	55

5 Modellierung der Pilotanlage in Resistencia

5.1	Systemanalyse und Modellaufbau	57
5.2	Beschreibung der Systemkomponenten	59
5.3	Verknüpfung der Komponenten im TRNSYS Deck	63
5.4	Vergleich von System und Modell	65

6 Validierung des erstellten Modells

6.1	Genauigkeit der Modellierung	69
6.2	Überprüfung allgemeiner Voraussagen	74
6.3	Versuche in der Klimakammer	76
6.4	Trocknungsläufe in Resistencia	84

7 Anwendung des Modells

7.1	Systemoptimierung und Anlagenplanung	99
7.2	Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen	101
7.3	Steuerung von Trocknungsläufen	102
7.4	Untersuchung weiterer Trocknungsvorgänge	103

	Zusammenfassung und Ausblick	105
--	-------------------------------------	-----

Anhang A FORTRAN Quellcode

A.1	TYPE 61 "Holztrocknung"	111
A.2	TYPE 91 "Aufwindkamin"	122

Anhang B TRNSYS Decks

B.1	Konfiguration der Komponenten	127
B.2	Freilufttrocknung	138
B.3	Klimakammerversuche	141
B.4	Trocknungsläufe in Resistencia	144

Anhang C Material- und Anlagenwerte

C.1	Sorptionsisothermen	153
C.2	Feuchteleitwerte	155
C.3	Sonstige Materialwerte	157
C.4	Werte der Trocknungsanlage in Resistencia	158

Anhang D Simulation mit TRNSYS am PC 161**Anhang E Bilder** 165**Literaturverzeichnis** 179

Abbildungsverzeichnis

1.1	System, Umgebung und Rest der Welt	4
1.2	Prozeß der Modellierung	6
1.3	TRNSYS Hierarchie	10
2.1	Kapillare Feuchtigkeitsbewegung in Holz bei der Trocknung	15
2.2	Trocknungsabschnitte und Trocknungsgeschwindigkeit	16
2.3	Sorptionsisothermen für Holz	17
2.4	Dampfdruckverlauf an einer trocknenden Oberfläche	18
2.5	Temperaturverlauf an einer trocknenden Oberfläche	19
2.6	Spezifische Bindungswärme für Wasser in Holz	20
2.7	Abmessungen im Holzstapel	21
2.8	Feuchtetransportmechanismen in porösen Materialien	25
2.9	Feuchteleitwert für Buchenholz	26
2.10	Durchlässigkeitswerte für Wasserdampfdiffusion	27
2.11	Temperaturverteilung im Holzbrett	29
3.1	Stoff- und Wärmeübergang zwischen Luftstrom und Holzstapel	31
3.2	Vom Holzstapel zum Rechenmodell	33
3.3	Aufbau des TRNSYS Moduls "Holztrocknung"	35
3.4	Informationsflußdiagramm	45
4.1	Stapelarten der Freilufttrocknung	48
4.2	Holztrocknungsanlage	49
4.3	Zeichnung der solaren Holztrocknungsanlage in Resistencia	54
4.4	Lage von Resistencia	55
5.1	Das System "Solare Holztrocknung mit natürlicher Konvektion"	57
5.2	Wechselwirkungen des Systems	58
5.3	Aufbau des TRNSYS Decks	59
5.4	Feuchteverteilung in Fichtenbrettern vor der Trocknung	67

6.1	Simulation des Trocknungsverlaufs mit variiertem Feuchteleitwert	70
6.2	Schema des Holzstapels zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten im konventionellen Trockner	71
6.3	Schema des Holzstapels zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten im Solartrockner	72
6.4	Simulation des Trocknungsverlaufs mit variiertem Luftgeschwindigkeit	73
6.5	Simulation der Trocknungsperioden	75
6.6	Simulation des Temperaturverhaltens bei der Holz Trocknung	77
6.7	Simulation der Trocknungsprofile der Versuche V7W und V9W	79
6.8	Simulation der Trocknungsverläufe der Versuche V7W und V9W	80
6.9	Simulation der Trocknungsgeschwindigkeiten der Versuche V7W und V9W	81
6.10	Simulation des Trocknungsverlaufs des Versuchs S3	83
6.11	Simulation des Temperaturverhaltens des Versuchs S3	83
6.12	Lage der Meßpunkte in der Holz Trocknungsanlage in Resistencia	85
6.13	Wirkungsgradkurven des Tunnelkollektors	87
6.14	Simulation der Kollektorausgangstemperatur	88
6.15	Trocknungsverlauf im ersten Trocknungsversuch in Resistencia	90
6.16	Simulation des Trocknungsverlaufs	90
6.17	Simulierte Feuchteprofile des ersten Trocknungslaufs in Resistencia	92
6.18	Simulation der Lufttemperatur nach dem Stapel	93
6.19	Simulation der Luftfeuchte nach dem Stapel	95
6.20	Simulation der Luftgeschwindigkeit in der Trocknungskammer	95
6.21	Trocknungsverlauf im zweiten Trocknungsversuch in Resistencia	97
7.1	Simulation der Kollektorausgangstemperatur für unterschiedliche Kollektorlängen	100

C.1	(Genäherte) Sorptionsisothermen für Fichte	154
C.2	(Genäherte) Summierte Feuchteleitwerte für Fichte	156
E.1	Einfache solare Holztrocknungsanlage (CITEMA, Santiago del Estero, Argentinien)	167
E.2	Solare Holztrocknungsanlage mit Zwangskonvektion (G.I.T.E.A., Resistencia, Argentinien)	169
E.3	Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion (G.I.D.E.R., Resistencia, Argentinien)	171
E.4	Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Übergang vom Tunnelkollektor zur Trocknungskammer	171
E.5	Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick auf das Gelände	173
E.6	Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick vom Kamin auf den Tunnelkollektor	173
E.7	Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick in die Trocknungskammer	175
E.8	Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick in den Tunnelkollektor	175
E.9	Traditionelle Holzverarbeitung in einem für die Provinz Chaco typischen kleinen Sägewerk	177

Tabellenverzeichnis

4.1	Höchsttemperaturen einiger Hölzer für die Trocknung	51
4.2	Typische Trocknungsschäden	52
6.1	Strömungsgeschwindigkeiten im konventionellen Holztrockner	71
6.2	Strömungsgeschwindigkeiten im Solartrockner	72
6.3	Simulation der Trocknungsperioden	75
6.4	Simulation des Temperaturverhaltens bei der Holz Trocknung	77
6.5	Simulation der Trocknungsversuche V7W und V9W	79
6.6	Simulation des Trocknungsversuchs S3	82
6.7	Simulation des ersten Trocknungsversuchs in Resistencia	89
6.8	Simulation des zweiten Trocknungsversuchs in Resistencia	97
B.1	Systemkomponente Tunnelkollektor: TYPE 1 "Solarkollektoren"	127
B.2	Systemkomponente Trocknungskammer: TYPE 19 "Detaillierte Zone"	128
B.3	Systemkomponente Holzstapel: TYPE 61 "Holztrocknung"	131
B.4	Systemkomponente Kamin: TYPE 91 "Aufwindkamin"	133
B.5	Systemkomponente Regelung: TYPE 40 "Mikroprozessor-Steuerung"	134
B.6	Umgebung: TYPE 9 "Datenleser"	135
B.7	Berechnung der Sonnenstrahlung: TYPE 16 "Solarstrahlungsberechner"	136
C.1	Werte der Trocknungsanlage in Resistencia	158

Nomenklatur

A	Fläche	$[m^2]$
c_p	spezifische Wärmekapazität	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
d	Abmessung	$[m]$
d_h	hydraulischer Durchmesser	$[m]$
EMC	Gleichgewichtsfeuchtegehalt des Holzes	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$
f_a	charakteristische Größe der Stapelung	$[-]$
FSP	Fasersättigungspunkt des Holzes	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$
h	Höhe	$[m]$
h_{NN}	Höhe über Meeresspiegel	$[m]$
I	Sonneneinstrahlung	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
k	Rauhigkeit	$[m]$
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
L	spezifischer Luftdurchsatz	$\left[\frac{kg}{s \cdot Pa}\right]$
l	Länge	$[m]$
l_c	charakteristische Länge	$[m]$
Le	Lewiszahl	$[-]$
$\dot{m}$	Massenstrom	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
$\dot{m}_A$	flächenspezifischer Massenstrom	$\left[\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right]$
n	Anzahl	$[-]$
n	Brechungsindex	$[-]$
Nu	Nusseltzahl	$[-]$
p	Luftdruck / Partialdruck	$[Pa]$
Pr	Prandtlzahl	$[-]$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$[W]$
R	Gaskonstante	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
r	spezifische Verdampfungswärme	$\left[\frac{J}{kg}\right]$
r_b	spezifische Bindungswärme	$\left[\frac{J}{kg}\right]$
Re	Reynoldszahl	$[-]$

T	absolute Temperatur	$[K]$
t	Zeit	$[s]$
V	Volumen	$[m^3]$
w	Luftgeschwindigkeit	$\left[\frac{m}{s}\right]$
x	Feuchtegehalt des Holzes	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$
$\dot{x}$	Trocknungsrate des Holzes	$\left[\frac{kg}{kg \cdot s}\right]$
y	Feuchtegehalt der Luft	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$

Griechische Buchstaben:

α	Absorptionsgrad	$[-]$
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
β	Kollektorneigung	$[^\circ]$
β	Stoffübergangskoeffizient	$\left[\frac{m}{s}\right]$
Δ, δ	Differenz	
ζ	Widerstandsbeiwert bei turbulenter Strömung	$[-]$
η	dynamische Viskosität	$\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$
η	Kollektorwirkungsgrad	$[-]$
θ	Einfallswinkel der Sonnenstrahlung	$[^\circ]$
ϑ	relative Temperatur	$[^\circ C]$
κ	summierter Feuchteleitwert	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$
λ	Rohrreibungszahl	$[-]$
λ	Wärmeleitkoeffizient	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
ν	kinematische Viskosität	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$
ξ	Mischungsfaktor	$[-]$
ξ	Widerstandsbeiwert für Einzelkörper	$[-]$
ϱ	Dichte	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
ϱ	Reflexionsgrad	$[-]$
τ	Transmissionsgrad	$[-]$
φ	relative Feuchte	$[-]$
Ψ	Hohlraumanteil des Holzstapels	$[-]$

Indizes:

x, y, z	Raumrichtungen
0	Umgebung
Ka	Trocknungskammer
Kl	Frischluftklappen in der Trocknungskammer
Kn	Kamin
Ko	Tunnelkollektor
St	Holzstapel
D	Dampf
G	Trocknungsgut
H	Holz
L	Luft
W	Wasser
O	Oberfläche
S	Segment
f	Endwert
i	Anfangswert
m	momentaner oder Mittelwert
max	Maximalwert
min	Minimalwert
f	feucht
s	gesättigt
t	trocken
l	laminar
t	turbulent
diff	diffus
dir	direkt
hor	horizontal
tot	total

Einleitung

**Answers -
There must be some answers
Hiding in the shadows -
They may only need
Illumination.**

Timbuk 3

Holz ist seit Urzeiten ein ständiger Begleiter der Menschheit, sei es als Material für Werkzeuge, als Energieträger oder auch als Baumaterial. Vor allem als solches erlebt Holz in den letzten Jahren in Mitteleuropa eine Renaissance, da natürliche Produkte den in Verruf geratenen Kunststoffen vorgezogen werden. In den technisch weniger entwickelten Ländern der Welt hat Holz seine starke Bedeutung nie verloren, doch besteht gerade hier die akute Gefahr, daß aus unterschiedlichsten Gründen die natürlichen Wälder - als Quellen des nachwachsenden Rohstoffes Holz - durch kurzfristigen Raubbau zerstört werden.

Um die Ressource Wald möglichst schonend behandeln zu können, ist es wichtig, daß bei der Holznutzung hochwertige Produkte entstehen. Dies läßt sich nur erreichen, wenn das Holz vor der Bearbeitung getrocknet wird. Das geringere Gewicht des getrockneten Holzes verringert außerdem Transportkosten.

Gleichzeitig bietet sich in vielen holzverarbeitenden Regionen an, die Sonne als Energiequelle zu erschließen. Eine solare Unterstützung der Holz Trocknung wird selbst in Nordeuropa angedacht, eine im wesentlichen oder gar reine solare Trocknung kommt jedoch nur in äquatornahen, strahlungsreichen Gebieten in Frage.

Die Entscheidung, ob und in welchem Umfang Sonnenenergie genutzt werden kann, muß immer im Einzelfall getroffen werden. Neben den klimatischen Verhältnissen ist auch die Art der verwendeten Hölzer, die Infrastruktur des Holzbetriebs und die vorgesehene Weiterverarbeitung des Trocknungsguts

maßgebend, ob eine solare Holztrochnungsanlage rentabel ist. Das Trocknungsergebnis umfaßt sowohl den Durchsatz an Holz als auch die erreichte Qualität.

Bei der Vielzahl an Einflüssen, die hier eine Rolle spielen, wird schnell ersichtlich, daß keine einfache Regel gilt, die den Erfolg einer solaren Holztrochnungsanlage vorhersagt. Solch vielschichtige Probleme werden sinnvollerweise im Rahmen von Systemansätzen untersucht, das heißt, man erstellt ein Modell, das einzelne Teile eines größeren Komplexes und deren Zusammenspiel in vielen Situationen nachbildet. Aus diesen Einzelbildern erhält man dann wie im Mosaik ein Gesamtbild der Anlage.

Ziel dieser Diplomarbeit ist, eine solare Holztrochnungsanlage mit natürlicher Konvektion zu modellieren, um so vor allem zukünftige Projekte planen und auslegen zu können. Gleichzeitig soll das Modell aber auch während des Betriebs bestehender Anlagen bei der Regelung und bei der Abschätzung des Trocknungsverlaufs helfen.

Im Rahmen früherer Diplom- und Semesterarbeiten [20, 37] wurde in Resistencia in der Provinz Chaco in Nordargentinien eine solare Holztrochnungsanlage mit natürlicher Konvektion geplant und erstellt. Diese diente als Vorbild für die Modellierung, an ihr wurden auch Trocknungsversuche mit den dort einheimischen Hölzern durchgeführt.

1 Systembetrachtungen

1.1 Systemdenken

Im Zuge der Betrachtung stets komplexerer Zusammenhänge in der Natur stellte die Wissenschaft zu Beginn des 20. Jahrhunderts fest, daß sich einige Probleme mit den bisherigen Denk- und Arbeitsmethoden nicht lösen ließen. Das "alte" kartesianische¹ Weltbild stieß an seine Grenzen.

In diesem Bild ist es theoretisch möglich, jedes Ereignis vorherzusagen oder nachzuvollziehen, vorausgesetzt, daß zu einem beliebigen Zeitpunkt alle Einflußgrößen bekannt sind. Diese Bedingung ist - schon wegen Meßungenauigkeiten - nie voll erfüllbar, dennoch liefert das kartesianische Weltbild bei vielen Fragestellungen im wissenschaftlichen Alltag nützliche Ergebnisse, da komplexe Aufgaben sich meist in einfachere Teilaufgaben mit weniger Parametern zerlegen lassen.

Wohl am bekanntesten ist das Scheitern des kartesianischen Modells beim Versuch der Beschreibung von Atomstrukturen in der Physik. Hier ließ sich kein Weg im Rahmen der deterministischen Anschauung finden. Erst die Einführung der Quantenmechanik brachte einen Fortgang der Forschung. Die Quantenmechanik ist mittlerweile allgemein akzeptiert und führt zu neuen Erkenntnissen bei der Untersuchung kleinster Strukturen, sie gibt aber weiterhin Rätsel auf. Der Grund für das Versagen des kartesianischen Weltbilds liegt darin, daß die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen, klassisch beschreibbaren Teilchen im Atom durch das Modell nur unzulänglich berücksichtigt werden. Das Ganze verhält sich anders als die Summe seiner Teile.

Dies ist genau das Charakteristikum von Systemen im heute gebräuchlichen Sinne [9, 38]: Systeme bestehen aus mehreren Komponenten, die durch ihre Wechselwirkung das Verhalten des Systems bestimmen. Ein System ist funktionell unteilbar, das Nichtberücksichtigen eines Systemteils führt zwingend auch zu einer unvollständigen Beschreibung des Restsystems.

¹ nach René Descartes, französischer Naturwissenschaftler und Philosoph (* 1596 † 1650)

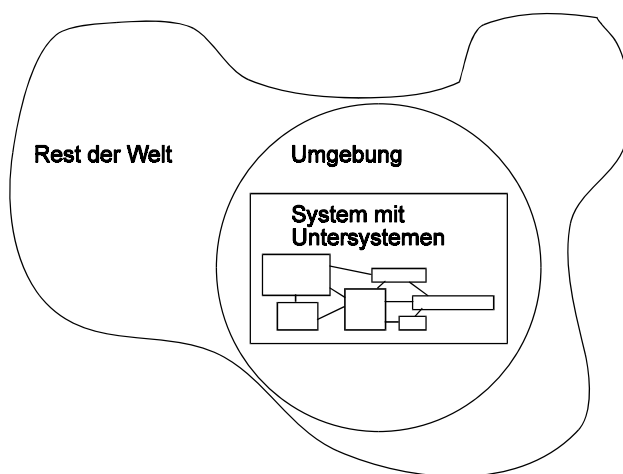
Wichtig für die Beschreibung von Systemen sind demzufolge neben deren Strukturen vor allem die Vorgänge im System [9]. Während für die "klassische" Betrachtungsweise Form und (Kausal-) Zusammenhänge des untersuchten Problems von Bedeutung sind, interessieren im Systembild mehr die Veränderungen und Wechselwirkungen im Rahmen eines Problems. Beide Vorgehensweisen ergänzen sich und schaffen so die Voraussetzung für ein tieferes Verständnis der vielschichtigen Vorgänge in Natur und Gesellschaft, die eben meist nicht so einfach zu beschreiben sind, wie sich die Wissenschaft das lange Zeit hindurch gewünscht hat.

Die Entwicklung einer Systemlehre erfolgte ab dem Ende des zweiten Weltkriegs [4, 9, 38]. Abgesehen von den philosophischen Aspekten, die die Kontroverse zwischen kartesianischem Weltbild und Systemdenken beinhaltet, ist insbesondere die Interdisziplinarität des Systembilds interessant. Obwohl die behandelte Materie in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen sehr unterschiedlich sein kann, bestehen im Bereich der Organisation von Strukturen oft Parallelen [9].

1.2 Systemuntersuchung durch Modellierung

Hauptaugenmerk bei der Untersuchung von Systemen ist die Suche nach den Systemgrenzen. Diese sind nicht eindeutig festgelegt und richten sich oft nach der Problemstellung. Man unterscheidet vom System die (System-) Umgebung und den "Rest der Welt" [4, 38]. Während die Umgebung einen mehr oder weniger großen Einfluß auf das Verhalten des Systems hat - und damit den Rahmen für

jede Systemuntersuchung bildet - ist der Einfluß des Rests der Welt vernachlässigbar. Das System läßt sich meist noch in Untersysteme aufteilen (siehe Abbildung 1.1).



Der zweite Schritt einer Systemanalyse ist das Erstellen des Wechselwirkungsschemas für die Beziehungen zwischen System und Umgebung und innerhalb des Systems. Ein mögliches Gliederungskriterium ist die Art des Austauschs zwischen

Abb. 1.1: System, Umgebung und Rest der Welt

zwei Komponenten. Zum Beispiel wird häufig der Fluß von Stoffen, Energie, Informationen oder Kapital untersucht. Andere Kriterien können die Reichweite oder die Stärke von Wechselwirkungen sein.

Betrachtet man Strömungsvorgänge, ist eine Bilanzierung entlang der Systemgrenzen unerlässlich. Insbesondere Stoffe und Energie können - leider im Gegensatz zu Informationen - nicht verschwinden, sie wandeln sich nur um.

Als nächstes wird versucht, die gegenseitigen Beeinflussungen der Elemente des Systems und der Umgebung sowie deren Austauschverhalten auf beobachtbare Vorgänge mit quantifizierbaren Größen zurückzuführen. Die notwendigerweise getroffenen Vereinfachungen müssen später auf ihre Zulässigkeit hin überprüft werden. Im System können Regelkreise bestehen, die durch positive Rückkopplung vermeintliche Mücken zu Elefanten machen...

Zusammen mit der Beschreibung des Verhaltens der einzelnen Systemteile ergibt sich schließlich ein erstes Modell. Je nach Ziel der Untersuchung werden nun gewisse Aspekte herausgegriffen. Diese sind einer algorithmischen Verarbeitung zugänglich zu machen, das heißt, einfache Formeln und Wirkungsketten müssen aufgestellt werden.

Bei der Erstellung eines Modells hat man sich stets vor Augen zu halten, daß jede Systemanalyse durch den Beobachter beeinflusst wird. Er hat, bewußt oder unbewußt, "Vorurteile" über das System - wenn er nicht sogar Teil des Systems ist und das Systemverhalten mitbestimmt.

Die Modellüberprüfung erfolgt in zwei Stufen. Zuerst wird festgestellt, ob das Modell in sich schlüssig ist. Dazu muß das Modell für alle Zustände anwendbar sein, die für das System auftreten können, es muß gleiche Ergebnisse für gleiche Ausgangsbedingungen reproduzieren und die Ergebnisse und Abläufe im Modell müssen physikalisch und logisch sinnvoll sein. Diese Stufe der Modellüberprüfung wird allgemein als Verifikation bezeichnet [38].

Nach einem zufriedenstellenden Abschluß der Verifikation kann die Übereinstimmung zwischen Modell und Wirklichkeit untersucht werden. Dies ist die sogenannte Validierung des Modells [38]. Anhand von Literaturwerten und eigenen Experimenten muß man entscheiden, ob Modellablauf und -ergebnisse akzeptabel sind, ob das Modell verfeinert - also verkompliziert - werden muß oder ob eine völlig neue Systemanalyse nötig ist. Eine vollkommene Übereinstimmung der Ergebnisse des Modells mit der Realität ist nicht erreichbar und nicht überprüfbar, im Idealfall ist die Abweichung des Modells vom Experiment nicht größer als die dort vorhandenen Ungenauigkeiten des Aufbaus, der verwendeten Materialien und der Messung.

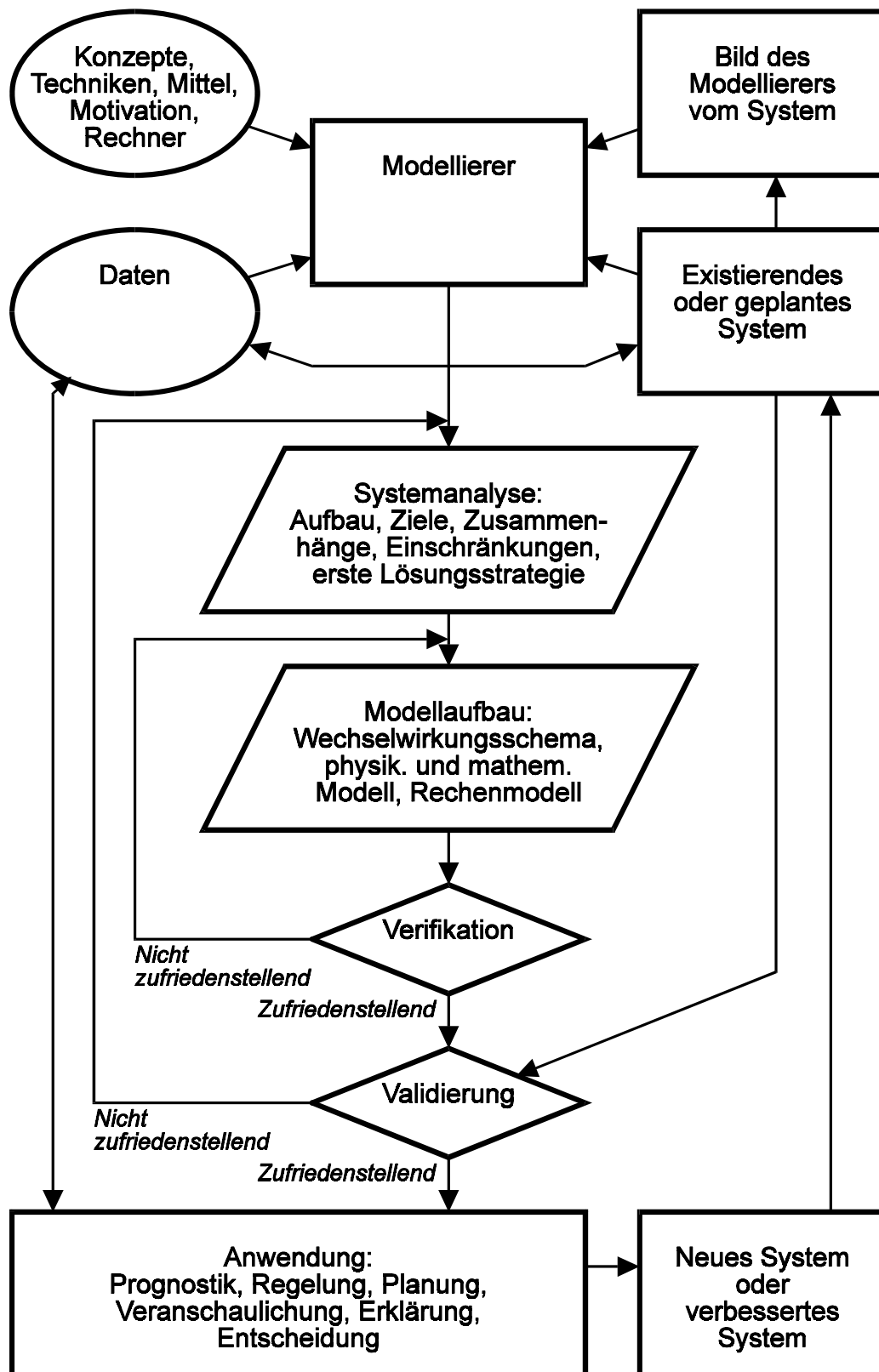


Abb. 1.2: Prozeß der Modellierung (nach Neelamkavil [38])

Nach Popper [40] kann eine These oder ein Modell nie bewiesen werden, nur widerlegt oder nicht widerlegt. Verifikation und Validierung eines Modells bedeuten also, daß dessen Anwendbarkeit für die untersuchten Aufgaben (noch) nicht widerlegt wurde. Je größer die Zahl der zufriedenstellend nachmodellierten Experimente ist, desto wahrscheinlicher gilt, daß das Modell allgemein angewendet werden kann.

Ist ein Modell schließlich akzeptiert, kann man mit seiner Anwendung beginnen. Möglich ist die Planung und Auslegung neuer Systeme, die Entwicklung von Regelstrategien zum Betrieb bestehender Systeme und nicht zuletzt die Darstellung von unzugänglichen oder schwer verständlichen Vorgängen. Die Anwendung des Modells zur Bestimmung des Systemverhaltens heißt Simulation.²

Abbildung 1.2 zeigt den Prozeß der Systemuntersuchung und Modellierung als Flußbild.

1.3 Modellierung - pro und contra

Ob die Modellierung zur Untersuchung eines Systems sinnvoll ist, ist immer im Einzelfall zu entscheiden. Einfacher ist es, wenn sich das Verhalten des Systems direkt bestimmen läßt. Meist ist auch die Genauigkeit einer analytischen Problemlösung größer als die einer Modellierung.

Neelamkavil [38] beschreibt die Anwendungsbereiche der Modellierung wie folgt:

Simulation ist ein langsames, iteratives, experimentelles Problemlösungsverfahren. Manchmal bezeichnet man es als die Methode des letzten Auswegs. Man sollte ein Problem nur mittels Simulation lösen, wenn

- (a) das wirkliche System nicht existiert und es teuer, zeitraubend, gefährlich oder unmöglich ist, Prototypen zu errichten und mit ihnen zu experimentieren (neuer Entwurf eines Rechners, einer Solaranlage, eines Kernreaktors).
- (b) das Experimentieren mit dem wirklichen System teuer oder gefährlich ist oder wahrscheinlich zu ernsten Beeinträchtigungen führt (Verkehrssystem, Kernreaktor, Fabrikationsanlage).
- (c) es notwendig ist, das bisherige, jetzige oder zukünftige Verhalten eines Systems in Echtzeit, Zeitlupe oder Zeitraffer zu untersuchen (Echtzeitsteuersysteme, Zeitlupestudien, Bevölkerungswachstum, Nebenwirkungen neuer Medikamente).
- (d) die mathematische Nachbildung eines Systems unmöglich ist (Ölförderung, Weltwirtschaft, internationale Konflikte, Rechnernetze).

² Manchmal wird mit Simulation auch der gesamte Modellierungsprozeß bezeichnet.

- (e) mathematische Modelle keine einfachen oder brauchbaren analytischen oder numerischen Lösungen bieten (nichtlineare Differentialgleichungen, stochastische Probleme).
- (f) die zufriedenstellende Validierung von Simulationsmodellen und -ergebnissen möglich ist.
- (g) die erwartete Genauigkeit (Ergebnisse können nicht besser als Eingangswerte sein) der Simulationsergebnisse mit den Erfordernissen des behandelten Problems übereinstimmt (die Genauigkeit der Bestrahlungsdosis zur Krebsbehandlung ist entscheidend verglichen mit Vorhersagen über die Welt-Tigerpopulationen).³

Zu den Grenzen der Modellierung meint er:

[Simulation ist]

- (a) weder eine Wissenschaft noch eine Kunst, sondern eine Kombination aus beidem.
- (b) die Methode des letzten Auswegs.
- (c) ein iteratives, experimentelles Problemlösungsverfahren.
- (d) teuer in Bezug auf Arbeitsstunden und Rechenzeit.

[Sie]

- (e) liefert im allgemeinen teilloptimierte Lösungen.
- (f) ist schwierig zu validieren.
- (g) erfordert eine gute Kenntnis von Wahrscheinlichkeiten und Statistik für die Sammlung, Auswertung und Beurteilung von Ergebnissen.
- (h) führt zu Ergebnissen, die leicht fehlinterpretiert werden, Fehlerquellen sind schwer zu finden.
- (i) [hat es] schwer, andere zu überzeugen.⁴

Allgemein gilt, daß die Problemlösung durch Modellierung umso vorteilhafter ist, je größer und unübersichtlicher ein System ist. Bereits während der Modellierung gewinnt man durch die notwendige genaue Systemanalyse Erkenntnisse über Zusammenhänge, die kaum untersucht werden, wenn man nur das Verhalten des Systems als ganzes betrachtet. Aufgrund der Untersuchung der Strukturen und ihrer Wechselwirkungen im System besteht die Chance, Parallelen zu eventuell bereits gelösten Problemen - auch in anderen Wissensbereichen - zu entdecken.

Die solare Holztrocknung mit natürlicher Konvektion eignet sich aufgrund ihrer vielfältigen Wechselwirkungen, der kaum analytisch lösbaren Mathematik, der Kosten für die Erstellung eines Prototyps und der Wetterabhängigkeit besonders gut für eine Systemuntersuchung durch Modellierung der Anlage.

³ F. Neelamkavil [38], p. 12, Übers. v. Verf.

⁴ F. Neelamkavil [38], pp. 12...13, Übers. v. Verf.

1.4 Modellierung mit TRNSYS

TRNSYS - A Transient System Simulation Program - wurde in den 1960er- und '70er-Jahren im Solar Energy Laboratory der University of Wisconsin-Madison, USA, entwickelt [25]. Es wird weltweit vor allem zur Auslegung von Solaranlagen zur Brauchwassererwärmung und Gebäudeheizung eingesetzt.

Ein wesentliches Charakteristikum des Programms ist seine modulare Struktur. So wie sich ein System aus Untersystemen zusammensetzt, besteht ein TRNSYS-Modell aus mehreren Komponenten. Die zwischen den Untersystemen fließenden Stoff-, Energie- und Informationsströme werden durch Informationsflüsse in TRNSYS nachgebildet. Wechselwirkungen des Systems mit seiner Umgebung werden durch spezielle Ein- und Ausgabekomponenten in das Modell übertragen.

Dieser flexible Aufbau ist der Hauptgrund, warum TRNSYS einen breiten Anwenderkreis gefunden hat. Um neue Modelle zu erstellen, genügt es häufig, bei bestehenden Modellen einzelne Komponenten auszutauschen oder anzupassen. Die Basisprogrammiersprache für TRNSYS ist zudem FORTRAN, das ebenfalls weit verbreitet und leicht zu lernen ist, so daß eigene Komponenten relativ einfach den vorhandenen hinzugefügt werden können, wie dies in dieser Arbeit auch geschah.

Die Modellierung mit TRNSYS erfolgt zunächst wie unter "1.2 Systemuntersuchung durch Modellierung" beschrieben. Zuerst muß untersucht werden, wie sich das zu modellierende System in Untersysteme gliedert und wo die Grenzen zwischen System und Umgebung liegen. Anschließend werden die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilen analysiert und möglichst in quantifizierbaren Größen dargestellt. Nun muß die Struktur des Systems in ein TRNSYS Informationsflußdiagramm übertragen werden. Die Aufteilung des Systems in Untersysteme sollte so genau sein, daß möglichst jedes Untersystem einer schon vorhandenen TRNSYS Komponente, einem "Type", entspricht. Typische Komponenten sind zum Beispiel "Solarkollektor", "Wärmepumpe", "Gebäude" oder auch "Drossel" und "Thermostat" [25].

Die Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten werden im TRNSYS Deck festgelegt. Jede Verknüpfung zwischen den Untersystemen und mit der Umgebung wird hier angegeben. Außerdem bestimmt man hier zum Beispiel die während der Simulation unveränderten Rahmenbedingungen, Simulationsbeginn

und -dauer, sowie Parameter zum Ablauf der Simulation wie Toleranzen, Abbruchkriterien bei Fehlern und ähnliches.⁵

Zum Ausführen des Decks, also zum Durchführen einer Simulation, benötigt man noch die TRNSYS-Benutzeroberfläche TRNSHELL. Dort werden sämtliche TRNSYS-Routinen und die bei der Modellierung verwendeten Types auf FORTRAN-Ebene verknüpft. TRNSHELL ist der "Organismus" der Simulation.⁶

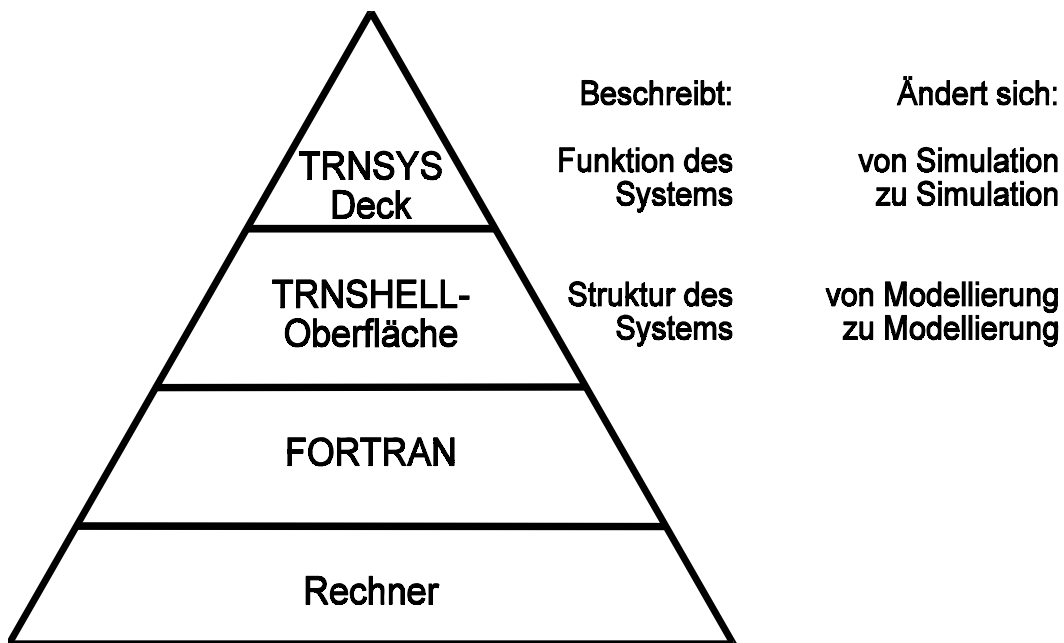


Abb. 1.3: TRNSYS Hierarchie

⁵ Das Erstellen eines TRNSYS Decks ist eine umfangreiche Aufgabe, die im Rahmen der Diplomarbeit nicht allgemein erklärt werden kann. Das TRNSYS Handbuch [25] beschreibt die notwendigen Schritte ausführlich und ist unabdingbar für die Arbeit mit TRNSYS. Das Erstellen des Decks für die Modellierung der solaren Holztrochnungsanlage in Resistencia ist in "5.3 Verknüpfung der Komponenten im TRNSYS Deck" beschrieben.

⁶ zur Installation von TRNSYS am PC siehe "Anhang D Simulation mit TRNSYS am PC"

Jedes Modell ist höchstens so gut, wie die Daten, mit denen es "gefüttert" wird. Gleichzeitig bleibt jede Simulation nutzlos, solange sie ihre Ergebnisse nicht ausgibt. In TRNSYS stehen deshalb vielfältige Möglichkeiten zur Datenein- und ausgabe bereit.

Welcher Weg zur Werteeingabe an das Simulationsprogramm gewählt wird, hängt im wesentlichen von der Menge der zu übergebenden Information ab. Sind nur wenige Werte auszutauschen, die sich möglicherweise von Simulation zu Simulation ändern, wird die Eingabe meist über das TRNSYS Deck erfolgen. Dort können sowohl *Parameter* angegeben werden, die während der Simulation konstant bleiben (zum Beispiel Abmessungen von Installationen oder Anfangswerte der Simulation), als auch *Inputs*, die sich jeden Simulationsschritt ändern können (zum Beispiel Raumtemperaturen).

Umfangreichere Eingabemengen werden in eigenen Dateien abgespeichert. Auch hier besteht die Möglichkeit, auf unveränderliche Tabellen (zum Beispiel Materialkonstanten) zurückzugreifen oder zeitveränderliche Daten (insbesondere Wetterwerte) einzulesen.

Die Ausgabe von Ergebnissen erfolgt auf drei Wegen. Zum einen protokolliert die Simulation den ordnungsgemäßen Verlauf - oder Fehlermeldungen - am Bildschirm, auf einen Drucker oder in eine Ausgabedatei. Gleichzeitig können hier einige Ergebnisse der Simulation mitprotokolliert werden.

Außerdem können eigene Ausgabedateien angelegt werden, in denen weitere Werte in regelmäßigen Abständen festgehalten werden. Dies kann zum Beispiel in Form von Tabellen oder Plots erfolgen.

Schließlich ist möglich, bis zu 20 Werte parallel zur Simulation graphisch am Bildschirm darzustellen, so daß der Verlauf der Simulation gut überprüfbar ist. Graphiken sind leichter erfaßbar als Zahlenwerte, was der Anschaulichkeit und Überzeugungskraft der Modellierung zugute kommt.

Hier kann nicht weiter auf die tatsächliche Form der Einbindung der Ein- und Ausgabeeinheiten in die Simulation mit TRNSYS eingegangen werden, dazu dient das TRNSYS Handbuch [25]. Es soll lediglich deutlich werden, daß es bei der Modellierung mit TRNSYS möglich ist, genau auf viele Einflüsse der Modellierung einzugehen und das Verhalten eines Systems bezüglich der unterschiedlichsten Aspekte zu untersuchen. "3.3 Einbindung in ein TRNSYS Deck" zeigt Möglichkeiten der Datenein- und -ausgabe anhand des Moduls "Holztrocknung".

2 Holztrocknung als physikalischer Prozeß¹

2.1 Feuchtebindung in Holz

Bei der Feuchtebindung in Festkörpern spielen unterschiedlichste physikalische und chemische Vorgänge eine Rolle. Grundsätzlich läßt sich hygroskopische und nichthygroskopische Feuchtebindung unterscheiden. Bei den meisten Materialien - so auch bei Holz - hängt die Art der Feuchtebindung von der Materialfeuchte, der Temperatur und dem Umgebungsdruck ab. Bei hohem Feuchtegehalt im Material herrscht nichthygroskopisches, bei niedrigem hygroskopisches Verhalten vor. Der Übergang ist fließend.

Bei der nichthygroskopischen Feuchtebindung ist keine Bindungsenthalpie zu überwinden, um die Feuchte aus dem Festkörper zu entfernen. Es findet demnach eigentlich keine *Feuchtebindung* statt, eher eine *Feuchteaufnahme*. An der Oberfläche des Festkörpers ist die Luft stets mit Dampf gesättigt. Durch stetiges Ersetzen der gesättigten Luft durch ungesättigte wird ein Feuchteentzug, also eine Trocknung des Festkörpers bis hin zu einem Feuchtegehalt $x = 0$ erreicht. Dabei muß der Flüssigkeit die nötige Verdampfungsenthalpie zugeführt werden. Die Trocknung führt zu einer Abkühlung des Festkörpers und der Luft. Eine Befeuchtung nichthygroskopischer Stoffe ist nur durch Kondensation von Feuchte aus übersättigter Luft oder durch direkte Zufuhr von Flüssigkeit möglich.

Bei hygroskopischer Feuchtebindung ist die Feuchte durch innere Kräfte an das Gut gebunden. Neben der Verdampfungsenthalpie muß Bindungsenthalpie² überwunden werden, um Feuchte zu entziehen. Dies führt dazu, daß auch im Austausch mit ungesättigter Luft der sich hygroskopisch verhaltende Festkörper

¹ gemäß [2, 27, 30, 34]

² Das Entstehen der Bindungsenthalpie beruht auf der Verminderung der Freiheitsgrade der Bewegung, die die Moleküle der Flüssigkeit bei der Einlagerung im Festkörper erfahren.

nicht vollständig trocknet. Zu jedem Luftzustand stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewichtszustand im Festkörper ein, der dem jeweiligen Dampfdruck an der Oberfläche entspricht.

Holz als organisches Material kann Feuchte - im allgemeinen Wasser - in drei Formen enthalten:

- ▶ als *freie* oder *kapillare Feuchte* in Hohlräumen (Kapillaren) zwischen den Zellen (nichthygroskopisches Verhalten);
- ▶ als *gebundene Feuchte* in den Zellwänden (hygroskopisches Verhalten);
- ▶ als *chemisch gebundene Feuchte* in den Zellen oder als Kristallwasser (stark hygroskopisches Verhalten).

Zusätzlich kann sich noch *haftende Feuchte* auf der Oberfläche des Holzes befinden. Diese zählt jedoch nicht zur vom Holz gebundenen Feuchte und wird beim Trocknen als erstes entfernt.

2.2 Trocknungsabschnitte

Abbildung 2.1 illustriert den Vorgang der Holztrocknung aus einem Zustand mit hohem Feuchtegehalt. Die Darstellung zeigt ein stark schematisiertes und vereinfachtes Holzgefüge.

Anfangs (Abb. 2.1 a) überwiegt der Einfluß der kapillaren Feuchte, alle Zellhohlräume sind vollständig mit Flüssigkeit gefüllt. Die Holztrocknung erfolgt nichthygroskopisch, da zur Verdampfung des Wassers keine Bindungsenthalpie überwunden werden muß. In die Hohlräume *a*, *b* und *c* verdunstet Feuchte aus den angrenzenden Zellwänden, bis dort die Gleichgewichtsfeuchte (siehe unten) erreicht ist und sich keine Flüssigkeit mehr in den äußersten Zellhohlräumen befindet. Damit ist der erste Trocknungsabschnitt beendet (Abb. 2.1 b).

Im zweiten Trocknungsabschnitt wird Wasser aus dem Holzinneren nach außen transportiert (Abb. 2.1 c), bis schließlich nur noch die Zellwände Feuchte enthalten. Diesen Zustand bezeichnet man als Fasersättigungspunkt (*FSP*), beziehungsweise besser als Fasersättigungsbereich. Da die Zellwände dem diffusiven und kapillaren Transport der Feuchte an die Holzoberfläche entgegenstehen, spielen hier die hygroskopischen Eigenschaften des Holzes bereits eine große Rolle.

abb. 45 s.102 Holzhandbuch

Abb. 2.1: Schematische Darstellung der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung in Holz bei der Trocknung (aus [27], nach L. F. Hawley [17])

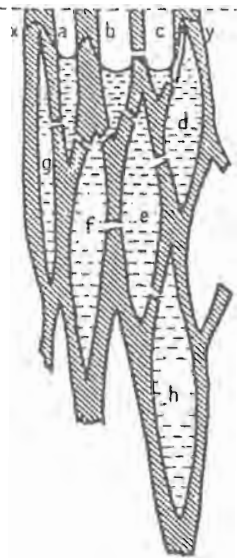
Ausschließlich hygroskopisch ist das Verhalten des Holzes im dritten Trocknungsabschnitt. Das in den Zellwänden verbliebene Wasser diffundiert nun aus dem Holzininneren an die Oberfläche, bis sich das gesamte Holz im Gleichgewicht mit der Umgebungsluft befindet.

Die chemisch gebundene Feuchte des Holzes läßt sich durch übliche, thermische Trocknungsverfahren nicht lösen.

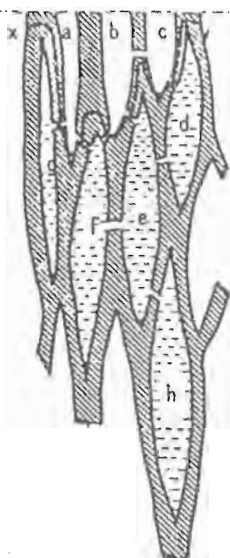
Das unterschiedliche Holzverhalten in den einzelnen Trocknungsabschnitten hat auch einen Einfluß auf die Trocknungsgeschwindigkeit (Abbildung 2.2, nächste Seite). Im ersten Trocknungsabschnitt ist die Trocknung unabhängig von der Holzfeuchte, so als würde ein freier Wasserspiegel bestehen. Die Trocknungsgeschwindigkeit ist konstant.

Im zweiten und dritten Abschnitt bestimmt der Feuchtetransport durch die Zellwände die Trocknung (siehe "2.5 Stoff- und Wärmetransport in Holz"). Die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt mit sinkender Holzfeuchte ab. Die Übergänge zwischen den Trocknungsabschnitten sind durch Knickpunkte gekennzeichnet (Abb. 2.2, E und F). Der Fasersättigungspunkt liegt am zweiten Knickpunkt zwischen dem zweiten und dritten Trocknungsabschnitt.

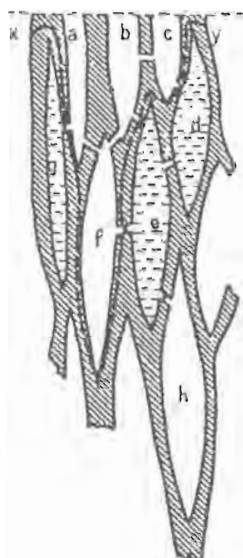
Schließlich nähert sich die Holzfeuchte asymptotisch der Gleichgewichtsfeuchte. Die Trocknung kommt zum Erliegen (Abb. 2.2, G).



a



b



c

Abb. 2.1: Schematische Darstellung der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung in Holz bei der Trocknung (aus [27], nach L. F. Hawley [17])

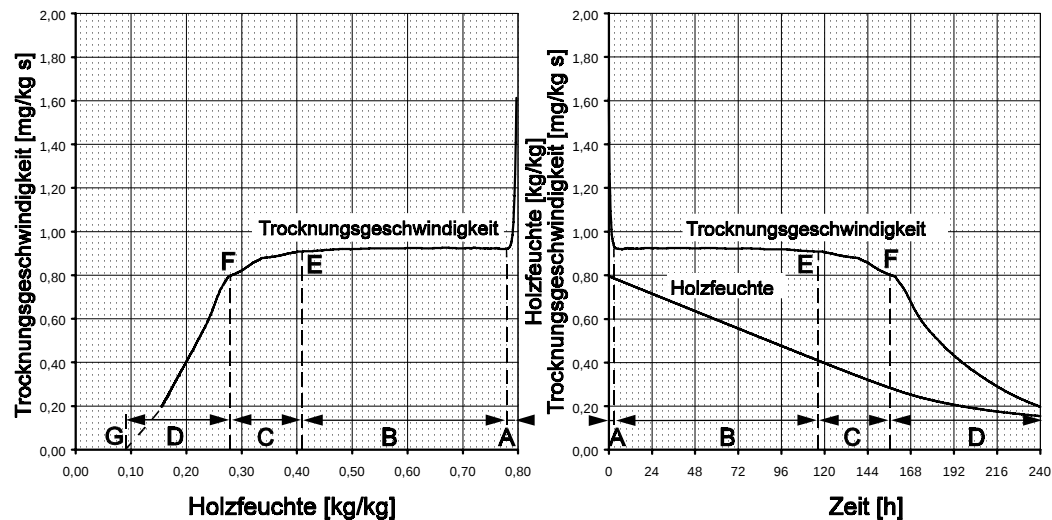


Abb. 2.2: Trocknungsabschnitte und Trocknungsgeschwindigkeit:

A: Abtrocknen haftender Feuchte; B, C, D: Erster bis dritter Trocknungsabschnitt; E: Erster Knickpunkt; F: Zweiter Knickpunkt (Fasersättigungspunkt); G: Gleichgewichtsfeuchte

2.3 Sorptionsisothermen

Die bereits erwähnte Gleichgewichtsfeuchte (englisch: Equilibrium Moisture Content, oder kurz: *EMC*) spielt eine herausragende Rolle bei der Trocknung. Sie gibt an, welche Feuchte sich im Trocknungsgut einstellt, wenn bei der gegenwärtigen Umgebungstemperatur und -luftfeuchte unendlich lang gewartet wird. Daraus läßt sich zum Beispiel für den Bau von Möbeln bestimmen, Holz welcher Feuchte verwendet werden muß, damit es später im klimatisierten Raum mit festen Umgebungsluftwerten nicht weiter "arbeitet" und das Möbel verzieht.

Doch nicht nur als Endfeuchte ist die Gleichgewichtsfeuchte wichtig. Bereits während der Trocknung ist der Quotient aus der momentanen Gutsfeuchte und der Gleichgewichtsfeuchte, das Trocknungsgefälle ($TG = x / EMC$), ein Maß für den Stoffübergang aus dem Trocknungsgut an die Trocknungsluft und damit von hoher Bedeutung für die Trocknungsgeschwindigkeit.

Die Bestimmung der Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchte von den Umgebungsbedingungen erfolgt in der Regel experimentell, da bis heute keine genügend genauen Modelle zur Feuchtebindung in Festkörpern - besonders in

Sorptionsisothermen, Krischer S. 53

Abb. 2.3: Sorptionsisothermen für Holz (aus [30], nach [17, 44, 46])

inhomogenen Festkörpern wie Holz - bestehen. In Sorptionsisothermen werden sämtliche Arten der Feuchtebindung zusammengefaßt. Hystereseeffekte - das Material verhält sich bei der Feuchteaufnahme anders als bei der Feuchteabgabe - werden meist nicht berücksichtigt.

In der neueren Literatur findet sich oft statt der relativen Feuchte der Umgebungsluft die Wasseraktivität als Bezugsgröße [2]. Sie beruht auf den Eigenschaften des realen statt des idealen Gases. Bei den in der Holztrocknung üblichen Temperaturen von unter 100 °C beträgt die Abweichung zwischen Wasseraktivität und relativer Luftfeuchte maximal 1,5 % [32].³ Sie ist also im Vergleich mit den Ungenauigkeiten der Sorptionsisothermen aufgrund der Inhomogenität des Holzes vernachlässigbar.

Abbildung 2.3 zeigt durchschnittliche Sorptionsisothermen für Holz. Bei einer relativen Luftfeuchte $\varphi = 50 \%$ und einer Lufttemperatur $\vartheta = 20 \text{ °C}$, bei typischen Raumluftbedingungen, ergibt sich im Holz die Gleichgewichtsfeuchte $EMC = 9 \%$ (dem eingezeichneten Pfeil folgend).

³ Lediglich bei der Hochtemperaturtrocknung von Nadel-schnittholz werden Temperaturen bis 130 °C verwendet. Das Verfahren ist aber selten und spielt im folgenden keine Rolle.

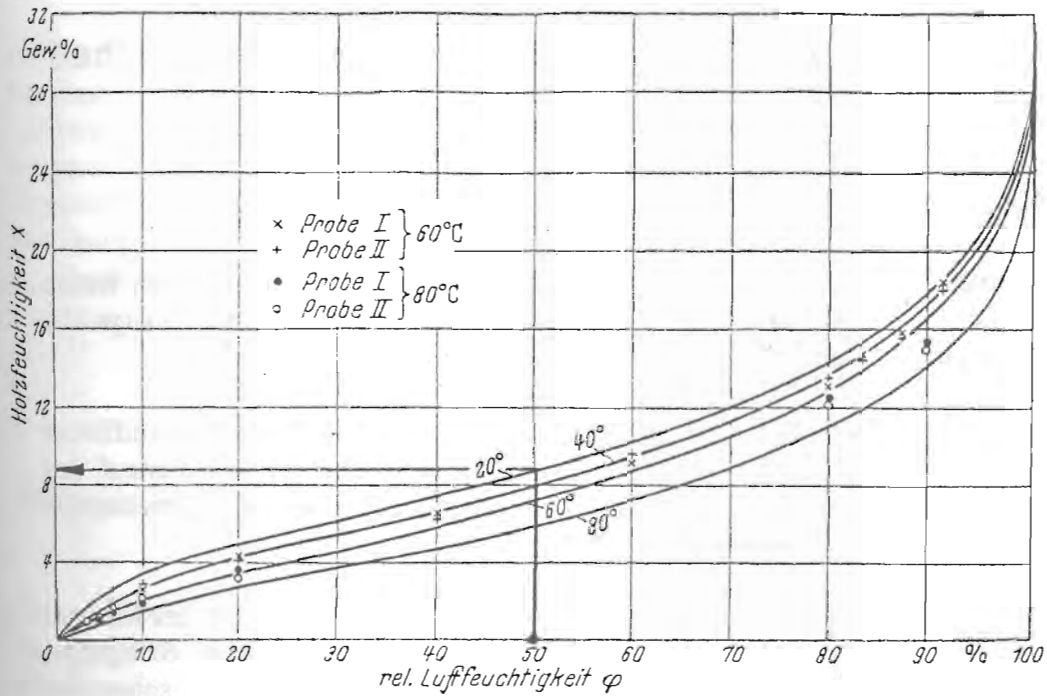


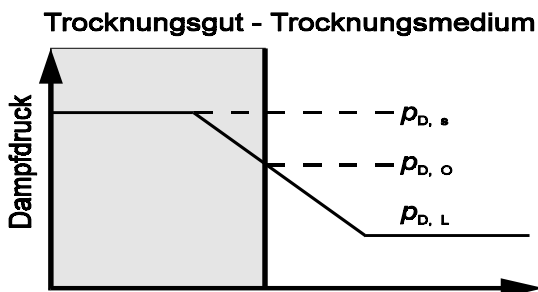
Abb. 2.3: Sorptionsisothermen für Holz (aus [30], nach [17, 44, 46])

2.4 Stoff- und Wärmeübergang an Oberflächen

Stoffübergang

Der Stoffübergang bei der Trocknung erfolgt im allgemeinen zwischen festem Gut und bewegter Luft. Interessant sind dabei vor allem die Menge der übergehenden Feuchte und die Veränderungen in Gut und Luft.

Als treibendes Potential des Stoffübergangs wirkt die Dampfdruckdifferenz zwischen Gut und Luft. Abbildung 2.4 zeigt den qualitativen Verlauf des Dampfdrucks an der Trocknungsfläche.



Im Inneren des Guts ist das Material gesättigt, es herrscht Sättigungsdampfdruck. Sorptionsisothermen verknüpfen Feuchten oberhalb des Fasersättigungspunkts mit der relativen Feuchte $\phi = 100\%$ (in Abb. 2.3 für Holzfeuchten $x > 28\%$).

Abb. 2.4: Dampfdruckverlauf an einer trocknenden Oberfläche

An der Oberfläche ergibt sich eine Dampfdruckabsenkung je nachdem,

wie stark hygroskopisch sich das Material verhält. Bei nichthygroskopischem Gut ist die Luft an der Oberfläche gesättigt (siehe "2.1 Feuchtebindung in Holz").

Die Einführung des Stoffübergangskoeffizienten β führt schließlich zu folgendem Ansatz für den Massenstrom:

$$\begin{aligned}\dot{m}_A &= \frac{\beta}{RT} (p_{D, o} - p_{D, L}) \\ &\approx \frac{\beta}{RT} p \ln \frac{p - p_{D, L}}{p - p_{D, o}}\end{aligned}$$

mit: $\dot{m}_A$ = flächenspezifischer Massenstrom [$\text{kg/m}^2 \text{ s}$]

β = Stoffübergangskoeffizient [m/s]

R = Gaskonstante [J/kg K]

T = Temperatur der Oberfläche [K]

p = Luftdruck [Pa]

$p_{D, o} - p_{D, L}$
= Dampfdruckdifferenz zwischen Oberfläche und Trocknungsluft [Pa]

Der Stoffübergangskoeffizient β wird aus dem Wärmeübergangskoeffizient α berechnet (siehe unten). Der Dampfdruck an der Gutoberfläche ergibt sich "rückwärts" aus den Sorptionsisothermen. Zum Beispiel folgt aus den Sorptionsisothermen aus Abbildung 2.3 für eine Holzfeuchte $x = 9\%$ bei einer Temperatur von 20 °C eine relative Luftfeuchte $\phi = 50\%$ an der Holzoberfläche. Der Dampfdruck ist dann $p_{D,o} = \phi \cdot p_{D,s}$. Werte für den Sättigungsdampfdruck $p_{D,s}$ lassen sich aus Tabellen entnehmen [31]. Im für die Holz Trocknung interessanten Temperaturbereich (etwa 10 °C bis 90 °C) gilt die Näherung:

$$p_{D,s} = 610,7 \cdot 10^{\left(\frac{7,5\vartheta}{237,7\text{ °C} + \vartheta}\right)} \text{ Pa} \quad (2.1)$$

mit: $p_{D,s}$ = Sättigungsdampfdruck [Pa]
 ϑ = Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Andere Tabellen geben direkt Gleichgewichtsfeuchten in Abhängigkeit von der psychrometrischen Differenz an [34] oder zeigen statt Sorptionsisothermen Linien gleicher Holzfeuchte im xy-Diagramm bezüglich relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur [27, 34].

Wärmeübergang

Bei der Trocknung fließt Wärme konvektiv und stoffgebunden direkt zwischen Trocknungsgut und Trocknungsmedium, zusätzlich steht das Gut im Strahlungsaustausch mit der näheren Umgebung. Die Wärme fließt immer von der Luft in das Gut, da dort das Lösen und die Verdampfung der Feuchte - wegen Bindungs- und Verdampfungsenthalpie - zur Abkühlung führen.

Abbildung 2.5 zeigt den an der Trocknungsfläche entstehenden Temperaturverlauf. Die Oberflächentemperatur erreicht bei der Trocknung ein Minimum, die Kühlgrenztemperatur, sobald sich ein Gleichgewicht des Stoff- und Wärmeübergangs eingestellt hat. Die Lage des Minimums der Temperatur im Materialinneren hängt vom Ort der höchsten Verdampfungsrates ab und verschiebt sich im Verlauf der Trocknung nach innen.

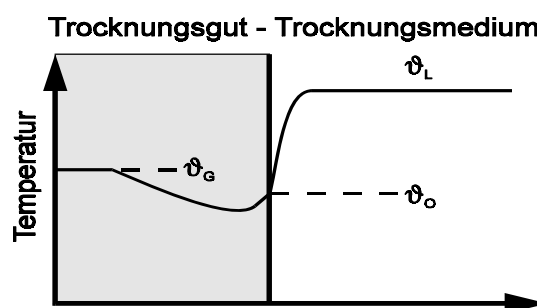


Abb. 2.5: Temperaturverlauf an einer trocknenden Oberfläche

Für den Wärmeübergang durch Konvektion gilt:

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T$$

mit: $\dot{Q}$ = Wärmefluß [W]
 α = Wärmeübergangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$]
 A = Wärmeübergangsfläche [m^2]
 ΔT = Temperaturdifferenz an der Trocknungsfläche [K]

Der Wärmeübergangskoeffizient α ist abhängig vom Zustand des Trocknungsmediums, der Gutoberfläche und der Strömung. Je turbulenter die Strömung, desto größer ist der Wärmefluß bei gleicher Temperaturdifferenz.

Zur Berechnung des stoffgebundenen Wärmeübergangs geht man davon aus, daß die Feuchte im Inneren des Trocknungskörpers verdampft und dann mit Oberflächentemperatur an die trocknende Luft übergeht. Für den Wärmefluß gilt dann:

$$\dot{Q} = c_{p,D} \dot{m} \vartheta_o$$

mit: $c_{p,D}$ = spezifische Wärmekapazität des übergehenden Dampfes [$\text{J}/\text{kg K}$]
 $\dot{m}$ = Massenstrom [kg/s]
 ϑ_o = Oberflächentemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Der Wärmeübergang durch Strahlung ist vernachlässigbar, da meist keine großen Temperaturunterschiede zwischen Trocknungsgut und Trocknerwänden bestehen.

Um Feuchte aus dem Festkörper zu entziehen, muß Bindungs- und Verdampfungsenthalpie erbracht werden. Der hierfür nötige Wärmestrom ist:

$$\dot{Q} = (r_b + r) \dot{m}$$

mit: r_b = spezifische Bindungswärme [J/kg]
 r = spezifische Verdampfungswärme [J/kg]

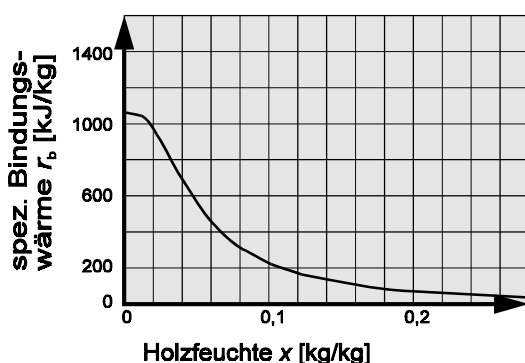


Abb. 2.6: Spezifische Bindungswärme für Wasser in Holz (nach [30])

Die spezifische Bindungswärme r_b läßt sich aus den Sorptionsisothermen herleiten [30]. Abbildung 2.6 zeigt den Verlauf der Bindungswärme bei der Holztrocknung.

Die spezifische Verdampfungswärme ist temperaturabhängig. Für Wasser ist $r = 2500 \dots 2256 \text{ kJ/kg}$ für $\vartheta = 0 \dots 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [31]. Für höhere Holzfeuchten ist die Verdampfungswärme somit deutlich größer als die Bindungswärme.

Berechnung des Stoff- und Wärmeübergangskoeffizienten

Wichtige Größen zur Berechnung des Stoff- und Wärmeübergangs sind die Strömungskoeffizienten Nusseltzahl Nu , Prandtlzahl Pr und Reynoldszahl Re . In der Literatur [5, 12, 33, 41, 54] finden sich Angaben zur Bestimmung dieser Größen bei luftdurchströmten Rohrbündeln. Durch die Beschreibung der Holzbretter als "ungewöhnliche Rohre" gibt es so die Möglichkeit, die Trocknung von Holzstapeln mathematisch zu erfassen⁴. Abbildung 2.7 zeigt die benötigten Maße im Stapel.

Zunächst berechnet man den Hohlraumanteil der Stapelung Ψ zu:

$$\Psi = 1 - \frac{d_1}{s_1} \quad (\text{in } [-])$$

und die charakteristische Größe der Stapelung⁵ f_a zu:

$$f_a = 1 + \frac{0,7}{\Psi^{1,5}} \left(\frac{s_2 d_1}{s_1 d_2} - 0,3 \right) / \left(\frac{s_2 d_1}{s_1 d_2} + 0,7 \right)^2 \quad (\text{in } [-])$$

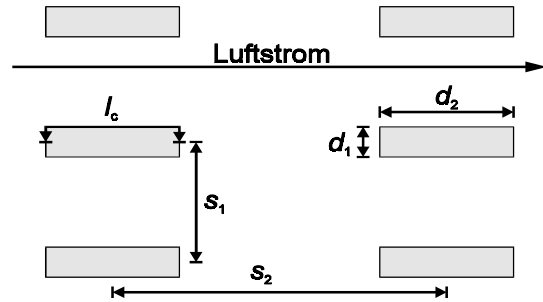


Abb. 2.7: Abmessungen im Holzstapel

Zur Berechnung der Reynoldszahl Re für den Luftstrom am einzelnen Brett benötigt man die kinematische Viskosität $\nu_{L,f}$ der feuchten Luft als Quotient der dynamischen Viskosität $\eta_{L,f}$ und der Luftdichte $\rho_{L,f}$ der feuchten Luft:

$$\nu_{L,f} = \frac{\eta_{L,f}}{\rho_{L,f}} \quad (\text{in } [\text{m}^2/\text{s}])$$

Die Stoffgrößen für feuchte Luft ergeben sich als Mischwerte der Größen für reinen Wasserdampf und trockene Luft. Es gilt:

$$\eta_{L,f} = \frac{p_{D,L} \eta_D + (p - p_{D,L}) \eta_{L,t}}{p} \quad (\text{in } [\text{kg/m s}])$$

und:

$$\rho_{L,f} = (1 + y) / \left(\frac{1}{\rho_{L,t}} + \frac{y}{\rho_D} \right) \quad (\text{in } [\text{kg/m}^3])$$

⁴ Das folgende gilt ähnlich auch für die Berechnung der Trocknung einzelner Bretter. Die nötigen Umformungen sind einfach herzuleiten und werden hier nicht im einzelnen beschrieben.

⁵ Die charakteristische Größe der Stapelung entspricht dem Rohranordnungsfaktor bei fluchtender Rohranordnung [54]. Sie faßt die Topographie des Stapels zusammen.

Die benötigten Stoffwerte lassen sich aus Tabellen entnehmen [31]. Im für die Holz Trocknung interessanten Temperaturbereich von 10 °C bis 90 °C gelten bei Normaldruck folgende, nur von einfachen Größen abhängende Näherungen [2]:

$$\eta_D = 8,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m s}} \left(1 + \frac{T}{273,15 \text{ K}}\right)^{1,25}$$

$$\eta_{L,t} = 17,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m s}} \left(\frac{T}{273,15 \text{ K}}\right)^{0,7}$$

$$\varrho_D = \frac{p}{R_D T}$$

$$\varrho_{L,t} = \frac{p}{R_L T}$$

mit: η = dynamische Viskosität [kg/m s]

ϱ = Dichte [kg/m³]

T = absolute Lufttemperatur [K]

p = Luftdruck [Pa]

R_D = Gaskonstante für Wasserdampf [J/kg K] ($R_D \approx 462 \text{ J/kg K}$)

R_L = Gaskonstante für trockene Luft [J/kg K] ($R_L \approx 287 \text{ J/kg K}$)

Der ebenfalls anzugebende Dampfdruck der Luft läßt sich in relative Luftfeuchte φ oder absolute Luftfeuchte y umrechnen. Es gilt:

$$p_{D,L} = \varphi p_{D,s} = p \frac{y}{0,622+y}$$

mit: $p_{D,L}$ = Dampfdruck der Luft [Pa]

φ = relative Luftfeuchte [-]

$p_{D,s}$ = Sättigungsdampfdruck der Luft [Pa] (siehe (2.1))

y = absolute Luftfeuchte [kg/kg]

Die charakteristische Länge l_c des überströmten Brettes gibt an, welchen Weg ein Luftteilchen zurücklegen muß, um am einzelnen Brett vorbeizufließen. Mit der kinematischen Viskosität $\nu_{L,f}$ und der Luftgeschwindigkeit w ergibt sich dann die mittlere Reynoldszahl Re im Stapel zu:

$$Re = \frac{w l_c}{\nu \Psi}$$

mit: Re = Reynoldszahl [-]

w = Luftgeschwindigkeit [m/s]

l_c = charakteristische Länge [m]

$\nu_{L,f}$ = kinematische Viskosität der feuchten Luft [m²/s]

Ψ = Hohlraumanteil des Stapels [-]

Üblicherweise ist die Reynoldszahl Re bei der Trocknung auch bei geringen Luftgeschwindigkeiten groß ($Re > 10^5$), die Strömung ist also turbulent.

Die Prandtlzahl Pr ist im für die Trocknung typischen Temperaturbereich der Luft (siehe oben) in guter Näherung konstant [30], es gilt im folgenden:

$$Pr = 0,72$$

Hiermit lässt sich die Nusseltzahl Nu der Strömung angeben. Sie setzt sich aus einem laminaren und turbulenten Anteil zusammen und hängt nur von der Reynoldszahl, der Prandtlzahl und der charakteristischen Größe der Stapelung ab. Die näherungsweise Berechnung führt zu:

$$Nu_l = 0,664 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,33}$$

$$Nu_t = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} (Pr^{0,67} - 1)}$$

$$Nu = f_a \sqrt{Nu_l^2 + Nu_t^2}$$

mit: Nu_l = Nusseltzahl für vollkommen laminare Strömung [-]

Nu_t = Nusseltzahl für vollkommen turbulente Strömung [-]

Nu = Nusseltzahl für eine parallel angeströmte, ebene Platte [-]

Zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α ist noch die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{L,f}$ der feuchten Luft nötig. Auch diese ergibt sich als Mischung aus den Werten für reinen Dampf und trockene Luft in Abhängigkeit von der Lufttemperatur. Im Bereich von 10 °C bis 90 °C ist in guter Näherung:

$$\lambda_D = 0,0182 \frac{W}{m \cdot K} \left(\frac{T}{273,15 \cdot K} \right)^{0,87+0,001 \cdot T}$$

$$\lambda_{L,t} = 0,02454 \frac{W}{m \cdot K} \left(\frac{T}{273,15 \cdot K} \right)^{0,83}$$

$$\lambda_{L,f} = \frac{p_{D,L}}{p} \lambda_D + \left(1 - \frac{p_{D,L}}{p} \right) \lambda_{L,t}$$

mit: λ = Wärmeleitfähigkeit [W/m K]

Der Wärmeübergangskoeffizient α ist nun aus den bisherigen Größen zu ermitteln, es gilt:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_{L,f}}{l_c} \quad (\text{in [W/m}^2 \text{ K]})$$

Der Stoffübergangskoeffizient β hängt eng mit dem Wärmeübergangskoeffizient α zusammen. Zunächst muß noch die spezifische Wärmekapazität der feuchten Luft $c_{pL,f}$ angegeben werden, die wieder aus Näherungen für die Stoffwerte des Dampfes und der trockenen Luft zu bestimmen ist. Im Temperaturbereich der hier untersuchten Vorgänge läßt sich schreiben:

$$c_{pD} = 1880 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (1 + 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot C^{-1} \cdot \vartheta)$$

$$c_{pL,t} = 1006 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (1 + 5 \cdot 10^{-7} \cdot C^{-2} \cdot \vartheta^2)$$

$$c_{pL,f} = \frac{y \cdot c_{pD} + c_{pL,t}}{1+y} \quad (\text{in [J/kg K]})$$

Man rechnet beim Stoffübergang mit einem mittleren Dampfdruck $p_{D,m}$ für die Grenzschicht der Luft entlang der Trocknungsfläche. Dieser mittelt sich aus dem Dampfdruck $p_{D,o}$ an der Gutsoberfläche und dem Dampfdruck $p_{D,L}$ näherungsweise zu:

$$p_{D,m} = p - (p_{D,o} - p_{D,L}) / \ln \frac{p - p_{D,L}}{p - p_{D,o}}$$

Als weitere Strömungszahl fließt die Lewiszahl Le in die Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten ein. Sie ist aber wie die Prandtlzahl für die untersuchten Luftzustände als konstant anzunehmen mit:

$$Le = 0,82$$

Für den betrachteten Stoffübergang aus einer parallel angeströmten, ebenen Platte in turbulent strömende Luft gilt dann für den Stoffübergangskoeffizient β :

$$\beta = \alpha \frac{1}{\varrho_{L,f} \cdot c_{pL,f} \cdot Le^{0,58}} \cdot \left(1 - \frac{p_{D,m}}{p} \right)$$

2.5 Stoff- und Wärmetransport in Holz

Stofftransport

Beim Stofftransport in Festkörpern unterscheidet man vor allem nach der Phase der transportierten Feuchte (Gas oder Flüssigkeit) und zum anderen nach der Art des Feuchtetransports (Diffusion, kapillarer Transport oder freie Strömung). Welcher Mechanismus vorherrscht, hängt von der inneren Struktur des Trocknungsguts und von seiner Feuchte und Temperatur ab. Abbildung 2.8 zeigt die Stufen des Feuchtetransports in porösen Materialien (nach [26, 44]), diese Mechanismen gelten auch für den Wassertransport in Holz.

Feuchtetransportmechanismen

Abb. 2.8: Feuchtetransportmechanismen in porösen Materialien (aus [13], nach [26, 44])

In trockenem Zustand wird in den Festkörper eindringende Feuchte an den Wänden sorbiert, es findet noch kein Transport statt (A). Erst wenn die Wände mit Feuchte bedeckt sind, diffundiert Wasserdampf durch den Hohlraum. Der Transport zwischen den Poren - also durch die Wände - erfolgt über Lösungsdiffusion einzelner Wassermoleküle im Festkörper (B). In (C) sind bei weiter steigendem Feuchtegehalt die engen Kapillaren zwischen den Poren mit Flüssigkeit gefüllt. Der Stofftransport erfolgt dort dann durch Lösungsdiffusion im Festkörper und Oberflächendiffusion entlang der Kapillarwände, während in den Poren weiterhin Wasserdampfdiffusion stattfindet. Schließlich bildet sich durch Kapillarkräfte auch in den Poren ein Wasserfilm, der zusätzlichen Feuchte-transport durch Oberflächendiffusion ermöglicht (D). Sind die Gefäße ausreichend

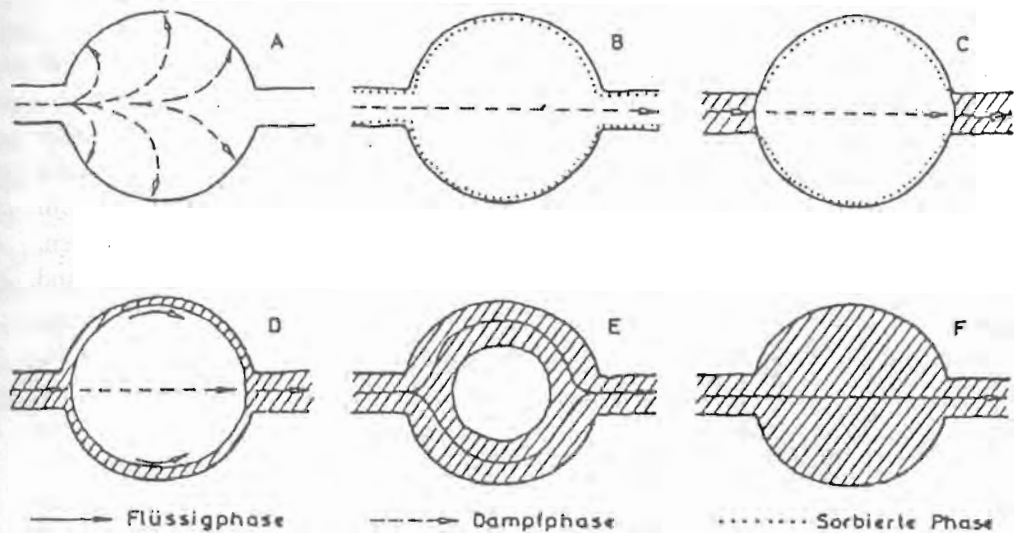


Abb. 2.8: Feuchtetransportmechanismen in porösen Materialien (aus [13], nach [26, 44])

groß, kann bei hohen Feuchten im Festkörper neben dem kapillaren Transport auch laminare Strömung entstehen (E, F).

Außer beim kapillaren Transport, der aufgrund innerer Kräfte (Kohäsion und Adhäsion zwischen Fluid und Festkörper) entsteht, ist für alle Transportvorgänge ein treibendes Potential nötig. Der übliche Ansatz zur Bestimmung des Stofftransports in Festkörpern ist demnach analog zum Ersten Fick'schen Gesetz⁶:

$$\dot{m}_A = \kappa \varrho_{G,t} |\nabla x|$$

mit: $\dot{m}_A$ = flächenspezifischer Massenstrom [$\text{kg/m}^2 \text{ s}$]

κ = Feuchteleitwert [m^2/s]

$\varrho_{G,t}$ = Dichte des trockenen Guts [kg/m^3]

$|\nabla x|$ = Betrag des Feuchtegradienten im Gut [kg/kg m]

Der Feuchteleitwert κ ist temperatur- und feuchteabhängig. Abbildung 2.9 zeigt die Feuchteabhängigkeit von κ für Buchenholz bei der Holztemperatur $\vartheta_H = 0^\circ \text{C}$. Charakteristisch ist das (relative) Maximum der Feuchteleitfähigkeit im Bereich des Fasersättigungspunkts. Hier ist sowohl Wasserdampfdiffusion als auch kapillarer Transport von Wasser möglich. Unterhalb der Fasersättigung kann kein

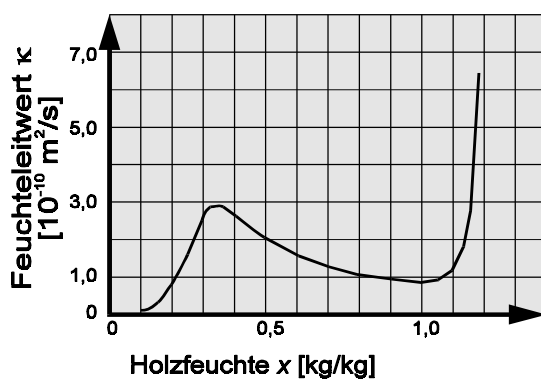


Abb. 2.9: Feuchteleitwert für Buchenholz bei Temperatur $\vartheta_H = 0^\circ \text{C}$ (nach [30])

kapillarer Transport mehr stattfinden, und auch der Diffusionswiderstand steigt. Krischer und Kröll [30] führen dies darauf zurück, daß das Holz im hygroskopischen Bereich zu schwinden beginnt, das heißt, die Poren werden enger. Oberhalb des Fasersättigungsbereichs ist zwar der Diffusionswiderstand gering, dennoch verschwindet die Dampfdiffusion als Feuchteleitprozeß. Aufgrund des nun entstehenden freien Wasserspiegels wird der Dampfdruck im Holz unabhängig vom Ort - es entsteht überall Sattedampfdruck. Das Dampfdruckgefälle als treibendes Potential der Dampfdiffusion ist nicht mehr vorhanden. Mit weiter zunehmendem Feuchtegehalt im Holz wird aus dem kapillaren Transport eine laminare Strömung, der Feuchteleitwert κ steigt steil an.

Es gibt Ansätze zur Berechnung des Feuchteleitwerts in der Literatur [30], für die meisten Hölzer läßt κ sich jedoch nur schwer theoretisch erfassen. Insbesondere aufgrund der Inhomogenität von Holz und der Vielzahl der bei der Holztrocknung

⁶ Das Erste Fick'sche Gesetz beschreibt Diffusionsvorgänge.

eine Rolle spielenden Feuchtetransportmechanismen wählt man bei der Untersuchung des Feuchtetransports in Holz meist einen empirischen Ansatz zur Bestimmung des sogenannten summierten Feuchteleitwerts, der dann sämtliche Transportmechanismen zusammenfaßt [6, 28, 35].

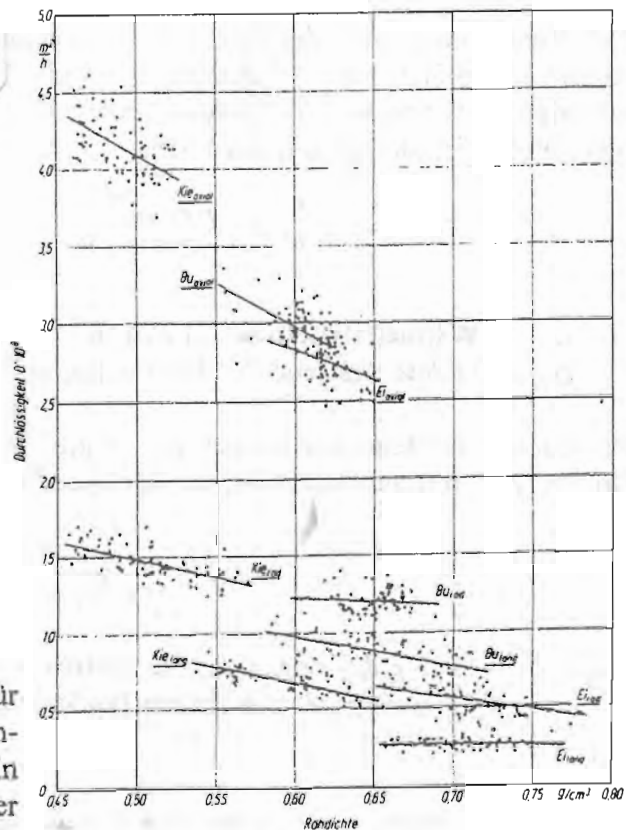
Im allgemeinen gilt, daß weiche Hölzer (wie zum Beispiel Fichte) Feuchte besser transportieren als harte Hölzer (wie zum Beispiel Algarrobo). Außerdem ist die Feuchteleitung bei höheren Temperaturen besser als bei niedrigen. ("Anhang C.2 Feuchteleitwerte" enthält summierte Feuchteleitwerte für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Hölzer.)

Zusätzlich hängt der Feuchtetransport im Holz von dessen Richtung ab. Man unterscheidet axialen Transport (parallel zum Stamm), radialen Transport (vom Stammkern nach außen) und tangentialen Transport (entlang der Jahresringe). Böhner [6] und Koponen [28] zeigen, daß hier große Unterschiede bestehen. Abbildung 2.10 vergleicht die Durchlässigkeit verschiedener Holzarten für Wasserdampfdiffusion in Abhängigkeit von der Rohdichte nach Böhner. Um dies bei der Berechnung der Holz Trocknung zu berücksichtigen, müßten je nach Richtung des Feuchtetransports andere Feuchteleitwerte verwendet werden. Beim Holzschnitt erhält man Bretter, die parallel zum Stamm geschnitten sind, so daß bei der Trocknung fast ausschließlich Feuchtetransport in radialer und tangentialer Richtung eine Rolle spielt; man rechnet deshalb mit einem durchschnittlichen Feuchteleitwert κ für diese Richtungen.

axial - radial - tangential, bild 5
Böhner

Abb. 2.10: Durchlässigkeitswerte für Kiefer-Splint-, Eichen- und Buchenholz für Wasserdampfdiffusion in axialer, radialer und tangentialer Richtung (nach Böhner [6])

Abb. 2.10: Durchlässigkeitswerte für Kiefer-Splint-, Eichen- und Buchenholz für Wasserdampfdiffusion in axialer, radialer und tangentialer Richtung (nach Böhner [6])



Wärmetransport

Der Wärmetransport im Gut setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. Man unterscheidet Wärmeleitung im Festkörper und in der im Festkörper gebundenen Flüssigkeit und konvektiven Wärmetransport in der Flüssigkeit und im Dampf. Für jeden dieser Prozesse gilt der klassische Wärmetransportansatz:

$$\dot{Q} = \lambda A |\nabla T| \quad (2.2)$$

mit: $\dot{Q}$ = Wärmefluß [W]
 λ = Wärmeleitkoeffizient [W/m K]
 A = Fläche des Wärmetransports [m²]
 $|\nabla T|$ = Betrag des Temperaturgradienten im Gut [K/m]

Zudem kann Wärme latent, also über Verdampfungs- und Kondensationsprozesse, transportiert werden.

Der Beitrag jedes Transportmechanismus und die Werte der Wärmeleitkoeffizienten sind wiederum temperatur- und feuchteabhängig [30]. Die höchste Wärmeleitfähigkeit ergibt sich für hohe Temperaturen und mittlere Feuchten, da hier alle Möglichkeiten des Wärmetransports gegeben sind.

Zur Berechnung im Simulationsmodell lassen sich aus den für Holz im Temperaturbereich der Trocknung gültigen Tabellen Näherungen für einen summierten Wärmeleitkoeffizienten entwickeln. Kollmann [27] verknüpft den Wärmeleitkoeffizient λ mit der Dichte des feuchten Holzes $\rho_{H,f}$ zu:

$$\lambda = 0,195 \frac{W m^2}{kg K} \cdot \rho_{H,f} + 0,026 \frac{W}{m K}$$

mit: λ = Wärmeleitkoeffizient [W/m K]
 $\rho_{H,f}$ = Dichte des feuchten Holzes [kg/m³]

Die Dichte des feuchten Holzes $\rho_{H,f}$ ergibt sich aus der Dichte darrtrockenen Holzes⁷ $\rho_{H,t}$ mit ausreichender Genauigkeit für alle Holzfeuchten über [27]:

$$\rho_{H,f} = \rho_{H,t} \frac{1+x}{1+8,4 \cdot 10^{-4} \rho_{H,t} x}$$

mit: $\rho_{H,t}$ = Dichte des darrtrockenen Holzes [kg/m³]
 x = Feuchtegehalt des Holzes [kg/kg]

⁷ Die Darrtrockenheit des Holzes erreicht man, indem man das Holz im Ofen bei einer Temperatur von etwa 100 °C bis 105 °C auf einen Feuchtegehalt $x = 0$ trocknet [27, 34].

Die Dichte darrtrockenen Holzes lässt sich Tabellen entnehmen [27, 34, 49] (siehe auch "Anhang C.3 Sonstige Materialwerte").

Die Wärmespeicherung im Holz findet sowohl in der Holzmasse als auch im gebundenen Wasser statt. Man berechnet die spezifische Wärmekapazität des feuchten Holzes $c_{p\,H,\,f}$ aus Näherungen für die spezifische Wärmekapazität des Wassers $c_{p\,W}$ und die spezifische Wärmekapazität des darrtrockenen Holzes $c_{p\,H,\,t}$, es gilt:

$$c_{p\,W} = 4178 \frac{J}{kg\,K} + 9 \cdot 10^{-3} \frac{J}{kg\,K^3} (\vartheta - 35\,^{\circ}C)^2$$

$$c_{p\,H,\,f} = (1-x) c_{p\,H,\,t} + x c_{p\,W}$$

mit: $c_{p\,W}$ = spezifische Wärmekapazität von Wasser [J/kg K]

ϑ = Holztemperatur [°C]

$c_{p\,H,\,f}$ = spezifische Wärmekapazität feuchten Holzes [J/kg K]

$c_{p\,H,\,t}$ = spezifische Wärmekapazität darrtrockenen Holzes [J/kg K]

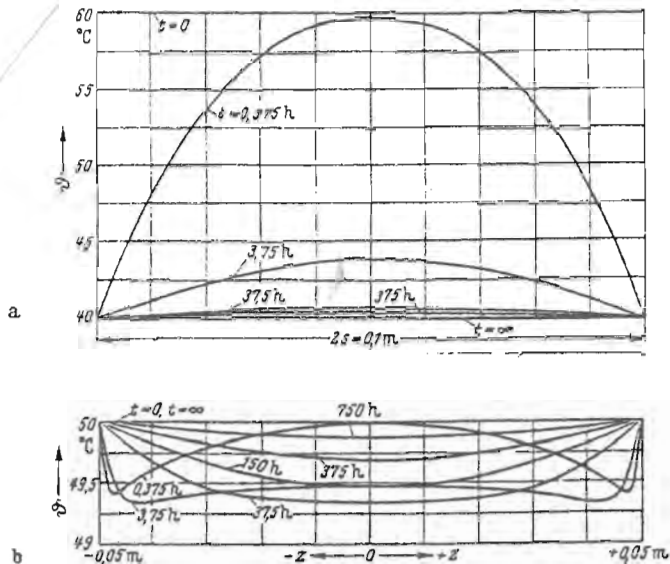
Die spezifische Wärmekapazität darrtrockenen Holzes lässt sich Tabellen entnehmen [27, 34, 49] (siehe auch "Anhang C.3 Sonstige Materialwerte"). Die Näherungen gelten im für die Trocknung üblichen Temperaturbereich.

Mit diesen Werten kann man die Temperaturverteilung im Holz während der Trocknung theoretisch über Differentialgleichungen berechnen. Üblicherweise erfolgen solche Berechnungen aber numerisch über die Methode der finiten Elemente (siehe "3.2 Aufbau der TRNSYS-Komponente 'Holztrocknung'"). Abbildung 2.11 zeigt die Änderung der Temperaturverteilung in einem Holzbrett bei plötzlicher Änderung der Randtemperatur oder der Randfeuchte nach Krischer und Kröll [30].

Abb. 2.11: Temperaturverteilung im Holzbrett nach plötzlicher Änderung der Randtemperatur von 60 °C auf 40 °C (a) und plötzlicher Änderung der Randfeuchte von $x = 0,20$ kg/kg auf $x = 0,10$ kg/kg (b) (nach Krischer und Kröll [30])

Temperaturverteilungen Abb. 249 Krischer

Abb. 2.11: Temperaturverteilung im Holzbrett nach plötzlicher Änderung der Randtemperatur von $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) und plötzlicher Änderung der Randfeuchte von $x = 0,20\text{ kg/kg}$ auf $x = 0,10\text{ kg/kg}$ (b) (nach Krischer und Kröll [30])



3 Modellierung der Holz Trocknung

3.1 Prinzip der Modellierung

Das TRNSYS Modul "Holztrocknung" beschreibt die Trocknung von Holz in bewegter Luft. Es ist vor allem ausgelegt für die Beschreibung eines von Luft durchströmten Bretterstapels, kann aber auch für andere Anordnungen verwendet werden. Zum Beispiel läßt sich auch die Trocknung einzelner Bretter berechnen. Hierbei sind eventuell geringere Genauigkeiten der Modellierung zu akzeptieren.

Das Modell bestimmt den Feuchte- und Wärmeaustausch zwischen Holz und Trockenluft an allen Holzoberflächen. Abbildung 3.1 zeigt schematisch die betrachteten Austauschvorgänge. Die Modellierung ist am genauesten, wenn die Hauptaustauschfläche ein Mehrfaches der übrigen Flächen beträgt, wie dies bei Brettern ja der Fall ist.

Austauschvorgang

Die wechselnden Zustände der Trocknungsluft werden als vier Eingabewerte in das Modul eingelesen. Neben Temperatur und absoluter Luftfeuchte als den wesentlichen Eigenschaften der strömenden Luft muß entweder der Massenstrom oder die Luftgeschwindigkeit am Eingang des Stapels angegeben werden. Das Modul erlaubt nur vorwärtsgerichtete Luftströmung. Dies ist zu beachten, wenn sich im Rahmen der Modellierung einer Trocknungsanlage ein rückwärtsgerichteter (negativer) Massenstrom ergeben kann. Schließlich ist noch der Luftdruck als Eingabewert vorgesehen.

Abb. 3.1: Stoff- und Wärmeübergang zwischen Luftstrom und Holzstapel

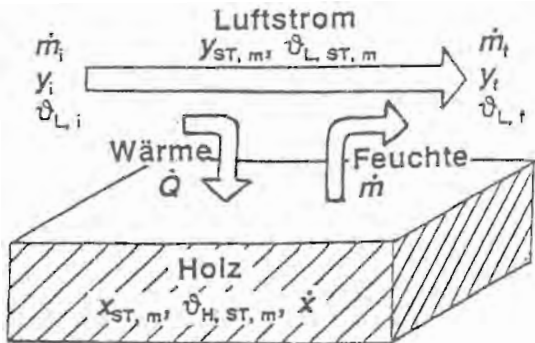


Abb. 3.1: Stoff- und Wärmeübergang zwischen Luftstrom und Holzstapel

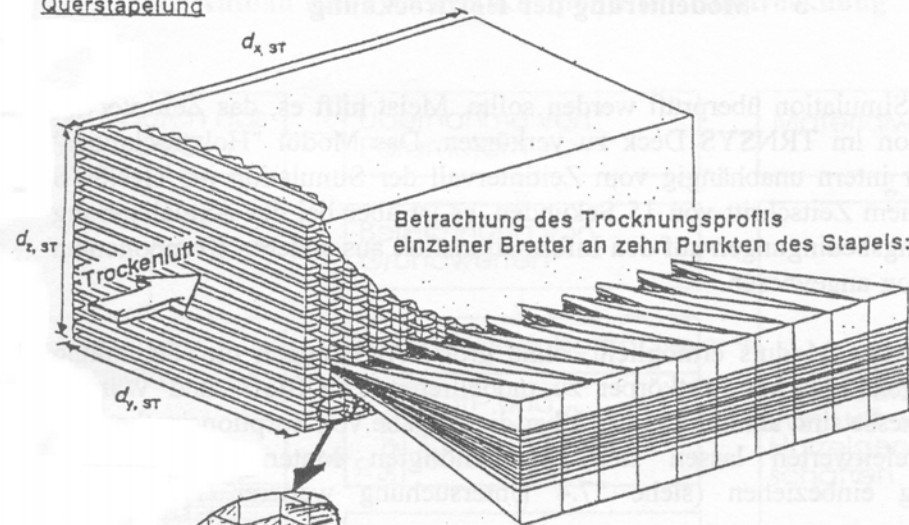
Über die Angabe von Materialwerten - insbesondere von Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerten - läßt sich die Modellierung an unterschiedliche Holzarten anpassen. Dies geschieht zum Teil mittels der Parameter-Liste, die Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerte müssen jedoch als eigene Dateien zur Verfügung stehen. "Anhang C Material- und Anlagenwerte" gibt Beispiele und Durchschnittswerte für einige Holzarten aus der Literatur [27, 28, 30]. Aufgrund der heterogenen Struktur von Holz können für alle Materialwerte nur Mittelwerte verwendet werden, insbesondere kann nicht auf die Unterschiede zwischen verschiedenen Faserrichtungen im Holz eingegangen werden.

Der Trocknungsverlauf ergibt sich aus der Anfangsfeuchte des Holzes - die als gleichmäßig verteilt angenommen wird - und den wechselnden Trocknungsbedingungen. Es wird angenommen, daß die Trocknungsbedingungen sich nur in Richtung des Luftstroms ändern und über den Querschnitt des Stapels konstant sind.

Ausgegeben werden Feuchtwerte und Temperaturen des Holzes und der Trockenluft ebenso wie Trocknungs- und Wärmeübergangsraten. Das Modul bestimmt die beim Fortdauern der gegenwärtigen Trocknungsbedingungen erreichbare Gleichgewichtsfeuchte aus den Sorptionsisothermen (siehe "2.3 Sorptionsisothermen"). Zur Untersuchung des Strömungsverhaltens der Trocknungsluft berechnet die Komponente "Holztrocknung" den spezifischen Luftdurchsatz durch den Stapel. Die Ausgabe der Werte der höchsten im Holzstapel auftretenden Temperatur, des höchsten an einem Ort herrschenden Trocknungsgefälles zwischen mittlerer Holzfeuchte und Gleichgewichtsfeuchte und der höchsten lokalen Feuchtedifferenz zwischen Holzmitte und Oberfläche ermöglicht Rückschlüsse auf die erreichbare Trocknungsqualität. Holz neigt zum Beispiel zur Rißbildung oder zur Verschalung, wenn gewisse Feuchtegradienten in seinem Inneren überschritten werden (siehe "4.4 Qualität der Trocknung").

Neben diesen an das TRNSYS Deck ausgegebenen Werten legt das Modul "Holztrocknung" noch eine Datei an, in die nach jeder Stunde Simulationszeit Trocknungsdaten gespeichert werden. Diese Daten enthalten Feuchte- und Temperaturwerte von der Trocknungsluft über die Holzoberfläche bis in das Holzinnere. Die Trocknungsprofile werden an zehn verschiedenen Stellen des Holzstapels oder -brettes parallel zur Richtung des Luftstroms erstellt (siehe Abbildung 3.2).

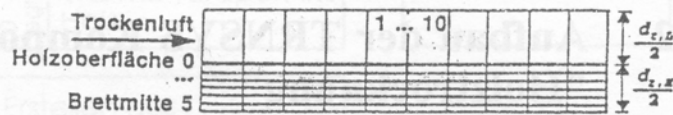
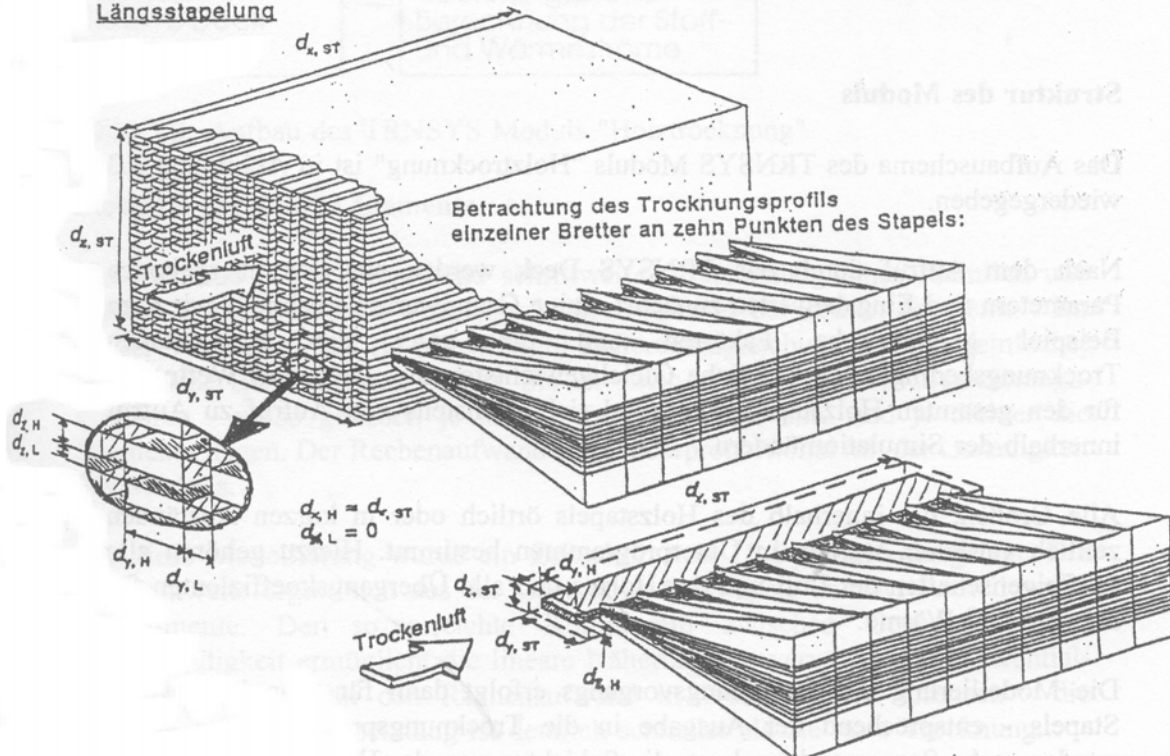
In die Trocknungsprofildatei werden während der Simulation auch Warnungen des Moduls ausgegeben. Dies erfolgt, wenn an der Holzoberfläche Feuchte kondensiert, sowie wenn die Feuchte- oder Wärmeströme, die das Modul errechnet, unrealistisch hoch erscheinen oder gar physikalisch unsinnig sind. Das Modul rechnet dann mit veränderten Werten weiter. Dies kann insbesondere bei sprungartigen Änderungen der Trocknungsbedingungen der Fall sein. Bei einem gehäuftem Auftreten von Warnungen in vielen Zeitschritten hintereinander ist davon auszugehen, daß größere Ungenauigkeiten entstehen und das gesamte

Querstapelung

$$d_{y,H} \approx d_{y,ST}$$

$$d_{y,L} = 0$$

Aufteilung in Segmente:

Längsstapelung

$$d_{x,H} \approx d_{x,ST}$$

$$d_{x,L} = 0$$

$$d_{x,H} \approx d_{x,ST}$$

$$d_{x,L} = d_{y,L} = d_{z,L} = 0$$

Einzelnes Brett

Abb. 3.2: Vom Holzstapel zum Rechenmodell

Umfeld der Simulation überprüft werden sollte. Meist hilft es, das Zeitintervall der Simulation im TRNSYS Deck zu verkürzen. Das Modul "Holztrocknung" arbeitet zwar intern unabhängig vom Zeitintervall der Simulation im TRNSYS Deck mit einem Zeitschritt von 15 Sekunden, es ist aber bei der Aktualisierung der Trocknungsbedingungen auf den Informationsfluß aus anderen Komponenten der Simulation angewiesen.

Die Struktur des Moduls ermöglicht, ohne große Änderungen die Trocknung weiterer hygroskopischer Festkörper zu modellieren. Die Stoff- und Wärmetransportprozesse sind ähnlich [2, 30]. Über die Angabe von Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerten lassen sich die benötigten Materialwerte in die Modellierung einbeziehen (siehe "7.4 Untersuchung weiterer Trocknungsvorgänge").

3.2 Aufbau der TRNSYS Komponente "Holztrocknung"

Struktur des Moduls

Das Aufbauschema des TRNSYS Moduls "Holztrocknung" ist in Abbildung 3.3 wiedergegeben.

Nach dem Aufruf durch das TRNSYS Deck werden aus den übergebenen Parametern und Eingabewerten zunächst einige Grundwerte berechnet - wie zum Beispiel geometrische Faktoren und die unter den momentanen Trocknungsbedingungen mögliche Gleichgewichtsfeuchte. Dies sind Werte, die für den gesamten Holzstapel gelten und sich höchstens von Aufruf zu Aufruf innerhalb der Simulation ändern.

Alle Größen, die innerhalb des Holzstapels örtlich oder in kurzen Abständen zeitlich variieren, werden in Unterprogrammen bestimmt. Hierzu gehören alle Stoffeigenschaften der Luft und des Holzes und alle Übergangskoeffizienten für Feuchte und Wärme.

Die Modellierung des Trocknungsvorgangs erfolgt dann für zehn Punkte des Stapels - entsprechend der Ausgabe in die Trocknungsprofildatei. Je Punkt werden sechs Segmente berechnet, die Schichten von der Holzoberfläche bis in die Brettmitte wiedergeben (siehe Abbildung 3.2).

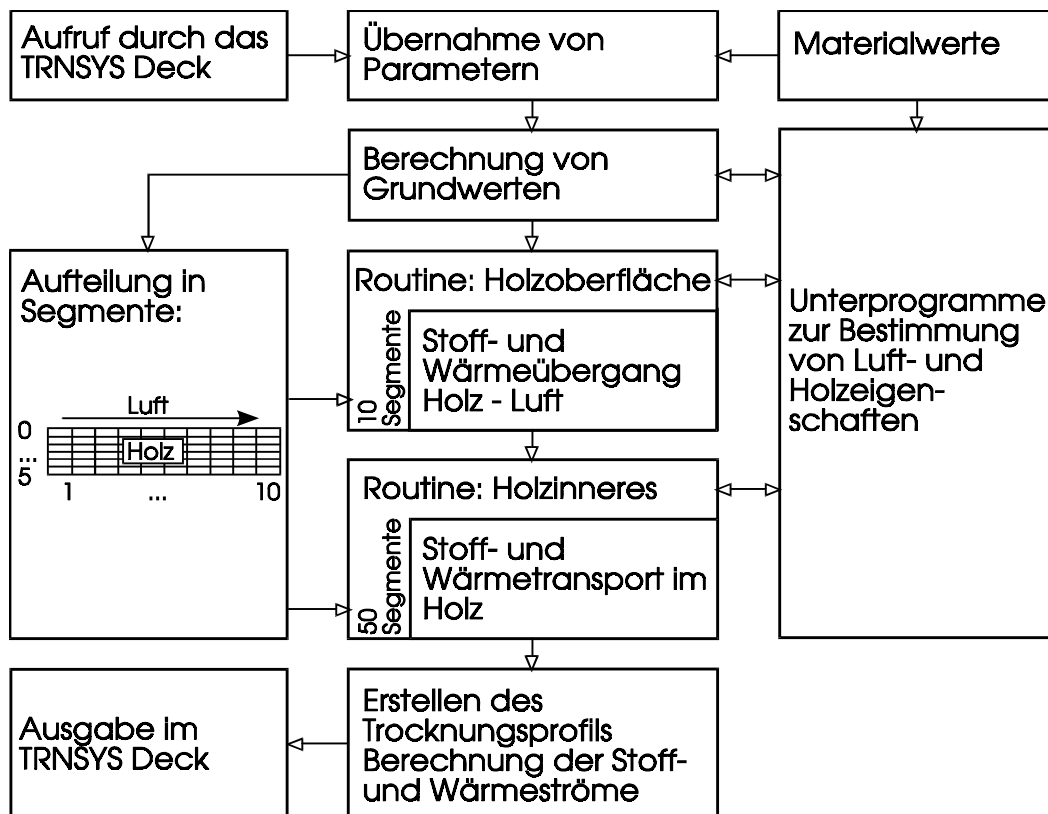


Abb. 3.3: Aufbau des TRNSYS Moduls "Holztrocknung"

Methode der finiten Elemente

Die Methode der segment- und schrittweisen Berechnung eines räumlich und zeitlich kontinuierlichen Vorgangs heißt "Methode der finiten Elemente". Ihr großer Vorteil ist, daß sie (schwierige) Differentialgleichungen durch (einfache) numerische Berechnungen ersetzt. Sie ist - wie alle numerischen Berechnungsverfahren - umso genauer, je kürzer die Zeitschritte sind und je dichter die Segmente liegen. Der Rechenaufwand steigt überproportional mit der Genauigkeit des Modells.

Für diese Modellierung wurde ein Zeitschritt von 15 Sekunden festgelegt. Die Segmentweite ergibt sich aus der Geometrie des Stapels und der Aufteilung in 60 Segmente. Der so erreichte Kompromiß zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit ermöglicht die lineare Näherung der verwendeten Differentialgleichungen und hält den Rechenaufwand in "vernünftigen" Grenzen - die Simulation der Holztrocknung ist deutlich schneller als die reale Trocknung...

Die iterative Berechnung beginnt mit den bekannten Anfangsbedingungen des Holzes und dem über die Eingabewerte vorliegenden Zustand der Trocknungsluft am Stapelanfang. Zunächst wird der Stoff- und Wärmeübergang an der Holzober-

fläche eines Brettes am Stapelanfang bestimmt. (In den Abbildungen 3.2 und 3.3 entspricht dies dem bei "Aufteilung in Segmente" links oben im Holz dargestellten Segment aus Reihe 0 und Spalte 1.) Die den Vorgang beschreibenden Differentialgleichungen (siehe "2.4 Stoff- und Wärmeübergang an Oberflächen") werden linear genähert, (siehe unten) um die Zustände des Luft- und des Holzsegments am Ende des ersten Zeitschritts in einfacher Rechnung zu ermitteln.

Mit den neuen Zustandsgrößen des ersten Holzoberflächensegments berechnet man den Stoff- und Wärmeaustausch mit dem nächsttieferen Holzsegment (Reihe 1, Spalte 1) gemäß "2.5 Stoff- und Wärmetransport in Holz". Die benötigten Differentialgleichungen werden wieder linear genähert. Mit dieser Methode fährt man fort, bis alle Holzsegmente der Spalte 1 bis zur Brettmitte neu beschrieben sind.

Für die Berechnung der nächsten Stapelspalte in Richtung des Luftstroms dienen neben den Anfangsbedingungen des Holzes die im ersten Schritt gefundenen neuen Luftzustandswerte als Ausgangsgrößen.

Das Berechnungsverfahren wird schrittweise fortgesetzt, bis auch das letzte Segment in der Brettmitte am Stapelende (Reihe 5, Spalte 10) neu bestimmt ist. Damit ist der erste Zeitschritt abgeschlossen.

Im folgenden Intervall bilden die so festgelegten Zustände der Holzsegmente die Anfangsbedingungen der Berechnung.

Die Näherung der Differentialgleichungen zur numerischen Berechnung sei am Beispiel der Wärmetransportgleichung (2.2) erklärt. Sie beschreibt den Wärmefluß $\dot{Q}$, der aufgrund eines Temperaturgradienten ∇T in Abhängigkeit des Wärmeleitkoeffizienten λ entsteht. Es gilt:

$$\dot{Q} = \lambda A |\nabla T|$$

mit: $\dot{Q}$ = Wärmefluß [W]
 λ = Wärmeleitkoeffizient [W/m K]
 A = Fläche des Wärmetransports [m²]
 $|\nabla T|$ = Betrag des Temperaturgradienten im Gut [K/m]

Wird die Wärme nur in z-Richtung transportiert, läßt sich schreiben:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{\delta T}{\delta z}$$

Für genügend kleine Zeitschritte und Segmentweiten kann für die numerische Berechnung die erste Näherung dieser Beziehung angewandt werden, es folgt:

$$\Delta Q = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta z} \Delta t$$

mit: ΔQ = während des Zeitintervalls

zwischen den Segmenten transportierte Wärme [J]

ΔT = Temperaturdifferenz zwischen den Segmenten [K]

Δz = Segmentweite [m]

Δt = Dauer des Zeitintervalls [s]

Analog läßt sich mit allen bei der Modellierung verwendeten Differentialgleichungen verfahren.

Durchführung der Berechnungen

Die Berechnung des Stoff- und Wärmeübergangs von der Holzoberfläche an die Trockenluft sowie des Stoff- und Wärmetransports im Holzininneren erfolgt, wie in "2 Holztrocknung als physikalischer Prozeß" beschrieben. Die dort berechneten feuchte- und temperaturabhängigen Stoffgrößen werden im folgenden übernommen.

Aus dem berechneten flächenspezifischen Massenstrom $\dot{m}_A$ an der Trocknungsoberfläche ergibt sich zunächst pro Segment die Trocknungsrate $\dot{x}_s$ im jeweiligen Oberflächensegment des Holzes und die Feuchtezunahme Δy_s , die die Trocknungsluft beim Passieren des Segments erfährt. Es gilt:

$$\dot{x}_s = \frac{\dot{m}_A A_s}{\varrho_{H,t} V_s} \quad \text{und} \quad \Delta y_s = \frac{\dot{m}_A A_s}{\varrho_{L,t} w A_{L,\phi}}$$

mit: $\dot{x}_s$ = Trocknungsrate im Segment [kg/kg s]

Δy_s = Feuchtezunahme der Trocknungsluft im Segment [kg/kg]

$\dot{m}_A$ = flächenspezifischer Massenstrom [kg/m² s]

A_s = Trocknungsfläche des Segments [m²]

$A_{L,\phi}$ = Querschnittsfläche des Luftstroms über dem Segment [m²]

V_s = Volumen des Holzsegments [m³]

w = Luftgeschwindigkeit über dem Holz [m/s]

$\varrho_{H,t}$ = Dichte des darrtrockenen Holzes [kg/m³]

$\varrho_{L,t}$ = Dichte der trockenen Luft [kg/m³]

Die benötigten segmentbezogenen Maße ergeben sich über einfache geometrische Berechnungen aus den Maßen des Holzstapels und der Bretter und der Anzahl der Segmente (siehe Abbildung 3.2).

Die Holzfeuchte x_f am Ende des Zeitschritts und die Luftfeuchte y_f am Ende des Segments sind dann:

$$x_{S,f} = x_{S,i} + \dot{x}_S \Delta t \quad \text{und} \quad y_{S,f} = y_{S,i} + \Delta y_S$$

mit: $x_{S,i}$ = Holzfeuchte im Segment zu Beginn des Zeitschritts [kg/kg]
 $x_{S,f}$ = Holzfeuchte im Segment am Ende des Zeitschritts [kg/kg]
 $y_{S,i}$ = Luftfeuchte zu Beginn des Segments [kg/kg]
 $y_{S,f}$ = Luftfeuchte am Ende des Segments [kg/kg]

Die Temperaturänderung in Holz und Luft folgt aus dem Wärmestrom $\dot{Q}$ in das Holz wegen Konvektion und Verdampfungsenthalpie (siehe "2.4 Stoff- und Wärmeübergang an Oberflächen), der Mischung der Luft mit dem übergehenden Dampf und den beteiligten Wärmekapazitäten. Es ergibt sich:

$$\vartheta_{H,S_f} = \vartheta_{H,S_i} + \frac{\dot{Q}_{konv.}}{c_{pH,f} \rho_{H,f} V_S} \Delta t$$

und

$$\vartheta_{L,S_f} = \frac{c_{pL,i} \dot{m}_i \vartheta_{L,S_i} - \dot{Q} + c_{pD} \dot{m}_A A_S \vartheta_D}{c_{pL,f} \dot{m}_f}$$

mit: ϑ_{H,S_i} = Holztemperatur im Segment zu Beginn des Zeitschritts [°C]
 ϑ_{H,S_f} = Holztemperatur im Segment am Ende des Zeitschritts [°C]
 ϑ_{L,S_i} = Lufttemperatur zu Beginn des Segments [°C]
 ϑ_{L,S_f} = Lufttemperatur am Ende des Segments [°C]
 ϑ_D = Temperatur des übergehenden Dampfes [°C] ($\vartheta_D \approx \vartheta_H$)
 $\dot{Q}$ = Wärmestrom in das Holz [W]
 $\dot{Q}_{konv.}$ = konvektiver Anteil am Wärmestrom $\dot{Q}$ in das Holz [W]
 $\dot{m}_i$ = Luftstrom zu Beginn des Segments [kg/s]
 $\dot{m}_f$ = Luftstrom am Ende des Segments [kg/s]
 $c_{pH,f}$ = spezifische Wärmekapazität des feuchten Holzes [J/kg K]
 $c_{pL,i}$ = spez. Wärmekapazität der Luft zu Beginn des Segments [J/kg K]
 $c_{pL,f}$ = spez. Wärmekapazität der Luft am Ende des Segments [J/kg K]
 c_{pD} = spezifische Wärmekapazität des übergehenden Dampfes [J/kg K]
 $\rho_{H,f}$ = Dichte des feuchten Holzes [kg/m³]

Das Modul überprüft, ob der Sättigungsdampfdruck der Luft überschritten wird. In diesem Fall wird eine Meldung in die Trocknungsprofildatei ausgegeben (siehe

"3.3 Einbindung in ein TRNSYS Deck") und alle Werte werden neu berechnet, so daß die Trocknungsluft die Sättigung nicht übersteigt.

Die Berechnung der Segmente im Holzininneren erfolgt in gleicher Weise, ausgehend von den dortigen Feuchte- und Wärmeströmen (siehe "2.5 Stoff- und Wärmetransport in Holz").

Am Ende eines Zeitschritts ergeben sich die Holzfeuchten $x_{S1, f}$ und $x_{S2, f}$ zweier benachbarter Segmente S1 und S2 zu:

$$x_{S1, f} = x_{S1, i} + \frac{\dot{m}_A A_S}{\rho_{H, t} V_S} \Delta t \quad \text{und} \quad x_{S2, f} = x_{S2, i} - \frac{\dot{m}_A A_S}{\rho_{H, t} V_S} \Delta t$$

mit: $x_{S1, i}$ = Anfangsfeuchte des feuchteaufnehmenden Segments S1 [kg/kg]
 $x_{S1, f}$ = Endfeuchte des feuchteaufnehmenden Segments S1 [kg/kg]
 $x_{S2, i}$ = Anfangsfeuchte des feuchteabgebenden Segments S2 [kg/kg]
 $x_{S2, f}$ = Endfeuchte des feuchteabgebenden Segments S2 [kg/kg]

Die Berechnung der Endtemperaturen $\vartheta_{H, S1 f}$ und $\vartheta_{H, S2 f}$ ergibt:

$$\vartheta_{H, S1 f} = \vartheta_{H, S1 i} - \frac{\dot{Q}}{c_{pH, f} \rho_{H, f} V_S} \Delta t \quad \text{und} \quad \vartheta_{H, S2 f} = \vartheta_{H, S2 i} + \frac{\dot{Q}}{c_{pH, f} \rho_{H, f} V_S} \Delta t$$

mit: $\vartheta_{H, S1 i}$ = Anfangstemperatur des wärmeabgebenden Segments S1 [°C]
 $\vartheta_{H, S1 f}$ = Endtemperatur des wärmeabgebenden Segments S1 [°C]
 $\vartheta_{H, S2 i}$ = Anfangstemperatur des wärmeaufnehmenden Segments S2 [°C]
 $\vartheta_{H, S2 f}$ = Endtemperatur des wärmeaufnehmenden Segments S2 [°C]

Zur Bestimmung des Luftstroms in der Trocknungsanlage ist der spezifische Luftdurchsatz durch den Stapel L_{St} von Bedeutung. Er beschreibt die Abhängigkeit des Luftmassenstroms $\dot{m}$ vom Druckunterschied zwischen Stapelanfang und Stapelende Δp_{St} in Abhängigkeit des Strömungswiderstands im Stapel. Es gilt:

$$\dot{m} = L_{St} \cdot \Delta p_{St}$$

mit: $\dot{m}$ = Luftmassenstrom durch den Stapel [kg/s]
 L_{St} = spezifischer Luftdurchsatz durch den Stapel [kg/s Pa]
 Δp_{St} = Druckunterschied zwischen Stapelanfang und -ende [Pa]

Der Strömungswiderstand der Luft im Stapel ergibt sich aus der technischen Strömungslehre [5, 12, 33, 41, 54] wiederum über die Beschreibung des Stapels als Rohrbündel (siehe "2.4 Stoff- und Wärmeübergang an Oberflächen").

Der Widerstandsbeiwert der einzelnen längsangeströmten Platte ξ ist abhängig vom Strömungszustand. Die Rauigkeit der Platte erhöht den Widerstand, wenn ein - strömungsabhängiger - Grenzwert überschritten ist.

Man erhält:

$$\xi = \frac{0,455}{(lg Re)^{2,58}} \quad \text{für} \quad \frac{k}{l_c} Re < 75$$

und

$$\xi = 0,455 / \left(lg \left(75 \cdot \frac{l_c}{k} \right) \right)^{2,58} \quad \text{für} \quad \frac{k}{l_c} Re \geq 75$$

mit: ξ = Widerstandsbeiwert der einzelnen Platte [-]
 Re = Reynoldszahl der Strömung [-]
 k = Rauigkeit der Platte [m]
 l_c = charakteristische Länge der Platte [m]

Es ergibt sich hieraus der Widerstandsbeiwert des Stapels ζ zu:

$$\zeta = \left(\xi \Psi \frac{d_{x,H}}{l_c} + 1,5 \right) \frac{n_{x,st}}{2}$$

mit: ζ = Widerstandsbeiwert des Stapels [-]
 Ψ = Hohlraumanteil der Stapelung [-]
 $d_{x,H}$ = Abmessung eines Brettes in Strömungsrichtung [m]
 $n_{x,st} / 2$
= Anzahl der Bretter in Strömungsrichtung [-]

In quadratischer Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit w folgt der Druckverlust im Stapel Δp_{st} :

$$\Delta p_{st} = \zeta \frac{\rho_{L,f}}{2} w^2$$

mit: $\rho_{L,f}$ = Dichte der feuchten Luft [kg/m³]

Der spezifische Luftdurchsatz durch den Stapel L_{st} ergibt sich dann zu:

$$L_{st} = \frac{\dot{m}}{\Delta p_{st}}$$

Somit sind alle Ausgabewerte bestimmt oder folgen über einfache Mittelung, Summation oder Grundrechenarten aus den Werten der Segmente des Stapels.

3.3 Einbindung in ein TRNSYS Deck

Der Datenaustausch mit dem TRNSYS Deck erfolgt in den von TRNSYS bevorzugt verwendeten Einheiten. Insbesondere beziehen sich die meisten zeitabhängigen Größen auf Stunden [h] statt auf die SI-Einheit Sekunden [s].

TRNSYS Komponenteneinrichtung

<u>PARAMETER NO.</u>			<u>BESCHREIBUNG</u>
1	x_i	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	- Mittlere Anfangsfeuchte im Holz
2	$\vartheta_{H, i}$	$[^{\circ}C]$	- Mittlere Anfangstemperatur im Holz
Für die Parameter 3...11 siehe Abbildung 3.2: ¹			
3	$d_{x, St}$	$[m]$	- Länge des Stapels
4	$d_{y, St}$	$[m]$	- Breite des Stapels
5	$d_{z, St}$	$[m]$	- Höhe des Stapels
6	$d_{x, H}$	$[m]$	- x-Maß eines Brettes
7	$d_{x, L}$	$[m]$	- Bretterabstand in x-Richtung
8	$d_{y, H}$	$[m]$	- y-Maß eines Brettes
9	$d_{y, L}$	$[m]$	- Bretterabstand in y-Richtung
10	$d_{z, H}$	$[m]$	- z-Maß eines Brettes
11	$d_{z, L}$	$[m]$	- Bretterabstand in z-Richtung
12	$\rho_{H, t}$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	- Dichte des trockenen Holzes (gedarrt)
13	$c_{p, H, t}$	$\left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right]$	- Spezifische Wärmekapazität des trockenen Holzes (gedarrt)
14	k	$[m]$	- Mittlere Rauhigkeit des Holzes

¹ Die Parameter 4 und 5, Breite und Höhe des Stapels, entsprechen dem Querschnitt des trocknenden Luftstroms, nicht des zu trocknenden Holzes. Die Modellierung ist umso genauer, je besser die beiden Querschnitte übereinstimmen, also je weniger Luft am Holzstapel vorbeiströmt.

Für die Raumrichtung, in der keine Bretter hintereinander liegen - wo demnach kein "Bretterabstand" vorhanden ist -, ist der entsprechende Wert der Parameter 7, 9 oder 11 gleich Null zu setzen. (Für die Trocknung eines einzelnen Brettes ist $d_{x, L} = d_{y, L} = d_{z, L} = 0$.)

15	Δt	[h]	-	Zeitintervall der TRNSYS Simulation
16	LU <i>"*.SRP"</i>		-	Logical Unit für Sorptionsisothermen
17	LU <i>"*.MTC"</i>		-	Logical Unit für Feuchteleitwerte
18	LU <i>"*.PRF"</i>		-	Logical Unit für Trocknungsprofile

Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerte werden aus eigenen Dateien benötigt (siehe "Anhang C Material- und Anlagenwerte"). Die Dateien müssen im TRNSYS Deck den hier angegebenen Logical Units mit "ASSIGN" zugewiesen werden [25].

INPUT NO.BESCHREIBUNG

1	y_i	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	-	Absolute Luftfeuchte am Stapelanfang
2	$\vartheta_{L, i}$	[°C]	-	Lufttemperatur am Stapelanfang
3	positiver Wert: $\dot{m}_i$	$\left[\frac{kg}{h}\right]$	-	Luftmassenstrom am Stapelanfang
	negativer Wert: $-w_i$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	-	Luftgeschwindigkeit am Stapelanfang
4	p	[Pa]	-	Luftdruck

OUTPUT NO.BESCHREIBUNG

1	y_f	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	-	Absolute Luftfeuchte am Stapelende
2	$\vartheta_{L, f}$	[°C]	-	Lufttemperatur am Stapelende
3	$\dot{m}_f$	$\left[\frac{kg}{h}\right]$	-	Luftmassenstrom am Stapelende
4	$y_{St, m}$	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	-	Mittlere absolute Luftfeuchte im Stapel
5	$\vartheta_{L, St, m}$	[°C]	-	Mittlere Lufttemperatur im Stapel
6	$x_{St, m}$	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	-	Mittlere Holzfeuchte im Stapel
7	$\vartheta_{H, St, m}$	[°C]	-	Mittlere Holztemperatur im Stapel
8	$\dot{x}$	$\left[\frac{kg}{kg \cdot h}\right]$	-	Trocknungsrate des Holzes
9	$\dot{m}$	$\left[\frac{kg}{h}\right]$	-	Feuchtestrom aus dem Holz
10	$\dot{m}_A$	$\left[\frac{kg}{m^2 \cdot h}\right]$	-	Flächenspezifischer Feuchtestrom aus dem Holz
11	$\dot{Q}$	$\left[\frac{kJ}{h}\right]$	-	Wärmestrom in das Holz
12	EMC	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	-	Gleichgewichtsfeuchte
13	L_{St}	$\left[\frac{kg}{h \cdot Pa}\right]$	-	Spezifischer Luftdurchsatz durch den Stapel
14	$\vartheta_{H, St, max}$	[°C]	-	Höchste Holztemperatur im Stapel

15	$TG_{S, \max}$	$[-]$	-	Höchstes in einem Segment auftretendes Trocknungsgefälle $x_{S, m} : EMC$
16	$\Delta x_{S, \max}$	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	-	Höchste in einem Segment auftretende Holzfeuchtedifferenz

Trocknungsprofildatei

Als Ergänzung zu den Ausgabewerten wird ein File mit Trocknungsprofilen erstellt. Es enthält die Feuchte- und Temperaturwerte aller Segmente in Abständen von einer Stunde Simulationszeit.

Die Form jedes Datensatzes ist:

1. Zeile:

t	$[h]$	Zeit im TRNSYS-Simulationsprogramm
-----	-------	------------------------------------

2. bis 8. Zeile:

$y_S(1), \dots, y_S(10)$	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	Luftfeuchte über dem Holz
$x_S(1,0), \dots, x_S(10,0)$	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	Holzfeuchte an der Holzoberfläche
$x_S(1,1), \dots, x_S(10,1)$	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	Holzfeuchte im jeweiligen Segment
...		
$x_S(1,5), \dots, x_S(10,5)$	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	

10. bis 16. Zeile:

$\vartheta_{L, s}(1), \dots, \vartheta_{L, s}(10)$	$[^{\circ}C]$	Lufttemperatur über dem Holz
$\vartheta_{H, s}(1,0), \dots, \vartheta_{H, s}(10,0)$	$[^{\circ}C]$	Holztemperatur an der Holzoberfläche
$\vartheta_{H, s}(1,1), \dots, \vartheta_{H, s}(10,1)$	$[^{\circ}C]$	Holztemperatur im jeweiligen Segment
...		
$\vartheta_{H, s}(1,5), \dots, \vartheta_{H, s}(10,5)$	$[^{\circ}C]$	

Die Begriffe "Holzoberfläche" und "Holzmitte" beziehen sich auf die kleinere Dicke der getrockneten Holzbretter quer zum Luftstrom ($d_{y, H}$ oder $d_{z, H}$). Die Numerierung von eins bis zehn entspricht den zehn Stellen im Holzstapel oder -brett, für die ein Trocknungsprofil berechnet wird (siehe Abbildung 3.2).

Auch der Logical Unit der Trocknungsprofildatei (Parameter 18) muß im TRNSYS Deck mit "ASSIGN" ein File zugeordnet werden.

Warnungen

Die Trocknungsprofildatei enthält auch Warnungen des Moduls, die ausgegeben werden, um über eine möglicherweise fehlerhafte Programmausführung zu informieren (siehe "3.1 Prinzip der Modellierung"). Die Meldungen sind:

"WARNING: CONDENSING OF MOISTURE ON WOOD SURFACE"

Die Simulation ergibt, daß Feuchte an der Holzoberfläche kondensiert. Der Zustand der Trocknungsluft wird neu berechnet, so daß sie die Sättigungsgrenze nicht übersteigt. Da die für den Stoff- und Wärmeübergang zwischen Luft und Holz vom Modul "Holztrocknung" verwendeten Berechnungen beim Auftreten von Kondensation nicht mehr uneingeschränkt gelten und Prozesse eine Rolle spielen, die vom Modul "Holztrocknung" nicht nachvollzogen werden, ist damit zu rechnen, daß die Beschreibung der Trocknung große Ungenauigkeiten aufweist.

"WARNING: NONREALISTIC MOISTURE FLOW AT WOOD SURFACE"

"WARNING: NONREALISTIC HEAT FLOW AT WOOD SURFACE"

"WARNING: NONREALISTIC MOISTURE FLOW IN INNER WOOD"

"WARNING: NONREALISTIC HEAT FLOW IN INNER WOOD"

Bei der Berechnung des Stoff- und Wärmeübergangs an der Holzoberfläche oder des Stoff- und Wärmetransports im Holz sind unrealistische oder physikalisch unsinnige Werte aufgetreten. Das Modul korrigiert die Berechnung in diesen Fällen und bestimmt die neuen Holz- oder Luftzustände aus der Halbierung der vorhandenen Feuchte- oder Temperaturgefälle. Beim gehäuften Auftreten dieser Warnungen muß die Simulation überprüft werden. Meist kann durch ein Verkürzen des Zeitintervalls der Simulation im TRNSYS Deck das Programmverhalten verbessert werden.

3.4 Informationsflußdiagramm

Inputs	-	4
Outputs	-	16
Parameters	-	18
Derivatives	-	0

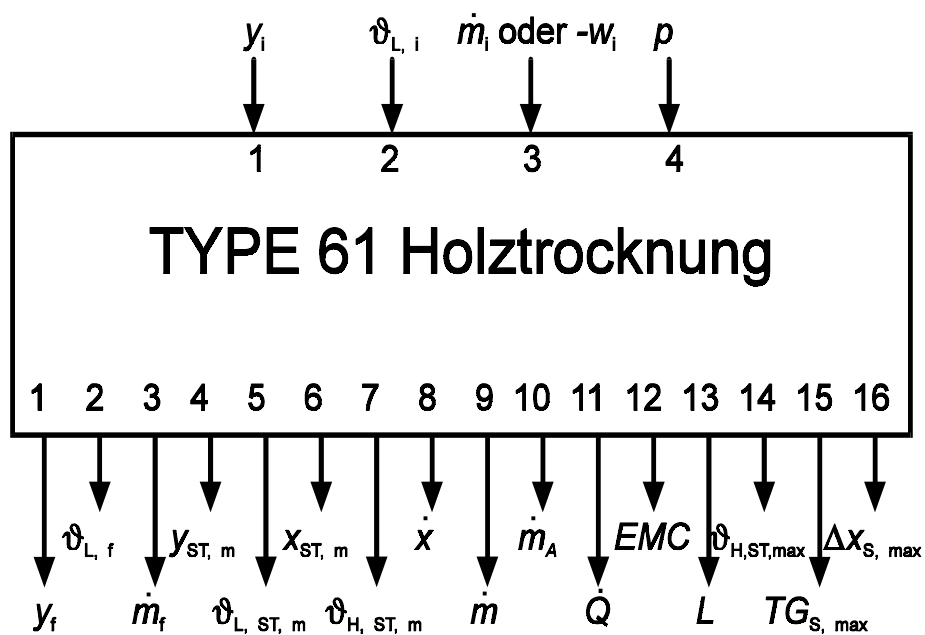


Abb. 3.4: Informationsflußdiagramm

Parameters

1	x_i	7	$d_{x,L}$	13	$c_{p,H}$
2	$\vartheta_{H,i}$	8	$d_{y,H}$	14	k
3	$d_{x,ST}$	9	$d_{y,L}$	15	Δt
4	$d_{y,ST}$	10	$d_{z,H}$	16	$LU \text{ "*.SRP"}$
5	$d_{z,ST}$	11	$d_{z,L}$	17	$LU \text{ "*.MTC"}$
6	$d_{x,H}$	12	$\varrho_{H,t}$	18	$LU \text{ "*.PRF"}$

4 Holztrocknung als industrieller Vorgang

4.1 Gründe für die Holztrocknung

Die Holztrocknung stellt einen wichtigen Schritt der Holzverarbeitung dar und sollte möglichst bald nach dem Fällen beginnen. Frisch gefälltes Holz enthält oft bis zu 100 % Feuchte (1 kg Wasser je kg trockenes Holz), in einzelnen Fällen weit mehr. (Balsaholz kann bis zu 600 % Holzfeuchte aufweisen [34].) Schon aus Gründen der Gewichtsersparnis beim Transport zwischen den holzverarbeitenden Betrieben sollte das Holz also möglichst früh getrocknet werden.

Doch auch für die Holzqualität ist eine gute Trocknung wichtig. Feuchtes Holz ist anfällig für Pilze und Insekten, eine unkontrollierte Trocknung führt zudem zu Rissen, Formänderungen und Verfärbungen, die später nicht mehr rückgängig gemacht werden können. Schließlich erhöht sich durch eine sachgemäße Trocknung die Elastizität und Festigkeit von Holz [27], was der weiteren Verarbeitung zugute kommt.

4.2 Verfahren der Holztrocknung

Das Grundprinzip der hier betrachteten Trocknungsverfahren ist der Übergang von Feuchte aus dem Holz an bewegte Luft als Trocknungsmedium aufgrund des Feuchte- und Temperaturunterschieds, wie dies in "2 Holztrocknung als physikalischer Prozeß" beschrieben wird. Sonderverfahren wie zum Beispiel Vakuumtrocknung und Strahlungstrocknung werden nicht berücksichtigt.

Freilufttrocknung

Stapelarten,
Lohmann Abb. 58, 62

Das einfachste - aber nicht billigste - Verfahren der Holz Trocknung ist die Freilufttrocknung. Man bezeichnet so die Trocknung von gestapeltem Schnittholz auf Lagerplätzen oder in offenen Schuppen [34]. Wichtig ist, wie bei allen Trocknungsverfahren, ein hoher Luftdurchsatz durch den Stapel. Um dies zu gewährleisten, wurden verschiedene Stapelverfahren entwickelt (siehe Abbildung 4.1), die je nach Schnittart, Holzart und Feuchtegehalt des zu trocknenden Holzes eingesetzt werden.

Die Vorteile der Freilufttrocknung liegen in der einfachen Handhabung, der ersparten Investition für technisches Material und den somit niedrigen Betriebskosten. Bei sorgfältiger Stapelung und Überdachung des Holzes ist eine gute Trocknungsqualität möglich.

Abb. 4.1: Stapelarten der Freilufttrocknung; oben: Blockstapel; unten: Kastenstapel

Ungünstig wirken sich der hohe Platzbedarf und das festliegende Kapital aus. Aufgrund der langen Trockenzeiten kann nicht kurzfristig über das Holz verfügt werden.

Der größte Nachteil der Freilufttrocknung liegt jedoch in der erreichbaren Endfeuchte. Um zum Beispiel hochwertige Möbel herzustellen - die sich nicht verziehen -, ist es notwendig, das Holz vor seiner Verarbeitung annähernd auf die später im Raum herrschende Gleichgewichtsfeuchte zu trocknen. Dies entspricht einer Endfeuchte von $x \approx 0,10 \text{ kg/kg}$, die mit Freilufttrocknung nicht erreichbar ist [27, 34]. Für eine hochwertige Holzverarbeitung ist die Freilufttrocknung somit nur zur Vortrocknung geeignet.

Konventionelle Trocknung

Als konventionelle Trocknung bezeichnet man die Verwendung von Trocknungskammern, in denen erwärmte Luft mittels Ventilatoren durch einen oder mehrere Holzstapel geführt wird. Die Erwärmung erfolgt über heißen Dampf, Verheizung von Brennstoffen oder elektrische Energie. Die Lufttemperatur liegt je nach

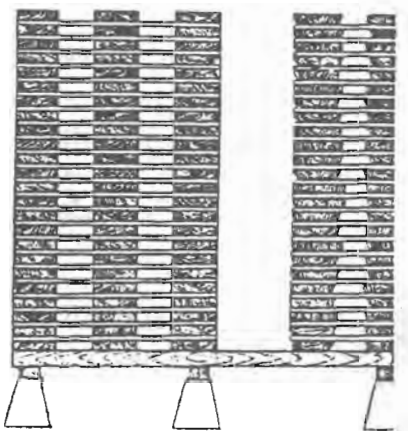
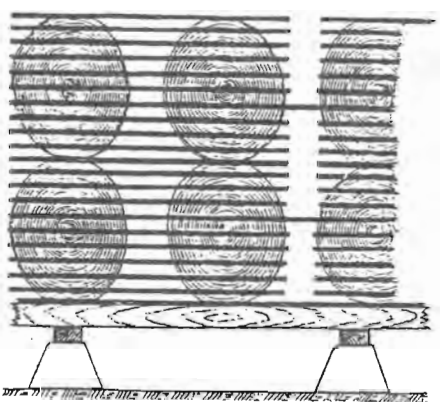


Abb. 4.1: Stapelarten der Freiluft-trocknung; oben: Blockstapel; unten: Kastenstapel

Holzart und Trocknungsstadium zwischen 30 °C und 90 °C, im Sonderfall der Hochtemperatur-trocknung bei bis zu 130 °C. Die Luftgeschwindigkeit beträgt zwischen 1,5 m/s und 8 m/s, je nach Holzart und Stapelung [34]. Abbildung 4.2 zeigt eine typische Holz-trocknungsanlage.

Holz-trocknungsanl.,
Kollmann II, S. 293

Der größte Vorteil der konventionellen Trocknung ist ihre gute Kontrollier- und Regelbarkeit.

Abb. 4.2: Holz-trocknungsanlage (aus [27])

Mit für jede Holzart empirisch festgelegten Trocknungsplänen [8, 34] ist es möglich, gute Trocknungsergebnisse in kurzer Zeit zu erreichen. So ist ein hoher Durchsatz durch die Trocknungsanlage und eine flexible und zuverlässige Planung bei gleichbleibend hoher Qualität der Hölzer möglich.

Ein gewichtiges Argument gegen die konventionelle Trocknung sind ihre Kosten. Bereits die Anschaffung und Inbetriebnahme einer konventionellen Trocknungsanlage sind teuer. Wartungsarbeiten und Reparaturen führen zu hohen laufenden Ausgaben. Schließlich müssen noch die Brennstoffe und die Energie zum Betrieb der Ventilatoren bezahlt werden. Dies führt dazu, daß "kleine" Sägewerksbesitzer keine konventionelle Trocknungsanlage betreiben können und weiter mit Freiluft-trocknung arbeiten. Die daraus resultierende geringere Holzqualität bedeutet zwangsläufig einen Wettbewerbsnachteil der kleinen Sägewerke gegenüber den großen.

Der Betrieb konventioneller Trockner führt wegen des Brennstoff- und Energiebedarfs zu Schadstoff- und Kohlendioxidemissionen, die in Zukunft verringert werden müssen (entsprechend den Beschlüssen der "Konferenz für Umwelt und Entwicklung" der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro im Juni 1992). Weitere nicht zu vernachlässigende Umweltschutzprobleme entstehen durch Abdämpfe oder Abwässer und durch Lärm.

Solare Trocknung

Bei solaren Holz-trocknungsanlagen wird die Lufterwärmung und eventuell auch die Luftbewegung durch Nutzung der Sonneneinstrahlung bewirkt. Solartrockner bestehen aus einem (Luft-) Kollektor, einer Trocknungskammer und einem System zur Luftumwälzung (Ventilatoren oder Aufwindkamin). Die Palette reicht von einfachen, unregelmäßigen Systemen bis hin zu großen Trocknern, die selbständig Temperatur und Feuchte regulieren.

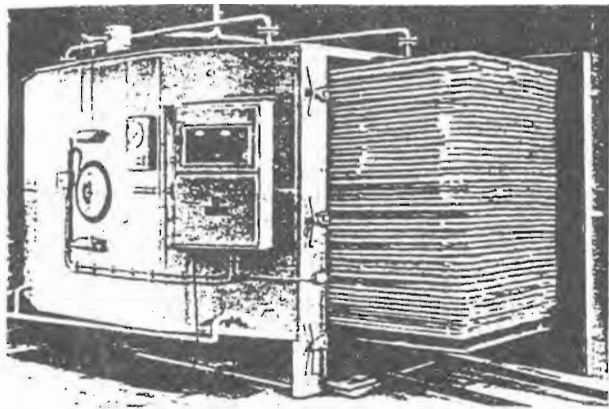


Abb. 4.2: Holztrocknungsanlage (aus [27])

Abhängig von der Ausstattung sind solare Holztrockner meist deutlich billiger als konventionelle Trocknungsanlagen. Es fallen geringere oder keine Kosten für die Energieversorgung an, da keine Brennstoffe nötig sind und allenfalls die Ventilatoren mit Strom zu versorgen sind. Auch die Wartungskosten sind niedriger als bei konventionellen Trocknern.

Dennoch sind gute Trocknungsergebnisse bei kurzen Trockenzeiten, abhängig von der Witterung, möglich. Die erreichbaren Endfeuchten entsprechen vollkommen den Erfordernissen einer modernen Holzverarbeitung. Da die Trocknung weniger "scharf" ist als bei konventioneller Trocknung (die Luftgeschwindigkeiten und -temperaturen sind niedriger, über Nacht besteht die Möglichkeit des Feuchte- und Temperatenausgleichs im Holz), ist die Gefahr von Trocknungsschäden geringer. Ein solarer Trockner ist deshalb einfach zu bedienen.

Solartrockner arbeiten im Prinzip schadstofffrei und lautlos, lediglich der Betrieb der - eventuell vorhandenen - Ventilatoren ist mit Umweltbelastungen verbunden. Der Platzbedarf bei solarer Trocknung ist höher als bei konventioneller Trocknung, jedoch deutlich niedriger als bei Freilufttrocknung.

Der einzige Nachteil der solaren Holztrocknung ist ihre Witterungsabhängigkeit. Die Trocknung braucht länger als bei konventioneller Trocknung, jedoch wesentlich kürzer als bei Freilufttrocknung. Meist ist die Trocknungsdauer nicht exakt vorhersagbar. Dies erschwert die Planung und kann bei großen Sägewerken zu Engpässen führen. Interessanterweise gibt es aber in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern, so auch in Argentinien, ausgedehnte warme und strahlungsreiche Zeiträume, so daß sich der Einsatz von Solarenergie wegen ihrer sicheren Verfügbarkeit dort anbietet.

Die Bilder E.1 bis E.3 (Seiten 167 ff.) zeigen solare Holztrocknungsanlagen aus Argentinien von verschiedener Größe und Konzeption.

Der Trockner des Centro de Investigación Tecnológica de la Madera y Afines (CITEMA) in Santiago del Estero (Bild E.1) ist für den mobilen Einsatz gedacht. Er faßt etwa 8 m³ Schnittholz im Stapel (etwa 4 m³ Netto-Holzvolumen). Die Luft wird in einem 18 m²-Kollektor erwärmt und mit einem Ventilator durch den Stapel geblasen. Mit einfachen Zu- und Abluftklappen können Lufttemperatur und -feuchte - durch Mischen der Trocknungs- mit Umgebungsluft - geregelt werden.

Die Universidad Tecnológica Nacional, Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas (G.I.T.E.A.) in Resistencia entwickelt einen Trockner mit einem Fassungsvermögen von etwa 36 m³ (etwa 18 m³ Netto-Holzvolumen) und einer Kollektorfläche von 48 m² (Bild E.2). Die Luft wird mit zwei Ventilatoren umgewälzt. Zur Regelung der Luftfeuchte und -temperatur sind ebenfalls Zu- und Abluftklappen vorgesehen. Zusätzlich steht eine Heizung zur Verfügung, die mit Holzabfällen oder daraus gewonnenem Holzgas betrieben werden soll. Die

Gesamtanlage aus Sägewerk und Holz Trockner soll energieautark arbeiten und über die Verwertung von Holzabfällen sogar noch Energie in Form von Holzgas, Koks und Briketts "liefern" [3].

Der solare Holz Trockner mit natürlicher Konvektion der Universidad Nacional del Nordeste, Grupo de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (G.I.D.E.R.) (Abbildung E.3) faßt etwa 12 m³ gestapeltes Holz (etwa 6 m³ Netto-Holz volumen). Er ist in "4.6 Solare Aufwindtrocknung in Resistencia, Argentinien" beschrieben.

4.3 Einflüsse von Holzart und Stapelung

Holzart

In der Trocknungstechnik trennt man zwischen Laub- und Nadelhölzern, weichen und harten Hölzern oder auch zwischen langsam- und schnellwachsenden Hölzern. Von Holzart zu Holzart, aber auch bei gleichartigen Hölzern aus verschiedenen Regionen können große Unterschiede in der Holzstruktur bestehen. Daraus folgen unterschiedliche hygroskopische Eigenschaften, unterschiedliche Verhalten bei der Feuchte- und Wärmeleitung und unterschiedliche Elastizitäten und Festigkeiten, um nur die für die Trocknung wichtigsten Punkte zu nennen.

Bei der industriellen Trocknung ist darauf zu achten, möglichst nur gleichartige Hölzer gemeinsam zu trocknen und jedes Holz so zu behandeln, daß keine Trocknungsschäden auftreten. Tabelle 4.1 gibt zum Beispiel die Höchsttemperaturen einiger Holzsorten an, die bei der Trocknung nicht überschritten werden dürfen.

Tab. 4.1: Höchsttemperaturen einiger Hölzer für die Trocknung (nach [27])

Holzart	Höchsttemperatur [°C]
Eiche	50...80
Buche, Ahorn	80
Birke, Lärche	80
Kiefer	80...120
Tanne, Fichte	120

Trocknungspläne [8, 34] geben Werte für die Feuchte und Temperatur der Trocknungsluft in Abhängigkeit von der Holzfeuchte, um so eine schonende und doch schnelle Trocknung zu ermöglichen.

Stapelung

Ein hoher Feuchteübergang aus dem Holz an die Trocknungsluft bedingt einen hohen Luftdurchsatz, gleichzeitig steht aber der durch Stapelleisten verbrauchte Platz nicht für Trocknungsgut zur Verfügung. Außerdem muß die Stapelung dafür sorgen, daß die Bretter möglichst gleichmäßig trocknen, um Risse und Formänderungen des Holzes zu vermeiden. Die ökonomischste Stapelung ergibt sich bei einem möglichst hohen Holzdurchsatz mit hoher Trocknungsqualität. Lohmann [34] gibt Richtwerte und Regeln zur Stapelung.

Mathematisch erfassen läßt sich die Stapelung über den Hohlraumanteil der Stapelung Ψ und die charakteristische Größe der Stapelung f_a (siehe "2.4 Stoff- und Wärmeübergang an Oberflächen").

Tab. 4.2: Typische Trocknungsschäden (nach [27, 30, 34])

Trocknungsschaden	Ursache	Vermeidung
Rißbildung, Verschalung	Hohes Feuchtegefälle zwischen Holzkern und Holzoberfläche	Feuchtegefälle im Holz kleiner 10 %; Trocknungsgefälle kleiner 3...4 bei Nadelholz, 2...3 bei Laubholz
Formänderung	Ungleichmäßige Trocknung; unsachgemäße Stapelung; Anisotropie des Holzes	Sachgemäße Stapelung
Verfärbung	Kondensation von Feuchte am Holz; zu hohe Feuchte oder Temperatur	Rasches Abtrocknen der Randzonen der Bretter
Zellkollaps	Zu scharfe Trocknung oberhalb des Fasersättigungspunkts	Dämpfen zum Ausgleich der Feuchteunterschiede
Harzausfluß	Temperatur über 60 °C	Temperatur kleiner 60 °C
Thermische Zersetzung	Temperatur über 130 °C	Temperatur kleiner 130°C
Trockenspannungen	Hohes Feuchtegefälle im Holz	Ausgleich der Feuchteunterschiede über Nacht (solare Trocknung) oder am Ende der Trocknung (konventionelle Trockn.)

4.4 Qualität der Trocknung

Unsachgemäße oder zu schnelle Trocknung kann zu vielerlei Schäden im Holz führen. Im allgemeinen sind weiche Hölzer weniger empfindlich als harte Hölzer, für die holzartspezifisch günstigste Trocknung sei jedoch abermals auf die empirisch gefundenen Trocknungspläne verwiesen [8, 34].

Tabelle 4.2 zeigt die häufigsten Trocknungsschäden, ihre Ursache und ihre Vermeidung. Weitergehende Angaben, auch zu Bestimmung von Trocknungsschäden, finden sich in der Holz- und Trocknungsliteratur [27, 30, 34].

Wie bereits erwähnt, ist die solare Trocknung weniger gefährlich für das Holz als die konventionelle Trocknung, da sie bei niedrigeren Temperaturen und Trocknungsgefällen¹ erfolgt. Außerdem kann sich das Holz über Nacht "erholen", im Holz findet ein teilweiser Ausgleich der örtlichen Feuchten und Temperaturen statt.

4.5 Planung von Trocknungsanlagen

Die Größe einer Trocknungsanlage richtet sich vor allem nach der Größe des holzverarbeitenden Betriebs und dem Bedarf an getrocknetem Holz pro Zeit. Die Art und Form der getrockneten Hölzer ist entscheidend für die Trockenzeit. Aus diesen Daten und der möglichen täglichen Betriebszeit läßt sich das benötigte Trockenvolumen berechnen [34]. Typische Trocknungskammern fassen 10...100 m³ gestapeltes Holz, also etwa 5...50 m³ Netto-Holzvolumen (Großraumkammern fassen bis zu 4000 m³-Stapel). Obwohl große Kammern wirtschaftlicher sind, ist es aus der Gründen der Flexibilität bei der Betriebsführung oft sinnvoll, kleine Kammern zu verwenden.

Weitere Überlegungen gelten der Beschickung der Kammer (Art der Tore und des Holztransports), der Bauweise (gemauerte Kammer oder Metallkammer), der Belüftung (quer oder längs zum Stapel, Art der Erzeugung des Luftstroms), der Heizung und allen weiteren Systemen zum Luftaustausch (Zu- und Abluftklappen) und zur Luftkonditionierung (Sprüheinrichtungen) [34].

¹ Als Trocknungsgefälle (*TG*) bezeichnet man den Quotient aus Holzfeuchte *x* und Gleichgewichtsfeuchte *EMC*: $TG = x / EMC$ (siehe "2.3 Sorptionsisothermen").

Die meteorologischen Gegebenheiten und die Größe des Betriebes bestimmen, ob solare Trocknung einsetzbar ist oder nicht. Solare Trocknung ist weniger gut "planbar", dafür einfacher handhabbar als konventionelle Trocknung. Sie ist deswegen gut für kleine und mittlere holzverarbeitende Betriebe geeignet.

Die Modellierung einer Trocknungsanlage kann viele Probleme während der Planung lösen. Durch die Simulation von Trocknungsläufen anhand von Trocknungsplänen und Holzdaten lassen sich Trocknungszeiten bestimmen. Für fast alle Gegenden dieser Erde gibt es Wetterdaten, so daß über die Untersuchung eines "Typischen Meteorologischen Jahres" (Typical Meteorological Year [TMY]-Approach, siehe auch [14]) abgeschätzt werden kann, in welchen Zeiträumen solare Trocknung sinnvoll ist.

Die im folgenden beschriebene solare Holz Trocknungsanlage in Resistencia, Argentinien, wurde mit Hilfe eines Rechnermodells geplant. Die Simulation von Lufttemperatur und -geschwindigkeit in der Trocknungskammer in Abhängigkeit von den Trocknerdimensionen führte so unter anderem zur gewählten Kollektorlänge und -breite und zur gewählten Höhe des Aufwindkamins [36, 37].

Zeichnung

Abb. 4.3: Zeichnung der solaren Holz Trocknungsanlage in Resistencia

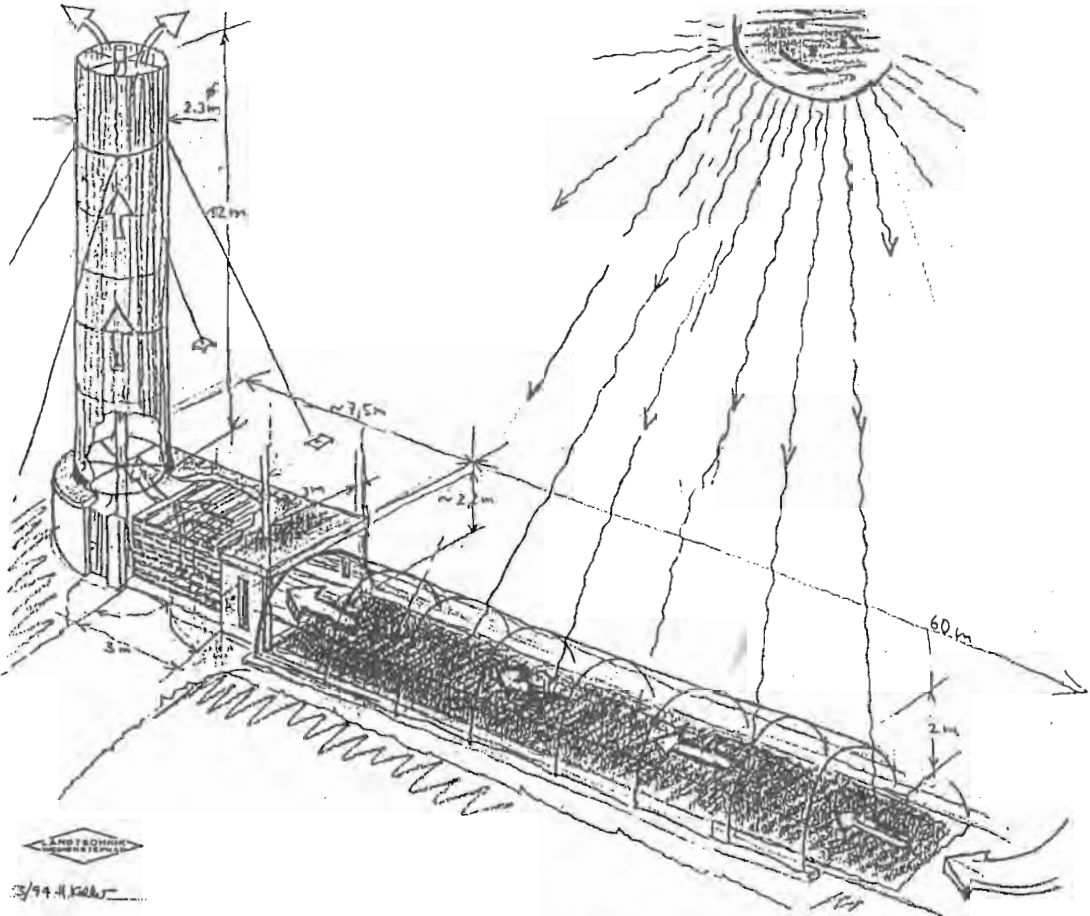


Abb. 4.3: Zeichnung der solaren Holztrocknungsanlage in Resistencia

4.6 Solare Aufwindtrocknung in Resistencia, Argentinien

Holzverarbeitung im Chaco

Die Provinz Chaco mit der Hauptstadt Resistencia liegt im Nordosten Argentiniens (siehe Abbildung 4.7). Verschiedene Holzarten dieser Region, zum Beispiel Algarrobo und Quebracho, werden zur Möbelherstellung verwendet.

Karte

In der feuchtwarmen Klimaregion des Chaco ist die Holz Trocknung vor der Verarbeitung unbedingt erforderlich, da sich die Möbel sonst verziehen, wenn sie in den klimatisierten Gebäuden mit niedriger Luftfeuchte aufgestellt werden.

Da die harten Hölzer des Chaco wegen ihrer geringen Feuchteleitfähigkeit auch in konventionellen Trocknern nur langsam zu trocknen sind und außerdem die Holzverarbeitung vor allem in kleinen Betrieben stattfindet, wird traditionell - falls überhaupt - mit Freiluft getrocknet². Für die Produktion höherwertiger Möbel muß also eine leistungsfähige Trocknung gefunden werden, die dennoch für kleine Betriebe erschwinglich ist. Für das Klima des Chaco - wechselhafte, aber milde Winter und heiße, niederschlagsarme Sommer - ist die solare Trocknung gut geeignet [1].

Abb. 4.4: Lage von Resistencia

Prinzip des Trockners (vergleiche Abbildung 4.6 und Bilder E.3 bis E.8)

In der solaren Holz Trocknungsanlage mit natürlicher Konvektion wird Luft durch Sonnenenergie in einem Folientunnel (aus Polyethylenfolien) erwärmt. Sonnenlicht durchscheint die transparente äußere Folie und wird an der schwarzen

² In anderen Provinzen Argentiniens, zum Beispiel in Misiones, wo vorwiegend standortfremde Weichhölzer (zum Beispiel Fichte) verarbeitet werden, sind konventionelle Trockner dagegen bereits weit verbreitet.



Abb. 4.4: Lage von Resistencia

Bodenfolie absorbiert. Diese erwärmt sich und emittiert Infrarotstrahlung. Die äußere Folie ist für Infrarotstrahlung undurchlässig, absorbiert sie und erwärmt sich ebenfalls. Die Erwärmung der Folien führt zur Temperaturerhöhung der Luft im Tunnel (Treibhauseffekt).

Anschließend strömt die warme, trockene Luft durch den Holzstapel in der gemauerten Trocknungskammer. Hier geht aufgrund der Wasserdampfpartialdruckdifferenz (siehe "2 Holztrocknung als physikalischer Prozeß") Feuchte vom Holz in die Luft über, das Holz trocknet³. Für den Fall zu scharfer Trocknungsbedingungen können zwei Klappen in den Wänden der Kammer geöffnet werden, so daß Umgebungsluft zuströmt und die Trocknung verlangsamt.

Der Luftstrom wird in dieser speziellen Anlage durch natürliche Konvektion in einem Wellblechkamin erzeugt. Aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen warmer Trocknungsluft und kalter Umgebungsluft entsteht Auftrieb, außerdem sorgt Wind, der über den Kamin bläst, für Sog. Es ist keine Zusatzenergie zum Betrieb von Ventilatoren erforderlich.

Um den Wind zusätzlich zu nutzen, wurde die Kollektoröffnung nach Norden gelegt. Warme Nord- und Nordostwinde beschleunigen so die Trocknung, während kalte Süd- und Südostwinde nicht in den Kollektor eindringen [1, 37].

Hintergrund des Projektes

Erste Forschungsarbeiten zu diesem Trockner mit natürlicher Konvektion wurden seit 1988 in Deutschland für landwirtschaftliche Produkte durchgeführt [19, 23, 42, 52]. Dieses Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert und gemeinsam von der Firma IST-Energietechnik in Kandern-Wollbach, der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik der Technischen Universität München und dem Lehrstuhl C für Thermodynamik der Technischen Universität München durchgeführt.

Die Holztrocknungsforschung in Argentinien wird vom Departamento de Termodinámica der Facultad de Ingeniería der Universidad Nacional del Nordeste in Resistencia geleitet, unterstützt durch das Secretaría de Ciencia y Tecnología der Republik Argentinien und die Regierung der Provinz Chaco.

³ Bei ungünstigen Bedingungen findet nachts der umgekehrte Prozeß statt: Das Holz nimmt aus der kalten Luft Feuchte auf. Diese Rückfeuchtung begrenzt die in Solartrocknern erreichbare Endfeuchte.

5 Modellierung der Pilotanlage in Resistencia

5.1 Systemanalyse und Modellaufbau

Wie in "1.2 Systemuntersuchung durch Modellierung" beschrieben, ist die erste Aufgabe der Modellierung die Suche nach den Systemgrenzen. Da die Simulation mit TRNSYS erfolgen soll, muß jedem Untersystem ein TRNSYS-Modul, ein "TYPE" entsprechen. Es bietet sich an, das System "Solare Holz Trocknung mit natürlicher Konvektion" in die Untersysteme "Tunnelkollektor", "Trocknungskammer", "Holzstapel" und "Kamin" zu gliedern (siehe Abbildung 5.1). Zusätzlich benötigt man das Untersystem "Regelung", das bei zu scharfem Trocknungsverlauf die in der Trocknungskammer eingebauten Klappen öffnet¹. Die "Umgebung" beinhaltet die Wetterwerte, die bei der Trocknung von Bedeutung sind.

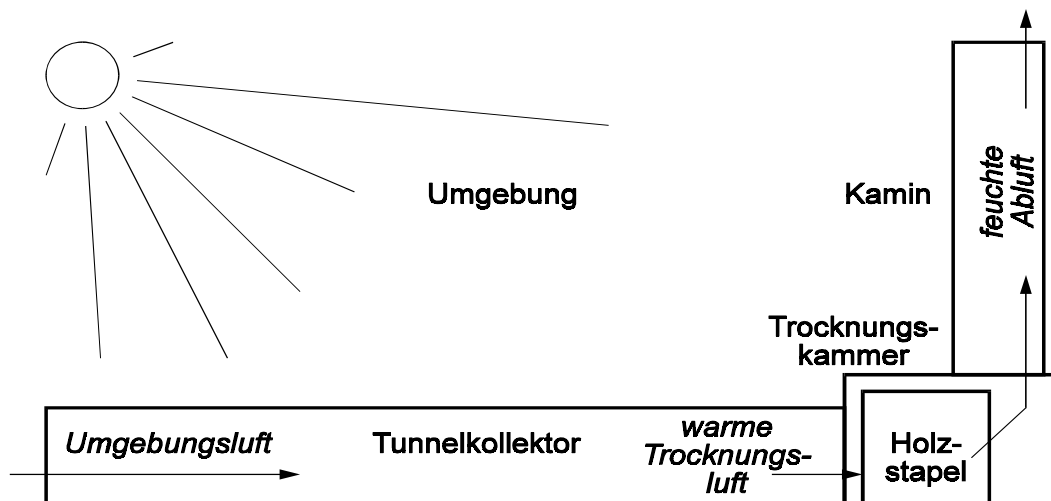


Abb. 5.1: Das System "Solare Holz Trocknungsanlage mit natürlicher Konvektion"

¹ In der bestehenden Anlage erfolgt die Regelung von Hand, das Untersystem "Regelung" entspricht also den Entscheidungen der Bediener des Trockners.

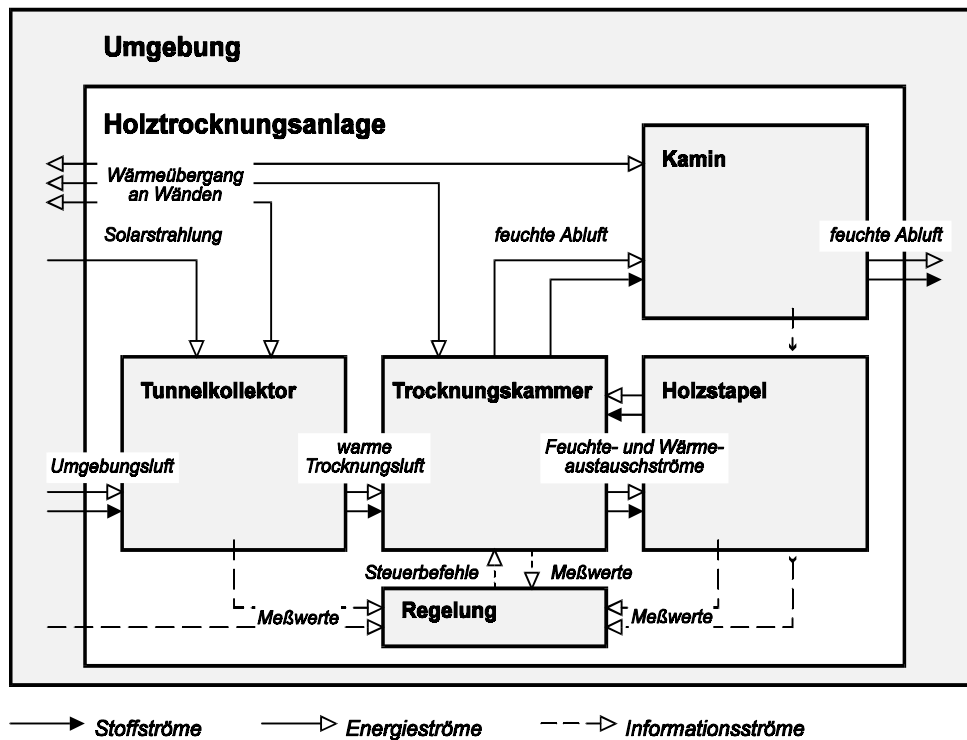


Abb. 5.2: Wechselwirkungen des Systems

Als nächstes müssen die Beziehungen zwischen den Untersystemen dargestellt werden. Man findet Stoffströme (Luft und Feuchte), Energieströme (Sonneneinstrahlung und Wärme) und Informationsströme (Regelung der Klappen). Abbildung 5.2 zeigt das so entstehende Schema der Wechselwirkungen des Systems.

Um das Modell "rechnertauglich" zu machen, müssen alle Angaben über den Zustand und die Funktion des Systems in Zahlen und Formeln wiedergegeben werden. Im TRNSYS Deck werden dann die Komponenten der Simulation und ihre Verknüpfungen bestimmt. Zusätzlich enthält das Deck Befehle zur Steuerung der Simulation (Simulationsbeginn und -ende, Zeitschritt der Simulation etc., siehe "1.4 Modellierung mit TRNSYS") und einfache Gleichungen zum Umformen von Daten für die Übergabe zwischen den Komponenten (zum Beispiel zum Ändern von Einheiten und zur Berechnung von relativer Luftfeuchte aus absoluter Luftfeuchte und umgekehrt).

Im Deck werden auch die Ein- und Ausgabewerte bestimmt. Aus eigenen Dateien werden bei der Modellierung des solaren Holz trockners in Resistencia Wetterwerte und Holzeigenschaften eingelesen. Andere Eingabewerte werden unmittelbar im Deck angegeben. Schließlich bestimmt man im TRNSYS Deck die Ausgabe von Werten. Es besteht die Möglichkeit der Darstellung von Graphen am Bildschirm, der Erstellung von Ausgabedateien und die Ausgabe auf Drucker.

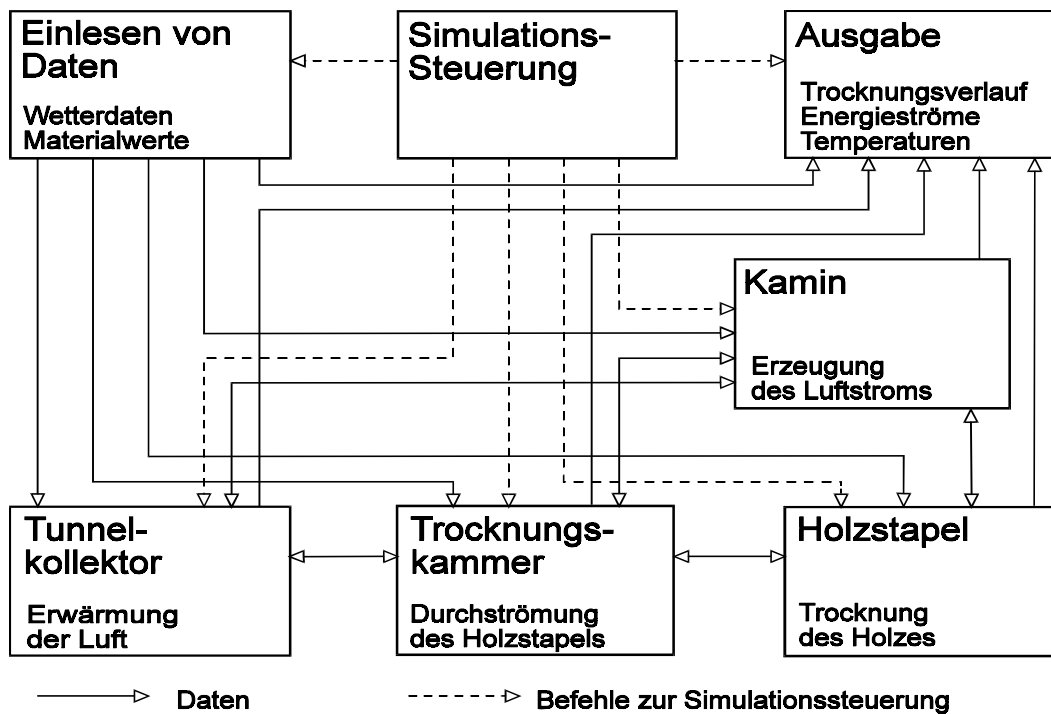


Abb. 5.3: Aufbau des TRNSYS Decks (ohne Modul "Regelung")

Abbildung 5.3 zeigt das Aufbauschema des Decks zur Simulation der solaren Holz Trocknungsanlage in Resistencia. (Für die tatsächliche Form des Decks siehe "Anhang C TRNSYS Decks".)

5.2 Beschreibung der Systemkomponenten

Tunnelkollektor: TYPE 1 "Solarkollektoren"

Es steht kein TRNSYS-Modul zur Verfügung, das den Spezialfall des Tunnelkollektors beschreibt. Der TYPE 1 "Solarkollektoren" läßt sich aber vielfältig modifizieren. Zur Modellierung der Trocknungsanlage in Resistencia wurde also ein allgemeiner Kollektor über die Angabe der Kollektorwirkungsgradkurven, die aus dem Verhalten des Tunnelkollektors im Experiment bestimmt wurden (siehe "6.4 Trocknungsläufe in Resistencia"), zum Tunnelkollektor "gemacht". Die Validierung des Modells zeigt, daß dies zu guten Ergebnissen führt.

Der TYPE 1 "Solarkollektoren" benötigt als wichtigste Eingabewerte die einfallende Strahlung und die diffuse Strahlung, die im TYPE 16 "Solarstrahlungsberechner" ermittelt wird (siehe unten). Die Temperatur der Luft am Kollektoreingang ist gleich der Umgebungstemperatur, der Massenstrom wird in TYPE 91 "Aufwindkamin" bestimmt.

Die weiter anzugebenden Parameter und Eingabewerte mit den für diese Modellierung verwendeten Werten finden sich in Tabelle B.1. Die als Datei bereitzustellenden Kollektorwirkungsgradkurven sind in "6.4 Trocknungsläufe in Resistencia" erklärt.

Als Ausgabewerte stehen die Kollektorausgangstemperatur, der Massenstrom und die an die Luft übergegangene Energie zur Verfügung.

Trocknungskammer: TYPE 19 "Detaillierte Zone"

Der Haupteinfluß der Trocknungskammer besteht in ihrer Funktion als Wärmespeicher. Daneben steht die Kammer im Strahlungsaustausch mit der Umgebung. TYPE 19 "Detaillierte Zone" beschreibt einfache Gebäude und eignet sich somit hier zur Modellierung.

Das Modul bestimmt anhand von Geometrie und Bauweise den Luftzustand in der Kammer. Dies geschieht in Abhängigkeit von den Wetterwerten und den Eigenschaften der in die Kammer fließenden Zuluft. Zudem wird die Änderung des Luftzustands im Kammerinneren berücksichtigt, die zum Beispiel durch Personen im Raum verursacht wird. So fließt auch der Stoff- und Wärmeübergang bei der Trocknung in die Berechnung ein.

Die Wärmekapazität der Trocknungskammer $c_{p\text{Ka}}$ ergibt sich als Abschätzung aus der Bauweise der Kammer [37] und den spezifischen Wärmekapazitäten von Ziegel, Beton und Erde. Das Dach und der Boden werden wie Außenwände berechnet.

Tabelle B.2 zeigt die in dieser Modellierung verwendeten Werte zur Beschreibung der Trocknungskammer. Auf Einzelheiten des TYPEs kann wegen seiner Kompliziertheit nicht eingegangen werden (siehe hierfür [25]).

Holzstapel: TYPE 61 "Holztrocknung"

Die TRNSYS-Komponente "Holztrocknung" ist in "3 Modellierung der Holztrocknung" beschrieben.

Kamin: TYPE 91 "Aufwindkamin"

Diese TRNSYS-Komponente wurde wie der TYPE 61 "Holztrocknung" im Rahmen der Modellierung der Holztrocknungsanlage neu erstellt. Der Kamin wird für die Modellierung als kegelstumpfförmig (mit dem Sonderfall zylindrisch) angenommen. Das Modul berechnet den Luftstrom, der aufgrund von Auftrieb (wegen des Dichteunterschieds zwischen der Luft im und außerhalb des Kamins) und Sog (durch den über den Kamin streichenden Wind) entsteht. Außerdem werden Luftgeschwindigkeiten und -temperaturen, der Wärmedurchgang durch die Kaminwand, der spezifische Luftdurchsatz durch den Kamin und der entstehende Druckunterschied zwischen Luftein- und -austritt angegeben.

Zur Berechnung des Kaminverhaltens benötigt das Modul neben der Geometrie des Kamins die Lufteigenschaften am Lufteintritt und die Umgebungswerte.

Der spezifische Luftdurchsatz durch den Kamin L_{Kn} erfaßt die Abhängigkeit des Luftmassenstroms $\dot{m}$ vom Druckunterschied zwischen Luftein- und -austritt Δp_{Kn} .

Es gilt:

$$\dot{m} = L_{Kn} \cdot \Delta p_{Kn} \quad (5.1)$$

mit: $\dot{m}$ = Luftmassenstrom [kg/s] (in TRNSYS: [kg/h])

L_{Kn} = spezifischer Luftdurchsatz durch den Kamin [kg/s Pa]
(in TRNSYS: [kg/h Pa])

Δp_{Kn} = Druckunterschied zwischen Luftein- und -austritt [Pa]

Zusätzlich muß der spezifische Luftdurchsatz des Systems vor dem Lufteintritt in den Kamin L_{Kn} angegeben werden. L_{Kn} beschreibt die Abhängigkeit des Luftmassenstroms $\dot{m}$ vom Druckunterschied im System vor dem Lufteintritt in den Kamin Δp_{Kn} wie (5.1):

$$\dot{m} = L_{Kn} \cdot \Delta p_{Kn}$$

L_{Kn} setzt sich aus den spezifischen Luftdurchsätzen von Kollektor, Trocknungskammer und Holzstapel wie folgt zusammen:

$$\frac{1}{L_{Kn}} = \frac{1}{L_{Ko}} + \frac{1}{L_{Ka}} + \frac{1}{L_{St}}$$

"3.2 Aufbau der TRNSYS-Komponente 'Holztrocknung'" zeigt, wie der spezifische Luftdurchsatz durch den Holzstapel L_{St} aus bekannten Strömungsgrößen berechnet wird. Dieser Ansatz gilt ähnlich für die übrigen spezifischen Luftdurchsätze der Anlage. Die Berechnung erfolgt im TRNSYS Deck mit dem "EQUATIONS"-Befehl (siehe [25]).

Mit L_{Kn} und L_{Kn} ergibt sich der spezifische Luftdurchsatz der gesamten Anlage L aus:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_{Kn}} + \frac{1}{L_{Kn}}$$

Tabelle B.4 zeigt alle Parameter und Ein- und Ausgabewerte des TYPE 91 "Aufwindkamin". Die Wärmekapazität des Kamins $c_{p,Kn}$ ergibt sich als Abschätzung aus der Bauweise des Kamins [37] und der spezifischen Wärmekapazität von Wellblech.

Regelung: TYPE 40 "Mikroprozessor-Steuerung"

Um Trocknungsschäden zu vermeiden, sollte bei zu "scharfen" Trocknungsbedingungen Frischluft der Trocknungsluft zugemischt werden. Dafür sind in die Trocknungskammer zwei Klappen eingebaut. Der TYPE 40 "Mikroprozessor-Steuerung" ermöglicht die Simulation des Öffnens der Klappen in Abhängigkeit von den Trocknungsbedingungen. Dies modelliert das Verhalten des Bedieners des Trockners.

Die Regelung ist so eingestellt, daß die Klappen bei einer Lufttemperatur am Eingang der Trocknungskammer $\vartheta_{Ka,i}$ von über 70 °C öffnen und bei unter 50 °C wieder schließen. Außerdem öffnen die Klappen beim Auftreten eines höchsten Trocknungsgefälles $TG_{S,max}$ (mit $TG = x / EMC$) im Holzstapel von über vier und schließen bei einem Wert von unter drei.

Tabelle B.5 zeigt die Einbindung der Regelung in das TRNSYS Deck.

Umgebung: TYPE 9 "Datenleser"

Während der Versuche an der solaren Holztrocknungsanlage werden in zehnminütigem Abstand Wetterwerte von einem rechnergestützten Meßsystem erfaßt und gespeichert (siehe [20]). Gemessen wird die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche, die Lufttemperatur und -feuchte und die Windgeschwindigkeit und -richtung. So entsteht ein Wetterprofil, das für die Modellierung ausreichend genaue und häufige Werte liefert.

Die Daten werden dann in ASCII-Files kopiert, aus denen der TYPE 9 "Datenleser" die Werte entnimmt und den anderen Komponenten als Eingabe zur Verfügung stellt. Tabelle B.6 gibt an, wie der TYPE 9 "Datenleser" in dieser Modellierung verwendet wird.

Berechnung der Sonnenstrahlung: TYPE 16 "Solarstrahlungsberechner"

Der "Solarstrahlungsberechner" wirkt als Bindeglied zwischen den eingelesenen Wetterwerten und den strahlungsabhängigen Systemkomponenten Kollektor und Trocknungskammer. Seine Aufgabe ist, aus den Werten für die Horizontalstrahlung unter Berücksichtigung der geographischen Lage, der Jahres- und Tageszeit und der Anordnung der Anlage Diffus- und Direktanteile der Strahlung sowie Werte für den Sonnenstand am Himmel zu bestimmen. Für die Berechnung stehen mehrere Modelle zur Verfügung, die auf meteorologischen Erfahrungen beruhen.

Tabelle B.7 zeigt die Konfiguration des TYPE 16 "Solarstrahlungsberechner".

5.3 Verknüpfung der Komponenten im TRNSYS Deck

Neben der Beschreibung der Systemkomponenten - der Konfiguration -, wird im Deck auch die Beziehung zwischen den Komponenten - die Funktion - des Systems festgelegt. Hierzu wird jeder Eingabe einer Komponente eine Ausgabe einer anderen Komponente zugeordnet, zum Beispiel ist die Temperatur am Eingang der Trocknungskammer gleich der Temperatur am Ende des Kollektors. Eingaben, die während der Simulation unverändert bleiben, werden als konstant angegeben [25].

In einigen Fällen müssen Daten bei der Übergabe zwischen zwei Komponenten umgeformt werden, zum Beispiel um zwischen relativer Feuchte und absoluter Feuchte umzurechnen. Bei der Modellierung mit TRNSYS kann dafür der Befehl "EQUATIONS" [25] verwendet werden. Für die Umwandlung von relativer Feuchte in absolute Feuchte und umgekehrt gilt im für die Holztrocknung interessanten Temperaturbereich (etwa 10 °C bis 90 °C) in guter Näherung:

$$\varphi = \frac{y}{0,622+y} \cdot \frac{p}{p_{D,s}}, \quad \text{wobei:} \quad p_{D,s} = 610,7 \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot \vartheta}{237,5 + \vartheta}\right)} \text{ Pa}$$

mit: φ = relative Luftfeuchte [-]
 y = absolute Luftfeuchte [kg/kg]
 p = Luftdruck [Pa]
 $p_{D,s}$ = Sättigungsdampfdruck der Luft [Pa]
 ϑ = Lufttemperatur [°C]

Die Luft, die als Trocknungsluft in den Holzstapel strömt, ist in den meisten Fällen gleich der Luft am Ausgang des Kollektors. Dies stimmt nicht, wenn die Klappen in der Trocknungskammer geöffnet sind oder wenn nachts die Luftgeschwindigkeit stark abnimmt. In diesem Fall muß die Trocknungsluft als Mischluft aus Kollektorluft und Umgebungsluft, beziehungsweise als Mischluft aus Kollektorluft und stehender Trocknungskammerluft berechnet werden. Auch hierfür eignet sich der "EQUATIONS"-Befehl.

Bei geöffneten Klappen gilt für die Mischluft:

$$\vartheta_m = \frac{A_{Ko,\varnothing} \vartheta_{Ko,f} + A_{Kl,\varnothing} \vartheta_0}{A_{Ko,\varnothing} + A_{Kl,\varnothing}} \quad \text{und} \quad y_m = y_{Ko} = y_0$$

mit: $A_{Ko,\varnothing}$ = Querschnittsfläche des Kollektors [m²]

$A_{Kl,\varnothing}$ = Querschnittsfläche der Klappen [m²]

ϑ_m = Mischtemperatur [°C]

$\vartheta_{Ko,f}$ = Kollektorausgangstemperatur [°C]

ϑ_0 = Umgebungslufttemperatur [°C]

y = absolute Luftfeuchte [kg/kg]

Die absolute Feuchte der Mischluft y_m ist gleich der absoluten Feuchte der Umgebungsluft y_0 , da im Kollektor die absolute Luftfeuchte konstant ist.

Der Einfluß der Kammerluft auf die Mischluft bei abnehmendem Luftstrom aus dem Kollektor wird wie folgt berücksichtigt:

$$\vartheta_m = \frac{\dot{m} \vartheta_{Ko,f} + \xi \vartheta_{Ka}}{\dot{m} + \xi} \quad \text{und} \quad y_m = \frac{\dot{m} y_0 + \xi y_{Ka}}{\dot{m} + \xi}$$

mit: $\dot{m}$ = Luftmassenstrom aus dem Kollektor [kg/s]

ξ = Mischungsfaktor der Kammerluft [kg/s]

ϑ_{Ka} = Kammerlufttemperatur [°C]

y_{Ka} = absolute Luftfeuchte der Kammerluft [kg/kg]

Der Mischungsfaktor ξ ergibt sich im Rahmen der Modellierung durch Parameteranpassung. Es gilt: $\xi \approx 1,4$ kg/s, das heißt, daß bei einem Luftmassenstrom von $\dot{m} \approx 1,4$ kg/s eine etwa gleichteilige Mischung von Kollektor- und Kammerluft berechnet wird.

Die Berechnungen der Mischluft nach dem Holzstapel erfolgen in gleicher Weise. Hier mischt sich Luft, die durch den Stapel fließt, mit Luft, die am Stapel vorbei fließt, und Kammerluft. Diese Mischluft muß als Eingabewert zur Berechnung des Kamins verwendet werden.

Im Deck werden der Modellierung Dateien zugeordnet - zum Beispiel für Wetterwerte und Materialeigenschaften. Dies geschieht mit dem Befehl "ASSIGN" [25]. Jede Datei erhält die Nummer einer "Logical Unit", auf die alle Komponenten zugreifen können.

Der Befehl "SIMULATION" legt Beginn der Simulation, Ende der Simulation und Simulationsintervall fest. Auf weitere Steuerbefehle kann hier nicht näher eingegangen werden (siehe hierfür [10, 25]).

5.4 Vergleich von System und Modell

Keine Modellierung kann ohne Vereinfachungen auskommen. Nach der Verifizierung des Modells ist es die Aufgabe der Validierung, die Zulässigkeit der gemachten Vereinfachungen zu überprüfen, was stark von den Ansprüchen an die Modellierung abhängt.

Schon die Methode der finiten Elemente sorgt für eine Ungenauigkeit bei der Modellierung. Der kontinuierliche Ablauf makroskopischer physikalischer Prozesse wird räumlich und zeitlich in kurze Abschnitte zerlegt. Hier beträgt das Simulationsintervall zehn Minuten, im TYPE 61 "Holztrocknung" sogar nur 15 Sekunden, dennoch zeigen sich zu Beginn der Simulation Einschwingvorgänge, die von den Intervallgrößen abhängen.

Die Holztrocknung verläuft wegen der Feuchte- und Wärmespeicherung im Holz "träge", hier kann nach einigen Simulationsschritten von einer guten Wiedergabe der Wirklichkeit ausgegangen werden. Bei der Speicherung der Wetterwerte werden dagegen nur Momentanwerte in zehnminütigem Abstand aufgenommen. Bei wechselhafter Bewölkung führt dies zu großen Ungenauigkeiten für die Strahlungswerte.

In der gesamten Anlage wird die Luftströmung als in ihrem Querschnitt homogen angenommen. Das Modell berücksichtigt weder Feuchte-, Temperatur- oder Geschwindigkeitsverteilungen über den Querschnitt, noch Verwirbelungen an den Rändern der Strömung oder an den Übergängen zwischen den Systemkomponenten. In "6.1 Genauigkeit der Modellierung" werden Strömungsmessungen in einem konventionellen Holztrockner und in der solaren Holztrocknungsanlage in Resistencia über die Geschwindigkeitsverteilung im Luftstrom vorgestellt.

Weitere Vereinfachungen sind bei der Modellierung der Komponenten nötig.

Tunnelkollektor

Wie bereits erwähnt, muß der Folientunnel im TRNSYS-Modell als allgemeiner Warmluftkollektor modelliert werden. Man kann über die Angabe von Wirkungsgradkurven das Verhalten des Kollektors gut darstellen, für die Übertragbarkeit des Modells auf andere Anlagen ist es aber vorteilhaft, ein spezielles Modul zur Beschreibung von Folientunneln zu entwickeln. Ansätze hierzu gibt Mahr [36].

Ein wesentlicher Mangel der TRNSYS-Komponente TYPE 1 "Solarkollektoren" ist die Nichtberücksichtigung der Wärmespeicherung im Kollektor. Bei der Anlage in Resistencia erwärmt sich der Erdboden unter der Absorberfolie, was zu einer Veränderung des Kollektorverhaltens gegenüber herkömmlichen Luftkollektoren führt.

Die Windabhängigkeit des Kollektorverhaltens kann bisher bei der Modellierung nicht berücksichtigt werden. In TRNSYS ist zwar die Angabe windabhängiger Kollektorwirkungsgradkurven möglich, diese konnten aber bis jetzt nicht erstellt werden, da nicht genügend Windgeschwindigkeiten erfaßt wurden, um einen Zusammenhang zu quantifizieren. Auch ein Einfluß der Windrichtung ist vorhanden, da der Kollektortunnel offen ist und Wind in den Tunnel eindringen kann (siehe "4.6 Solare Aufwindtrocknung in Resistencia, Argentinien"). Der Einfluß der Windrichtung fließt nicht in die Modellierung ein.

Trocknungskammer

Die Trocknungskammer wird im Modell als eine Zone berechnet. Die Änderung des Luftzustands vom Lufteintritt bis zum Luftaustritt wird demnach nicht erfaßt. Da der Einfluß der Kammerluft aber nur bei geringen Luftgeschwindigkeiten und niedrigen Trocknungsraten eine Rolle spielt, kann auf ein komplizierteres Gebäudemodell verzichtet werden.

Ungünstiger ist, daß die Wärmekapazität und Wärmedurchlässigkeit der Trocknungskammer nicht bekannt sind und nur geschätzt werden können. Wegen der großen Öffnungen zum Kollektor und zum Kamin ist eine Berechnung nicht möglich, außerdem ist nicht bekannt, wie groß der Anteil des Erdbodens unter der Kammer an der Wärmespeicherung ist².

² Es ist nicht davon auszugehen, daß die Systemgrenzen neu gezogen werden müssen, um den Einfluß des Erdbodens in die Modellierung miteinzubeziehen. Eine Anpassung der Parameter der Trocknungskammer wird ausreichen, das Verhalten der Trocknungsanlage genauer zu beschreiben.

Holzstapel

Grundsätzlich kann die Anisotropie des Holzes bei der Berechnung der Holz Trocknung nicht berücksichtigt werden, da der Schnitt des Holzes nie bekannt ist. Insbesondere bei der Angabe der Materialkoeffizienten für den Feuchte-transport muß darauf geachtet werden, diejenigen Werte zu wählen, die der Haupttransportrichtung am besten entsprechen.

Die Feuchteverteilung im Holz wird zu Beginn der Trocknung als gleichmäßig angenommen. Abbildung 5.4 zeigt dagegen die Feuchteverteilung zweier Fichtenbretter vor Trocknungsversuchen am Holzforschungsinstitut der LMU München [7] mit deutlichen Unterschieden zwischen Kern- und Splintholz. Feuchteunterschiede in den Brettern entstehen auch durch die Lagerung des Schnittholzes und die damit verbundene Vortrocknung. Zu Beginn der Trocknung wirkt sich dies in Ungenauigkeiten der Modellierung aus.

Feuchteverteilung V7W, V9W

Eine weitere Ungenauigkeit des Modells ergibt sich darin, daß die Tiefe der Verdampfungszone im Holz nicht bekannt ist. Die unterschiedlichen Feuchte- und Wärmetransportvorgänge von Flüssigkeit und Dampf werden über den summierten Feuchteleitwert gemittelt.

Abb. 5.4: Feuchteverteilung in Fichtenbrettern vor der Trocknung:

oben:	mittl. Feuchte:	0,41 kg/kg
	Kernholz:	0,32 kg/kg
	Splintholz:	0,82 kg/kg
unten:	mittl. Feuchte:	0,77 kg/kg
	Kernholz:	0,37 kg/kg
	Splintholz:	1,36 kg/kg

Bei der Berechnung des Strömungsverhaltens der Luft werden keine Formänderungen des Holzes durch Schwinden während der Trocknung berücksichtigt. Das Modell vernachlässigt außerdem Randprozesse der Luftströmung wie zum Beispiel das Einlaufverhalten in den Stapel oder Verluste an den Stapelseiten. Vor allem bei der Modellierung der Trocknung einzelner Bretter führt dies zu Ungenauigkeiten bei der Beschreibung des Luftstroms und der Berechnung von Stoff- und Wärmeübergangskoeffizient.

Das Modul "Holztrocknung" nimmt an, daß nicht nur jedes einzelne Brett, sondern auch der gesamte Stapel homogen aufgebaut ist. Beim Modellieren der Trocknung von Stapeln mit Brettern unterschiedlicher Holzart oder unterschiedlicher Geometrie muß man demnach für jeden Spezialfall eine eigene Simulation starten, in der die entsprechenden Parameter und Materialwerte eingegeben werden.

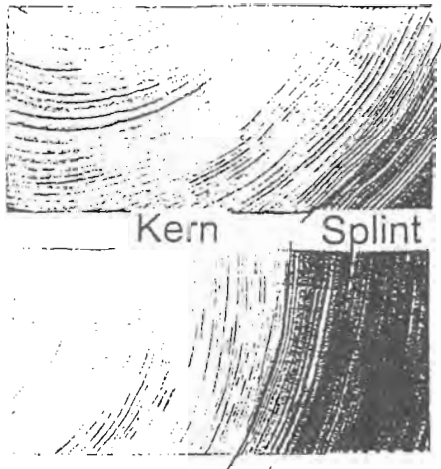


Abb. 5.4: Feuchteverteilung in Fichtenbrettern vor der Trocknung:

oben:	mittl. Feuchte:	0,41 kg/kg
	Kernholz:	0,32 kg/kg
	Splintholz:	0,82 kg/kg
unten:	mittl. Feuchte:	0,77 kg/kg
	Kernholz:	0,37 kg/kg
	Splintholz:	1,36 kg/kg

Kamin

Der Wärmeaustausch des Kamins mit der Umgebung wird nur für den konvektiven Anteil berechnet. Es ist geplant, die Leistung der Trocknungsanlage dadurch zu verbessern, daß der noch silbrig-graue Kamin schwarz angestrichen wird, um so die Sonnenstrahlung zur Erwärmung des Kamins und zur Erhöhung des Auftriebs im Kamin zu verwenden. Diese Veränderung des Systems läßt sich mit dem gegenwärtigen Modell nicht nachvollziehen.

In allen Komponenten des Modells werden Näherungen und Erfahrungswerte zur Berechnung verwendet. Die Validierung muß zeigen, ob trotz aller (notwendigen) Vereinfachungen das Modell zur Beschreibung des Systems verwendet werden kann und ob aus der Anwendung des Modells ein Nutzen zu ziehen ist³.

³ Zum Thema "Nutzen" meint Kurt Vonnegut (US-amerikanischer Schriftsteller):
"Für die meisten Menschen sind Informationen vollkommen nutzlos, es sei denn als Unterhaltung. Wenn Tatsachen weder lustig noch gruselig sind, und wenn man nicht damit reich werden kann, dann zur Hölle damit."

6 Validierung des erstellten Modells

6.1 Genauigkeit der Modellierung

Die Genauigkeit der Modellierung hängt besonders von der Beschreibung der Holzeigenschaften ab. Da Holz ein inhomogenes Material ist, lassen sich keine festen Materialwerte, zum Beispiel für die Feuchteleitung, angeben. Schon Bretter ein- und desselben Baumes verhalten sich je nach Lage im Baum und je nach Schnitt unterschiedlich [27, 34].

Im Rahmen der Modellierung des Trocknungsversuchs "V7W" des Holzforschungsinstituts der LMU München (siehe "6.3 Versuche in der Klimakammer") wurde der Einfluß des Feuchteleitwerts auf die Modellierung der Trocknung abgeschätzt. Böhner [6] zeigt, daß die Durchlässigkeitswerte für Wasserdampfdiffusion im Holz in radialer Richtung bis zu doppelt so hoch sind wie in tangentialer Richtung (siehe "2.5 Stoff- und Wärmetransport im Holz"). (Axialer Feuchtetransport spielt bei der Schnittholztrocknung keine Rolle, da die Feuchte den kürzesten Weg zur Brettoberfläche anstrebt und quer zur Faserichtung fließt.)

Abbildung 6.1 zeigt, welche Trocknungsverläufe sich ergeben, wenn statt des summierten Feuchteleitwerts κ , der sich aus der Literatur [6, 27, 28, 30] und aus Parameteranpassung ergibt und der den tatsächlichen Trocknungsverlauf gut wiedergibt, abweichende Feuchteleitwerte für die Simulation verwendet werden. Zwei Feuchteleitwerte κ_+ und κ_- wurden so gewählt, daß für alle Temperaturen und Feuchten gilt:

$$\frac{\kappa_+}{\kappa} = \frac{\kappa}{\kappa_-} \quad \text{und:} \quad \frac{\kappa_+}{\kappa_-} = 2$$

Über den Vergleich der simulierten Trocknungsverläufe ergibt sich für diese extremen Annahmen eine relative Ungenauigkeit der (mit dem optimierten Feuchteleitwert κ) simulierten Holzfeuchte von bis zu 28 %, der Einfluß des Feuchteleitwerts auf die Modellierung der Trocknung ist - wie erwartet - groß.

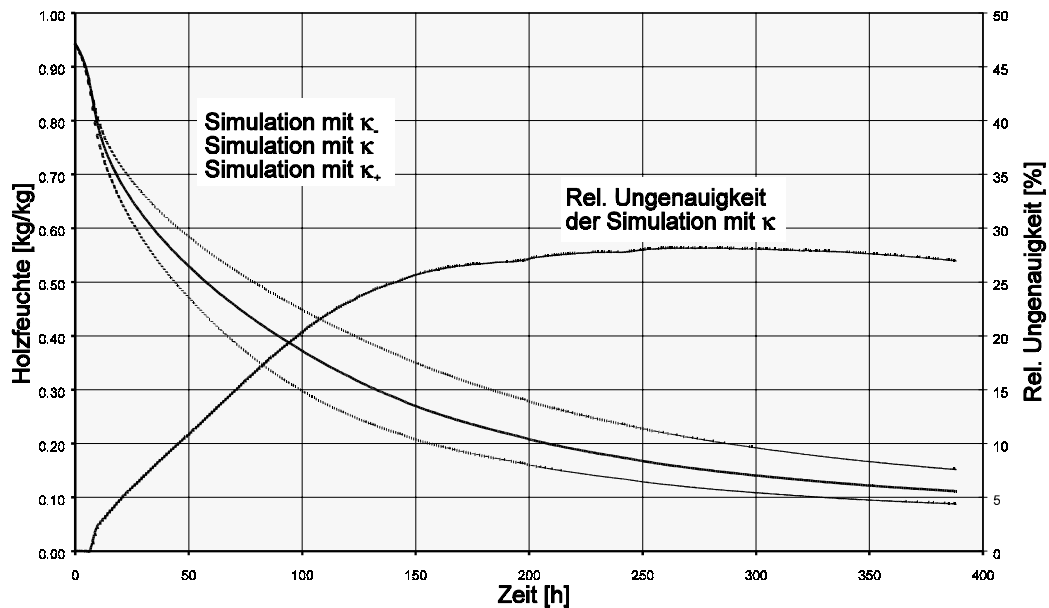


Abb. 6.1: Simulation des Trocknungsverlaufs mit variiertem Feuchteleitwert

Bei der Erstellung von Trockenplänen werden stets vorsichtige Werte angegeben, um die unterschiedlichen Holzverhalten zu berücksichtigen und eine hohe Trocknungsqualität zu wahren [8, 34]. Erst wenn mit der Trocknung einer bestimmten Holzart aus einer bestimmten Region ausreichend Erfahrungen gesammelt wurden, kann die Trocknung verschärft werden, um einen höheren Durchsatz durch die Trocknungskammer zu erreichen.

Für die Modellierung bedeutet die hohe Schwankung der Feuchteleitwerte und die damit verbundene Ungenauigkeit der Modellierung, daß Simulationsergebnisse kritisch überprüft werden müssen. Erst nach dem Vergleich mehrerer Simulationen mit dem Experiment und der daraus folgenden Bestimmung der Holzeigenschaften über Parameteranpassung kann die Modellierung als Prognoseinstrument verwendet werden. An der Trocknungsanlage in Resistencia konnten erst zwei Trocknungsversuche durchgeführt werden, so daß über die Genauigkeit der Modellierung noch keine abschließende Aussage möglich ist (siehe "6.4 Trocknungsläufe in Resistencia").

Der zweite wichtige Einfluß auf die Genauigkeit der Modellierung ist die Beschreibung des Zustands der Trocknungsluft. Während die Holzeigenschaften die festen Parameter der Trocknung bestimmen - über Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerte -, bestimmt der Zustand der Trocknungsluft den Verlauf der Trocknung über die Variablen Feuchte, Temperatur und Luftgeschwindigkeit.

Diese Größen werden in der Modellierung als über den Querschnitt der Strömung konstant angenommen. Der Änderung der Werte im Verlauf der Strömung wird im Holzstapel durch die Berechnung in zehn Segmenten entsprochen, für die

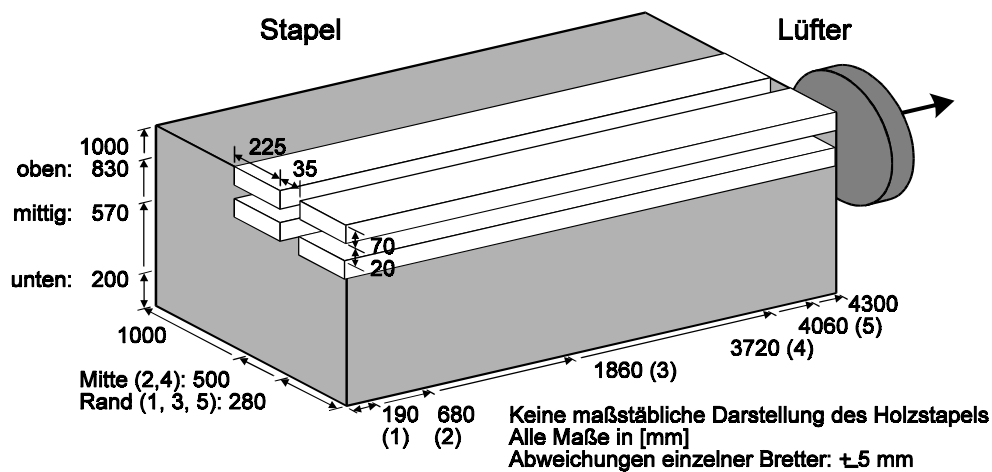


Abb. 6.2: Schema des Holzstapels zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten im konventionellen Trockner; Lage der Meßstellen (1) bis (5) für Tab. 6.1

Tab. 6.1: Strömungsgeschwindigkeiten im konventionellen Holztrockner (alle Werte in [m/s])

Meßstelle Meßpunkt	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Mittelwert
oben	1,8 ... 2,1 ^a	1,8 ... 1,95	1,85 ... 1,95	3,1	2,7 ... 3,1	2,3 ± 0,6
mittig	3,7 ... 4,5 ^a	2,05 ... 2,15	3,5 ... 3,6	3,9	3,8 ... 4,0	3,5 ± 0,8
unten	4,1 ... 4,2	2,7 ... 2,9	3,7 ... 3,8	3,5	5,2	3,9 ± 0,8
Mittelwert	3,4 ± 1,1	2,3 ± 0,4	3,1 ± 0,8	3,5 ± 0,3	4,0 ± 1,0	3,2 ± 1,0

^a stark schwankende Meßergebnisse

Modellierung des Kollektors und der Trocknungskammer fehlt eine solche Möglichkeit.

Tabelle 6.1 beschreibt die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Holzstapel einer konventionellen Trocknungsanlage des Holzforschungsinstituts der LMU München (Abbildung 6.2 zeigt das Schema des längsbelüfteten Stapels). Die an Position (2) mittig und unten gemessenen Geschwindigkeiten sind deutlich niedriger als die Werte der benachbarten (1) und (3). Eine mögliche Erklärung ist, daß das Meßgerät bei (2) nicht zwischen zwei Brettern sondern in einer Stapellücke lag.

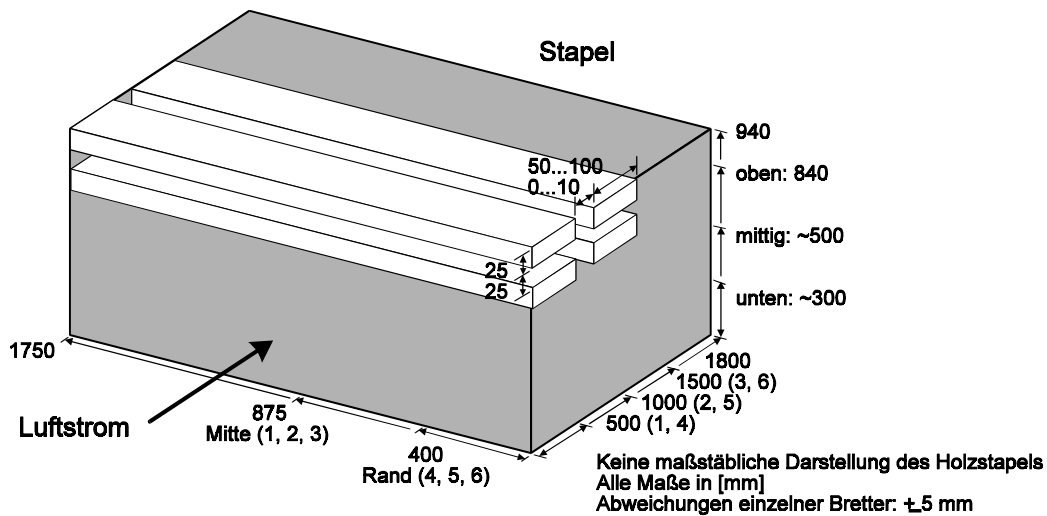


Abb. 6.3: Schema des Holzstapels zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten im Solartrockner; Lage der Meßstellen (1) bis (6) für Tab. 6.2

Tab. 6.2: Strömungsgeschwindigkeiten im Solartrockner (alle Werte in [m/s])

Meßstelle Meßpunkt	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	Mittelwert
oben	1,2	0,8	0,6	0,8	0,6	0,7	$0,8 \pm 0,2$
mittig	0,8	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	$0,8 \pm 0,2$
unten	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6	$0,6 \pm 0,1$
Mittelwert	$0,9 \pm 0,2$	$0,8 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,0$	$0,6 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,2$

Die Verteilung der Luftgeschwindigkeit im Holzstapel während des ersten Trocknungsversuchs in Resistencia ist in Tabelle 6.2 zusammengefaßt (Abbildung 6.3 zeigt das Schema des querbelüfteten Stapels).

Die Luftgeschwindigkeitsmessung vor dem Stapel ergab $w = 1,0 \pm 0,2$ m/s. Der Unterschied zur Strömungsgeschwindigkeit im Stapel folgt aus dem Aufbau des Stapels in der Trocknungskammer. Da der Stapel nur etwa einen Meter hoch war, floß ein Teil der Trocknungsluft über statt durch den Stapel. (Über dem Stapel ergab sich $w = 1,1 \pm 0,3$ m/s.) Im Sinne einer schnelleren Trocknung und einer genaueren Modellierung muß der Stapel bei weiteren Versuchen möglichst die gesamte Trocknungskammer ausfüllen. (Die Modellierung berücksichtigt die Aufteilung des Luftstroms bei der Berechnung des Massenstroms durch den Stapel.)

Die relative Ungenauigkeit der Strömungsgeschwindigkeit im Stapel ergibt sich aus Tabelle 6.1 und aus Tabelle 6.2 übereinstimmend zu etwa 30 %.

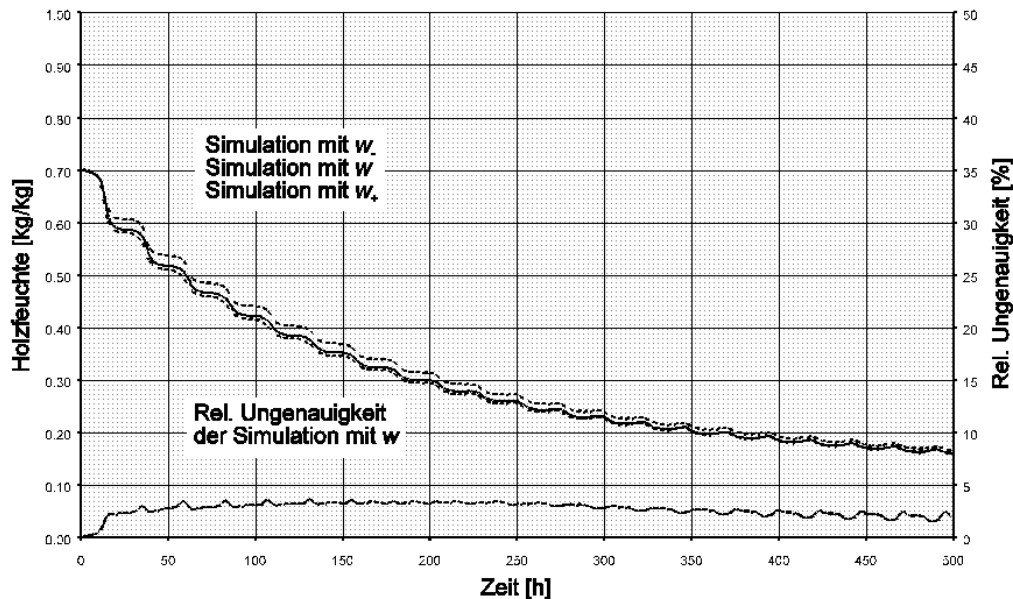


Abb. 6.4: Simulation des Trocknungsverlaufs mit variiertter Luftgeschwindigkeit

Anhand der Simulation eines im Freien trocknenden Holzstapels wurde der Einfluß der Ungenauigkeit der Luftgeschwindigkeit auf die Simulation der Trocknung untersucht. Abbildung 6.4 zeigt den Trocknungsverlauf für die Luftgeschwindigkeit w und die variierten Luftgeschwindigkeiten w_+ und w_- . Es ist hier während der gesamten Simulation:

$$w_+ = 1,3 \cdot w$$

$$w_- = 0,7 \cdot w$$

und:

Aus dem Vergleich der Trocknungsverläufe mit den Luftgeschwindigkeiten w , w_+ und w_- ergibt sich eine relative Ungenauigkeit der simulierten Holzfeuchte von unter 4 %. Dieser geringe Einfluß der Luftgeschwindigkeit auf die Modellierung bestätigte sich in anderen Simulationen.

Weitere Ungenauigkeiten der Modellierung entstehen aus den in "5.4 Vergleich von System und Modell" beschriebenen Vernachlässigungen und Näherungen. Ihre Auswirkungen sind jedoch geringer als die oben beschriebenen Schwankungen der Holzeigenschaften und des Strömungszustands.

Beim Betrieb konventioneller Trocknungsanlagen und bei der Freilufttrocknung spielen Erfahrungswerte eine große Rolle, um das ungenaue oder nicht vorhandene Wissen - zum Beispiel über Holzeigenschaften - zu ergänzen. Dies ist beim Betrieb einer solaren Trocknungsanlage und auch bei der Modellierung der Holz Trocknung zu beachten. Die Modellierung kann nicht genauer sein als die ihr zur Verfügung

stehenden Eingaben.

6.2 Überprüfung allgemeiner Voraussagen

Aus der Beschreibung der Holz Trocknung (siehe "2 Holz Trocknung als physikalischer Prozeß") ergeben sich Ansätze, das Modell unabhängig von Experimenten auf seine Übereinstimmung mit der Wirklichkeit zu überprüfen.

Trocknungsperioden

Zunächst wurde untersucht, ob das Modell die Trocknungsperioden richtig wiedergibt. In Versuchen zeigen sich diese am besten bei der Trocknung eines einzelnen Brettes mit moderaten, konstanten Trocknungsbedingungen. Für die Überprüfung der Modellierung wurde dieser Fall simuliert.

Tabelle 6.3 zeigt die Annahmen und Ergebnisse der Modellierung. Abbildung 6.5 zeigt den Verlauf von Holzfeuchte und Trocknungsgeschwindigkeit mit den daraus bestimmten Trocknungsperioden.

Das Modell reproduziert die Konstanz der Trocknungsgeschwindigkeit während des ersten Trocknungsabschnitts und den exponentiellen Abfall der Trocknungsgeschwindigkeit im dritten Trocknungsabschnitt. Wie in Wirklichkeit nähert sich die Holzfeuchte schließlich asymptotisch der Gleichgewichtsfeuchte. Der exponentielle Abfall der Trocknungsgeschwindigkeit während des zweiten Trocknungsabschnitts ist aus der Simulation nicht zu erkennen.

Die Lage des zweiten Knickpunkts am Fasersättigungspunkt des Holzes wird mit einer Abweichung zum Literaturwert [27] von unter 10 % wiedergegeben. Eine Erklärung für die Simulation der zu niedrigen Holzfeuchte am zweiten Knickpunkt ist, daß das Modell die (trockenen) Brettränder bei der Mittelung der Holzfeuchte einbezieht. Diese haben aber nur einen geringen Einfluß auf die Lage des zweiten Knickpunkts.

Schlecht wiedergegeben wird der Verlauf der Trocknung am Trocknungsbeginn, da das Modell von einer Gleichverteilung der Feuchte im Holz ausgeht, die in der Realität nicht besteht. Dies zeigt sich auch bei der Modellierung der Trocknungsversuche "V7W" und "V9W" bei der Validierung des Modells anhand von Klimakammerversuchen (siehe "6.2 Versuche in der Klimakammer"). Diese Ungenauigkeit tritt nur zu Beginn der Trocknung auf - das Modell bestimmt schnell eine wirklichkeitsgetreuere Feuchteverteilung im Brett -, so daß die Trocknungsperioden zufriedenstellend beschrieben werden.

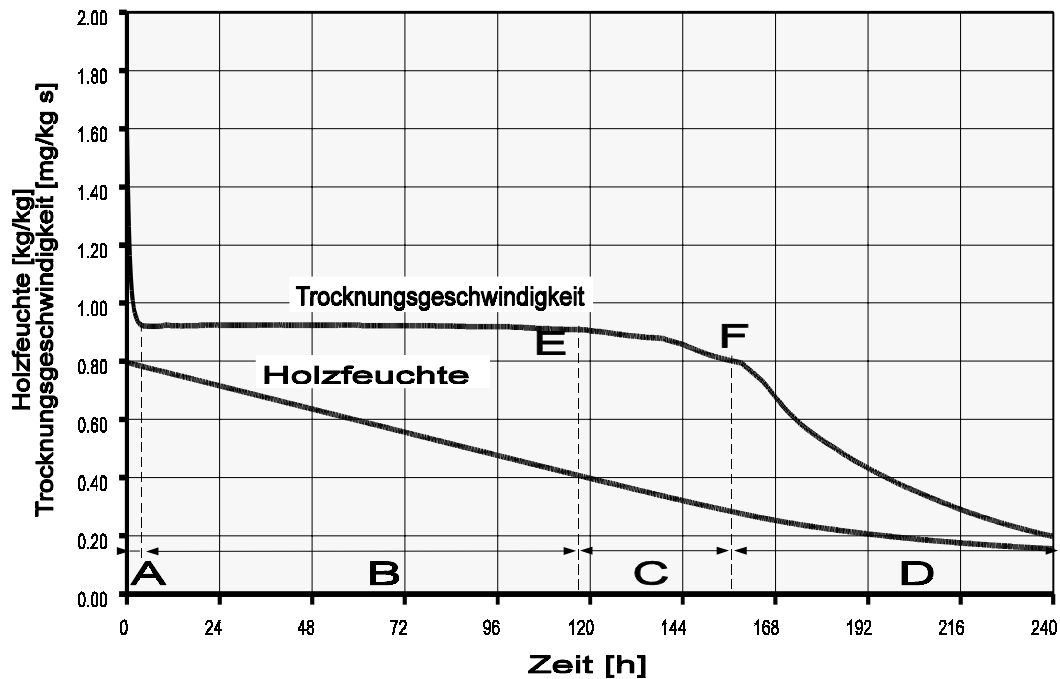


Abb. 6.5: Simulation der Trocknungsperioden der Holz Trocknung:
 A: Abtrocknen haftender Feuchte; B, C, D: Erster bis dritter Trocknungsabschnitt;
 E: Erster Knickpunkt; F: Zweiter Knickpunkt (Fasersättigungspunkt)

Tab. 6.3: Simulation der Trocknungsperioden

Annahmen der Modellierung			
Holzart:	Fichte		
Brettmaße:		Trocknungsluft:	
Länge:	1000 mm	Temperatur:	50 °C
Breite:	400 mm	Rel. Feuchte:	60 %
Höhe:	20 mm	Luftgeschwindigkeit:	0,5 m/s
Anfangsfeuchte:	0,80 kg/kg	Gleichgewichtsfeuchte:	0,09 kg/kg
Ergebnisse der Modellierung			
Holzfeuchte am ersten Knickpunkt (Ende des ersten Trocknungsabschnitts):		0,41 kg/kg	
Holzfeuchte am zweiten Knickpunkt (Ende des zweiten Trocknungsabschnitts und Fasersättigungspunkt):		0,28 kg/kg	
Zum Vergleich:			
Fasersättigungspunkt (FSP) bei Fichte laut Kollmann [27]:		0,30...0,34 kg/kg	
Relative Abweichung zur Simulation des FSP:		3,4...9,7 %	

Temperaturverhalten

Die Modellierung läßt sich ohne Experimente daraufhin überprüfen, ob das Einstellen der Kühlgrenztemperatur und die Einflüsse der Wärmekapazität des Holzes qualitativ richtig simuliert werden. Bei der Simulation eines im Freien trocknenden Holzstapels können beide Aspekte beobachtet werden. Tabelle 6.4 faßt die Annahmen und Ergebnisse der Modellierung zusammen, Abbildung 6.6 zeigt das simulierte Temperaturverhalten.

Es ist deutlich zu erkennen, daß während der ersten Tage der Trocknung eine starke Abkühlung der Trocknungsluft - um bis zu 10 °C - vom Stapeleinlauf zum Stapelauslauf simuliert wird. Dies entspricht dem Einstellen der Kühlgrenztemperatur bei der realen Trocknung. Gegen Ende der Simulation ist diese Abkühlung - wie erwartet - kaum zu beobachten.

Während der gesamten Trocknung spielt die Wärmekapazität des Trocknungsguts eine große Rolle. Sie führt zu einer zeitlichen Verschiebung und zu einer Dämpfung der Temperaturkurve des Holzes bezüglich der Lufttemperatur am Stapeleinlauf. Die Lufttemperatur am Stapelauslauf ist wegen des Wärmeaustauschs im Stapel ebenfalls zeitlich verschoben bezüglich der Stapeleinlaufstemperatur.

Die Modellierung beschreibt die wichtigsten Aspekte des Temperaturverhaltens bei der Trocknung qualitativ richtig.

6.3 Versuche in der Klimakammer

Zur weiteren Validierung des Modells zur Beschreibung der Holz Trocknung wurden drei am Holzforschungsinstitut der LMU München durchgeführte Versuche ausgewählt.

Versuche V7W und V9W mit konstanten Trocknungsbedingungen

Die Versuche V7W und V9W wurden im Januar und Februar 1994 am Holzforschungsinstitut mit Fichtenbrettern durchgeführt [7]. Da die Eigenschaften von Fichte im Vergleich zu anderen Holzarten gut erforscht sind, eignen sich diese Versuche besonders zur ersten Validierung des Trocknungsmodells. Die Sorptionsisothermen als Grundlage der Modellierung wurden der Literatur

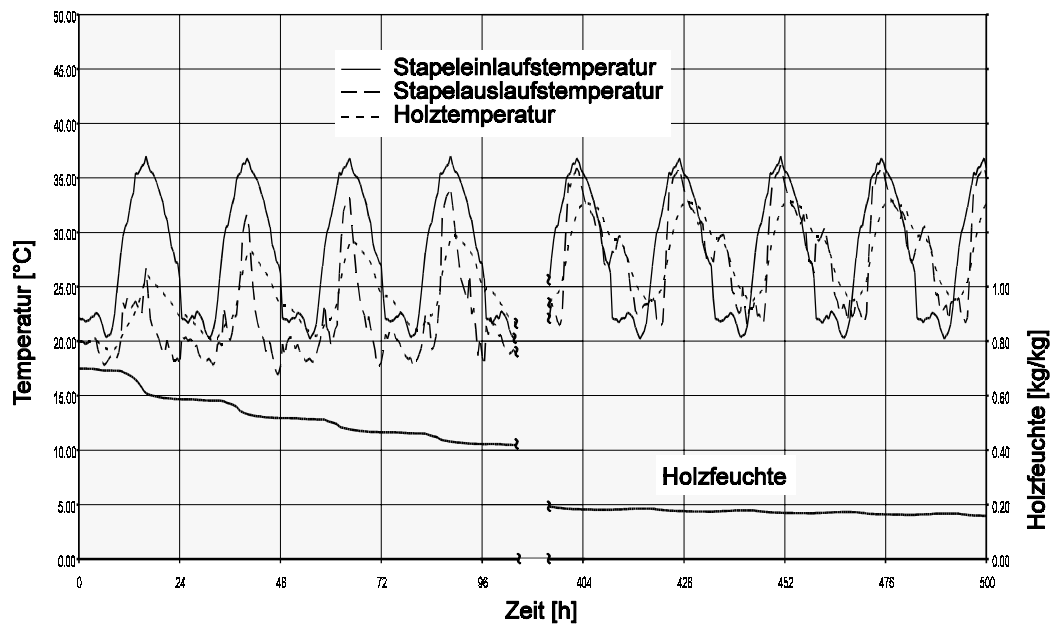


Abb. 6.6: Simulation des Temperaturverhaltens bei der Holz Trocknung

Tab. 6.4: Simulation des Temperaturverhaltens bei der Holz Trocknung

Annahmen der Modellierung			
Holzart:	Fichte	Anfangsfeuchte:	0,70 kg/kg
Stapelmaße:		Brettmaße:	
Länge:	1500 mm	Länge:	1000 mm
Breite:	1200 mm	Breite:	150 mm
Höhe:	1500 mm	Höhe:	25 mm
Trocknungsluft:			
Zeitlicher Verlauf gemäß den Wetterdaten eines sonnigen Wintertags in Resistencia, Argentinien			
Ergebnisse der Modellierung			
Endfeuchte nach 500 h Trocknung: 0,16 kg/kg			
Das Einstellen der Kühlgrenztemperatur und die Einflüsse der Wärmekapazität des Holzes auf das Temperaturverhalten der Trocknung werden durch die Simulation qualitativ richtig beschrieben.			

entnommen [27] (siehe "C.1 Sorptionsisothermen"). Die Feuchteleitwerte wurden durch Parameteranpassung¹ ermittelt. Tabelle 6.5 zeigt die Annahmen der Modellierung für die Versuche V7W und V9W.

Bei den Versuchen tritt zu Beginn der Trocknung eine Verzögerung der Trocknung (V7W), beziehungsweise Befeuchtung des Holzes (V9W) auf. Die Simulation gibt eine Warnung aus, daß laut Berechnung des Luftzustands Feuchte am Holz kondensiere. Um die daraus folgende Abweichung zwischen Simulation und Experiment auszugleichen, wurde bei beiden Versuchen die Anfangsfeuchte der Modellierung höher gewählt als im Experiment gemessen. So stimmt nach der Anfangsperiode die simulierte und die gemessene Feuchte überein.

Abbildung 6.8 (Seite 80) zeigt den Vergleich des experimentellen und simulierten Trocknungsverlaufs. Die größten relativen Abweichungen der Simulation von den gemessenen Werten liegen beim Versuch V7W mit 17 % im Rahmen des aufgrund der Abschätzung der Genauigkeit der Modellierung Erwarteten. Die großen Unterschiede zwischen Experiment und Simulation beim Versuch V9W entstehen innerhalb der ersten 24 Stunden der Trocknung im Feuchtebereich oberhalb des Fasersättigungspunkts und hängen möglicherweise mit dem Auftreten von Kondensation bei der Trocknung zusammen.

Dieser Eindruck wird durch den Vergleich der Trocknungsgeschwindigkeiten bestärkt (Abbildung 6.9, Seite 81). Für den Feuchtebereich unterhalb des Fasersättigungsbereichs ergeben sich übereinstimmende Werte für die Relation von Trocknungsgeschwindigkeit zu Feuchte. Beim Versuch V7W setzt sich diese Übereinstimmung auch in hohe Feuchtebereiche fort.

Der Vergleich der Trocknungsprofile am Ende der Trocknung gibt ein interessantes Ergebnis. Beide Simulationen reproduzieren den qualitativen Verlauf der Feuchteverteilung im Holz (Abbildung 6.7). Beim Versuch V7W stimmen die ermittelten Endfeuchten aus Experiment und Simulation mit den Werten des Feuchteprofils überein. Beim Versuch V9W weist das gemessene Feuchteprofil indes höhere Feuchten auf als die Simulation, im Gegensatz zu den Werten der Endfeuchte. Die Abschätzung der Endfeuchte aus der Mittelung des gemessenen Feuchteprofils führt zu einem Wert von etwa 0,14 bis 0,15 kg/kg, was wiederum sehr gut dem Ergebnis der Simulation entspricht.

Da die Trocknungsversuche mit konstanter Lufttemperatur durchgeführt wurden, läßt sich die Simulation von Temperaturen hier nicht überprüfen.

¹ Die gesuchten Parameter werden in fortlaufenden Simulationen in kleinen Schritten variiert, bis die größtmögliche Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität erreicht ist. Kann kein zufriedenstellender Parametersatz gefunden werden, ist das Modell zu überprüfen.

Tab. 6.5: Simulation der Trocknungsversuche V7W und V9W

Annahmen der Modellierung			
Holzart:	Fichte	Anfangsfeuchte V7W:	0,95 kg/kg
		Anfangsfeuchte V9W:	0,47 kg/kg
Brettmaße:		Trocknungsluft:	
Länge:	500 mm	Temperatur V7W:	60 °C
Breite:	180 mm	Temperatur V9W:	75 °C
Höhe:	90 mm	Rel. Feuchte: gemäß Trocknungsplan	
		Luftgeschwindigkeit:	2,5 m/s
		Gleichgewichtsfeuchte am Schluß der Trocknung:	0,07 kg/kg
Ergebnisse der Modellierung			
Endfeuchte V7W nach 388,5 h Trocknung: 0,11 kg/kg (im Experiment: 0,12 kg/kg)			
Endfeuchte V9W nach 142,5 h Trocknung: 0,15 kg/kg (im Experiment: 0,11 kg/kg)			
Größte rel. Abweichung			V7W: 17 %
der sim. Holzfeuchte von der gemessenen Holzfeuchte:			V9W: 33 %

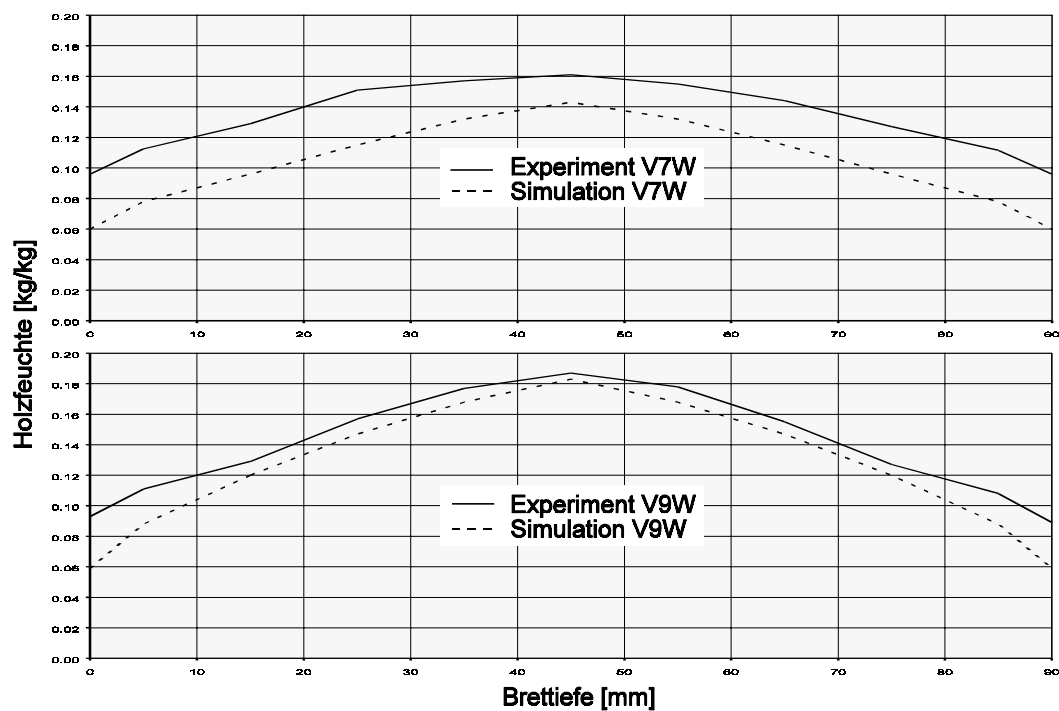


Abb. 6.7: Simulation der Trocknungsprofile der Versuche V7W und V9W

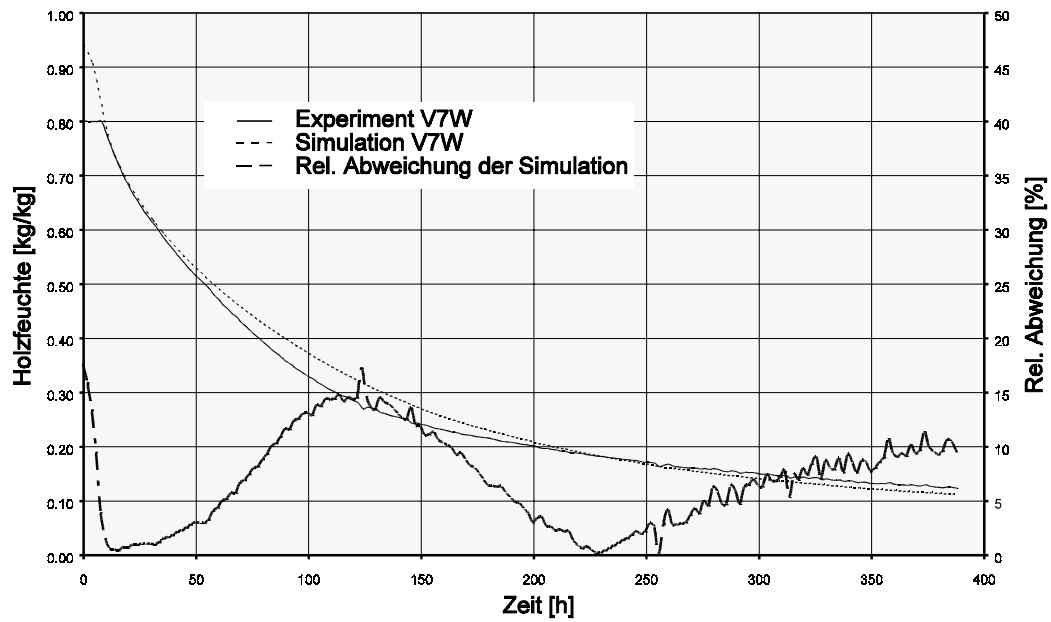


Abb. 6.8a: Simulation des Trocknungsverlaufs des Versuchs V7W

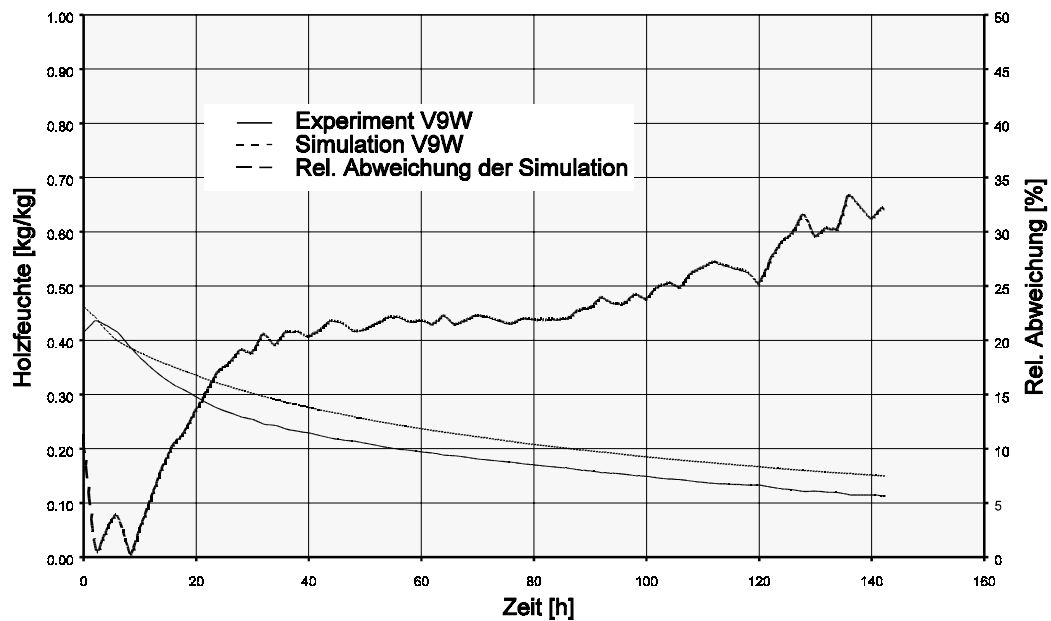


Abb. 6.8b: Simulation des Trocknungsverlaufs des Versuchs V9W

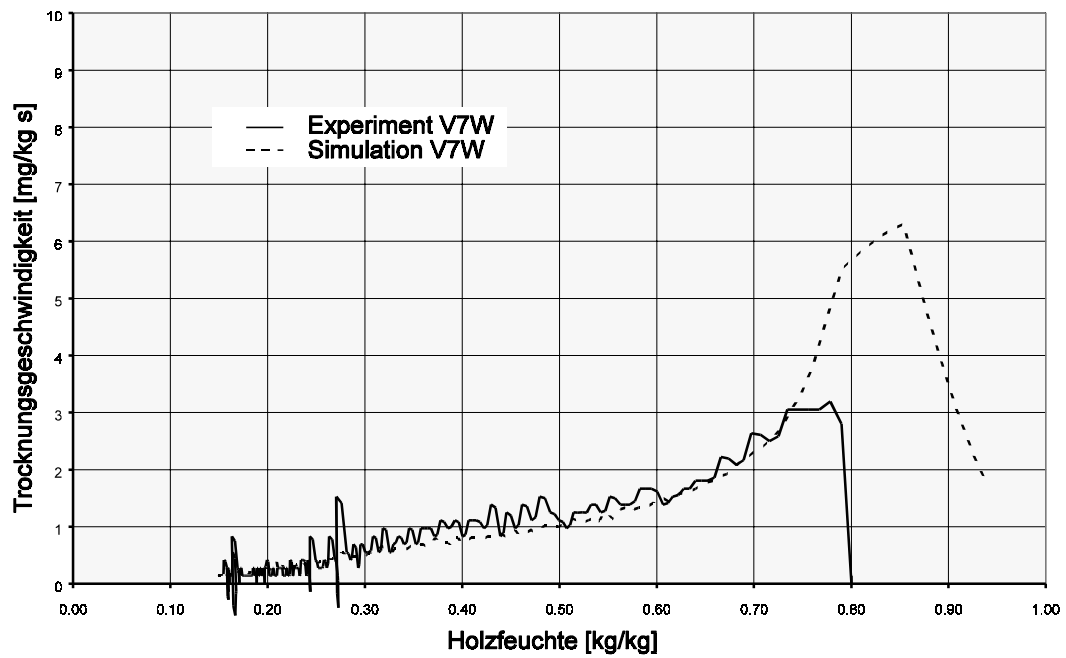


Abb. 6.9a: Simulation der Trocknungsgeschwindigkeit des Versuchs V7W

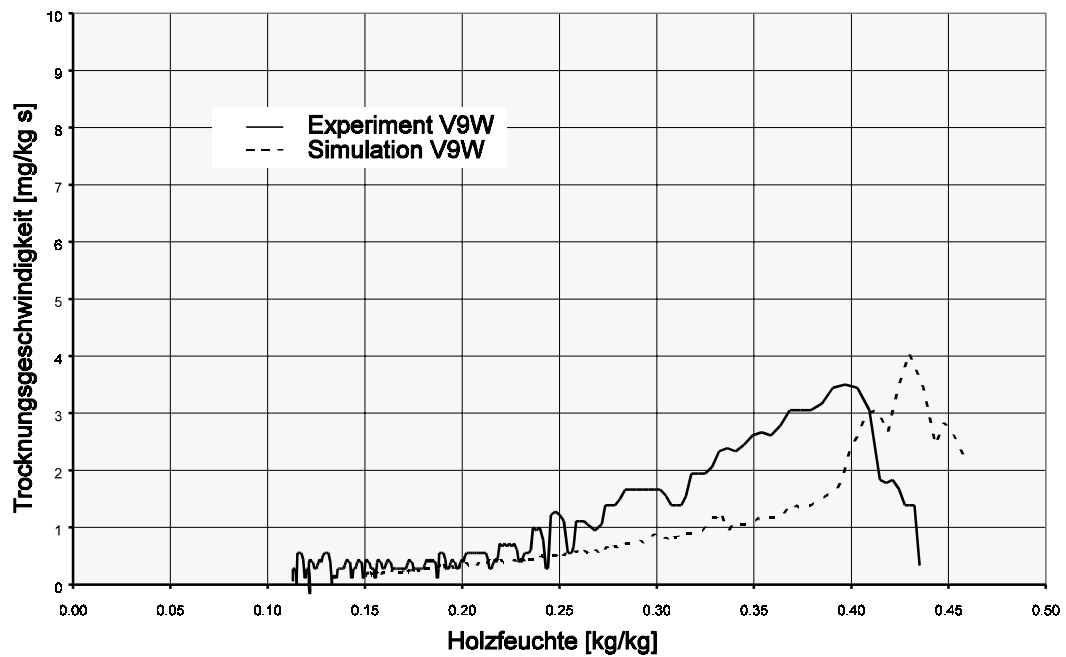


Abb. 6.9b: Simulation der Trocknungsgeschwindigkeit des Versuchs V9W

Versuch S3 mit veränderlichen Trocknungsbedingungen

Im Versuch S3, der im August und September 1993 am Holzforschungsinstitut durchgeführt wurde [45], wurden die wechselnden Luftzustände der Trocknungskammer einer fiktiven solaren Trocknungsanlage in der Klimakammer nachgebildet. Getrocknet wurde ein Fichtenbrett mit einem Anfangsfeuchtegehalt von 0,325 kg/kg. Tabelle 6.6 zeigt die weiteren Annahmen und einige Ergebnisse der Modellierung.

Der Vergleich der Trocknungsverläufe von Simulation und Experiment ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Die relative Abweichung des Simulationsergebnisses von der Messung wächst im Verlauf der Simulation an und erreicht schließlich etwa 25%. Dieser Wert liegt noch im Rahmen der Abschätzungen aus "6.1 Genauigkeit der Modellierung".

Die Rückfeuchtung des Holzes, die auftritt, wenn die Gleichgewichtsfeuchte nachts größer als die Holzfeuchte ist, wird von der Simulation reproduziert.

Der Vergleich der Temperaturen aus Experiment und Modell (Abbildung 6.11) zeigt, daß die Wärmekapazität des Holzes im Modell deutlich zu groß angenommen wird. Da bei den weiteren Trocknungsversuchen (in Resistencia) keine Holztemperaturen bestimmt wurden, kann diese Abweichung nicht weiter untersucht werden.

Tab. 6.6: Simulation des Trocknungsversuchs S3

Annahmen der Modellierung			
Holzart:	Fichte	Anfangsfeuchte:	0,325 kg/kg
Brettmaße:		Trocknungsluft:	
Länge:	500 mm	Temperatur:	16...60 °C
Breite:	100 mm	Rel. Feuchte:	40...88 %
Höhe:	25 mm	Luftgeschwindigkeit:	3,0 m/s
Der Zustand der Trocknungsluft entspricht dem zeitlichen Verlauf in einer fiktiven solaren Trocknungsanlage.			
Ergebnisse der Modellierung			
Endfeuchte nach 93,5 h Trocknung:		0,10 kg/kg (im Experiment: 0,12 kg/kg)	
Größte rel. Abweichung der sim. Holzfeuchte von der gemessenen Holzfeuchte:			
			25 %
Die nächtliche Rückfeuchtung des Holzes wird von der Simulation reproduziert. Der Einfluß der Wärmekapazität des Holzes ist im Modell zu groß.			

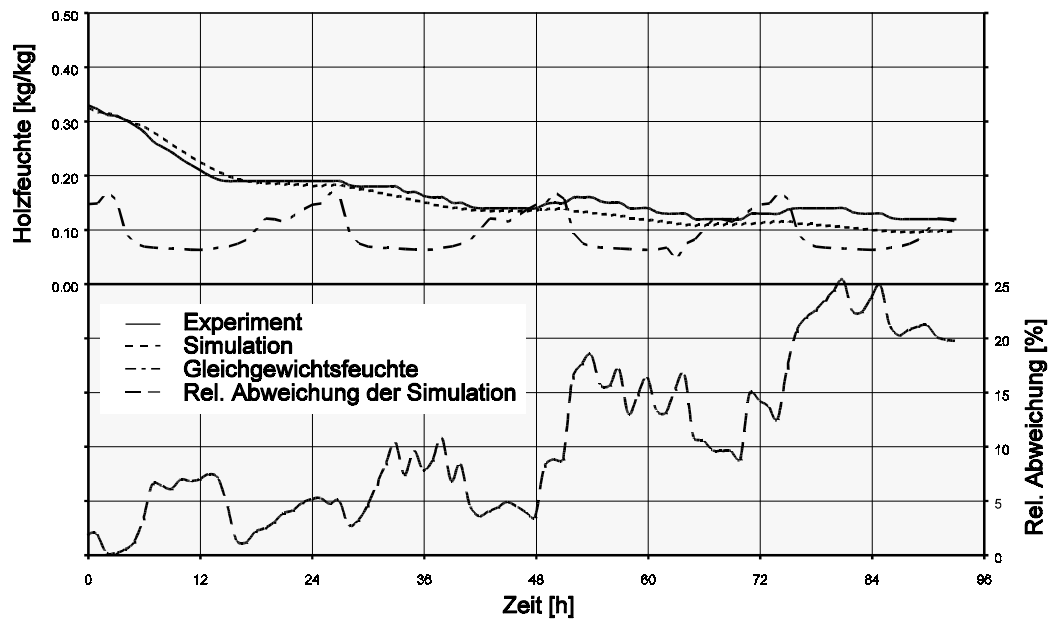


Abb. 6.10: Simulation des Trocknungsverlaufs des Versuchs S3

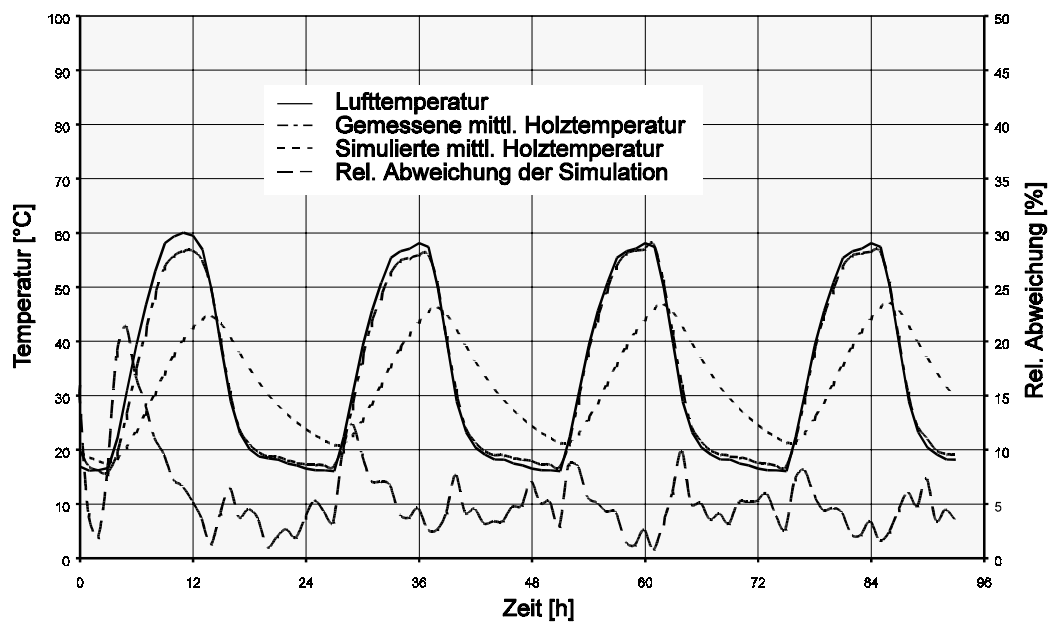


Abb. 6.11: Simulation des Temperaturverhaltens des Versuchs S3

6.4 Trocknungsläufe in Resistencia

In der Zeit von Juli bis November 1994 wurden die ersten beiden Trocknungsversuche im Prototyp des solaren Holzrockners durchgeführt.

In den Versuchen wurde Algarrobo-Schnittholz verwendet, eine Hartholzart, die im Chaco reichlich vorkommt. Die Bretter wurden in der Trockenkammer quer gestapelt. Abstandhalter von etwa 25 mm Dicke sorgten für eine gute Durchlüftung des Stapels. (Abbildung 6.3 zeigt ein Schema des beim ersten Trocknungsversuch aufgebauten Stapels.)

Um den Trocknungsverlauf zu beobachten, wurden einige Bretter verschiedener Breite und an verschiedenen Orten des Stapels als Proben ausgewählt. Durch regelmäßiges Wiegen - zweimal täglich - der Proben konnte über das zum Schluß jedes Trocknungsversuchs bestimmte Darrgewicht der Holzfeuchteverlauf im Stapel berechnet werden. Es gilt [8, 27]:

$$x = \frac{m_f(x) - m_t}{m_t}$$

mit: x = Holzfeuchte [kg/kg]
 m_f = Masse der feuchten Probe [kg]
 m_t = Masse der gedarrten Probe [kg]

Die Proben wurden numeriert, um zu gewährleisten, daß sie nach jeder Wägung wieder die selben Plätze im Stapel einnahmen.

Während der Versuche wurden außerdem in zehnminütigem Abstand folgende Meßwerte aufgenommen:

- ▶ Sonneneinstrahlung [W/m²]
- ▶ Umgebungstemperatur [°C]
- ▶ Relative Luftfeuchte der Umgebung [%]
- ▶ Windgeschwindigkeit [m/s]
- ▶ Temperaturen im Trockner (Kollektor, Kammer und Kamin) [°C]
- ▶ Relative Luftfeuchte in der Trocknungskammer [%]
- ▶ Luftgeschwindigkeit in der Trocknungskammer [m/s]

Die Werte der Umgebung dienten als Eingabewerte der Simulation, die Werte im Trockner als Vergleichswerte zur Validierung des Modells.

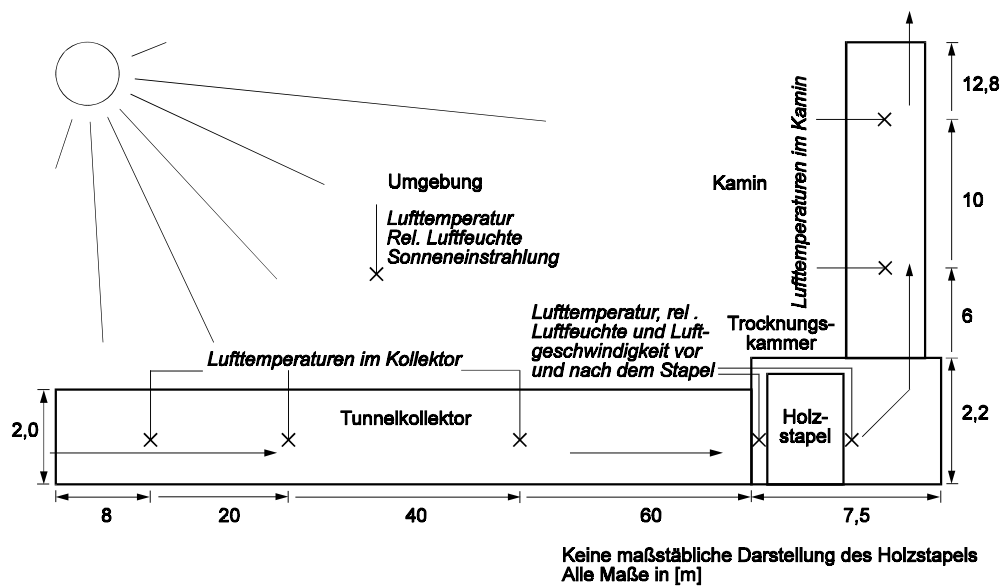


Abb. 6.12: Lage der Meßpunkte in der Holztrochnungsanlage in Resistencia

Abbildung 6.12 zeigt schematisch die Anordnung der Meßpunkte. Hommels [20] erklärt die Einrichtung der Meßtechnik und die Handhabung der rechnergestützten Meßwerterfassung.

Erster Trocknungsversuch

Der erste Versuch dauerte vom 17. August bis zum 18. September 1994, lag also am Winterende der südlichen Hemisphäre. Die Lufttemperatur schwankte während des Versuchs zwischen 1,6 °C und 36 °C, die relative Luftfeuchte zwischen 27 % und 100 %. Starke Schwankungen sind charakteristisch für das Winterklima in Resistencia.

Aus den gewonnenen Meßwerten wurde zunächst der Kollektorwirkungsgrad abgeschätzt. Für eine genaue Bestimmung der Kollektorkennwerte im instationären Verfahren, zum Beispiel nach Hahne und Guigas [15], reichen die in zehnminütigem Abstand vorliegenden Werte nicht aus. Ein stationäres Meßverfahren, zum Beispiel nach DIN 4757 [51], läßt sich wegen der ständigen Änderung der Wetterwerte ebenfalls nicht durchführen. Eine zusätzliche Schwierigkeit bei der Bestimmung des Kollektorverhaltens entsteht, weil sowohl die Kollektortemperaturen als auch der Luftmassenstrom durch den Kollektor von den wechselnden Einstrahlungswerten abhängen. Übliche Testverfahren beziehen sich auf konstante Massenströme [11, 21].

Die Abschätzung des Kollektorstufenwirkungsgrads erfolgte gemäß folgender Gleichung:

$$\eta_{Ko} = \frac{\dot{Q}_{Ko,f}}{\dot{Q}_{Ko,i}}$$

mit: η_{Ko} = Kollektorstufenwirkungsgrad [-]

$\dot{Q}_{Ko,f}$ = aus dem Kollektor fließender, nutzbarer Wärmestrom [W]

$\dot{Q}_{Ko,i}$ = in den Kollektor fließender Wärmestrom [W]

Als nutzbaren Wärmestrom bezeichnet man den Wärmestrom, der zur Temperaturerhöhung der Luft im Kollektor führt. Beim in den Kollektor fließenden Wärmestrom wird nur die Sonnenstrahlung betrachtet, die auf die Kollektorfläche trifft. Verluste - oder Gewinne - des Kollektors sind sämtliche weiteren Wärmeströme, die aufgrund von Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung oder auch verknüpft mit Stoffströmen - zum Beispiel Undichtigkeiten des Kollektors - auftreten.

Es gilt somit:

$$\dot{Q}_{Ko,f} = c_{pL} \dot{m} \Delta\vartheta \quad \text{und:} \quad \dot{Q}_{Ko,i} = I A_{Ko}$$

mit: c_{pL} = spezifische Wärmekapazität von Luft [J/kg K]

$\dot{m}$ = Massenstrom im Kollektor [kg/s]

$\Delta\vartheta$ = Temperaturerhöhung der Luft im Kollektor [°C]

I = Sonneneinstrahlung auf den Kollektor [W/m²]

A_{Ko} = Kollektorfläche [m²]

Der Massenstrom im Kollektor läßt sich aus der Luftgeschwindigkeit und dem Kollektorquerschnitt berechnen. Es ist:

$$\dot{m} = \rho A_{Ko,\phi} w$$

mit: ρ = Dichte der Luft [kg/m³]

$A_{Ko,\phi}$ = Querschnittsfläche des Kollektors [m²]

w = Luftgeschwindigkeit im Kollektor [m/s]

Sämtliche Größen lassen sich den Meßwerten oder Näherungen (siehe "2.4 Stoff- und Wärmeübergang an Oberflächen") entnehmen.

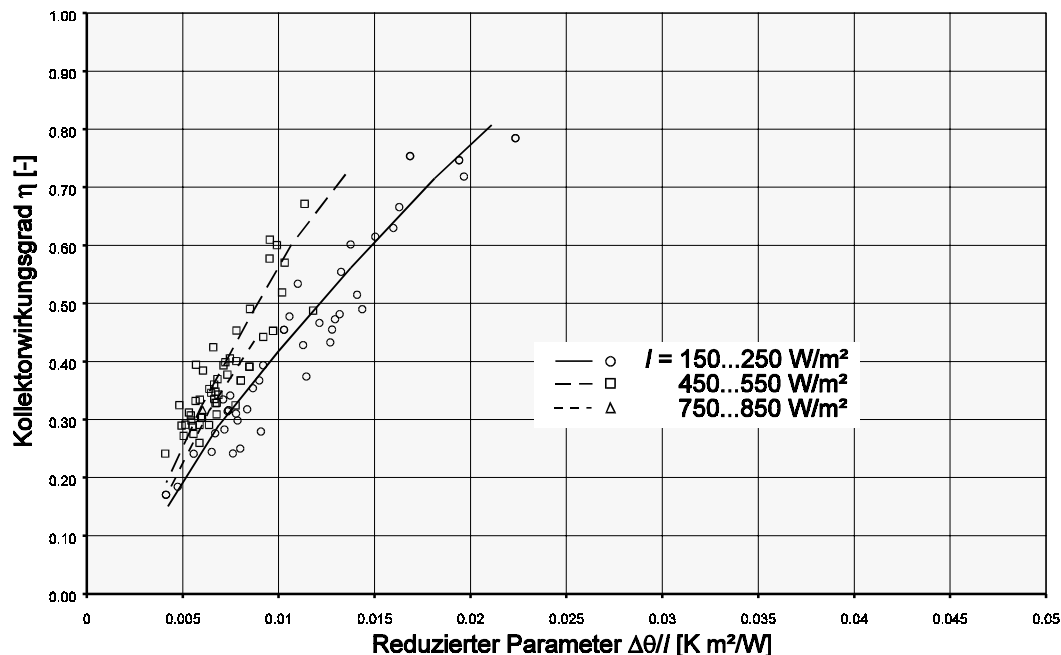


Abb. 6.13: Wirkungsgradkurven des Tunnelkollektors

Abbildung 6.13 zeigt die Kollektorwirkungsgradkurven, die für drei Strahlungsbereiche abgeschätzt wurden. Die Kollektorwirkungsgrade werden bezüglich des sogenannten reduzierten Parameters $\Delta\theta/I$ in $[K\ m^2/W]$ angegeben. Die Werte der Kurven werden als Parameter bei der Modellierung des Kollektors (siehe "5.2 Beschreibung der Systemkomponenten") verwendet.

Als nächstes wurde die Modellierung des Kollektors anhand des Vergleichs von gemessener und simulierter Kollektorausgangstemperatur überprüft. Abbildung 6.14 (nächste Seite) zeigt das Ergebnis zweier klarer und zweier bewölkter Tage. Die Temperaturerhöhung beträgt an den sonnigen Tagen bis zu $12\ ^\circ C$, an den bewölkten Tagen immerhin noch bis zu $5\ ^\circ C$. Die größte Abweichung der simulierten Kollektorausgangstemperatur zum gemessenen Wert beträgt unter $5\ ^\circ C$. Sowohl das Kollektorverhalten als auch die Modellierung führen zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

Der Luftzustand am Kollektorausgang entspricht in fast allen Fällen dem Zustand der Trocknungsluft am Anfang des Holzstapels. Nur bei geöffneten Klappen und bei geringem Luftstrom müssen Korrekturen vorgenommen werden (siehe "5.4 Verknüpfung der Komponenten im TRNSYS Deck"). Die genaue Modellierung des Kollektorverhaltens ermöglicht so die Validierung des Trocknungsmodells für die Trocknungsanlage in Resistencia.

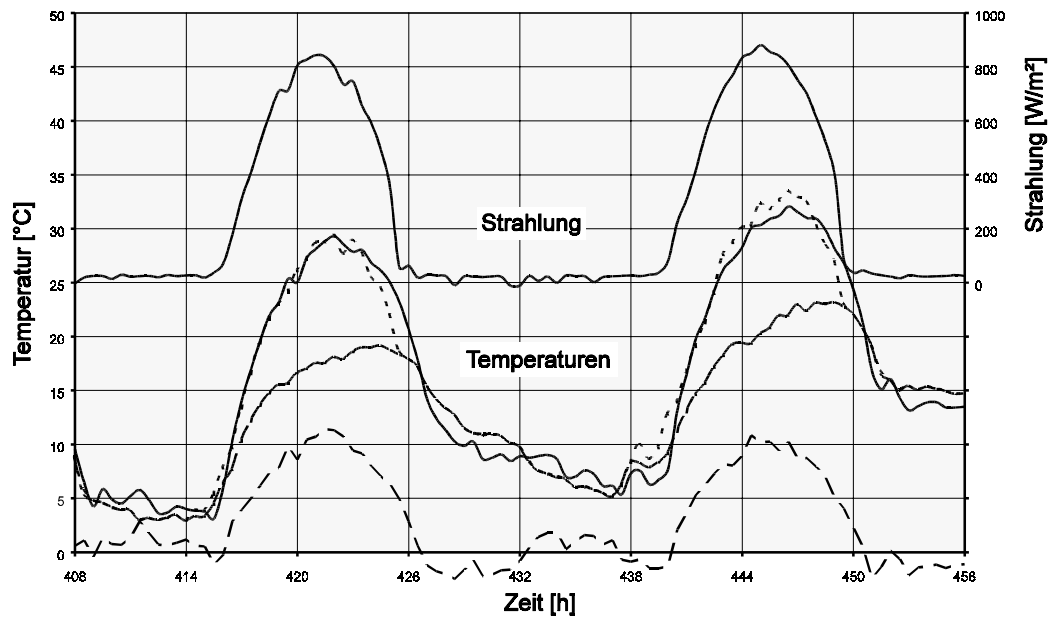


Abb. 6.14a: Simulation der Kollektorausgangstemperatur für zwei sonnige Tage

Legende:

- Kollektorausgangstemperatur / Strahlung
- Simulation der Kollektorausgangstemperatur
- ... Umgebungstemperatur
- - Temperaturerhöhung im Kollektor

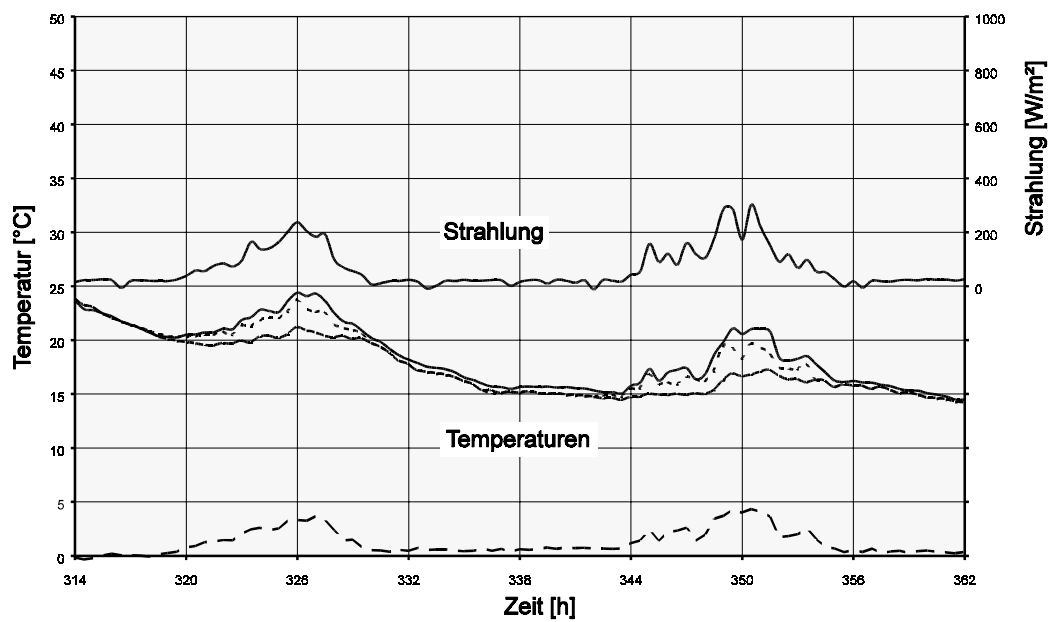


Abb. 6.14b: Simulation der Kollektorausgangstemperatur für zwei bewölkte Tage

Wie erwähnt, wurden die Trocknungsversuche mit Algarrobo-Brettern unterschiedlicher Abmessungen durchgeführt. Tabelle 6.7 faßt die Annahmen und einige Ergebnisse der Modellierung der Holz Trocknung zusammen. Abbildung 6.15 (nächste Seite) zeigt den Verlauf der Holzfeuchten der sechs Proben während der Trocknung.

Von einem Anfangsfeuchtegehalt von etwa 0,53 kg/kg bis 0,65 kg/kg trocknen die Proben innerhalb etwa eines Monats (840 Stunden) auf eine Endfeuchte von 0,12 kg/kg bis 0,30 kg/kg. Wie erwartet trocknen die schmalen Proben 2I und 2D schneller als die breiten Proben 3I, 3D, 4I und 4D. Die großen Unterschiede zwischen den Trocknungsverläufen gleich breiter Bretter - besonders deutlich bei den Proben 3I und 3D - liegen vermutlich zum Teil an der Lage der Bretter im Stapel. Vor allem aber spiegeln sie die Inhomogenität der Holzeigenschaften wieder, die wiederum die Genauigkeit der Modellierung, aber auch die Steuerung konventioneller und solarer Trocknungsanlagen beeinflußt.

Über die Methode der Parameteridentifikation wurden die in der Literatur nicht bestimmten Feuchteleitwerte festgelegt, ebenso die nur für wenige Werte bekannten Sorptionsisothermen [1, 37]. Andere Materialwerte sind aus der Literatur [27, 34, 49] zu entnehmen (siehe "C Material- und Anlagenwerte"). Anschließend wurde die Holz Trocknung für jede Brettbreite gesondert simuliert, Abbildung 6.16 (Seiten 90 und 91) zeigt die Ergebnisse.

Tab. 6.7: Simulation des ersten Trocknungsversuchs in Resistencia

Annahmen der Modellierung			
Holzart:	Algarrobo	Anfangsfeuchte:	0,53...0,65 kg/kg
Stapelmaße:		Brettmaße:	
Länge:	1800 mm	Länge:	450...1750 mm
Breite:	1750 mm	Breite:	50 mm (2I, 2D)
Höhe:	940 mm		75 mm (3I, 3D)
			100 mm (4I, 4D)
		Höhe:	25 mm
Trocknungsluft:			
Temperatur:	5...41 °C	Der Zustand der Trocknungsluft	
Rel. Feuchte:	28...90 %	entspricht dem zeitlichen Verlauf in	
Luftgeschwindigkeit:	0...2,5 m/s	der solaren Trocknungsanlage.	
Ergebnisse der Modellierung			
Endfeuchte nach 840 h Trocknung:			0,12...0,22 kg/kg
			(im Experiment: 0,12...0,30 kg/kg)

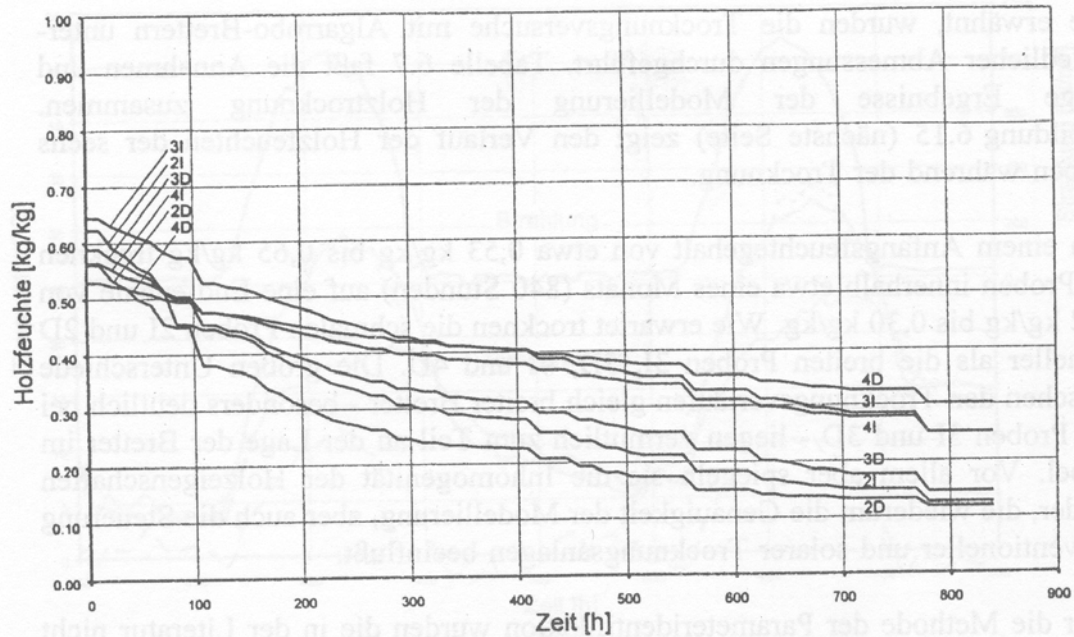


Abb. 6.15: Trocknungsverlauf im ersten Trocknungsversuch in Resistencia

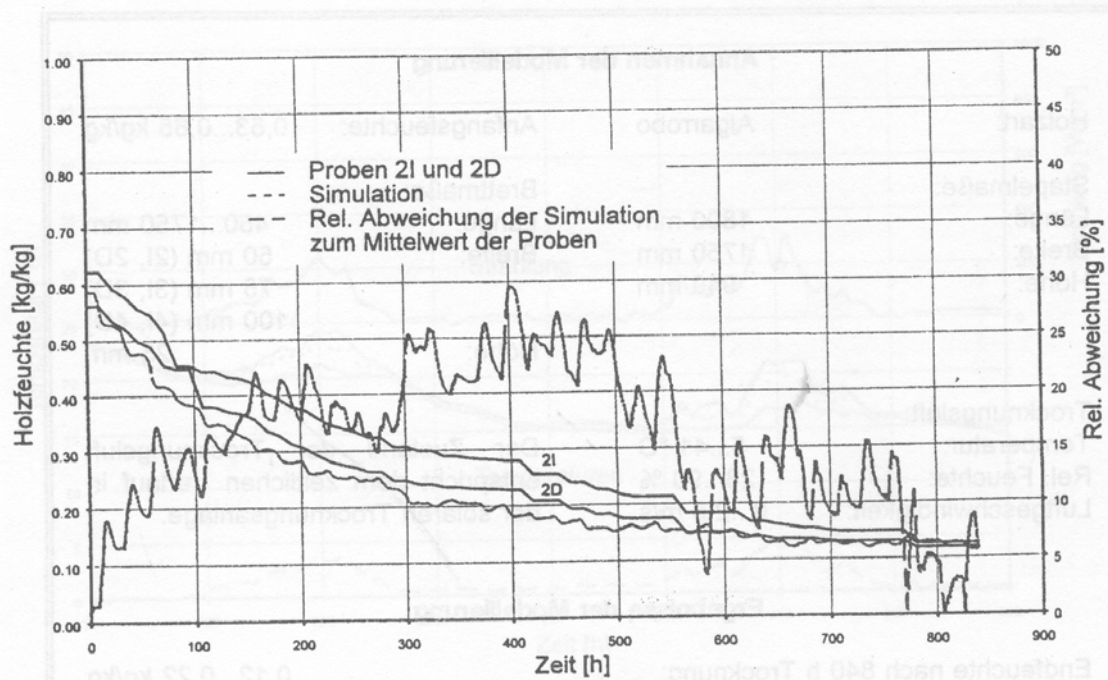


Abb. 6.16a: Simulation des Trocknungsverlaufs der Proben 2I und 2D

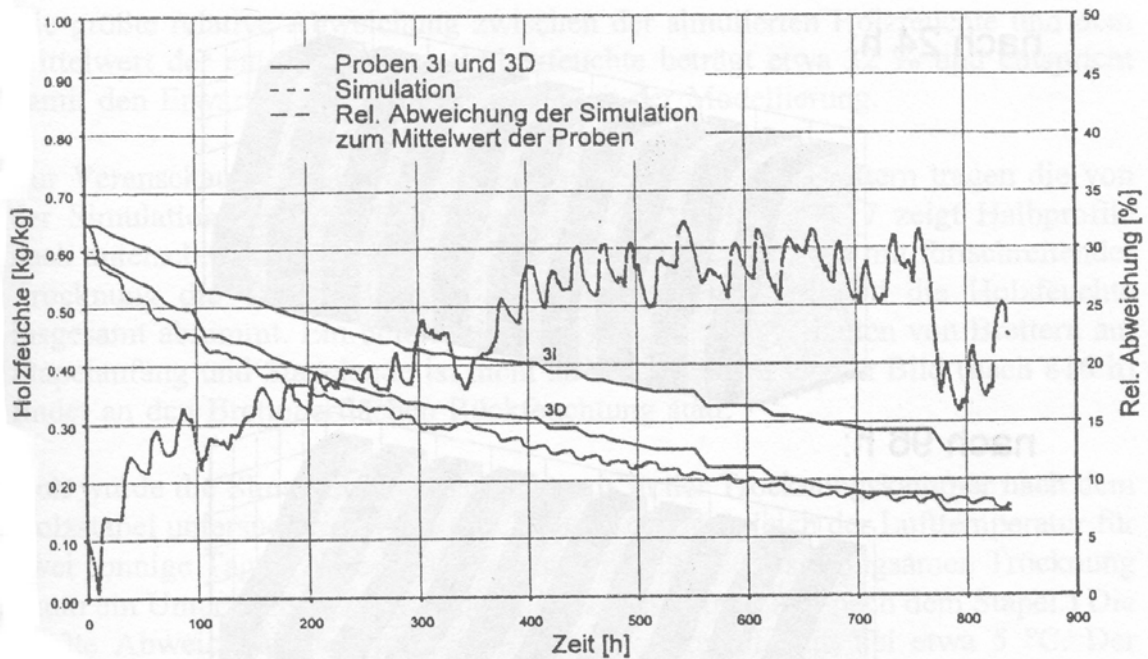


Abb. 6.16b: Simulation des Trocknungsverlaufs der Proben 3I und 3D

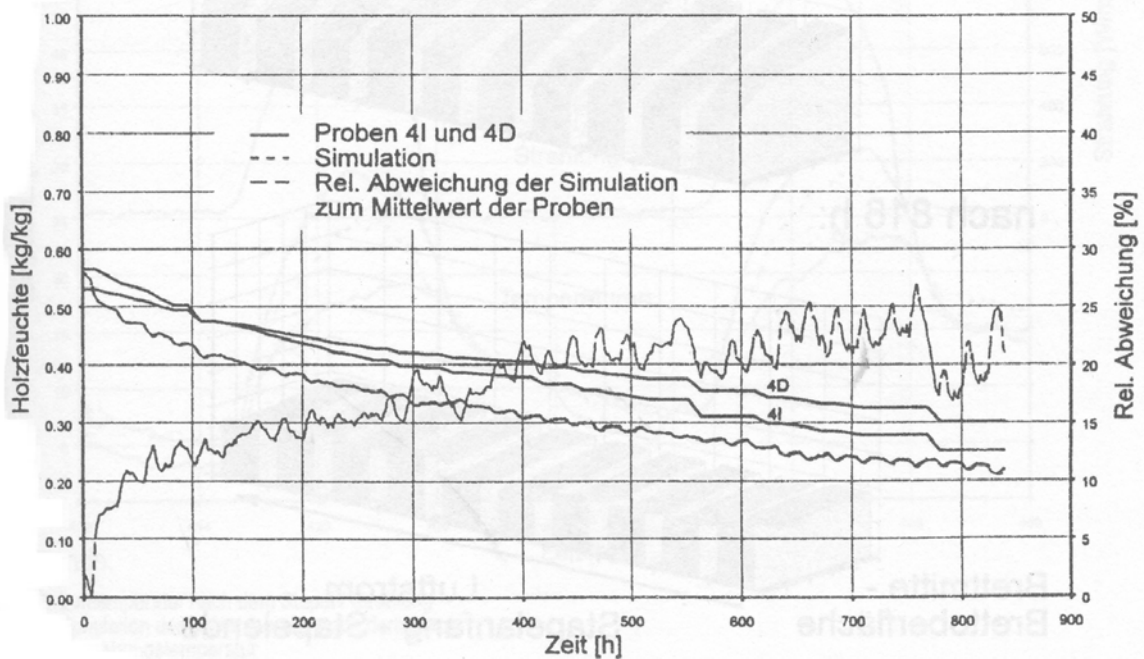
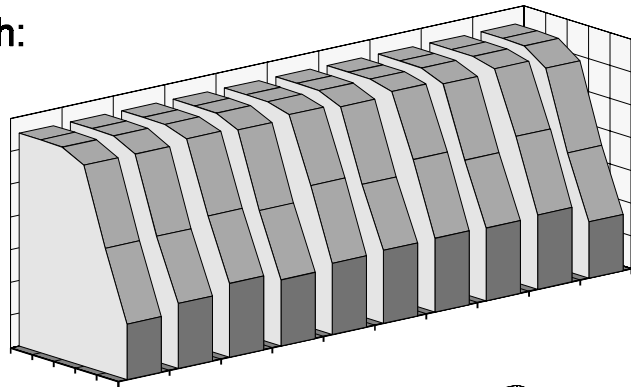
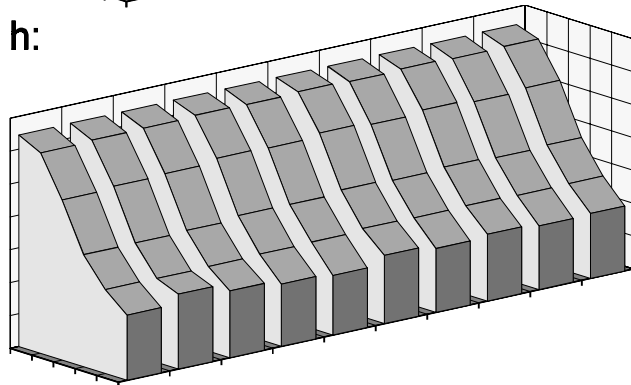


Abb. 6.16c: Simulation des Trocknungsverlaufs der Proben 4I und 4D

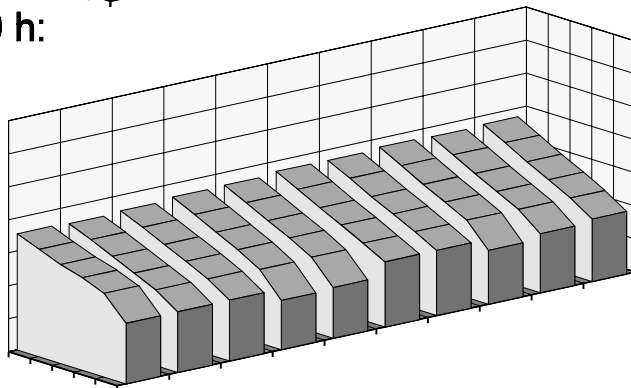
nach 24 h:



nach 96 h:



nach 360 h:



nach 816 h:

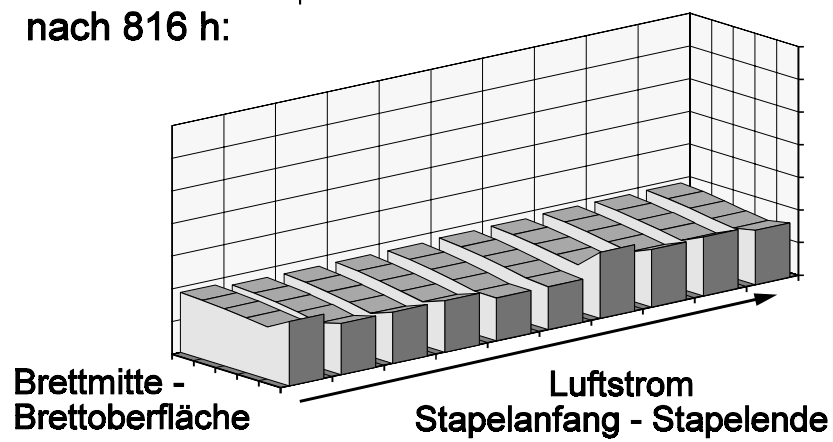


Abb. 6.17: Simulierte Feuchteprofile des ersten Trocknungslaufs in Resistencia

Die größte relative Abweichung zwischen der simulierten Holzfeuchte und dem Mittelwert der entsprechenden Probenfeuchte beträgt etwa 32 % und entspricht damit den Erwartungen für die Genauigkeit der Modellierung.

Zur Veranschaulichung des Trocknungsvorgangs in den Brettern tragen die von der Simulation erstellten Feuchteprofile bei. Abbildung 6.17 zeigt Halbprofile nach unterschiedlichen Zeiten der Trocknung. Man sieht, wie mit fortschreitender Trocknung die Trocknungszone zur Brettmitte wandert und die Holzfeuchte insgesamt abnimmt. Ein unterschiedliches Trocknungsverhalten von Brettern am Stapelanfang und Stapelende ist nicht zu erkennen. Im letzten Bild (nach 816 h) findet an den Brettoberflächen Rückfeuchtung statt.

Nun wurde die Simulation des Luftzustands in der Trocknungskammer nach dem Holzstapel untersucht. Abbildung 6.18 zeigt den Vergleich der Lufttemperatur für zwei sonnige Tage. (An bewölkten Tagen ist aufgrund der langsamen Trocknung kaum ein Unterschied zwischen den Luftzuständen vor und nach dem Stapel.) Die größte Abweichung der Simulation zum Experiment liegt bei etwa 5 °C. Der Verlauf der simulierten Temperatur legt nahe, daß wie bei der Modellierung des Versuchs S3 (siehe "6.3 Versuche in der Klimakammer") der Einfluß der Wärmekapazität des Holzes durch das Modell überbewertet wird.

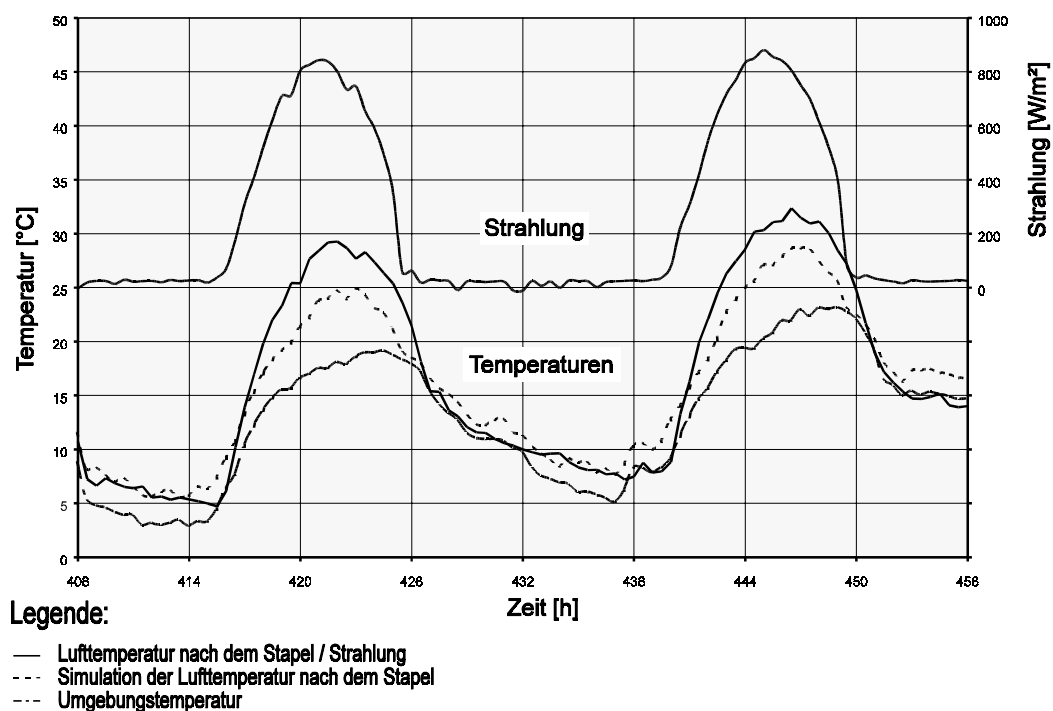


Abb. 6.18: Simulation der Lufttemperatur nach dem Stapel für zwei sonnige Tage

Der Vergleich der simulierten und gemessenen Luftfeuchten nach dem Stapel, dargestellt in Abbildung 6.19, zeigt ebenfalls eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Die Abweichung der Feuchten beträgt zwar bis zu 20 % relativer Feuchte, der Feuchteverlauf der Luft wird aber qualitativ gut nachgebildet. Tagsüber - während den Zeiten hoher Trocknungsintensität - liegt die größte Abweichung zwischen den Feuchten bei etwa 10 % relativer Feuchte.

Es bleibt, die Systemkomponente "Kamin" zu untersuchen, um die Validierung des Modells der solaren Holz Trocknungsanlage abzuschließen. Bei den bisherigen Versuchen in Resistencia wurden jedoch keine Windgeschwindigkeiten in ausreichendem Umfang gemessen. Da das Verhalten des Kamins vom Temperaturunterschied zwischen Abluft und Umgebungsluft *und* von der Windgeschwindigkeit entscheidend abhängt, kann das TRNSYS Modul "Aufwindkamin" vorerst nur darauf überprüft werden, ob es bei realistischen Eingabewerten realistische Ausgaben erzeugt.

Abbildung 2.20 zeigt die gemessenen Luftgeschwindigkeiten und die mit fiktiven Windgeschwindigkeiten simulierten Vergleichswerte. Die Luftgeschwindigkeit lag im ersten Trocknungsversuch stets unter 2,5 m/s, ein im Vergleich zu konventionellen Trocknern niedriger Wert. Die Simulation führt zu realistischen Luftgeschwindigkeiten, die auch eine Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Umgebungsluft zeigt. Erst über die Eingabe realer Meßwerte der Windgeschwindigkeit läßt sich die Komponente "Kamin" validieren - und akzeptieren oder zurückweisen.

Bei der vollständigen Modellierung wird der Massenstrom in der Trocknungsanlage von der Komponente "Kamin" berechnet. Da dies bis jetzt nicht möglich ist, wurde der Massenstrom aus den gemessenen Luftgeschwindigkeiten und dem Querschnitt des Holz Trockners an verschiedenen Stellen bestimmt.

Zweiter Trocknungsversuch

Der zweite Versuch dauerte vom 25. Oktober bis zum 24. November 1994, während des Frühlings in Resistencia. Die Umgebungslufttemperatur lag zwischen 10 °C und 33 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 30 % bis 99 %.

Beim zweiten Trocknungsversuch wurde ein Holzstapel - wie gehabt - solar getrocknet. Ein zweiter, zum im Trockner befindlichen identischer, Stapel wurde neben der Trocknungsanlage im Freien getrocknet. Der Freiluftstapel wurde durch ein Dach vor Niederschlag geschützt, aber ansonsten der Witterung ausgesetzt. Es sollte so ein Vergleich der Solartrocknung mit der Freilufttrocknung durchgeführt werden.

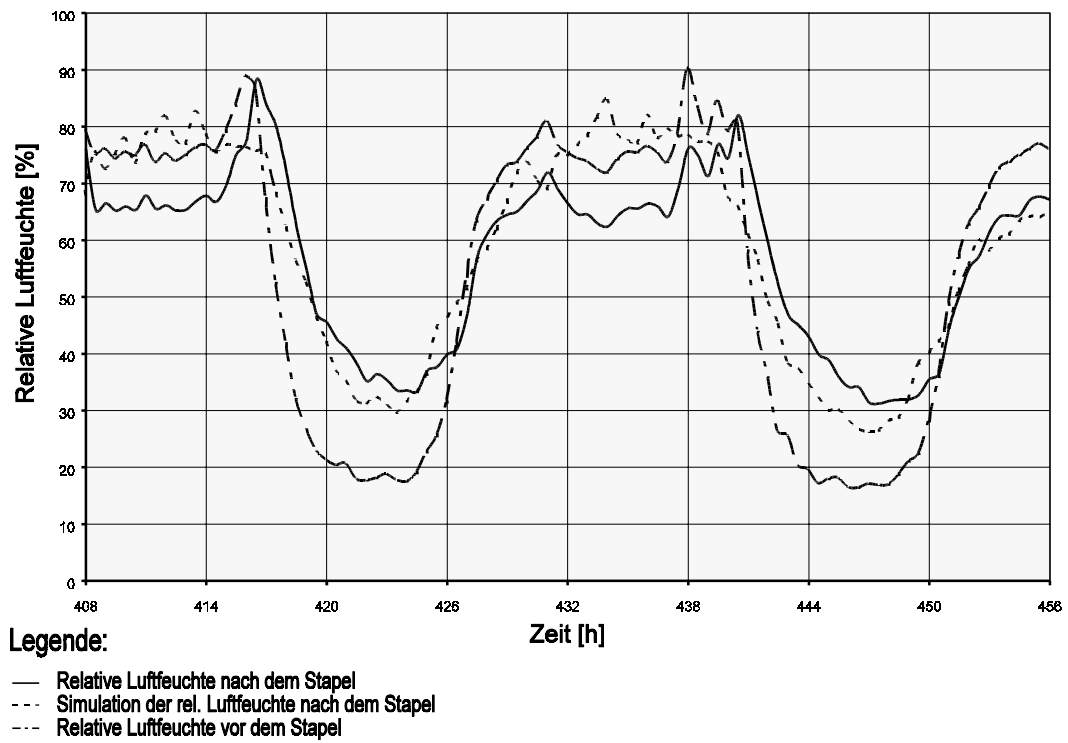


Abb. 6.19: Simulation der Luftfeuchte nach dem Stapel für zwei sonnige Tage

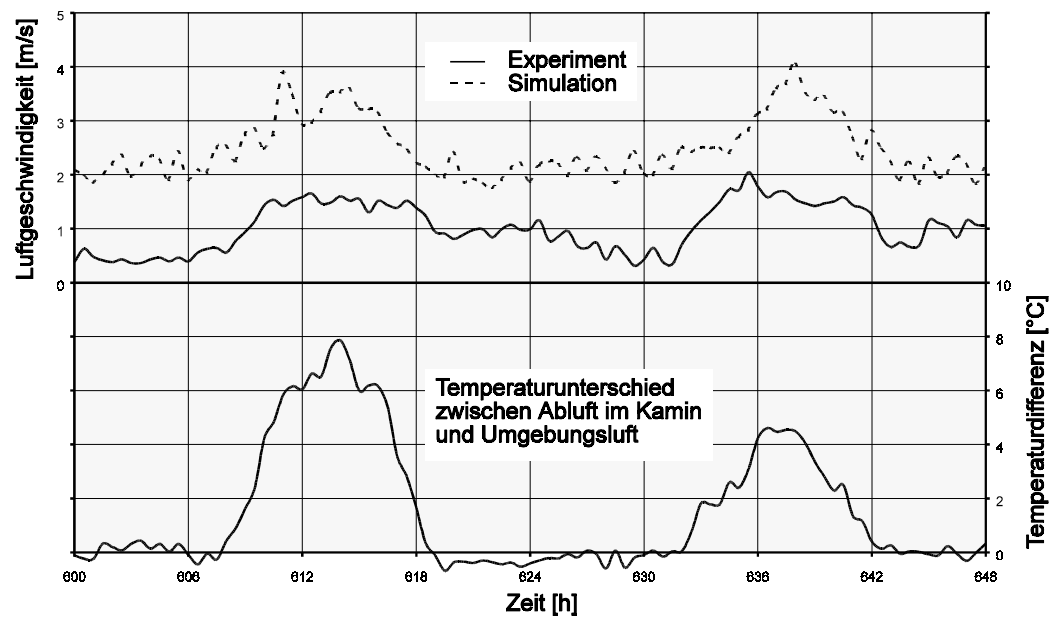


Abb. 6.20: Simulation der Luftgeschwindigkeit in der Trocknungskammer

Tabelle 6.8 gibt eine Zusammenfassung der Annahmen der Modellierung der Holz Trocknung. Abbildung 6.21 zeigt die ermittelten Trocknungsverläufe.

Man erkennt die rasche Trocknung während des zweiten Trocknungsversuchs. Aufgrund der höheren Strahlungsintensitäten ergab sich eine gegenüber dem ersten Trocknungsversuch erhöhte Kollektorausgangstemperatur von bis zu 50 °C. Gleichzeitig lag die höchste gemessene Luftgeschwindigkeit in der Trocknungskammer mit 2,8 m/s über der des ersten Versuchs. Ausgehend von Holzfeuchten zwischen 0,42 kg/kg und 0,81 kg/kg trockneten alle Proben im Trockner (Proben 1 bis 4) innerhalb eines Monats auf eine Feuchte von unter 0,15 kg/kg. Die Proben im Freien (Proben 6A und 6B) erreichten bei Anfangsfeuchtegehalten von 0,58 kg/kg und 0,70 kg/kg eine Endfeuchte von etwa 0,17 kg/kg.

Die zu Beginn des Versuchs besonders schnell trocknenden Proben 2 und 4 sind von der Holzart Algarrobo Blanco, die anderen Proben von der Holzart Algarrobo Negro. Dies führt möglicherweise zu den großen Unterschieden zwischen den Trocknungsverläufen. Da die Anfangsfeuchtegehalte weit auseinander liegen, läßt sich der Vergleich zwischen Freilufttrocknung und Solartrocknung nur schlecht durchführen. Aufgrund der höheren Lufttemperatur und niedrigeren Luftfeuchte in der Trocknungskammer liegt aber in jedem Fall die für das Holz mögliche Endfeuchte im Trockner niedriger als im Freien.

Fazit der Trocknungsversuche

Auch im Winter und Frühling sind mit der solaren Holz Trocknungsanlage mit natürlicher Konvektion in Resistencia zufriedenstellende Trocknungsergebnisse zu erreichen. Um auf die angestrebte Endfeuchte von 0,10 kg/kg - entsprechend dem Klima in Gebäuden - zu trocknen, müssen im Möbelbau verwendete Algarrobo-Schnitthölzer etwa vier bis sieben Wochen im Trockner verweilen. Im Sommer wird sich dieser Zeitraum noch verkürzen.

Bei den getrockneten Proben trat in keinem Fall eine Schädigung des Holzes während der Trocknung auf. An der Trocknungsanlage führten Stürme zu Rissen in den transparenten Folien des Tunnelkollektors. Diese beeinflussten das Kollektorverhalten jedoch scheinbar nur gering und waren leicht zu reparieren. Sonst arbeitete die Anlage störungsfrei.

Die bisher durchgeführte Validierung des Modells zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität. Die bestimmten Abweichungen liegen im Rahmen der aufgrund der Inhomogenitäten und Anisotropien des Holzes erwarteten - und nicht zu vermeidenden - Ungenauigkeiten. Weitere Versuche müssen durchgeführt werden, um insbesondere die Modellierung des Kamins zu überprüfen.

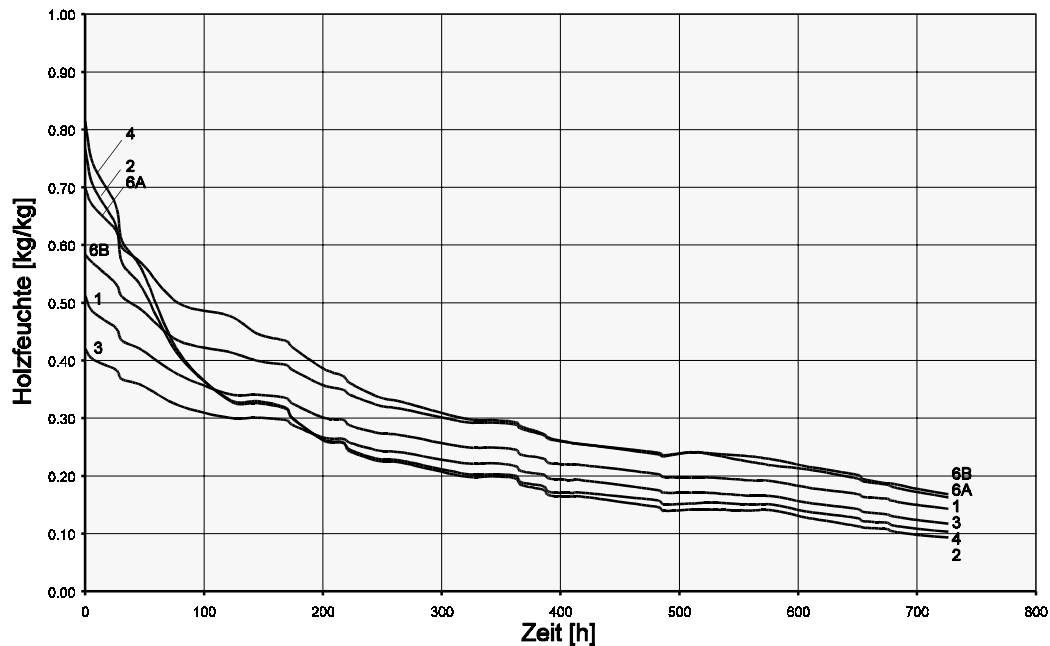


Abb. 6.21: Trocknungsverlauf im zweiten Trocknungsversuch in Resistencia

Tab. 6.8: Simulation des zweiten Trocknungsversuchs in Resistencia

Annahmen der Modellierung			
Holzart:	Algarrobo	Anfangsfeuchte:	0,42...0,81 kg/kg
Stapelmaße:		Brettmaße:	
Länge:	1800 mm	Länge:	570 mm
Breite:	1750 mm	Breite:	50 mm
Höhe:	1888 mm	Höhe:	31,3 mm
Trocknungsluft:			
Temperatur:	11...50 °C	Der Zustand der Trocknungsluft	entspricht dem zeitlichen Verlauf in
Rel. Feuchte:	k. A.		der solaren Trocknungsanlage.
Luftgeschwindigkeit:	0...2,8 m/s		
Ergebnisse der Modellierung			
Es wurde noch keine Simulation durchgeführt.			
Endfeuchte im Experiment nach 726,5 h Trocknung:	0,09...0,17 kg/kg		

7 Anwendung des Modells

7.1 Systemoptimierung und Anlagenplanung

Bei der Untersuchung solarer Anlagen sind nie gleichbleibende oder auch nur reproduzierbare Prüfbedingungen möglich. Da die Errichtung vieler Prototypen - zum Vergleich verschiedener Anlagen in gleichzeitigen Versuchen - vor allem an finanziellen Gründen scheitert, stellt die Modellierung das einzige Mittel dar, "Experimente" mit Anlagen unterschiedlicher Bauweise und Konzeption durchzuführen.

Schon bei der Planung der solaren Trocknungsanlage in Resistencia wurde ein Simulationsprogramm eingesetzt [36, 37], zur Verbesserung der Anlage wird nun das in dieser Arbeit erstellte Modell verwendet. Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Verbesserung der Anlage ist ihr Platzbedarf. Der installierte Tunnelkollektor hat eine Länge von 60 m. Abbildung 7.1 (nächste Seite) zeigt einen Vergleich der simulierten Kollektorausgangstemperatur für Kollektorlängen von 40 m und 20 m mit den simulierten Werten für die Länge 60 m - die weitgehend den gemessenen Werten für die Länge 60 m entsprechen¹.

Mit der für den verkürzten Kollektor berechneten Kollektorausgangstemperatur läßt sich nun das neue Trocknungsverhalten bestimmen. Der Nachteil der geringeren Trocknungsgeschwindigkeit läßt sich dem Vorteil des gesparten Platzes gegenüberstellen und gewichten.

Ähnliche Abwägungen lassen sich zum Beispiel für die Höhe des Kamins, die Größe der Trocknungskammer und das Volumen des zu trocknenden Holzstapels anstellen. Die neu vom Vertreiber des Simulationsprogramms TRNSYS in

¹ Eine Schwierigkeit bei der Modellierung des verkürzten Kollektors ist, daß veränderte Kollektorwirkungsgradkurven als Eingabewerte verwendet werden müssen. Diese wurden nach der in "6.4 Trocknungsläufe in Resistencia" beschriebenen Methode aus den Meßwerten für die Lufttemperatur im Kollektor nach 20 m und 40 m Kollektorlänge berechnet. Die Verwendung der Kollektorwirkungsgradkurven des 60 m langen Kollektors führt zu einer falschen Beschreibung des Verhaltens des verkürzten Kollektors.

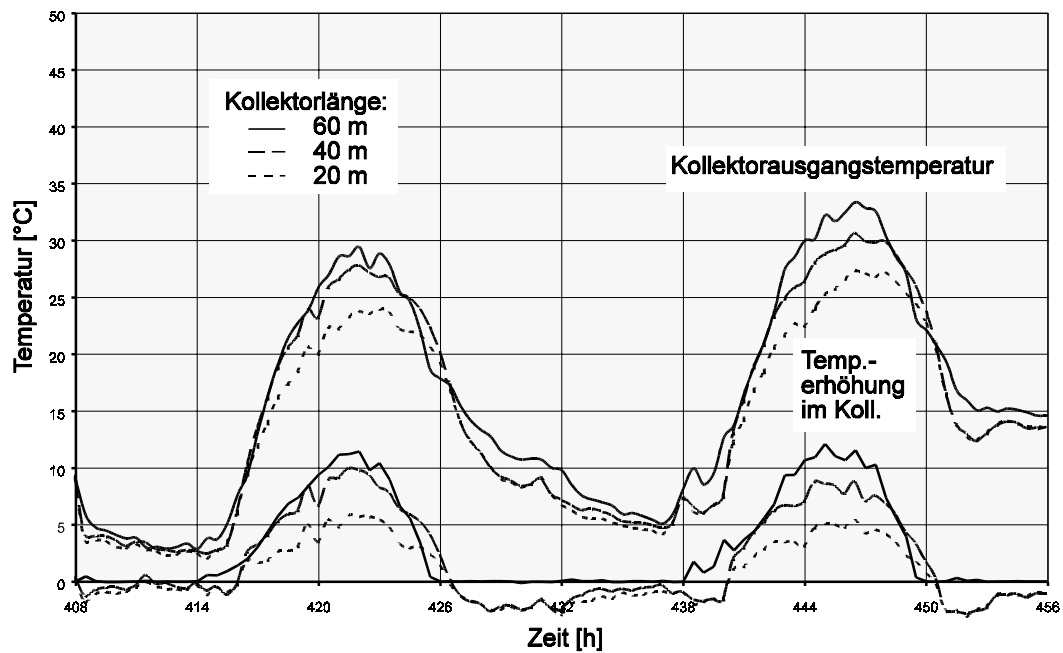


Abb. 7.1a: Simulation der Kollektorausgangstemperatur für unterschiedliche Kollektorlängen für zwei sonnige Tage

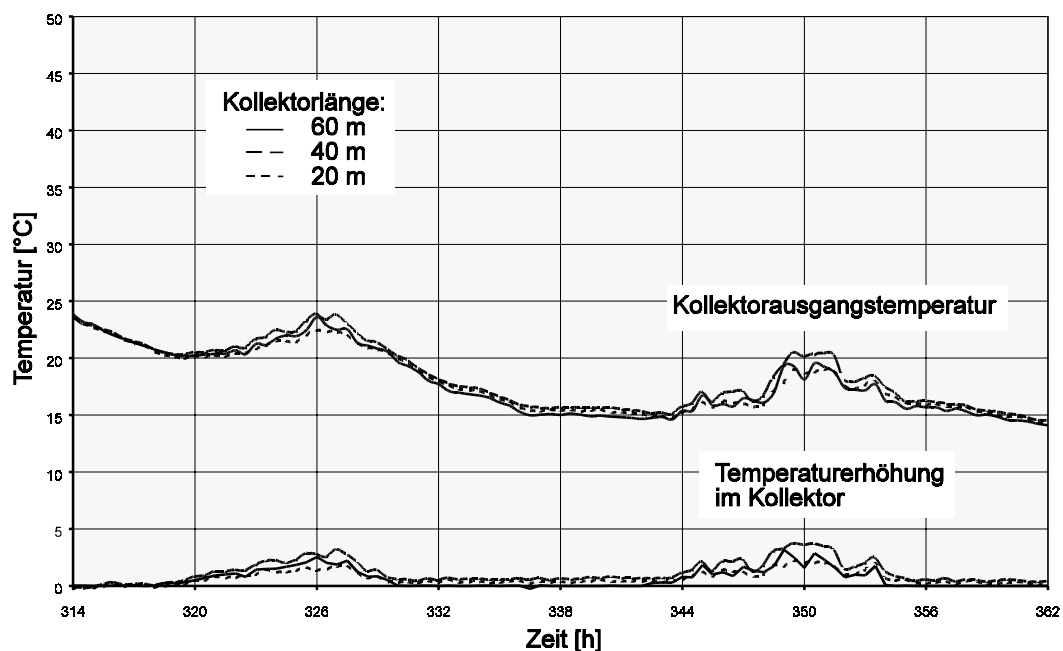


Abb. 7.1b: Simulation der Kollektorausgangstemperatur für unterschiedliche Kollektorlängen für zwei bewölkte Tage

Deutschland, der Firma TRANSSOLAR in Stuttgart², erstellte TRNSYS Komponente TRNSPID ermöglicht die automatische Identifikation und Optimierung von Parametern³. Ziel der Anlagenoptimierung ist, einen möglichst hohen Holzdurchsatz durch den Trockner bei gleichbleibend hoher Qualität der Trocknungsprodukte zu erreichen. Gleichzeitig muß die Anlage einfach - und preiswert - herzustellen und zu betreiben sein.

Weltweit gibt es Überlegungen, Solarenergie für die Holz Trocknung und die Trocknung landwirtschaftlicher Produkte einzusetzen [24, 29, 43, 47, 48, 50]. Mit Hilfe des Modells lassen sich bei der Planung neuer Trocknungsanlagen die stets veränderten Rahmenbedingungen berücksichtigen. Die Konzeption der Trocknungsanlage hängt zum Beispiel vom Standort und dem dortigen Klima ab. Weitere Einflußgrößen sind die zu trocknende Holzart, der gewünschte Holzdurchsatz, aber auch der vorhandene Platz zum Bau der Anlage und zur Lagerung des Holzes. Das Modell läßt sich abstimmen auf die Verwendung von Ventilatoren zur Erzeugung des Trocknungsluftstroms und auf den Betrieb mit Zusatzheizung, die zum Beispiel aus Holzabfällen gespeist werden kann [3].

7.2 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

Die für den Betreiber eines holzverarbeitenden Betriebs wichtigste - falls nicht einzig wichtige - Frage bei der Einführung von solarer Trocknung ist: "Lohnt es sich?" In der argentinischen Holzindustrie sind aufgrund des voranschreitenden Zusammenschlusses im südamerikanischen gemeinsamen Markt MERCOSUR in nächster Zeit große Anpassungsprozesse zu erwarten [18]. Besonders die Konkurrenz aus Brasilien, wo konventionelle Holz Trocknung weit verbreitet ist, führt dazu, daß langfristig nur hochwertige (argentinische) Produkte auf dem Markt bestehen können. Die Einführung von Trocknungsanlagen ist eine Voraussetzung für die Herstellung hochwertiger Produkte.

In der Provinz Chaco in Nordargentinien verfügen nur wenige große Betriebe über - meist konventionelle - Holz Trockner. Für die Vielzahl kleiner Betriebe bietet die Nutzung von Solartrocknern die Chance, die hohen Investitions- und Betriebskosten konventioneller Trockner beim Umstieg von der Freilufttrocknung zu vermeiden. Es soll nicht verschwiegen werden, daß viele Betriebe für die Entsorgung ihrer Holzabfälle die Verfeuerung in einer konventionellen

² TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, Nobelstr. 15, 70569 Stuttgart

³ Die Komponente TRNSPID stand bei der Erstellung dieser Arbeit noch nicht zur Verfügung.

Trocknungsanlage als einfachste Lösung wählen. Abgesehen von der Umweltbelastung durch das Verbrennen von Holz bleiben weitere Nachteile des Betriebs konventioneller Trocknungsanlagen, wie der Aufwand für die Wartung der Anlage und die im Vergleich zur Solartrocknung schwierigere Steuerung, bestehen. Es muß versucht werden, die Holzabfälle gewinnbringend zum Beispiel zur Herstellung von Holzspan- oder Holzfaserplatten zu verwenden [27] und die hervorragenden klimatischen Bedingungen in Nordargentinien - milde Winter und niederschlagsarme, heiße Sommer - für den Einsatz von Solartrocknern zu nutzen.

Für die Bewertung der Holzwirtschaft und die Verbesserung ihrer Wirtschaftlichkeit - nicht nur in Argentinien - ist der gesamte Prozeß vom Anpflanzen der Forste und dem Fällen der Bäume über die Verarbeitung des Holzes und das Herstellen der Holzprodukte bis hin zum Gebrauch derselben und zur Entsorgung oder Wiederverwertung der Abfälle zu betrachten. Im Sinne der Erstellung einer vollständigen Produktlinienanalyse müssen gleichrangig zu den wirtschaftlichen Gesichtspunkten auch ökologische und gesellschaftliche Auswirkungen der Holznutzung untersucht werden [53]. Die Modellierung der Holz Trocknung kann zusammen mit Daten über die Energie- und Transportkosten bei der Holzverarbeitung, der Beschreibung des Trocknungsverfahrens, sowie den Marktwerten der verwendeten Hölzer - feucht und trocken - bei der Beurteilung der ersten Schritte dieser Kette einen wertvollen Beitrag liefern.

Imre [22] zeigt, wie die solare Trocknung mit der konventionellen Trocknung zu vergleichen ist. Er betont, daß bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen die durch die solare Trocknung vermiedene Umweltbelastung einbezogen werden muß. Er zeigt Wege, wie die solare Trocknung ihre Wirtschaftlichkeit steigern kann, zum Beispiel durch das abwechselnde Trocknen verschiedener Trocknungsgüter. Die Universidad Nacional del Nordeste in Resistencia, Chaco ist dabei, eine Potentialstudie und Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Einsatz von Solartrocknern in Nordargentinien zu erarbeiten.

7.3 Steuerung von Trocknungsläufen

Auch beim Betrieb konventioneller Trocknungsanlagen kann die Modellierung der Holz Trocknung zu einer Verbesserung des Anlageverhaltens beitragen. Anhand der Simulation der höchsten im Holz auftretenden Temperatur, des Feuchtegefälles im Holz und des Trocknungsgefälles zwischen Holz und Trocknungsluft lassen sich für das Holz gefährliche Situationen während der Trocknung erkennen. Läuft die Simulation parallel zur Trocknung, lassen sich Maßnahmen ergreifen, um die Qualität der Trocknung zu wahren. Im Gegenzug läßt sich die Trocknungs-

geschwindigkeit erhöhen, wenn ersichtlich ist, daß das Holz auch bei verschärfter Trocknung keinen Schaden nehmen wird.

Denkbar ist, die automatische Regelung einer Trocknungsanlage mit der Modellierung der Holz Trocknung zu verbinden, so daß die - bisher starren - Trocknungspläne variiert und optimiert werden können, um dem Ziel einer möglichst schnellen, aber dennoch hochwertigen Trocknung näherzukommen.

7.4 Untersuchung weiterer Trocknungsvorgänge

Das erstellte Modell des Holz Trocknungsprozesses ist ausgerichtet auf die Beschreibung der Trocknung eines Schnittholzstapels. Sein Anwendungsbereich kann jedoch ohne große Änderungen erweitert werden. Der Verlauf der Trocknung hängt vor allem vom Verhalten des Trocknungsgut bei der Feuchtebindung und beim Feuchtetransport im Gutsinneren ab (siehe "2 Holz Trocknung als physikalischer Prozeß"). Die Angabe von Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerten ermöglicht, die Trocknung verschiedener Materialien zu modellieren. Werte finden sich in der Trocknungsliteratur [16, 30, 39, 44] oder lassen sich durch den Vergleich der Simulation mit Experimenten über die Methode der Parameteranpassung⁴ ermitteln. Das Modell der solaren Holz Trocknungsanlage mit natürlicher Konvektion dient als Ausgangspunkt für die Modellierung anderer Solartrockner. Der modulare Aufbau des Simulationsprogramms TRNSYS ermöglicht das einfache Anpassen des Modells an andere Bauformen.

Als interessantes Einsatzgebiet für die Modellierung weiterer Trocknungsvorgänge ergibt sich zum Beispiel die Trocknung von Baustoffen, vor allem von Ziegeln und Dämmstoffen, ebenso die Trocknung von Klärschlamm und Gülle. Es ist zu untersuchen, ob die Trocknung landwirtschaftlicher Produkte - wie Tee, Kräuter oder Getreide - im Überströmverfahren sich mit Hilfe der TRNSYS Komponente "Holz Trocknung" beschreiben läßt. Die Modellierung der Trocknung im Durchströmverfahren erfordert aufgrund der völlig veränderten Strömungsbedingungen hingegen ein neues Modell.

⁴ siehe Fußnote 1 in "6 Validierung des erstellten Modells"

Zusammenfassung und Ausblick

Mehr Licht!

Johann Wolfgang von Goethe

Für die Untersuchung der solaren Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion in Resistencia wurde wegen der vielfältigen, kaum analytisch erfaßbaren Wechselwirkungen des Systems, des hohen Aufwands für die Errichtung eines Prototyps und insbesondere der Wetterabhängigkeit beim Betrieb der Anlage die Methode der Modellierung als Untersuchungsmittel gewählt. Sie bietet den Vorteil, daß zeitaufwendige Versuche durch - vergleichsweise - kurze Simulationen ersetzt und so die Auswirkungen von Systemänderungen schnell abgeschätzt werden können.

Die Modellierung stützt sich auf das Simulationsprogramm TRNSYS, das weltweit zur Auslegung von Solaranlagen eingesetzt wird. Durch seine modulare Struktur ist TRNSYS flexibel und läßt sich zur Simulation unterschiedlichster Systeme verwenden. Neue TRNSYS Komponenten lassen sich in der ebenfalls weit verbreiteten Programmiersprache FORTRAN erstellen und in die Simulation integrieren. Für die Modellierung der solaren Holztrocknungsanlage wurden neue Komponenten zur Beschreibung der Holztrocknung und des Aufwindkamins entwickelt.

Die Modellierung der Holztrocknung folgt der aus der Literatur entnommenen Theorie der Trocknung [2, 27, 30, 34]. Der Fluß der Trocknungsluft im Holzstapel wird gemäß Theorien der technischen Strömungslehre [5, 12, 41, 54] beschrieben. Die wesentlichen physikalischen Vorgänge bei der Holztrocknung betreffen die Feuchtebindung im Holz, den Stoff- und Wärmeübergang an der Trocknungsoberfläche und den Stoff- und Wärmetransport im Holzininneren. Über die Angabe von Sorptionsisothermen, Feuchteleitwerten und weiterer Stoffeigenschaften läßt sich die Abhängigkeit der Holztrocknung vom Material erfassen.

Das Modell bestimmt mit Hilfe der Methode der finiten Elemente den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Feuchte und Temperatur des Holzes und der Trocknungsluft im Stapel¹. Es ermöglicht unter anderem die Simulation der mittleren Holzfeuchte im Stapel, der Gleichgewichtsfeuchte und der Trocknungsgeschwindigkeit. Zur Untersuchung der Trocknung nach energetischen Gesichtspunkten wird der Wärmestrom in den Stapel berechnet. Die Trocknungsqualität läßt sich anhand der Simulation der höchsten Holztemperatur, des höchsten Trocknungsgefälles zwischen Holz und Trocknungsluft und des höchsten Feuchtegefälles im Holz beurteilen. Schließlich wird das Feuchteprofil einzelner Bretter an verschiedenen Punkten des Holzstapels simuliert.

Die Holz Trocknung ist ein wichtiges Verfahren zur Hebung der Holzqualität. Die solare Holz Trocknung ermöglicht eine wesentliche Verbesserung der Trocknungsqualität und -geschwindigkeit gegenüber der Freiland Trocknung, die in vielen weniger industrialisierten Gebieten traditionell angewandt wird. Gleichzeitig vermeidet die solare Trocknung Nachteile der konventionellen Trocknung, wie zum Beispiel die Abhängigkeit von Brennstoffen oder Elektrizität zum Betrieb der Anlage - verbunden mit hohen Betriebskosten -, die durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe verursachte Umweltbelastung und die hohen Investitionskosten für die Trocknungskammer.

Es gibt mehrere Arten solarer Holz Trocknungsanlagen. Für die vorliegende Arbeit wurde eine solare Holz Trocknungsanlage mit natürlicher Konvektion untersucht, die vollständig mit Sonnenenergie betrieben wird. Luft wird in einem Folienkollektor erwärmt und strömt dann in die Trocknungskammer mit dem Holzstapel. Dort geht Feuchte vom Trocknungsgut an die Trocknungsluft über. Die feuchte Abluft fließt über einen Kamin zurück in die Umgebung. Der Kamin sorgt aufgrund des Auftriebs der warmen Abluft und wegen des durch Wind verursachten Sogs für einen steten Luftstrom durch die Trocknungsanlage. Die Klimaverhältnisse am Standort der Anlage in Nordargentinien ermöglichen einen ganzjährigen Betrieb bei hervorragenden Strahlungsbedingungen und somit hohen Temperaturen in der Trocknungskammer.

Die Modellierung der Anlage gliedert das System in seine Hauptkomponenten "Tunnelkollektor", "Trocknungskammer", "Holzstapel" und "Kamin". Die bestehenden Wechselwirkungen des Systems - Stoff-, Energie- und Informationsströme - werden durch vom Rechner erfaßbare Gleichungen dargestellt und numerisch ausgewertet. Die Simulation des Systemverhaltens erfolgt gemäß der vorgegebenen Anlageparameter und Holzeigenschaften und anhand der gemessenen Wetterwerte mit dem Simulationsprogramm TRNSYS.

¹ Statt der Trocknung eines Stapels kann als Spezialfall auch die Trocknung eines einzelnen Brettes untersucht werden.

Die wesentliche Vereinfachung, die das Modell trifft, besteht in der Nichtberücksichtigung der Inhomogenität und Anisotropie des Holzes, zum Beispiel bei der Feuchteleitung. Die daraus folgende relative Ungenauigkeit der Modellierung bei der Berechnung der Holzfeuchte im Laufe einer Simulation beträgt bis zu etwa 30 %. Sie läßt sich nicht vermeiden, da über den genauen Schnitt und die Lage der Bretter im Holzstapel keine Aussage möglich ist. Trocknungspläne für konventionelle Trocknungsanlagen berücksichtigen diese Unsicherheit bei der Bestimmung der Holzeigenschaften durch das Angeben vorsichtiger Werte für die Trocknungsbedingungen.

Weitere Vereinfachungen und Ungenauigkeiten des Modells liegen in der Darstellung der Feuchteverteilung im Holz zu Trocknungsbeginn und in der Annahme einer über ihren Querschnitt homogenen Luftströmung in der Trocknungsanlage. Die Modellierung des Tunnelkollektors läßt sich verbessern, wenn genauere Kollektorwirkungsgradkurven bestimmt sind. Diese konnten bis jetzt nur abgeschätzt werden. Vorteilhaft ist, eine neue TRNSYS Komponente zu entwickeln, die den Folienkollektor besser beschreibt als das bisherige TRNSYS Modul "Solarkollektoren".

Die Überprüfung des Modells erfolgte zunächst anhand von Klimakammerversuchen, die am Holzforschungsinstitut der LMU München durchgeführt wurden. Es ergibt sich, daß das Modell die wesentlichen Vorgänge bei der Holz Trocknung, wie zum Beispiel den Feuchteverlauf, die Trocknungsperioden, das Temperaturverhalten und das Feuchteprofil im Brett, im Rahmen der zuvor abgeschätzten Genauigkeit zufriedenstellend beschreibt.

Die ersten Trocknungsversuche in Resistencia dienten gleichzeitig der experimentellen Überprüfung der Anlage und der weiteren Validierung des Modells. Getrocknet wurden Versuchsstapel mit Algarrobo-Schnittholz aus einem ortsansässigen kleinen Sägewerk. Algarrobo ist ein in der Region reichlich vorkommendes Hartholz, das vorwiegend zum Bau von Möbeln verwendet wird. Zur Untersuchung der Anlage wurden an verschiedenen Punkten Messungen des Luftzustands durchgeführt (relative Luftfeuchte, Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit), Wetterwerte aufgezeichnet (Sonnenstrahlung, relative Luftfeuchte, Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit) und regelmäßig die Holzfeuchten mehrerer Proben bestimmt.

Die Versuche zeigen, daß es möglich ist, mit der Anlage in Resistencia eine qualitativ hochwertige und rasche Trocknung zu erreichen. Die Trocknungsdauer ist etwas länger als bei konventioneller Trocknung, jedoch sehr viel kürzer als bei Freilufttrocknung in der feuchtwarmen Klimaregion des Chaco. Eine Schädigung des Holzes durch Umwelteinflüsse oder zu scharfe Trocknung tritt nicht auf.

Für die Modellierung wurden mittels Parameteridentifikation die nicht bekannten Feuchteleitwerte für Algarrobo festgelegt und die nur ungenau bekannten

Sorptionsisothermen ergänzt. Die anschließende Simulation der Trocknung in der solaren Holz Trocknungsanlage ergab eine zufriedenstellende Übereinstimmung von Simulation und Wirklichkeit sowohl bei den Lufttemperaturen und Luftfeuchten in der Anlage, als auch bei den Trocknungsverläufen der Proben. Die Validierung der Modellierung des Kamins muß wegen der bisher nicht ausreichenden Anzahl an Meßwerten für die Windgeschwindigkeit fortgeführt werden.

Nach der vollständigen Validierung des Modells kann mit seiner Anwendung begonnen werden. Neben der Optimierung der bestehenden Anlage dient das Modell zur Planung und Auslegung neuer Systeme. Gerade bei Solaranlagen ist die Modellierung hilfreich bei der Anpassung an stets unterschiedliche Klima-, Anlagen- und Betriebsbedingungen. Mit Hilfe des Modells läßt sich untersuchen, inwieweit es möglich ist, die nordargentinische Holzindustrie über den Einsatz (solarer) Holz Trocknungsanlagen weiterzuentwickeln. Eine Qualitätssteigerung ist dringend geboten, um die Produkte für den sich entwickelnden südamerikanischen gemeinsamen Markt MERCOSUR wettbewerbsfähig zu machen.

Auch in Europa besteht Interesse am Einsatz solarer Trocknungsanlagen seitens der Holzindustrie. Mit dem Modell lassen sich hier ebenfalls Wirtschaftlichkeitsstudien durchführen und potentielle Betreiber über die Leistung eines Solar-trockners informieren. Die Steuerung konventioneller Trocknungsanlagen läßt sich durch das Einbeziehen des Modells flexibler gestalten, um so Trocknungszeiten zu kürzen - bei gleichbleibender Qualität der Trocknung.

Schließlich ist die Modellierung weiterer Trocknungsvorgänge denkbar - aufbauend auf dem Modell der Holz Trocknung. Wirtschaftlich interessant sind die Modellierung der Trocknung von Baustoffen und - wegen des großen Platzbedarfs bei der Deponierung - von Klärschlamm und Gülle. Es ist zu untersuchen, ob die Trocknung landwirtschaftlicher Produkte mit dem vorgestellten Modell beschrieben werden kann.

Das chinesische Orakelbuch *I Ging*² gibt im Zeichen Sü (Das Warten) folgenden Ratschlag für die Anwendung des Modells:

Das Warten.
Wenn du wahrhaftig bist, so hast du Licht und Gelingen.
Beharrlichkeit bringt Heil.
Fördernd ist es, das große Wasser zu durchqueren.

² R. Wilhelm (Übers.): *I Ging*, Eugen Diederichs Verlag, Köln, 1973

雷

Sü (Das Warten)

Anhang A FORTRAN Quellcode

A.1 TYPE 61 "Holztrocknung"

```
C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C TRNSYS TYPE 61 DRYING                                     TYPE61.FOR
C VERSION 3.1 (TRNSYS 14.1) JANUAR 1995
C
C BY STEPHAN BENKERT
C TU MUENCHEN WEIHENSTEPHAN
C INSTITUT FUER LANDTECHNIK
C (C) 1995
C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C       SUBROUTINE TYPE61 (TIME,XIN,OUT,T,DTDT,PAR,INFO,ICNTRL,*)
C
C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C HINWEIS ZUR BENUTZUNG DES TYPE 61:
C
C TYPE 61 BENOETIGT ZUSAETZLICH ZU DEN INPUTS UND PARAMETERN AUS
C DEM TRNSYS-DECK DATEIEN ZU DEN HOLZEIGENSCHAFTEN.
C DAZU MUESSEN IM TRNSYS-DECK EIN FILE MIT SORPTIONSISOTHERMEN ALS
C LOGICAL UNIT LU1 UND EIN FILE MIT FEUCHTELEITWERTEN ALS LOGICAL
C UNIT LU2 MIT ASSIGN FESTGELEGT WERDEN.
C UEBER DIE FORM DER FILES SIEHE BESCHREIBUNG DES TYPE 61.
C
C TYPE 61 GIBT ZUSAETZLICH ZU DEN OUTPUTS AN DAS TRNSYS-DECK
C STUENDLICHE FEUCHTE- UND TEMPERATURPROFILE IN DAS FILE DER
C LOGICAL UNIT LU3 AUS.
C
C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C-> INITIALISIERUNG
C
C       DOUBLE PRECISION XIN,OUT
C       CHARACTER*3 YCHECK(4),OCHECK(16)
C       DIMENSION XIN(4),OUT(16),PAR(18),INFO(15)
C       DIMENSION XS(10,0:5),THS(10,0:5),YS(10),TLS(10),DSEG(0:5)
C       DIMENSION XSI(10,0:5),THSI(10,0:5)
C       DIMENSION NXSRP(2),NXMTC(2),XEMC(10),XT(5),XPHI(10)
C       COMMON YS,TLS,XS,THS,XSI,THSI
C       SAVE
C +DSEG,DZSEG,DLC,PSI,FA,FR1,FR2,XNXST,XNYST,XNZST,AL,ASEG,VST
C       SAVE IWRNC,IWRNX0,IWRNT0,IWRNX1,IWRNT1,TIME1,XMST,THMST
C
```

```

C-> SETZEN DER INPUTS / SCHUTZ VOR DIV BY ZERO UND UNSINNIGEN
C   WERTEN
C
      YI=AMAX1(XIN(1),1.E-5)
      TLI=AMAX1(0.,AMIN1(XIN(2),100.))
C->   XIN(3) WIRD ERST BEI LABEL 15 UEBERNOMMEN
C->   SIEHE 15: XIN(3)   =XMDOTI FUER XIN(3)>0   =WI FUER XIN(3)<0
      P=XIN(4)
      IF (P.LT.2.E4) P=1.E5
C
C-> SETZEN DER PARAMETER / SCHUTZ VOR DIV BY ZERO UND UNSINNIGEN
C   WERTEN
C
C->   ANFANGSWERTE FUER HOLZFEUCHTE UND -TEMPERATUR
      XI=AMAX1(PAR(1),.005)
      THI=PAR(2)
C->   ABMESSUNGEN DES HOLZSTAPELS
      DXST=AMAX1(PAR(3),0.)
      DYST=AMAX1(PAR(4),0.)
      DZST=AMAX1(PAR(5),0.)
      IF (DXST*DYST*DZST.EQ.0.) PRINT *,
+ 'TYPE61 ERROR: DXST, DYST AND DZST NEED TO BE GREATER THAN
+ ZERO'
C->   ABMESSUNGEN UND ABSTAENDE DER BRETTEN
      DXH=AMAX1(PAR(6),0.)
      DXL=AMAX1(PAR(7),0.)
      DYH=AMAX1(PAR(8),0.)
      DYL=AMAX1(PAR(9),0.)
      DZH=AMAX1(PAR(10),0.)
      DZL=AMAX1(PAR(11),0.)
      IF (DXH*DYH*DZH.EQ.0.) PRINT *,
+ 'TYPE61 ERROR: DXH, DYH AND DZH NEED TO BE GREATER THAN
+ ZERO'
      IF (DXH+DXL.GT.DXST) PRINT *,
+ 'TYPE61 ERROR: DXH+DXL MUST NOT BE GREATER THAN DXST'
      IF (DYH+DYL.GT.DYST) PRINT *,
+ 'TYPE61 ERROR: DYH+DYL MUST NOT BE GREATER THAN DYST'
      IF (DZH+DZL.GT.DZST) PRINT *,
+ 'TYPE61 ERROR: DZH+DZL MUST NOT BE GREATER THAN DZST'
      IF (DXL.EQ.0.) DXL=DXST-DXH
      IF (DYL.EQ.0.) DYL=DYST-DYH
      IF (DZL.EQ.0.) DZL=DZST-DZH
      IF ((DZL+DYL).EQ.0.) PRINT *,
+ 'TYPE61 ERROR: NO AIR FLOW POSSIBLE WITH DYH=DYST AND
+ DZH=DZST'
C->   DICHT, SPEZ. WAERMEKAPAZITAET UND RAUHIGKEIT DES TROCKENEN
C   HOLZES
      RHOHT=AMAX1(PAR(12),10.)
      CPHT=AMAX1((PAR(13)*1000.),10.)
      XK=AMAX1(PAR(14),0.)
C->   LAENGE EINES ZEITINTERVALLS IN DER TRNSYS-SIMULATION
      DTIME=AMAX1(PAR(15)*3600.,1.)
      IF (DTIME.LT.15.) PRINT *,
+ 'TYPE61 WARNING: TIMESTEP OF SIMULATION (PAR 15)
+ SHOULD AT LEAST BE 15 s'
C->   LAENGE EINES ZEITINTERVALLS IM TYPE 61: 15 s ODER DTIME
      DTIME1=AMIN1(15.,DTIME)
C->   LOGICAL UNITS FUER *.SRP, *.MTC UND *.PRF
      LU1=PAR(16)
      LU2=PAR(17)
      LU3=PAR(18)
C

```

```

C-> SETZEN VON GRUNDWERTEN
C
      DATA NXSRP/10,5/,NXMTC/10,5/
      DATA RL/287./,RD/462./,RW0/2.501E6/,XLE/.82/,PR/.72/
C
C-> NUR BEIM ERSTEN AUFRUF
C
      IF (INFO(7).GE.0) GOTO 15
C->      TYPECK UND RCHECK
          INFO(6)=16
          CALL TYPECK(1,INFO,4,18,0)
          IF (XIN(3).GE.0.) THEN
              DATA YCHECK/'DM1','TE1','MF2','PR3'/
          ELSE
              DATA YCHECK/'DM1','TE1','VE1','PR3'/
          ENDIF
          DATA OCHECK/'DM1','TE1','MF2','DM1','TE1','DM1','TE1',
+ 'DM1','MF2','DM1','PW2','DM1','DM1','TE1','DM1','DM1'/
          CALL RCHECK(INFO,YCHECK,OCHECK)
C->      RUECKSETZEN DER WARNUNGEN
          IWRNC=0
          IWRNX0=0
          IWRNT0=0
          IWRNX1=0
          IWRNT1=0
C->      FEUCHTE- UND TEMPERATURPROFIL AM ANFANG; 1. AUSGABE NACH LU3
          DO 10 I=1,10
              YS(I)=YI
              TLS(I)=TLI
10          CONTINUE
          DO 11 J=0,5
              DO 11 I=1,10
                  XS(I,J)=XI
                  XSI(I,J)=XI
                  THS(I,J)=THI
                  THSI(I,J)=THI
11          CONTINUE
          OPEN (LU3)
          WRITE (LU3,'(A4)') 'TIME'
          WRITE (LU3,'(A12)') 'YS (I=1,10) '
          WRITE (LU3,'(A19)') 'XS (I=1,10, J=0,5) '
          WRITE (LU3,'(1H)')
          WRITE (LU3,'(A13)') 'TLS (I=1,10) '
          WRITE (LU3,'(A20)') 'THS (I=1,10, J=0,5) '
          WRITE (LU3,'(1H)')
          WRITE (LU3,'(A14)') 'INITIAL VALUES'
          WRITE (LU3,'(10(F6.5,1X))') (YS(I),I=1,10)
          DO 12 J=0,5
              WRITE (LU3,'(10(F6.5,1X))') (XS(I,J),I=1,10)
12          CONTINUE
          WRITE (LU3,'(1H)')
          WRITE (LU3,'(10(F6.2,1X))') (TLS(I),I=1,10)
          DO 13 J=0,5
              WRITE (LU3,'(10(F6.2,1X))') (THS(I,J),I=1,10)
13          CONTINUE
          WRITE (LU3,'(1H)')

```

```

C->      GEOMETRISCHE BERECHNUNGEN
C->      TROCKNUNGSFLAECHE
      XNXST=2*DXST/(DXH+DXL)
      XNYST=2*DYST/(DYH+DYL)
      XNZST=2*DZST/(DZH+DZL)
      AST=DZST*DYST
      AL=AST-XNZST*XNYST*DZH*DYH/4
      DXSEG=DXH/(DXH+DXL)*DXST/10
      ASEG=XNZST*XNYST*(DZH+DYH)*DXSEG/2+
+XNZST*XNYST*XNXST*DZH*DYH/40
      VST=(AST-AL)*DXSEG*10
C->      BERECHNUNG DES TROCKNUNGSPROFILS FUER GERINGSTE DICKE BEZ.
C      Y - Z
      IF (DZH.LT.DYH) THEN
        DSEG(0)=DZH/22
        DLC=DZH+DXH
        FA1=DZH*(DXL+DXH)/DXH/(DZL+DZH)
        PSI=DZL/(DZL+DZH)
        FR1=DZH/DYH
        FR2=AMIN1(DZH/DXH,DXH/DZH)
      ELSE
        DSEG(0)=DYH/22
        DLC=DYH+DXH
        FA1=DYH*(DXL+DXH)/DXH/(DYL+DYH)
        PSI=DYL/(DYL+DYH)
        FR1=DYH/DZH
        FR2=AMIN1(DYH/DXH,DXH/DYH)
      ENDIF
      DO 14 J=1,5
        DSEG(J)=2*DSEG(0)
14      CONTINUE
      FA=1+.7*(FA1-.3)/PSI**1.5/(FA1+.7)**2
C->      ANFANGSZEIT
      TIME1=TIME
C->      ANFANGSWERTE HOLZFEUCHTE & -TEMPERATUR
      XMSTI=XI
      THMSTI=THI
15      CONTINUE
C
C->      BERECHNUNG XMDOTI AUS XIN(3)>0 BZW. XIN(3)<0
C
      XMDOTI=XIN(3)
      IF (XMDOTI.GE.0) THEN
        XMDOTI=XMDOTI/3600.
      ELSE
        RHOD=P/RD/(TLI+273.15)
        RHOLT=P/RL/(TLI+273.15)
        RHOLF=(1+YI)/(1/RHOLT+YI/RHOD)
        XMDOTI=XMDOTI*AL*RHOLF*(-1)
      ENDIF
      IF (XMDOTI.LT..1) XMDOTI=.1
C

```

C-> BERECHNUNG DES EMC

```

C
  REWIND LU1
  PDL=P*YI/(.622+YI)
  PDS=610.7*10**(7.5*TLI/(237+TLI))
  PHI=PDL/PDS*100
  READ(LU1,*)(XT(J),J=1,5)
  DO 30 I=1,5
    T2=XT(I)
    IF (T2.GE.TLI) GOTO 31
    T1=T2
30  CONTINUE
31  IF (I.GT.1) GOTO 32
    T1=T2
32  XT1=0
    IF (T1.NE.T2) XT1=(TLI-T1)/(T2-T1)
    READ(LU1,*)(XEMC(J),J=1,10)
    IF (I.LE.2) GOTO 33
    READ(LU1,*)(DUM,J=1,(I-2)*10)
33  READ(LU1,*)(XPHI(J),J=1,10)
    DO 34 I=1,10
      PHI2=XPHI(I)
      XEMC2=XEMC(I)
      IF (PHI2.GE.PHI) GOTO 35
      PHI1=PHI2
      XEMC1=XEMC2
34  CONTINUE
35  IF (I.GT.1) GOTO 36
    PHI1=PHI2
    XEMC1=XEMC2
36  IF (PHI1.NE.PHI2) XEMC1=XEMC1+
+ (PHI-PHI1)/(PHI2-PHI1)*(XEMC2-XEMC1)
    IF (T1.NE.T2) GOTO 37
    EMC=XEMC1/100
    GOTO 41
37  READ(LU1,*)(XPHI(J),J=1,10)
    DO 38 I=1,10
      PHI4=XPHI(I)
      XEMC4=XEMC(I)
      IF (PHI4.GE.PHI) GOTO 39
      PHI3=PHI4
      XEMC3=XEMC4
38  CONTINUE
39  IF (I.GT.1) GOTO 40
    PHI3=PHI4
    XEMC3=XEMC4
40  IF (PHI3.NE.PHI4) XEMC3=XEMC3+
+ (PHI-PHI3)/(PHI4-PHI3)*(XEMC4-XEMC3)
    EMC=(XEMC1+XT1*(XEMC3-XEMC1))/100
41  REWIND LU1
C

```

```

C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C-> HAUPTROUTINE: BERECHNUNG DER HOLZSEGMENTE
C
C-> ITERATIONSSCHRITT: DTIME1 s
C->          -DAUER: DTIME s
C
C-> SETZEN DES TROCKNUNGSPROFILS
C
      IF (INFO(7).GT.0) THEN
        DO 45 J=0,5
        DO 45 I=1,10
          XS(I,J)=XSI(I,J)
          THS(I,J)=THSI(I,J)
45      CONTINUE
      ELSE
        DO 46 J=0,5
        DO 46 I=1,10
          XSI(I,J)=XS(I,J)
          THSI(I,J)=THS(I,J)
46      CONTINUE
        XMSTI=XMST
        THMSTI=THMST
      ENDIF
C
C-> BERECHNUNG ALLER SEGMENTE
C
      DO 56 K=1,DTIME/DTIME1
C
C-> ANFANGSWERTE DES LUFTSTROMS
      YM=YI
      TLM=TLI
      XMDOTM=XMDOTI
C
C-> BERECHNUNG DER HOLZBERFLAECHESEGMENTE
      DO 52 I=1,10
C->  TEMPERATUREN UND HOLZFEUCHTE
        TLM=TLM
        XM=XS(I,0)
        TM=(TLM+THS(I,0))/2
        TM=AMAX1(0.,AMIN1(TM,100.))
C->  STOFFWERTE
        CALL CALCULL1(AL,DLC,PSI,P,RD,RL,TM,XMDOTM,YM,
+PDL,RE,RHOLF,RHOLT,WM)
        CALL CALCULL2(DLC,FA,INFO,LU1,NXSRP,P,PDL,PR,RE,RHOLF,
+RW0,TM,XLE,XM,YM,ALPH,BETA,CPD,CPLF,PDM,PDS,RW)
        CALL CALCULH(CPHT,INFO,LU2,NXMTC,RHOHT,TM,XM,
+CPHF,RHOHF,XLDAHF,XKAP)
C->  STOFFTRANSPORT
        XMDOTS=BETA*ASEG*P*ALOG((P-PDL)/(P-PDM))/RD/(TM+273.15)
        XDOTS=XMDOTS/RHOHT/ASEG/DSEG(0)
        DYS=XMDOTS/RHOLT/WM/AL
C->  KONDENSATION VON FEUCHTE?
        IF (P*(YM+DYS)/(.622+YM+DYS).GT.PDS) THEN
          DYS=.622*PDS/(P-PDS)-YM
          XMDOTS=DYS*RHOLT*WM*AL
          XDOTS=XMDOTS/RHOHT/ASEG/DSEG(0)
          IWRNC=1
        ENDIF
C->  WAERMETRANSPORT
        QDOTS=XMDOTS*RW+ALPH*ASEG*(TM-THS(I,0))
C->  NEUE STOFFWERTE

```

```

      YM=YM+DYS
      TLM=(CPLF*RHOLF*WM*AL*TLM-QDOTS+CPD*XMDOTS*THS(I,0))/
+ (CPLF*RHOLF*WM*AL+CPD*XMDOTS)
      TLM=AMAX1(0.,AMIN1(TLM,100.))
      TLM=AMAX1((TLM-2.),AMIN1(TLM,TLM+2.))
      DXS=XDOTS*DTIME1
      DTHS=ALPH*(TLM-THS(I,0))/CPHF/RHOHF/DSEG(0)*DTIME1
C-> BEGRENZUNG GEGEN UNSINNIGE WERTE
      PDS=610.7*10**((7.5*TLM/(237+TLM)))
      YM=AMIN1(AMAX1(0.,YM),(.622*PDS/(P-PDS)))
      IF (ABS(DXS).LT..001) GOTO 50
      DXS0=DXS
      IF (DXS.GT.0) DXS=AMIN1(DXS,.01*ABS(XS(I,0)-EMC))
      IF (DXS.LT.0)
+DXS=AMAX1(DXS,(-.01),(-.01)*ABS(XS(I,0)-EMC))
      IF (ABS(1-DXS/DXS0).GT..5) IWRNX0=1
50    CONTINUE
      IF (ABS(DTHS).LT..05) GOTO 51
      DTHS0=DTHS
      IF (DTHS.GT.0) DTHS=AMIN1(DTHS,.01*(TLM-THS(I,0)))
      IF (DTHS.LT.0) DTHS=AMAX1(DTHS,.01*(TLM-THS(I,0)))
      IF (ABS(1-DTHS/DTHS0).GT..5) IWRNT0=1
51    CONTINUE
      YS(I)=YM
      TLS(I)=TLM
      XS(I,0)=XS(I,0)-DXS
      THS(I,0)=THS(I,0)+DTHS
      XMDOTM=XMDOTM+XMDOTS
      IF (XMDOTM.LT..1) XMDOTM=.1
52    CONTINUE
C
C-> BERECHNUNG DER SEGMENTE IM HOLZINNEREN
      DO 55 J=1,5
      DO 55 I=1,10
C-> TEMPERATUREN UND HOLZFEUCHTE
      XM=(XS(I,J)+XS(I,J-1))/2
      TM=(THS(I,J)+THS(I,J-1))/2
      TM=AMAX1(0.,AMIN1(TM,100.))
C-> STOFFWERTE
      CALL CALCULH(CPHT,INFO,LU2,NXMT,C,RHOHT,TM,XM,
+CPHF,RHOHF,XLDAHF,XKAP)
C-> STOFF- UND WAERMETRANSPORT
      DXS=XKAP*(XS(I,J)-XS(I,J-1))/DSEG(J)**2*DTIME1
      DTHS=
+XLDAHF*(THS(I,J-1)-THS(I,J))/CPHF/RHOHF/DSEG(J)**2*DTIME1
      DXS=DXS*(1+FR1*(13-4*J)/11)*(1+FR2*(13-4*J)/11)
      DTHS=DTHS*(1+FR1*(13-4*J)/11)*(1+FR2*(13-4*J)/11)
C-> BEGRENZUNG GEGEN UNSINNIGE WERTE
      IF (ABS(DXS).LT..001) GOTO 53
      DXS0=DXS
      IF (DXS.GT.0) DXS=AMIN1(DXS,.01*(XS(I,J)-XS(I,J-1)))
      IF (DXS.LT.0) DXS=AMAX1(DXS,.01*(XS(I,J)-XS(I,J-1)))
      IF (ABS(1-DXS/DXS0).GT..5) IWRNX1=1
53    CONTINUE
      IF (ABS(DTHS).LT..05) GOTO 54
      DTHS0=DTHS
      IF (DTHS.GT.0)
+DTHS=AMIN1(DTHS,.01*(THS(I,J-1)-THS(I,J)))
      IF (DTHS.LT.0)
+DTHS=AMAX1(DTHS,.01*(THS(I,J-1)-THS(I,J)))
      IF (ABS(1-DTHS/DTHS0).GT..5) IWRNT1=1
54    CONTINUE

```

```

C->      NEUE STOFFWERTE
        XS(I,J)=XS(I,J)-DXS
        THS(I,J)=THS(I,J)+DTHS
        IF (J.EQ.1) DXS=2*DXS
        XS(I,J-1)=XS(I,J-1)+DXS
        THS(I,J-1)=THS(I,J-1)-DTHS
55      CONTINUE
C
56      CONTINUE
C
C-> ENDE DER HAUPTROUTINE
C
C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C-> AUSGABE FEUCHTE-/TEMPERATURPROFIL IN LU3
C->  AUSGABE JE STUNDE SIMULATIONSZEIT
      IF (TIME.LT.TIME1) GOTO 62
      TIME1=TIME1+1
      WRITE (LU3,'(F10.4)')TIME
      WRITE (LU3,'(10(F6.5,1X))')(YS(I),I=1,10)
      DO 60 J=0,5
        WRITE (LU3,'(10(F6.5,1X))')(XS(I,J),I=1,10)
60      CONTINUE
      WRITE (LU3,'(1H)')
      WRITE (LU3,'(10(F6.2,1X))')(TLS(I),I=1,10)
      DO 61 J=0,5
        WRITE (LU3,'(10(F6.2,1X))')(THS(I,J),I=1,10)
61      CONTINUE
      WRITE (LU3,'(1H)')
C->  AUSGABE VON WARNUNGEN
      IF ((IWRNC+IWRNX0+IWRNX1+IWRNT0+IWRNT1).EQ.0) GOTO 89
      IF (IWRNC.EQ.1) WRITE (LU3,80)
      IF (IWRNX0.EQ.1) WRITE (LU3,81)
      IF (IWRNX1.EQ.1) WRITE (LU3,82)
      IF (IWRNT0.EQ.1) WRITE (LU3,83)
      IF (IWRNT1.EQ.1) WRITE (LU3,84)
      WRITE (LU3,'(1H)')
      IWRNC=0
      IWRNX0=0
      IWRNT0=0
      IWRNX1=0
      IWRNT1=0
80      FORMAT
      +(' WARNING: CONDENSING OF MOISTURE ON WOOD SURFACE')
81      FORMAT
      +(' WARNING: NONREALISTIC MOISTURE FLOW AT WOOD SURFACE')
82      FORMAT
      +(' WARNING: NONREALISTIC MOISTURE FLOW IN INNER WOOD')
83      FORMAT
      +(' WARNING: NONREALISTIC HEAT FLOW AT WOOD SURFACE')
84      FORMAT(' WARNING: NONREALISTIC HEAT FLOW IN INNER WOOD')
89      CONTINUE
62      CONTINUE
C

```

```

C-> MITTELUNG VON FEUCHTEN UND TEMPERATUREN
C-> BERECHNUNG DER FEUCHTE- UND TROCKNUNGSGEFAELLE
C-> ERMITTELUNG DER MAX. TEMPERATUR IM STAPEL
C
  YMST=0
  TLMST=0
  XMST=0
  THMST=0
  THMAX=0
  XXEMC=0
  XXX=0
  DO 70 I=1,10
    YMST=YMST+YS(I)
    TLMST=TLMST+TLS(I)
70  CONTINUE
  DO 72 I=1,10
    XM=0.
    TM=0.
    DO 71 J=0,5
      XM=XM+XS(I,J)*DSEG(J)
      TM=TM+THS(I,J)*DSEG(J)
      TM=AMAX1(0.,AMIN1(TM,100.))
      THMAX=AMAX1(THMAX,THS(I,J))
71  CONTINUE
    XMST=XMST+XM
    THMST=THMST+TM
    XXEMC=AMAX1(XXEMC,XM/11/DSEG(0)/EMC)
    XXX=AMAX1(XXX,
+AMAX1(XS(I,0),XS(I,1),XS(I,2),XS(I,3),XS(I,4),XS(I,5))-
+AMIN1(XS(I,0),XS(I,1),XS(I,2),XS(I,3),XS(I,4),XS(I,5)))
72  CONTINUE
C-> BERECHNUNG DER AUSGABEWERTE
  YMST=YMST/10
  TLMST=TLMST/10
  XMST=XMST/110/DSEG(0)
  THMST=THMST/110/DSEG(0)
  YF=YS(10)
  TLF=TLS(10)
  XMDOTF=XMDOTM
C
C-> BERECHNUNG DES MASSENLEITWERTS DER LUFT DURCH DEN STAPEL
C
  XMDOTM=(XMDOTI+XMDOTF)/2
  CALL CALCULL1(AL,DLC,PSI,P,RD,RL,TLMST,XMDOTM,YMST,
+PDL,RE,RHOLF,RHOLT,WM)
  CALL CALCULL2(DLC,FA,INFO,LU1,NXSRP,P,PDL,PR,RE,RHOLF,
+RW0,TLMST,XLE,XMST,YMST,ALPH,BETA,CPD,CPLF,PDM,PDS,RW)
  CALL CALCULH(CPHT,INFO,LU2,NXMTC,RHOHT,TLMST,XMST,
+CPHF,RHOHF,XLDAHF,XKAP)
  IF (XK*RE/DLC.LT.75) THEN
    XKSI=.455/(ALOG10(RE))**2.58
  ELSE
    XKSI=.455/(ALOG10(DLC/XK*75))**2.58
  ENDIF
  ZETA=(XKSI*PSI*DXH/DLC+1.5)*XNXST/2
  DPST=ZETA*RHOLF/2*WM**2
  XL=XMDOTM/DPST
C

```

```

C-> SETZEN DER OUTPUTS
C
      OUT(1)=YF
      OUT(2)=TLF
      OUT(3)=XMDOTF*3600.
      OUT(4)=YMST
      OUT(5)=TLMST
      OUT(6)=XMST
      OUT(7)=THMST
      OUT(8)=(XMSTI-XMST)/DIME*3600.
      OUT(9)=(XMDOTF-XMDOTI)*3600.
      OUT(10)=(XMDOTF-XMDOTI)/ASEG/10.*3600.
      OUT(11)=
+ ((XMDOTF-XMDOTI)*RW+VST*RHOHF*CPHF*(THMST-THMSTI)/DIME)*3.6
      OUT(12)=EMC
      OUT(13)=XL*3600.
      OUT(14)=THMAX
      OUT(15)=XXEMC
      OUT(16)=XXX
C
      RETURN 1
      END
C
C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C-> SUBROUTINEN: BERECHNUNG DER LUFT- UND HOLZWERTE
C
C->   HOLZWERTE
      SUBROUTINE CALCULH(CPHT, INFO, LU2, NXMTC, RHOHT, TM, XM,
+CPHF, RHOHF, XLDAHF, XKAP)
C
      DIMENSION XMTC(2)
      CPW=4178+9E-3*(TM-35)**2
      CPHF=(1-XM)*CPHT+XM*CPW
      RHOHF=RHOHT*(1+XM)/(1+8.4E-4*RHOHT*XM)
      XLDAHF=.195*RHOHF/1000+.026
      XMTC(1)=XM*100
      XMTC(2)=TM
      CALL DATA(LU2, 2, NXMTC, 1, XMTC, XKAP, INFO, *901)
      CALL LINKCK('TYPE61', 'DATA', 1, 99)
901  CONTINUE
      XKAP=XKAP*1.E-10
      RETURN
      END
C
C->   LUFTWERTE
      SUBROUTINE CALCULL1(AL, DLC, PSI, P, RD, RL, TM, XMDOTM, YM,
+PDL, RE, RHOLF, RHOLT, WM)
C
      PDL=P*YM/(.622+YM)
C
      RHOD=P/RD/(TM+273.15)
      RHOLT=P/RL/(TM+273.15)
      RHOLF=(1+YM)/(1/RHOLT+YM/RHOD)
C
      WM=XMDOTM/AL/RHOLF
C
      ETAD=8.1E-6*(1+(TM+273.15)/273.15)**1.25
      ETALT=17.2E-6*((TM+273.15)/273.15)**.7
      ETALF=(PDL*ETAD+(P-PDL)*ETALT)/P
      XNY=ETALF/RHOLF
C

```


A.2 TYPE 91 "Aufwindkamin"

```

C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C TRNSYS TYPE 91 NATURAL CONVECTION CHIMNEY TYPE91.FOR
C VERSION 2.0 (TRNSYS 14.1) NOVEMBER 1994
C
C BY STEPHAN BENKERT
C TU MUENCHEN WEIHENSTEPHAN
C INSTITUT FUER LANDTECHNIK
C (C) 1994
C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C      SUBROUTINE TYPE91 (TIME,XIN,OUT,T,DTDT,PAR,INFO,ICNTRL,*)
C
C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C-> INITIALISIERUNG
C
C      DOUBLE PRECISION XIN,OUT
C      DIMENSION XIN(7),OUT(8),PAR(7),INFO(15)
C      SAVE WLMI,XMDOT
C
C-> SETZEN DER INPUTS
C
C      T0=AMAX1(0.,AMIN1(XIN(1),100.))
C      Y0=XIN(2)
C      W0=XIN(3)
C      P=XIN(4)
C      T1=AMAX1(0.,AMIN1(XIN(5),100.))
C      Y1=XIN(6)
C      WLMA=XIN(7)/3600.
C
C      IF (INFO(7).LE.0.) XMDOT0=XMDOT
C
C-> SCHUTZ VOR DIV BY ZERO UND UNSINNIGEN EINGABEN:
C
C      IF (Y0.LT.1.E-5) Y0=1.E-5
C      IF (P.LT.2.E4) P=1.E5
C      IF (Y1.LT.1.E-5) Y1=1.E-5
C
C-> SETZEN DER INFOS
C
C      INFO(6)=8
C
C-> SETZEN DER PARAMETER
C
C      A1=PAR(1)
C      A2=PAR(2)
C      HK=PAR(3)
C      CPK=PAR(4)*1000.
C      RHOK=PAR(5)
C      XKWK=PAR(6)
C      XK=PAR(7)
C
C-> SCHUTZ VOR DIV BY ZERO UND UNSINNIGEN EINGABEN:
C
C      IF (A1.GT.0.AND.A2.GT.0.AND.WLMA.GT.0) GOTO 160
C      XMDOT=0

```

```

        TM=T0
        T2=T0
        W1=0
        W2=0
        QDOT=0
        WLMI=0
        DPG=0
        GOTO 210
160    CONTINUE
C
C->  UEBERPRUEFEN DES AUFRUFS DURCH DAS TRNSYS-DECK
C
        CALL TYPECK(1,INFO,7,7,0)
C
C->  SETZEN VON GRUNDWERTEN
C
        DATA RL/287./,RD/462./,PI/3.14/
C->  GEOMETRISCHE BERECHNUNGEN
C
        DK1=2*SQRT(A1/PI)
        DK2=2*SQRT(A2/PI)
        DKM=(DK1+DK2)/2
        AM=DKM**2*PI/4
C
        XLK=SQRT(HK**2+(DK1-DK2)**2/4)
        AS1=XLK*(DK1+DKM)*PI/4
        AS2=XLK*(DK2+DKM)*PI/4
        VK=HK*(DK1**2+DK2**2+DK1*DK2)*PI/12
C
C->  W-RMEVERLUSTE, TEMPERATUREN
C
        CALL CALCULL(A1,DKM,P,RD,RL,T1,XMDOT,Y1,CPLF,RE,RHOLF,WM)
        QDOT1=XKWK*AS1*(T1-T0)/2
        IF (XMDOT.LT..01) THEN
            TM=T0
            T2=T0
            QDOT=QDOT1
            GOTO 100
        ELSE
            TM=T1-QDOT1/XMDOT/CPLF
            IF (T1.GT.T0) TM=AMAX1(TM,T0+(T1-T0)/5)
            IF (T1.LT.T0) TM=AMIN1(TM,T0-(T0-T1)/5)
            TM=AMAX1(0.,AMIN1(TM,100.))
        ENDIF
        CALL CALCULL(AM,DKM,P,RD,RL,TM,XMDOT,Y1,CPLF,RE,RHOLF,WM)
        QDOT2=XKWK*AS2*(TM-T0)/2
        QDOT=QDOT1+QDOT2
        T2=TM-QDOT2/XMDOT/CPLF
        IF (TM.GT.T0) T2=AMAX1(T2,T0+(TM-T0)/5)
        IF (TM.LT.T0) T2=AMIN1(T2,T0-(T0-TM)/5)
        T2=AMAX1(0.,AMIN1(T2,100.))
100    CONTINUE
C
C->  LUFTLEITWERT GESAMT
C
        IF (WLMI.EQ.0) THEN
            WLMG=WLMA
        ELSE
            WLMG=1/(1/WLMI+1/WLMA)
        ENDIF
C

```

```

C2345+7CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
C-> HAUPTROUTINE: BERECHNUNG DES KAMINS
C
      TM1=(T1+TM+T2)/3
      TM1=AMAX1(0.,AMIN1(TM1,100.))
      CALL CALCULL(AM,DKM,P,RD,RL,TM1,XMDOT,Y1,CPLF,RE,RHOLF,WM)
      CALL CALCULL(AM,DKM,P,RD,RL,T0,XMDOT,Y0,CPLF,RE,RHOLF0,WM)
C
C-> AUFTRIEBSSOG
C
      DP1=VK*(RHOLF0-RHOLF)*9.81/A2
C
C-> AUSSENWINDSOG
C
      DP2=RHOLF0*W0**2/2
C
C-> GESAMTSOG
C
      DPG=DP1+DP2
C
C-> OUTPUTS-BERECHNUNG
C
      XMDOT=WLMG*DPG
C-> BEGRENZUNG GEGEN UNSINNIGE WERTE
300  CONTINUE
      IF (ABS(XMDOT-XMDOT0).LE..5*ABS(XMDOT0)) GOTO 310
      XMDOT1=XMDOT
      XMDOT=.5*XMDOT0+.5*XMDOT1
      XMDOT0=.7*XMDOT0+.3*XMDOT1
      GOTO 300
310  CONTINUE
      CALL CALCULL(A2,DKM,P,RD,RL,T2,XMDOT,Y1,CPLF,RE,RHOLF,W2)
      CALL CALCULL(A1,DKM,P,RD,RL,T1,XMDOT,Y1,CPLF,RE,RHOLF,W1)
      IF (XMDOT.EQ.0) GOTO 200
      XLDA=.25/(ALOG10(15/RE+XK/(DKM*3.715)))**2
      ZETA=XLDA*HK/DKM
C-> DIFFUSOR
      IF (DK2.GT.DK1) ZETA=ZETA+(DK2/DK1-1)**2*(DK2-DK1)/HK*10
      WLM1=2*A1**2*RHOLF/ZETA/ABS(XMDOT)
200  CONTINUE
C
210  CONTINUE
C
C-> SETZEN DER OUTPUTS
C
      OUT(1)=XMDOT*3600.
      OUT(2)=TM
      OUT(3)=T2
      OUT(4)=W1
      OUT(5)=W2
      OUT(6)=QDOT*3.6
      OUT(7)=WLM1*3600.
      OUT(8)=DPG
C
      RETURN 1
      END
C
C-> ENDE DER HAUPTROUTINE
C

```


Anhang B TRNSYS Decks

B.1 Konfiguration der Komponenten

Dieser Anhang enthält die Einbindung sämtlicher zur Modellierung verwendeter Komponenten in TRNSYS Decks. Ausführliche Beschreibungen der Komponenten finden sich im TRNSYS-Handbuch [25], beziehungsweise in "3 Modellierung der Holz Trocknung".

In den Tabellen werden alle Werte in den Standard-TRNSYS-Einheiten angegeben, die oft keine SI-Einheiten sind. Sämtliche Werte gelten für den ersten am solaren Holz trockner in Resistencia durchgeführten Versuch, entsprechend dem Deck "17AGOSTO.DCK".

Tab. B.1: Systemkomponente Tunnelkollektor: TYPE 1 "Solarkollektoren"

Parameter No.	Beschreibung	Wert
1	Mode: Angabe von Wirkungsgradkurven	2
2	Anzahl der Kollektoren	1
3	Kollektorfläche	228 m ²
4	Spezifische Wärmekapazität des Kollektormediums (hier: Luft)	1,012 kJ/kg K
5	Mode: Wirkungsgrad η_{k0} als Funktion von $(\vartheta_{k0,f} - \vartheta_0) / I$	3
6	Logical Unit der Wirkungsgradkurven	14
7	Anzahl der x-Werte für $(\vartheta_{k0,f} - \vartheta_0) / I$	10
8	Anzahl der Kurven für verschiedene Strahlung I	3
9	Anzahl der Kurven für versch. Windgeschw. w_0	1
10	Optischer Mode: Kollektoreigenschaften nutzen	3

11	Absorptionsgrad α der Absorberfolie	0,8
12	Anzahl der Kollektorabdeckungen	1
13	Brechungsindex n der Abdeckung (PE-Folie)	1,51
14	Extinktionsgrad $(1-\tau)$ der Abdeckung	0,25
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1	Kollektoreingangstemperatur (Umgebungsluft)	ϑ_0 [°C]
2	Massenstrom (aus TYPE 91 "Aufwindkamin")	$\dot{m}_i$ [kg/h]
3	Umgebungstemperatur	ϑ_0 [°C]
4	Einfallende Totalstrahlung (aus TYPE 16 "Solarstrahlungsberechner")	I_{tot} [kJ/m ² h]
5	Windgeschwindigkeit	w_0 [m/s]
6	Horizontale Totalstrahlung (aus TYPE 16)	$I_{\text{hor, tot}}$ [kJ/m ² h]
7	Horizontale Diffusstrahlung (aus TYPE 16)	$I_{\text{hor, diff}}$ [kJ/m ² h]
8	Reflexionsgrad ρ des Bodens in der Umgebung	0,7
9	Einfallswinkel der Strahlung (aus TYPE 16)	θ [°]
10	Kollektorneigung β	0 °
Ausgabe No.	Beschreibung	Wert
1	Kollektorausgangstemperatur	$\vartheta_{\text{Ko, f}}$ [°C]
2	Massenstrom	$\dot{m}_f$ [kg/h]
3	Energiefluß in die Luft	$\dot{Q}_{\text{Ko}}$ [kJ/h]

Tab. B.2: Systemkomponente Trocknungskammer: TYPE 19 "Detaillierte Zone"

Parameter No.	Beschreibung	Wert
1	Mode: Temperaturkontrolle	2
2	Volumen der Trocknungskammer	51,4 m ³
3	Luftaustauschrate (ohne Belüftung)	3 h ⁻¹
4, 5	Hier nicht verwendet	0

6	Wärmekapazität der Trocknungskammer $c_{p\ Ka}$	500 kJ/K
7	Anzahl der "Wände" zur Kammerbeschreibung	7
8	Anfangstemperatur der Kammer $\vartheta_{Ka, i}$	7 °C
9	Anfangsluftfeuchte der Kammer $y_{Ka, i}$	0,01 kg/kg
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1	Umgebungstemperatur	ϑ_0 [°C]
2	Umgebungsluftfeuchte	y_0 [kg/kg]
3	Temp. der Trocknungsluft (Kammereingang)	$\vartheta_{Ka, i}$ [°C]
4	Massenstrom	$\dot{m}_i$ [kg/h]
5	Luftfeuchte der Trocknungsluft (Kammereing.)	$y_{Ka, i} = y_0$ [kg/kg]
6	Feuchtezustrom in die Kammer aufgrund der Trocknung (aus TYPE 61 "Holztrocknung")	$\dot{m}$ [kg/h]
7, 8, 9	Hier nicht verwendet	0, 1, 0
10	Wärmestrom in die Kammer aufgrund der Trocknung (aus TYPE 61 "Holztrocknung")	$-\dot{Q}$ [kJ/h]
11	Windgeschwindigkeit	w_0 [m/s]
Wandparameter No.	Beschreibung	Wert
1	Nummer der ersten Wand (nach Westen)	1
2	Wandtyp: Außenwand	1
3	Wandfläche	14,28 m ²
4	Reflexionsgrad ρ der Wandinnenseite	0,7
5	Absorptionsgrad α der Wandaußenseite	0,1
6	Mode: Angabe der Wandeigenschaften	4
7	Wärmeübergangskoeffizient α innen	100 kJ/h m ² K
8, 9, 10	Anzahl weiterer Wandparameter	1, 1, 0
11, 12	Wärmedurchgangskoeffizienten k_1, k_2	10 kJ/h m ² K
13, 16, 19, 22, 25	Nummern der übrigen Wände (nach Süden, Osten, oben, unten, Norden)	2, 3, 4, 5, 6
14, 17, 20, 23, 26	Wandeigenschaften wie Wand 1	-1

15, 18, 21, 24, 27	Wandflächen der Wände 2 bis 6 (alle in [m²])	7,56; 14,28; 24,48; 24,48; 7,56
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1 bis 6	Einfallende Totalstrahlung auf die Wände (aus TYPE 16 "Solarstrahlungsberechner")	I_{tot} [kJ/m² h]
Wandpara- meter No.	Beschreibung	Wert
1	Nummer der "Wand" zwischen Kollektor und Kammer	7
2	Wandtyp: Beschreibung als Fenster	5
3	Übergangsfläche	6,6 m²
4	Mode: Interne Berechnung von Wärmetransport und Strahlung durch den Übergang	1
5	Transmissionskoeffizient τ für diffuse Strahlung	0,2
6	Wärmeübergangskoeffizient α innen	500 kJ/h m² K
7	Anzahl an Innenwänden, auf die Licht fällt	1
8	Wandnummer des bestrahlten Bodens	5
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1	Einfallende Totalstrahlung (aus TYPE 16)	I_{tot} [kJ/m² h]
2	Einfallende Direktstrahlung (aus TYPE 16)	I_{dir} [kJ/m² h]
3	Transmissionskoeffizient τ	0,3
4	Hier nicht verwendet	0
5	Anteil des Lichts, das den Boden erreicht	0,5
Ansichtpara- meter No.	Beschreibung	Wert
1	Geometriemode: Quader	1
2, 3, 4	Höhe, Breite, Länge der Kammer (alle in [m])	2,1; 6,8; 3,6
5 bis 10	Reihenfolge der Wände	1, 6, 3, 2, 5, 4
11	Anzahl der "Fenster"	1
12	Wandnummer des "Fensters" (des Übergangs)	7

13	Nummer der Wand, die den Übergang enthält	6
14, 15	xy-Position des Übergangs in der Wand (in [m])	0,15; 0,05
16, 17	Höhe und Breite des Übergangs (in [m])	2,0; 3,3
Ausgabe No.	Beschreibung	Wert
1	Temperatur der Trocknungskammer	$\vartheta_{Ka, f}$ [°C]
2	Luftfeuchte in der Kammer	$y_{Ka, f}$ [kg/kg]
3 bis 6	Hier nicht verwendet	

Tab: B.3: Systemkomponente Holzstapel: TYPE 61 "Holztrocknung"

Parameter No.	Beschreibung	Wert
1	Mittlere Anfangsfeuchte im Holz x_i	0,56 kg/kg
2	Mittlere Anfangstemperatur im Holz $\vartheta_{H, i}$	7 °C
3	Länge des Stapels $d_{x, ST}$	3,00 m
4	Breite des Stapels $d_{y, ST}$	3,00 m
5	Höhe des Stapels $d_{z, ST}$	1,00 m
6	x-Maß eines Brettes $d_{x, H}$	0,100 m
7	Bretterabstand in x-Richtung $d_{x, L}$	0,010 m
8	y-Maß eines Brettes $d_{y, H}$	0,900 m
9	Bretterabstand in y-Richtung $d_{y, L}$	0,010 m
10	z-Maß eines Brettes $d_{z, H}$	0,025 m
11	Bretterabstand in z-Richtung $d_{z, L}$	0,025 m
12	Dichte des darrtrockenen Holzes $\rho_{H, t}$	750 kg/m ³
13	Spezifische Wärmekapazität des darrtrockenen Holzes $c_{p, H, t}$	1,5 kJ/kg K
14	Mittlere Rauigkeit des Holzes k	0,002 m
15	Zeitintervall der TRNSYS Simulation Δt	0,166667 h
16	Logical Unit für Sorptionsisothermen LU <i>"*.SRP"</i>	11
17	Logical Unit für Feuchteleitwerte LU <i>"*.MTC"</i>	12

18	Logical Unit für Trocknungsprofile <i>LU "*.PRF"</i>	15
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1	Absolute Luftfeuchte am Stapelanfang (Trocknungsluft)	$y_i = y_0$ [kg/kg]
2	Lufttemperatur am Stapelanf. (Trocknungsluft)	$\vartheta_{L,i}$ [°C]
3	Luftmassenstrom am Stapelanfang (aus TYPE 91 "Aufwindkamin")	$\dot{m}_i$ [kg/h]
4	Luftdruck p (als konstant angenommen)	$1,0 \cdot 10^5$ Pa
Ausgabe No.	Beschreibung	Wert
1	Absolute Luftfeuchte am Stapelende	y_f [kg/kg]
2	Lufttemperatur am Stapelende	$\vartheta_{L,f}$ [°C]
3	Luftmassenstrom am Stapelende	$\dot{m}_f$ [kg/h]
4	Mittlere absolute Luftfeuchte im Stapel	$y_{ST,m}$ [kg/kg]
5	Mittlere Lufttemperatur im Stapel	$\vartheta_{L,ST,m}$ [°C]
6	Mittlere Holzfeuchte im Stapel	$x_{ST,m}$ [kg/kg]
7	Mittlere Holztemperatur im Stapel	$\vartheta_{H,ST,m}$ [°C]
8	Trocknungsrate des Holzes	$\dot{x}$ [kg/kg h]
9	Feuchtestrom aus dem Holz	$\dot{m}$ [kg/h]
10	flächenspezifischer Feuchtestrom aus dem Holz	$\dot{m}_A$ [kg/m² h]
11	Wärmestrom in das Holz	$\dot{Q}$ [kJ/h]
12	Gleichgewichtsfeuchte	EMC [kg/kg]
13	Spezifischer Luftdurchsatz	L [kg/h Pa]
14	Höchste Holztemperatur im Stapel	$\vartheta_{H,ST,max}$ [°C]
15	Höchstes in einem Segment auftretendes Trocknungsgefälle	$TG_{S,max}$ [-]
16	Höchste in einem Segment auftretende Holzfeuchtedifferenz	$\Delta x_{S,max}$ [kg/kg]

Tab: B.4: Systemkomponente Kamin: TYPE 91 "Aufwindkamin"

Parameter No.	Beschreibung	Wert
1	Querschnittsfläche des Kamins am Lufteintritt $A_{Kn, i}$	4,75 m ²
2	Querschnittsfläche des Kamins am Luftaustritt $A_{Kn, f}$	4,75 m ²
3	Höhenunterschied zwischen Luftein- und -austritt h_{Kn}	12,8 m
4	Wärmekapazität der Kaminwand $c_{p, Kn}$	0,2 kJ/K
5	Dichte der Kaminwand ρ_{Kn}	7000 kg/m ³
6	Wärmedurchgangskoeffizient der Kaminwand $k_{w, Kn}$	7,0 kJ/h m ² K
7	Rauhigkeit der Kamininnenwand k_{Kn}	0,2 m
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1	Umgebungstemperatur	ϑ_0 [°C]
2	Absolute Feuchte der Umgebungsluft	y_0 [kg/kg]
3	Windgeschwindigkeit	w_0 [m/s]
4	Luftdruck p (als konstant angenommen)	$1,0 \cdot 10^5$ Pa
5	Lufttemperatur am Lufteintritt (feuchte Abluft)	$\vartheta_{Kn, i}$ [°C]
6	Absolute Luftfeuchte am Lufteintritt (feuchte Abluft)	$y_{Kn, i}$ [kg/kg]
7	Spez. Luftdurchsatz des Systems vor dem Lufteintritt in den Kamin	$L_{\overline{Kn}}$
Ausgabe No.	Beschreibung	Wert
1	Massenstrom	$\dot{m}$ [kg/h]
2	Lufttemperatur in der Mitte des Kamins	$\vartheta_{Kn, m}$ [°C]
3	Lufttemperatur am Luftaustritt	$\vartheta_{Kn, f}$ [°C]
4	Luftgeschwindigkeit am Lufteintritt	$w_{Kn, i}$

5	Luftgeschwindigkeit am Luftaustritt	$w_{Kn, i}$
6	Wärmedurchgang durch die Kaminwand in die Umgebung	$\dot{Q}$ [kJ/h]
7	Spezifischer Luftdurchsatz durch den Kamin	L_{Kn}
8	Druckunterschied zwischen Luftein- und -austritt	Δp_{Kn}

Tab: B.5: Systemkomponente Regelung: TYPE 40 "Mikroprozessor-Steuerung"

Parameter No.	Beschreibung	Wert
1	Anzahl an Steuergrößen	2
2	Schwellentemperatur $\vartheta_{Ka, i}$ zum Öffnen der Klappen	70 °C
3	Schwellentemperatur $\vartheta_{Ka, i}$ zum Schließen der Klappen	50 °C
4	Schwelle des höchsten Trocknungsgefälles $TG_{S, max}$ zum Öffnen der Klappen	4
5	Schwelle des höchsten Trocknungsgefälles $TG_{S, max}$ zum Schließen der Klappen	3
6	Anzahl an Steuermöglichkeiten	4
7 bis 19	Klappen sollen öffnen, sobald eine der beiden Öffnungsbedingungen zutrifft (Logisches ODER)	0, 0; 0, 1; 1, 0; 1, 1; 1; 0, 1, 1, 1
20 bis 25	Angaben zum Steuerverhalten	3; 0, 0; 0, 0; 4
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1	Lufttemperatur am Eingang der Kammer	$\vartheta_{Ka, i}$ [°C]
2	Hier nicht verwendet	0
3	Höchstes Trocknungsgefälle (aus TYPE 61 "Holztrocknung")	$TG_{S, max}$ [-]
4	Hier nicht verwendet	0
Ausgabe No.	Beschreibung	Wert
1	Klappen geschlossen / offen	0 / 1

Tab: B.6: Umgebung: TYPE 9 "Datenleser"

Parameter No.	Beschreibung	Wert
1	Mode: eigene Wetterdaten ab der ersten Zeile	2
2	18 Werte werden eingelesen	18
3	Werte in zehnminütigem Abstand	0,166667 h
4, 7, 10, ..., 55	Wert No.	1, 2, 3, ..., 18
5, 8, 11, ..., 56	Keine Multiplikation der Werte	1
6, 9, 12, ..., 57	Keine Addition zu den Werten	0
außer:	Wert No. 12: Horizontale Globalstrahlung I_{hor}	
37	Keine Interpolation (negative Wert No.)	-12
38	Umrechnung von $[10 \text{ W/m}^2]$ in $[\text{kJ/h m}^2]$: Multiplikation mit 36	36
58	Logical Unit für Wetterdaten "*.DAT"	10
59	Wetterdaten sind formatiert ¹	1
Ausgabe No.	Beschreibung	Wert
1 bis 18	Werte der entsprechend der Formatangabe aus den Wetterdaten gelesenen Daten, hier ² : ► Temperaturen in der Trocknungsanlage ► Relative Luftfeuchte nach dem Stapel ► Lufttemperatur nach dem Stapel ► Relative Luftfeuchte vor dem Stapel ► Lufttemperatur vor dem Stapel ► Horizontale Globalstrahlung ► Umgebungstemperatur (Messung 1) ► Relative Umgebungsluftfeuchte ► Umgebungstemperatur (Messung 2) ► Luftgeschwindigkeit vor und nach dem Stapel ► Windgeschwindigkeit	$\vartheta_{1,4,6,7,8,9,10} [\text{°C}]$ $\phi_{H1} [\%]$ $\vartheta_{H1} [\text{°C}]$ $\phi_{H2} [\%]$ $\vartheta_{H2} [\text{°C}]$ $I_{\text{hor}} [\text{kJ/h m}^2]$ $\vartheta_0 [\text{°C}]$ $\phi_0 [\%]$ $\vartheta_0 [\text{°C}]$ $v_1, v_2 [\text{m/s}]$ $w_0 [\text{m/s}]$

¹ Das Format lautet hier: (18X,F8.4,19X,F8.4,10X,16(F8.4,1X)). (Die Formatangabe erfolgt wie in FORTRAN.) Die Formatzeile steht unmittelbar nach den Parameterangaben des TYPE 9 "Datenleser" im Deck.

² Die Anordnung der Meßpunkte ist in "6.4 Trocknungsläufe in Resistencia" beschrieben. Die Form der Wetterdaten-Dateien ist in "B.4 Solare Aufwindtrocknungsanlage" erklärt.

Tab: B.7a: Berechnung der Sonnenstrahlung für den Kollektor: TYPE 16
"Solarstrahlungsberechner"

Parameter No.	Beschreibung	Wert
1	Berechnungsmodell für Horizontalstrahlung: Reindl (voll korreliert)	5
2	Nachführmodus: feste Oberfläche	1
3	Berechnungsmodell für geneigte Oberflächen: Hay und Davies	2
4	Erster Tag der Simulation: 17. August	229
5	Breitengrad von Resistencia (Südhalbkugel)	-27,46 °
6	Solarkonstante	4871 kJ/h m ²
7	Unterschied zwischen Orts- und Solarzeit	0 h
8	Keine Glättung der Strahlungswerte	2
9	Simulationszeit sei gleich Solarzeit	-1
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1	Horizontalstrahlung	I_{hor} [kJ/h m ²]
2	Umgebungstemperatur	ϑ_o [°C]
3	Relative Feuchte der Umgebungsluft	φ [%]
4, 5	Zeiten der letzten und nächsten Strahlungswerte (aus TYPE 9 "Datenleser")	t_{d1}, t_{d2} [h]
6	Reflexionsgrad ρ des Bodens in der Umgebung	0,7
7	Neigung β des Kollektors	0 °
8	Ausrichtung γ des Kollektors (Richtung Äquator)	180 °
Ausgabe No.	Beschreibung	Wert
1	Extraterrestrische Horizontalstrahlung	I_o [kJ/h m ²]
2, 3	Sonnenstand (Zenit-, Azimutwinkel)	θ_z, γ_s [°]
4, 6	Horizontale Totalstrahlung = Totalstrahlung auf den Kollektor	$I_{hor, tot}$ [kJ/m ² h]

5, 8	Horizontale Diffusstrahlung = Diffusstrahlung auf den Kollektor	$I_{\text{hor, diff}}$ [kJ/m ² h]
7	Direktstrahlung auf den Kollektor	$I_{\text{hor, dir}}$ [kJ/m ² h]
9	Einstrahlwinkel auf den Kollektor	θ_{Ko} [°]
10	Neigung β des Kollektors	0 °

Tab: B.7b: Berechnung der Sonnenstrahlung für die Trocknungskammer:
TYPE 16 "Solarstrahlungsberechner"

Parameter No.	Beschreibung	Wert
1 bis 9	wie in Tab. B.7a	
Eingabe No.	Beschreibung	Wert
1 bis 6	wie in Tab. B.7a	
7, 9, 11, 13	Neigung β der Wände	90 °
8, 10, 12, 14	Ausrichtung γ der Wände (Nord, West, Süd, Ost)	180 °, 90 °, 0 °, -90 °
Ausgabe No.	Beschreibung	Wert
1 bis 5	wie in Tab. B.7a	
6, 11, 14, 17	Totalstrahlung auf die Wände (Nord, West, Süd, Ost)	I_{tot} [kJ/m ² h]
7, 12, 15, 18	Direktstrahlung auf die Wände (Nord, West, Süd, Ost)	I_{dir} [kJ/m ² h]
8	Diffusstrahlung auf die Nord-Wand	$I_{\text{N, diff}}$ [kJ/m ² h]
9, 13, 16, 19	Einstrahlwinkel auf die Wände (Nord, West, Süd, Ost)	θ [°]
10	Neigung β der Nord-Wand	90 °

B.2 Freilufttrocknung

Das hier abgedruckte TRNSYS Deck modelliert die Freilufttrocknung eines Fichtenholzstapels.

Die Trocknungsbedingungen werden dem File "WEATHER.DAT" entnommen. Die zur Modellierung benötigten Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerte des Holzes sind über die Files "FICHTE.SRP" und "FICHTE.MTC" zugänglich.

Der Verlauf der Trocknung wird in den Files "FREILUFT.LST", "FREILUFT.PRF" und "FREILUFT.PLT" festgehalten. "FREILUFT.PRF" wird als Logical Unit 13 direkt aus dem TYPE 61 "Holztrocknung" heraus erstellt (siehe "3 Modellierung der Holztrocknung"). Während der Simulation kann der Trocknungsablauf am Bildschirm verfolgt werden (TYPE 65 ONLINE).

```
* * * * *
*      FREILUFT.DCK  (STEPHAN BENKERT)
*
*      DEZEMBER 1994 (TRNSYS 14.1)
*
* * * * *

ASSIGN FREILUFT.LST 6

ASSIGN WEATHER.DAT 10
ASSIGN FICHTE.SRP  11
ASSIGN FICHTE.MTC  12

ASSIGN FREILUFT.PRF 13
ASSIGN FREILUFT.PLT 14

SIMULATION  0.  100.  .166667

WIDTH 72

UNIT 9 TYPE 9 CARD READER
PARAMETERS 16
* aus WEATHER.DAT (LU 10):  t0[°C] rF0[%] w0[m/s] p[mbar]
* in Abständen von: 10 Min.
2      8      .166667
3 1. 0.    4 1. 0.    5 1. 0.    8 100. 0.    10
* OUTPUTS:      3: t0[°C] 4: rF0[%] 5: w0[m/s] 8: p[Pa]
```

```

EQUATIONS 5
* rel. Feuchte rF0 in abs. Feuchte y0:
PDS=610.7*10**(7.5*[9,3]/(237+[9,3]))
PDL=[9,4]*PDS/100
Y0=PDL*.622/([9,8]-PDL)
* rel. Feuchte rF0 in [100%]:
rF=[9,4]/100
* Neg. Wert für Luftgeschwindigkeit (Eingabe für Type 61):
WI=(-1)*[9,5]

UNIT 61 TYPE 61 WOOD DRYING
PARAMETERS 18
* xi tHi dxST dyST dzST dxH dxL dyH dyL dzH dzL
.325 20. 1.5 1.2 1.5 .15 .04 1. 0. .025 .01
* rhoHt cpHt k dt LU_SRP LU_MTC LU_PRF
408.08 1.370 .0005 .166667 11 12 13
INPUTS 4
* yi tLi wi p
Y0 9,3 WI 9,8
0. 20. 0. 1.E5
* OUTPUTS: 1: yf 2: tLf 3: mdotf 4: ySTm 5: tLSTm 6: xSTm
* 7: tHSTm 8: xdot 9: mdot 10: mdot_A 11: Qdot
* 12: EMC 13: L 14: tHSTmx 15: TGSmax 16: dXSmax

UNIT 25 TYPE 25 PRINTER 'FREILUFT.LST'
PARAMETERS 5
.25 0. 100. 6 2
INPUTS 4
* yi yf xdot mdot Qdot
Y0 61,1 61,8 61,9 61,10
YI YF XDOT MDOT QDOT

EQUATIONS 2
* zur Ausgabe in FREILUFT.PLT und ONLINE
XDT1E2=[61,8]*100.
XDT1E3=[61,8]*1000.

UNIT 27 TYPE 25 PRINTER 'FREILUFT.PLT'
PARAMETERS 5
.5 0. 100. 14 2
INPUTS 7
* tLi tLf tHSTm rF0 xSTm EMC xdt1E3
9,3 61,2 61,7 9,4 61,6 61,12 XDT1E3
TLI TLF THSTM RF0 XSTM EMC XDT1E3

```

```

UNIT 26 TYPE 65 ONLINE
PARAMETERS 14
* Anzahl der Variablen A/B, min./max. Werte A/B
4 4 0. 75. -0.25 1.
* Zeitschritte Zeichnen/Werte, Zeiteinheit
1 1 3
* Anzahl der Bilder/x-Gitter/no stop
1 10 0
* Bildschirmmodus/HPGL-Files
2 0
INPUTS 20
* tLi tLf tLSTm tHSTm xSTm EMC xdt1E2 rF
9,3 61,2 61,5 61,7 61,6 61,12 XDT1E2 rF
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
tLi tLf tLSTm tHSTm xSTm EMC xdt1E2 rF
- - - - -
LABELS 4
°C
div.
Luft- und Holztemperaturen
Feuchten und Trocknungsrate

END

```

Die Datei "WEATHER.DAT" enthält folgende Wetterwerte in zehnminütigem Abstand:

Stunde.Minute	Globalstrahlung [W/m ²]	Temperatur [°C]	rel. Feuchte [%]	Windgeschw. [m/s]	Windrichtung [°]	Infrarotstrahlung [W/m ²]	Luftdruck [mbar]
00.00	0	22.1	90.2	1.1	236	381	964
00.10	0	22.1	90.2	1.1	236	381	964
00.20	0	22.0	90.9	0.4	254	371	964
00.30	0	22.0	91.3	0.0	270	372	964
...							
06.30	0	20.3	87.3	0.8	282	348	962
06.40	5	20.1	88.7	0.6	320	342	962
06.50	17	20.5	87.1	0.1	279	342	962
07.00	33	20.6	85.3	0.1	195	345	962
07.10	55	20.5	84.8	0.7	198	345	962
...							
12.30	848	33.5	34.7	1.9	233	415	966
12.40	857	33.2	35.8	2.3	242	417	966
12.50	857	33.3	36.7	2.0	255	415	966
13.00	863	34.0	34.4	1.9	248	421	965
13.10	861	34.7	32.3	2.3	200	426	965
13.20	865	35.1	30.5	3.7	209	427	965
13.30	861	35.8	31.7	3.5	233	421	965
13.40	858	35.2	33.5	4.1	212	422	965
...							

Die Dateien "FICHTE.SRP" und "FICHTE.MTC" sind in "C Material- und Anlagenwerte" beschrieben.

B.3 Klimakammerversuche

Das hier abgedruckte TRNSYS Deck zur Modellierung des Versuchs V7W wurde mit geringen Änderungen für alle weiteren Klimakammerversuche eingesetzt.

Die Trocknungsbedingungen werden dem File "V7W.DAT" entnommen. Die zur Modellierung benötigten Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerte des Holzes sind über die Files "FICHTE.SRP" und "FICHTE.MTC" zugänglich.

Der Verlauf der Trocknung wird in den Files "V7W.LST", "V7W.PRF" und "V7W.PLT" festgehalten. "V7W.PRF" wird als Logical Unit 13 direkt aus dem TYPE 61 "Holztrocknung" heraus erstellt (siehe "3 Modellierung der Holztrocknung"). Während der Simulation kann der Trocknungsablauf am Bildschirm verfolgt werden (TYPE 65 ONLINE).

```

* * * * *
*
*       V7W.DCK (STEPHAN BENKERT)
*
*       TROCKNUNG VON HOLZ IN DER KLIMAKAMMER
*
*       DEZEMBER 1994 (TRNSYS14.1)
*
* * * * *
*
* Das Deck liest Daten aus V7W.DAT, speist damit den TYPE61 und
* gibt die Ergebnisse über TYPE65 ONLINE und TYPE25 PRINTER auf
* den Bildschirm, bzw. in die Files V7W.LST und V7W.PLT aus.
*
* TYPE61 erstellt zusätzlich das File V7W.PRF.
*
* Daten, die je nach Simulation häufig geändert werden müssen,
* sind mit '!!' gekennzeichnet.
* * * * *

ASSIGN V7W.LST 6

ASSIGN V7W.DAT 10
ASSIGN FICHTE.SRP 11
ASSIGN FICHTE.MTC 12

ASSIGN V7W.PLT 14
ASSIGN V7W.PRF 13

* !!simulationsdauer und -schrittweite anpassen:
SIMULATION 0. 388.5 .25

WIDTH 72

```

UNIT 9 TYPE 9 CARD READER

PARAMETERS 53

```
* von LU 10 in Abständen von: 2h
* unterschied meßwertzeit - sim_time beachten!
* !!zeitabstände, in denen daten vorliegen, anpassen
2 16 2.
1 1. 0. 2 1. 0. 3 1. 0. 4 1. 0. 5 1. 0.
6 1. 0. 7 .001 0. 8 100. 0. 9 .01 0. 10 .01 0. 11 .01 0.
12 .01 0. 13 .01 0. 14 .01 0. 15 .01 0. 16 .01 0. 10 0
* OUTPUTS: 1:meßwertzeit 2:twb 3:tdb 4:th0 5:th1 6:th2 7:m 8:p
* 9:x5 10:x10 11:x15 12:x25 13:x40 14:EMC 15:xm_el 16:xm_gew
* alle in [h], [°C], [kg], [Pa], [kg/kg] umgerechnet
```

UNIT 33 TYPE 33 PSYCHRO

PARAMETERS 4

```
* !!p[1E5 Pa] angeben
1 .88 0 2
INPUTS 2
*tdb twb
9,3 9,2
20. 20.
*out: 1:y[kg/kg] 2:twb 3:h[kJ/kg] 4,5:rho 6:rF[%] 7:tdb 8:tdp
* 9:status
```

UNIT 61 TYPE 61 WOOD DRYING

PARAMETERS 18

```
* !!anpassen:
* x31 t3h dx3 dy3 dz3 dxh dxl dyh dyl dzh dzl rhoht cpht xk dtime
.95 16. 1.0 .4 .4 .500 0. .18 0. .09 .0 408.08 1.370 .0005 .25
*lu1 lu2 lu3
11 12 13
INPUTS 4
* y31 t31 w3 p
33,1 9,3 0,0 9,8
0 20 -2.5 1.E5
*out: 1:yf 2:tLf 3:mdotf 4:ySTm 5:tLSTm 6:xSTm 7:thSTm 8:xdot
* 9:mdot 10:mdot_A 11:Qdot 12:EMC 13:L 14:tHmax 15:xxEMC 16:xxx
```

UNIT 25 TYPE 25 PRINTER 'V7W.LST'

PARAMETERS 5

```
1. 0. 400. 6 2
INPUTS 5
* y31 y32 xdot3 xmdot3 xmdot-dens qdot
33,1 61,1 61,8 61,9 61,10 61,11
Y31 Y32 XDOT3 XMDOT3 XMDOTA QDOT
```

EQUATIONS 1

```
XDT1E6=[61,8]*1.E6/3600
```

UNIT 27 TYPE 25 PRINTER 'V7W.PLT'

PARAMETERS 5

```
1. 0. 400. 14 2
INPUTS 8
*meßwertzeit xm_gew xSTm emc_v emc_61 th0 tHmax thSTm
9,1 9,16 61,6 9,14 61,12 9,4 61,14 61,7
TIME XM_GEW XSTM EMC_V EMC_61 TH0 THMAX THSTM
```

EQUATIONS 1

```
rFx=[33,6]/100
```

```

UNIT 26 TYPE 65 ONLINE
PARAMETERS 14
* number of variables A/B
4 6
* min/max values A/B
0. 100. 0. 1.25
* time steps drawing/refreshing
1 1
* time unit:
3
* number of pictures/x-grid/no stop
1 12 0
* screen mode/hpgl-files
2 0
inputs 20
* t31 t32 t3lm t3hm xm_gew x3m emc_v emc xdt1e6 rFx
9,3 61,2 61,5 61,7 9,16 61,6 9,14 61,12 XDT1E6 rFx
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
t31 t32 t3lm t3hm xm_gew x3m emc_v emc xdt1e6 rFx
- - - - -
LABELS 4
T_[°C] ?
temp.
feuchten

END

```

Die Datei "V7W.DAT" enthält folgende während des Versuchs in der Klimakammer gemessenen Werte in zweistündigem Abstand:

1	Meßzeit [h]	9	Holzfeuchte in 5 mm Tiefe [%]
2	Feuchttemperatur [°C]	10	Holzf. in 10 mm Tiefe [%]
3	Trockentemperatur [°C]	11	Holzf. in 15 mm Tiefe [%]
4	Holzoberflächentemperatur [°C]	12	Holzf. in 25 mm Tiefe [%]
5	Holztemp. in 5 mm Tiefe [°C]	13	Holzf. in 40 mm Tiefe [%]
6	Holztemp. in 45 mm Tiefe [°C]	14	Gleichgewichtsfeuchte [%]
7	Masse der Probe [g]	15	Mittl. Holzfeuchte 1 [%]
8	Luftdruck [mbar]	16	Mittl. Holzfeuchte 2 [%]

Die mittlere Holzfeuchte 1 (Wert 15) ergibt sich aus den über Widerstandsmessung im Holz bestimmten Holzfeuchten (Werte 9 bis 13). Die mittlere Holzfeuchte 2 (Wert 16) ergibt sich aus der Wägung der Probe (Wert 7).

Die Daten sind im ASCII-Code gespeichert und jeweils durch Leerzeichen voneinander getrennt (siehe "WEATHER.DAT" in "B.2 Freilufttrocknung").

Die Dateien "FICHTE.SRP" und "FICHTE.MTC" sind in "C Material- und Anlagenwerte" beschrieben.

B.4 Trocknungsläufe in Resistencia

Das hier abgedruckte TRNSYS Deck beschreibt den ersten Trocknungsversuch in Resistencia, der am 17. August 1994 begann.

Die Trocknungsbedingungen werden den in File "17AGOSTO.DAT" angegebenen Dateien "940817__.DAT", "940824__.DAT", etc. entnommen, die wochenweise Wetterwerte in zehnminütigem Abstand enthalten. Die zur Modellierung benötigten Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerte des Holzes sind über die Dateien "ALGARROB.SRP" und "ALGARROB.MTC" zugänglich. Näherungen der Kollektorwirkungsgradkurven für verschiedene Strahlungsintensitäten finden sich in "COLECTOR.EFF". Zum Vergleich der simulierten mit den tatsächlichen Trocknungsverläufen enthält "17AGOSTO.HUM" die Meßwerte der Wägungen und die daraus ermittelten Feuchten der Proben.

Der Verlauf der Trocknung wird in den Files "17AGOSTO.LST", "17AGOSTO.PRF" (Trocknungsprofile), "17AGOSTO.CRT" (Lufttemperaturen), "17AGOSTO.CRH" (Luftfeuchten) und "17AGOSTO.PLT" (Holzfeuchten) festgehalten. "17AGOSTO.PRF" wird als Logical Unit 13 direkt aus dem TYPE 61 "Holztrocknung" heraus erstellt (siehe "3 Modellierung der Holztrocknung"). Während der Simulation kann der Trocknungsablauf am Bildschirm verfolgt werden (TYPE 65 ONLINE).

```

* * * * *
*
*      17AGOSTO.DCK      (TRNSYS 14.1)
*
*      UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
*      TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
*
*      SOLARE HOLZTROCKNUNGSANLAGE IN RESISTENCIA
*      ERSTER TROCKNUNGSVERSUCH
*      17. AUGUST BIS 20. SEPTEMBER 1994
*
*      STEPHAN BENKERT      SEPTEMBER 1994
*
* * * * *

ASSIGN 17AGOSTO.LST 6
* ^ Protokoll der Simulation

```

```

* Im zweiten Trocknungsversuch vorzunehmende Änderungen sind mit
* !!C!! gekennzeichnet.

* Assign: Logical Units für Ein- und Ausgabe *****
* !!C!! Wetterwerte: Format steht bei UNIT 9 TYPE 9 DATA READER
ASSIGN 17AGOST0.DAT 10
* Holzeigenschaften: Sorptionsisothermen und Feuchteleitwerte
ASSIGN ALGARROB.SRP 11
ASSIGN ALGARROB.MTC 12
* Kollektorwirkungsgradkurven
ASSIGN COLECTOR.EFF 14
* !!C!! Protokoll des tatsächlichen Trocknungsverlaufs
ASSIGN 17AGOST0.HUM 13
* Ausgabe des Trocknungsprofils
ASSIGN 17AGOST0.PRF 15
* Ausgabe der simulierten Lufttemperaturen
ASSIGN 17AGOST0.CRT 16
* Ausgabe der simulierten Luftfeuchten
ASSIGN 17AGOST0.CRH 17
* Ausgabe der simulierten Trocknungsverläufe
ASSIGN 17AGOST2.PLT 18

* Werte zur Steuerung der Simulation *****
* !!C!! Simulationsdauer: 5 Wochen = 840 Stunden
* Simulationsintervall: 10 Minuten = .166667 Stunden
SIMULATION 0. 840. .166667
* Toleranzen, schnellere Konvergenz, etc.
TOLERANCES .01 .01
ACCELERATE 2
62,1 19,2
LIMITS 10 100
WIDTH 132

* Gleichungen *****
* Maße des Kollektors und der Trocknungskammer
* (siehe auch UNITS 1 und 19)
EQUATIONS 6
* Absorberfläche, Querschnitt, Länge, hydr. Durchmesser,
* Rauigkeit des Kollektors
A1_COL=228.
A2_COL=5.38
LA_COL=60.
DH_COL=2.26
K_COL=2.2E-3
* Fläche der Frischluftklappen in der Trocknungskammer
A_VENT=.72

* !!C!! Anteil der Trocknungsluft, die am Stapel VORBEI strömt
EQUATIONS 1
M_PROP=.5

* Gleichungen zum Austausch von Daten zwischen den UNITS
EQUATIONS 4
* MDOT = Massenstrom in der Trocknungskammer, aus der gemessenen
* Luftgeschwindigkeit berechnet
MDOT=MAX([9,17]*A2_COL*1.2*3600.),10.)
* MDOT2 = Massenstrom DURCH den Stapel
MDOT2=MDOT*(1.-M_PROP)
* MDOT3 = Massenstrom am Stapel VORBEI
MDOT3=MDOT*M_PROP
* Wärmestrom AUS dem Holz ([61,11] ist Wärmestrom IN das Holz)
QIN=[61,11]*(-1)

```

```

* Berechnung des Luftzustands der Umgebung
* Umwandlung rel. Feuchte ---> abs. Feuchte
EQUATIONS 3
PDS1=610.7*10**(7.5*[9,13]/(237+[9,13]))
PDL1=[9,14]*PDS1/100
YEXT=PDL1*.622/(1.E5-PDL1)

* Berechnung des Luftzustands in den Mischungszonen
* am Anfang und Ende der Trocknungskammer
EQUATIONS 4
* T_CAM0: Mischung bei geöffneten Frischluftklappen
T_CAM0=(A2_COL*[1,1]+[40,1]*A_VENT*[9,13])/(A2_COL+[40,1]*A_VENT)
* T_CAM1: Mischung bei schwachem Luftstrom am Kammereingang
T_CAM1=(5000.*[19,1]+MDOT*T_CAM0)/(5000.+MDOT)
* T_CAM2 E Y_CAM2: Mischung bei schwachem Luftstr. am Kammerausg.
T_CAM2=(5000.*[19,1]+MDOT2*[61,2]+MDOT3*T_CAM1)/(5000.+MDOT)
Y_CAM2=(5000.*[19,2]+MDOT2*[61,1]+MDOT3*YEXT)/(5000.+MDOT)

* Berechnung des Luftzustands am Kammereingang
* Umwandlung abs. Feuchte ---> rel. Feuchte
EQUATIONS 3
PDS2=610.7*10**(7.5*T_CAM1/(237+T_CAM1))
PDL2=1.E5*YEXT/(.622+YEXT)
H_CAM1=PDL2/PDS2*100

* Berechnung des Luftzustands am Kammerausgang
* Umwandlung abs. Feuchte ---> rel. Feuchte
EQUATIONS 3
PDS3=610.7*10**(7.5*T_CAM2/(237+T_CAM2))
PDL3=1.E5*Y_CAM2/(.622+Y_CAM2)
H_CAM2=PDL3/PDS3*100

* Berechnung des spezifischen Luftdurchsatzes durch Kollektor und
* Trocknungskammer als Eingabe für UNIT 62 TYPE 62 Aufwindkamin
EQUATIONS 6
RE_COL=DH_COL/13.3E-6/A2_COL/1.13*MAX(0.01,([62,1]/3600.))
LD_COL=.25/(LOG(15/RE_COL+K_COL/3.715))**2
ZETA1=LD_COL*LA_COL/DH_COL
L_COL=2*A2_COL**2*1.13/ZETA1/MAX(10.,([62,1]/3600.))*3600.
L_CAM=1.E7
L_EXT=1/(1/L_COL+1/L_CAM+1/((1.-M_PROP)*[61,13]+M_PROP*L_CAM))

* Gleichungen zur Ausgabe von Ergebnissen
EQUATIONS 8
XDTe6=[61,8]*1E6/3600.
XMe2=[61,6]*100
EMCe2=[61,12]*100
GIe-3=[16,6]/1000/3.6
XXXe2=[61,16]*100
RAD=[9,12]/3.6
RADe-1=[9,12]/10/3.6
QINe-3=QIN/1000/3.6

```

```

* UNITS zur Durchführung der Simulation *****
* !!C!! Einlesen der Wetterwerte:
* 17 formatierte Werte alle 10 Minuten von Logical Unit 10
UNIT 9 TYPE 9 CARD READER
PARAMETERS 56
2 17 .166667
1 1 0 2 1 0 3 1 0 4 1 0 5 1 0 6 1 0 7 1 0 8 1 0
9 1 0 10 1 0 11 1 0 -12 36 0 13 1 0 14 1 0 15 1 0 16 1 0
17 1 0 10 1
(18X,F8.4,19X,F8.4,10X,15(F8.4,1X))
*^^^^^^Format der Wetterwerte^^^^^^
* (Dezimalpunkte verwenden, keine Kommata)
* OUT: 1:T1[°C] 2:T4[°C] 3:T6[°C] 4:T7[°C] 5:T8[°C]
* 6:T9[°C] 7:T10[°C] 8:HT1[%] 9:TH1[°C] 10:HT2[%]
* 11:TH2[°C] 12:RAD[kJ/m2 h] 13:TEXT2[°C] 14:HEXT[%]
* 15:TEXT1[°C] 16:V1[m/s] 17:V2[m/s]

* !!C!! Einlesen der tatsächlichen Trocknungsverläufe:
* 15 nicht formatierte Werte alle 12 Stunden von Logical Unit 13
UNIT 10 TYPE 9 CARD READER
PARAMETERS 23
2 15 12. 5 1 0 7 1 0 9 1 0 11 1 0 13 1 0 15 1 0 13 0
* (Dezimalpunkte verwenden, keine Kommata)
* OUT: Feuchte [%] der Proben 2I, 2D, 3I, 3D, 4I, 4D:
* 5: 2I 7: 2D 9: 3I 11: 3D 13: 4I 15: 4D

* Berechnung der Strahlung auf den Kollektor
UNIT 16 TYPE 16 SOLAR RADIATION PROCESSOR
PARAMETERS 9
5 1 2
* !!C!! Anfangstag: 17. August = 229. Tag
229
* Breitengrad Solarkonstante
-27.46 4871.
0. 2 -1
INPUTS 8
* RAD TEXT2 HEX T_D1 T_D2 REFL BETA GAMMA
9,12 9,13 9,14 9,19 9,20 0,0 0,0 0,0
0.0 7.0 90.0 0.0 0.0 0.7 0.0 180.
* OUT: 4:RAD_TOT_HOR 5:RAD_DIFF_HOR 6:RAD_TOT_INCL 9:INCL_SOL

* Berechnung der Strahlung auf die Trocknungskammer
* mit Mauern nach Nord, West, Süd, Ost
UNIT 17 TYPE 16 SOLAR RADIATION PROCESSOR
PARAMETERS 9
5 1 2
* !!C!! Anfangstag: 17. August = 229. Tag
229
* Breitengrad Solarkonstante
-27.46 4871.
0. 2 -1
INPUTS 14
* RAD TEXT2 HEX T_D1 T_D2 REFL BETA_NORD GAMMA_NORD B_W G_W
* B_S G_S B_0 G_0
9,12 9,13 9,14 9,19 9,20 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
0.0 7.0 90.0 0.0 0.0 0.7 90. 180. 90. 90.
90. 0. 90. -90.
* OUT: 6, 11, 14, 17: RAD_TOT AUF NORD, WEST, SÜD, OST

```

```

* Simulation des Kollektors
UNIT 1 TYPE 1 SOLAR COLLECTOR
PARAMETERS 14
* KOLL_MOD KOLL_ANZ
2 1
* OBERFL. SPEZ_WK EFF_MOD LU_EFF N_WERTE N_KURVEN N_WIND
A1_COL 1.012 3 14 10 3 1
* OPT_MOD ABS_KOEFF. FOLIEN_ANZ BR_INDEX EXT_KOEFF
3 .8 1 1.51 .025
INPUTS 10
* TEXT2 MDOT TEXT2 RAD_TOT_INCL !! WIND_GESCHW.
9,13 MDOT 9,13 16,6 0,0
* RAD_TOT RAD_DIFF_HOR REFL INCL_SOL INCL_COL
16,4 16,5 0,0 16,9 0,0
6. 50. 7. 0. 2.
0. 0. 0.7 0. 0.
* OUT: 1:T_COL 2:MDOT 3:QDOT

* Simulation der Trocknungskammer: Luftstrom, Temp., Feuchte
UNIT 19 TYPE 19 DETAILED_ZONE
PARAMETERS 9
2
* KAMM_VOL LUFTWECHSEL - - WK ANZ_OBERFL. T_INITIAL Y_INITIAL
51.4 3. 0. 0. 500. 7 7. 1.E-2
INPUTS 11
* TEXT2 YEXT T_CAM0 MDOT YEXT YDOT1 - - - QIN !! WIND_GESCHW.
9,13 YEXT T_CAM0 MDOT YEXT 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0 0,0
7. 1.E-2 7. 50. 1.E-2 0. 0. 1 0. 0. 2.
PARAMETERS 27
* Beschreibung der Mauern nach West, Süd, Ost, Dach, Boden, Nord
* NO. TYP FLÄCHE REFL ABS_KOEFF. MOD ALPHA N_B N_C N_D TRANSM_1_2
1 1 14.28 .7 .1 4 100. 1 1 0 10. 10.
2 -1 7.56
3 -1 14.28
4 -1 24.48
5 -1 24.48
6 -1 7.56
INPUTS 6
* Strahlung auf die Oberflächen
17,11 17,14 17,17 16,4 0,0 17,6
0. 0. 0. 0. 0.
PARAMETERS 8
* Beschreibung des Kammereingangs als Fenster zur
* Berücksichtigung des Lichteintritts
* NO. TYP FLÄCHE - TRANSM ALPHA - -
7 5 6.6 1 .2 500. 1 5
INPUTS 5
* Eintretende Strahlung
17,6 17,7 0,0 0,0 0,0
0. 0. .3 0. .5
PARAMETERS 17
* VIEW FACTORS
1 2.1 6.8 3.6 1 6 3 2 5 4 1
7 6 .15 .05 2. 3.3
* OUT: 1:T_CAM 2:H_CAM 3:QIN_CONV 5:QIN_INFIL 6:QIN_VENT

```

* Steuerung der Klappen in der Trocknungskammer:
 * Öffnen zur Verlangsamung der Trocknung zum Schutz des Holzes
 * bei hohen Temperaturen oder großen Feuchteunterschieden im Holz

UNIT 40 TYPE 40 CONTROLLER

PARAMETERS 25

2

* GRENZWERTE

70. 50. 4. 3.

* STEUERMODEN

4 0 0 0 1 1 0 1 1

1 0 1 1 1

3 0 0 0 0 4

INPUTS 4

*T_CAM0 - DIF_HUM -

T_CAM0 0,0 61,15 0,0

10. 0. 1. 0.

* OUT: 1: KLAPPEN ZU/AUF (0/1)

* Simulation des Kamins: Luftstrom

UNIT 62 TYPE 91 CHIMNEY

PARAMETERS 7

* QUERSCHNITT_1 _2 HÖHE WK RHO TRANSM RAUHIGKEIT

4.75 4.75 12.8 .2 7000. 7. .2

INPUTS 7

* TEXT2 YEXT !! WIND_GESCHW. LUFTDRUCK T_CAM2 Y_CAM2 L_EXT

9,13 YEXT 0,0 0,0 T_CAM2 Y_CAM2 L_EXT

7. 1.E-2 2. 1.E5 10. 1.E-2 100.

* OUT: 1:MDOT 2:T_MITTE 3:T_AUS 4:V_EIN 5:V_AUS

* 6:QDOT 7:L_INT 8:DRUCK_DIFF

* Simulation der Holztrocknung

UNIT 61 TYPE 61 WOOD DRYING

PARAMETERS 18

* !!C!! ANFANGSFEUCHTE UND -TEMPERATUR

* X_IN T_IN

.56 7.

* !!C!! GEOMETRIE DES STAPELS UND DER BRETTEN

* !!C!! BEI PROBEN 2/3/4 IST DX_HOLZ = .050/.075/.100

* DX_STAPEL DY_ST DZ_ST DX_HOLZ DX_LUFT DY_H DY_L DZ_H DZ_L

3.00 3.00 1.00 .100 .010 .900 .010 .025 .025

* HOLZEIGENSCHAFTEN

* RHO SPEZ_WK RAUHIGKEIT

750.0 1.5 .002

* SIM_INTERVALL LOGICAL UNITS *.SRP, *.MTC, *.PRF

.166667 11 12 15

INPUTS 4

* YEXT T_CAM1 MDOT LUFTDRUCK

YEXT T_CAM1 MDOT2 0,0

.01 7. 25. 1.E5

* OUT: 1:Y_AUS 2:T_AUS 3:MDOT 4:Y_M 5:T_LUFT_M

* 6:X_M 7:T_H_M 8:XDOT 9:MDOT 10: MDOT_A

* 11:QDOT 12:EMC 13:L_ST 14:T_ST_MAX 15:TG_MAX 16:FEUCHTE_DIFF

```

* UNITS zur Ausgabe der Daten *****
* Ausgabe in '17AGOST0.LST': alle halbe Stunde nach LU 6
UNIT 25 TYPE 25 PRINTER
PARAMETERS 5
.5 0. 840. 6 2
INPUTS 10
* TEXT2 T9      T_CAM1 T6      T_CAM2 XDTe6 V2      V_ENTR X_MED% EMC%
9,13      9,6      T_CAM1 9,3      T_CAM2 XDTe6 9,17      62,4      XMe2 EMCe2
T_EXT  T9_EXP T9_SIM T6_EXP T6_SIM XDTe6 V2_EXP V2_SIM X_MED  EMC

* Ausgabe in '17AGOST0.CRT': jede halbe Stunde nach LU 16
UNIT 27 TYPE 25 PRINTER
PARAMETERS 5
.5      0.      840.      16  2
INPUTS 6
* RAD TEXT2 T9      T_CAM1 T6      T_CAM2
RAD  9,13  9,6      T_CAM1 9,3      T_CAM2
RAD  T_EXT T9_EXP T9_SIM T6_EXP T6_SIM

* Ausgabe nach '17AGOST0.CRH': jede halbe Stunde nach LU 17
UNIT 28 TYPE 25 PRINTER
PARAMETERS 5
.5      0.      840.      17  2
INPUTS 8
* RAD HEXT HT2      H_CAM1 HT1      H_CAM2 V2      V_ENT
RAD  9,14  9,10      H_CAM1 9,8      H_CAM2 9,17      62,4
RAD  H_EXT HT2_EX HT2_SI HT1_EX HT1_SI V_EXP V_SIM

* Ausgabe nach '17AGOST0.PLT': jede Stunde nach LU 18
UNIT 29 TYPE 25 PRINTER
PARAMETERS 5
1.      0.      840.      18  2
INPUTS 8
* EMC  X_SIM X_2I X_2D X_3I X_3D X_4I X_4D
EMCe2 XMe2 10,5 10,7 10,9 10,11 10,13 10,15
EMC    X_SIM X_2I X_2D X_3I X_3D X_4I X_4D

* Ausgabe auf den Bildschirm: jedes Intervall
UNIT 65 TYPE 65 ONLINE
PARAMETERS 14
* ANZ_VARIABLEN A/B
8      10
* WERTE MIN/MAX A/B
0      50      0      100
* JEDES INTERVALL
1      1
* ZEIT IN STUNDEN
3
* !!! EIN BILD JEDEN TAG = 35 BILDER, 12 GITTERLINIEN, NO STOP
35 12 0
* BILDSCHIRMMODE, KEIN HPGL-FILE
2      0

```

```

INPUTS 20
* TEXT2 XDTe6 T9      T_CAM1 T6      T_CAM2 V2      VEL_ENTR
9,13      XDTe6 9,6      T_CAM1 9,3      T_CAM2 9,17      62,4
* !!C!! ZUM ANZEIGEN DER PROBEN: 2I 2D = 10,5 10,7
*                                     3I 3D = 10,9 10,11
*                                     4I 4D = 10,13 10,15
* X_PROBE_1_2
10,13      10,15
* X_MED% EMC% HT2 H_CAM1 HT1 H_CAM2 HEXT RAD/10 - -
XMe2      EMCe2 9,10 H_CAM1 9,8 H_CAM2 9,14 RAde-1 0,0 0,0
TEXT2 XDTe6 T9      T_CAM1 T6      T_CAM2 V2      V_ENTR
X_EXPI X_EXPD X_MED% EMC% HT2      H_CAM1 HT1      H_CAM2 HEXT
RAD/10 - -
LABELS 4
DIV. DIV.
DIV.
DIV.

END

```

Die Datei "17AGOSTO.DAT" enthält die Liste der Wetterdaten-Files:

```

FILES
C:\TRNSYS14\WEATHER\940817____.DAT
C:\TRNSYS14\WEATHER\940824____.DAT
C:\TRNSYS14\WEATHER\940831____.DAT
C:\TRNSYS14\WEATHER\940907____.DAT
C:\TRNSYS14\WEATHER\940914____.DAT

```

In den aufgeführten Dateien sind für je eine Woche folgende Werte in zehnminütigem Abstand gespeichert (vergleiche Abbildung 6.12):

1	Datum [TT/MM/JJ]	12	Temp. im Kamin in 10 m Höhe [°C]
2	Uhrzeit [hh:mm:ss]	13	Rel. Luftfeuchte nach dem Stapel [%]
3	Temp. im Kollektor nach 8 m [°C]	14	Temp. nach dem Stapel [°C]
4	Temp. im Kollektor nach 20 m [°C]	15	Rel. Luftfeuchte vor dem Stapel [%]
5	Temp. im Kollektor nach 40 m [°C]	16	Temp. vor dem Stapel [°C]
6	Temp. am Kollektorausgang [°C]	17	Sonneneinstrahlung [10 W/m²]
7	Temp. am Kollektorausgang [°C]	18	Umgebungstemperatur [°C]
8	Temp. nach dem Stapel [°C]	19	Rel. Luftfeuchte der Umgebung [%]
9	Temp. im Kamin in 6 m Höhe [°C]	20	Umgebungstemperatur [°C]
10	Temp. nach dem Stapel [°C]	21	Luftgeschw. nach dem Stapel [m/s]
11	Temp. am Kollektorausgang [°C]	22	Luftgeschw. vor dem Stapel [m/s]

Sämtliche Werte (außer Datum und Uhrzeit) sind als reelle Zahlen mit einer Datenfeldweite von 8 Stellen anzugeben, davon vier Stellen rechts des Dezimalpunkts. Zwischen jeweils zwei Werten steht ein Leerzeichen. Die Formatbeschreibung gemäß FORTRAN-Standard lautet (Datum und Uhrzeit werden als Leerzeichen übersprungen):

```
(18X, 20 (F8.4, 1X) )
```

Das Deck liest nur 17 Werte ein. Die Formatbeschreibung im Deck bei UNIT 9 TYPE 9 Data Reader entspricht den gelesenen Werten. Sobald die Windgeschwindigkeit den zehnminütigen Daten hinzugefügt werden kann (Wert 23), ist sie als 18. Wert vom Deck zu lesen und steht dann der Simulation als Eingabewert zur Verfügung. Vorerst wird die Windgeschwindigkeit als mit 2 m/s konstant angenommen, was die Genauigkeit der Modellierung beeinträchtigt (siehe "6.4 Trocknungsläufe in Resistencia").

Die Dateien "ALGARROB.SRP", "ALGARROB.MTC" und "COLECTOR.EFF" sind in "C Material- und Anlagenwerte" beschrieben.

Die Datei "17AGOSTO.HUM" enthält folgende Werte:

- 1 Datum [TT]
- 2 Uhrzeit [hh.mm]
- 3 Trocknungsdauer [h]
- 4, 6, 8, 10, 12, 14
Masse der Proben 2I, 2D, 3I, 3D, 4I, 4D [g]
- 5, 7, 9, 11, 13, 15
Holzfeuchte der Proben 2I, 2D, 3I, 3D, 4I, 4D [%]

Anhang C Materialwerte

C.1 Sorptionsisothermen

Sorptionsisothermen beschreiben die Abhängigkeit der Holzfeuchte von den Umgebungsbedingungen. Sie geben einen Wert für die Gleichgewichtsfeuchte des Holzes - die Holzfeuchte, die sich nach unendlich langer Zeit für eine bestimmte Luftfeuchte und Lufttemperatur einstellt. Jede Holzart nimmt für gleiche Umgebungswerte unterschiedliche Mengen an Feuchte auf, der Verlauf der Sorptionsisothermen ist somit von Holz zu Holz, genaugenommen sogar innerhalb einzelner Bretter verschieden. Durchschnittswerte aus der Literatur [27, 28, 30, 37] können dennoch übernommen werden, wenn keine genaueren Angaben zu den verwendeten Hölzern vorliegen.

Aus den Sorptionsisothermen folgt die Differenz zwischen Gleichgewichtsfeuchte und momentaner Holzfeuchte. Hieraus ergibt sich die Feuchteübergangsrate zwischen Holzoberfläche und Luft, ein wesentlicher Faktor bei der Modellierung der Trocknung.

Die Übergabe der Werte der Sorptionsisothermen an das Simulationsprogramm geschieht über die im TYPE 61 "Holztrocknung" durch Parameter 16 festgelegte Logical Unit, der im TRNSYS Deck durch ASSIGN eine Datei mit Sorptionsdaten zugewiesen wird. Dafür müssen die Daten genähert werden, da über die TRNSYS Subroutine DATA nur Files eines bestimmten Formats gelesen werden können. Die Sorptionsisothermen werden zwischen den Werten bei fünf Temperaturen und zehn Holzfeuchten interpoliert.

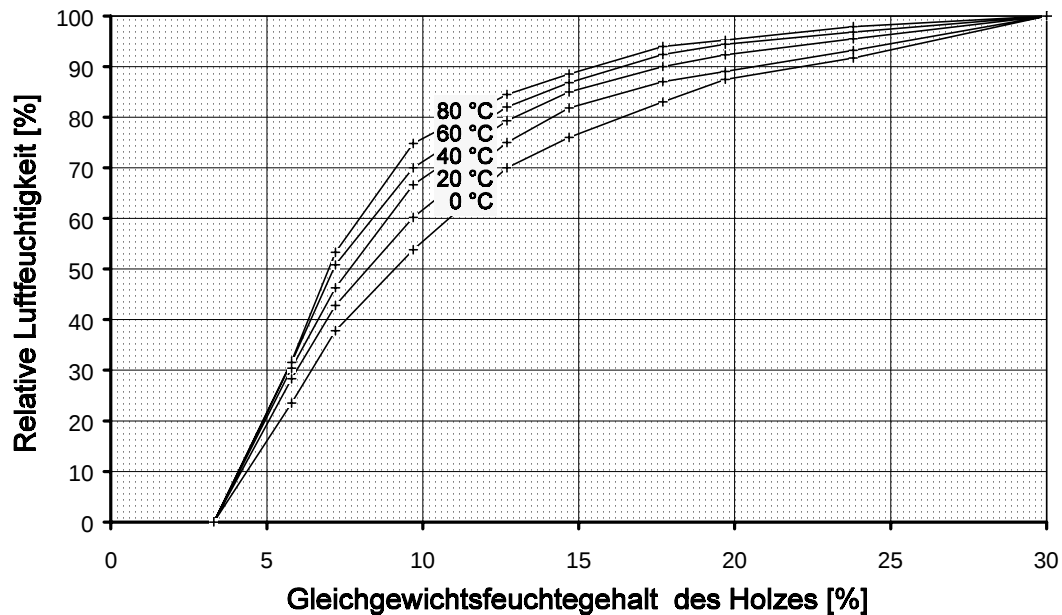


Abb. C.1: (Genäherte) Sorptionsisothermen für Fichte

Abbildung C.1 zeigt die so genäherten Sorptionsisothermen für Fichte (nach [27]). Die entsprechende Datei "FICHTE.SRP" hat folgenden Aufbau (siehe auch [25]):

0.0	20.0	40.0	60.0	80.0					
3.3	5.8	7.2	9.7	12.7	14.7	17.7	19.7	23.8	30.0
0.0	23.5	37.8	53.8	70.0	76.0	83.0	87.5	91.7	100.0
0.0	28.3	42.8	60.2	75.0	81.8	87.0	89.0	93.2	100.0
0.0	30.4	46.3	66.6	79.3	85.0	90.0	92.3	95.5	100.0
0.0	31.5	50.8	70.0	82.0	86.8	92.4	94.4	96.8	100.0
0.0	31.8	53.3	74.8	84.5	88.5	94.0	95.2	97.9	100.0

Zeile 1: fünf Lufttemperaturen ϑ_1 bis ϑ_5 in [°C]

Zeile 2: zehn Gleichgewichtsfeuchten EMC_1 bis EMC_{10} in [%]

Zeilen 3 bis 7 (entsprechend ϑ_1 bis ϑ_5):

die relativen Luftfeuchten φ_{ij} in [%], die bei der jeweiligen Lufttemperatur ϑ_i die Gleichgewichtsfeuchte EMC_j bewirken

In den Zeilen 3 bis 7 sollten die äußeren Werte gleich 0 und 100 sein, die Extrema der relativen Luftfeuchtigkeit, sonst können bei der Modellierung der Trocknung für extreme Holzfeuchten oder außergewöhnliche Temperaturen Fehler auftreten.

Insgesamt können 40 Punkte aus dem Sorptionsisothermendiagramm angegeben werden. Sollten weniger Meßwerte zur Verfügung stehen, können Temperaturen oder Gleichgewichtsfeuchten mehrfach angegeben werden (siehe unten bei den Sorptionsdaten für Buche). Das Format des Files muß in der obigen Form erhalten bleiben.

Sorptionsdaten für weitere Hölzer:

Algarrobo (nach [1]):

20.	30.	40.	60.	80.					
3.	5.	6.	7.5	9.	12.	16.	20.	25.	30.
0.	16.	25.	40.	55.	65.	75.	85.	93.	100.
0.	18.	30.	45.	60.	71.	80.	90.	95.	100.
0.	22.	40.	52.	68.	77.	88.	92.	97.	100.
0.	25.	45.	60.	73.	82.	93.	95.	98.	100.
0.	28.	48.	65.	77.	86.	96.	97.	99.	100.

Buche (nach [30]):

20.	40.	40.	60.	80.					
0.	2.	4.	8.	12.	16.	20.	24.	28.	32.
0.	3.	12.	45.	70.	85.	93.	97.	99.	100.
0.	8.	18.	50.	73.	87.	94.	97.5	100.	100.
0.	8.	18.	50.	73.	87.	94.	97.5	100.	100.
0.	10.	24.	55.	77.	88.	95.	98.	100.	100.
0.	14.	32.	65.	83.	94.	98.	99.	100.	100.

C.2 Feuchteleitwerte

Die hier verwendeten summierten Feuchteleitwerte umfassen sämtliche Stofftransportvorgänge im Holz. Im wesentlichen sind das kapillarer und diffusiver Transport [27]. Feuchteleitwerte in Holz sind außerordentlich schwierig zu bestimmen. Die Werte schwanken stark je nach Faserrichtung und Struktur des Materials. Bei der Trocknung sollte deshalb darauf geachtet werden, möglichst einheitliche Holzbretter zu verwenden, die Modellierung kann dann auf einen Durchschnittszustand abgestimmt werden. Wichtig ist, die Feuchteleitwerte der Faserrichtung anzupassen, in der der hauptsächliche Feuchtetransport stattfindet. Die hier angegebenen Werte entsprechen tangentialen und radialen Faserrichtungen, die von Werten für axialen Faserverlauf zum Teil deutlich abweichen [6, 28].

Die Feuchteleitung im Holz hängt sowohl von der Holzfeuchte als auch von der Holztemperatur ab. Wie bei den Sorptionsisothermen ist es möglich, genäherte Werte aus der Literatur [6, 27, 28, 30] über die TRNSYS Subroutine DATA dem Modul "Holztrocknung" zur Verfügung zu stellen. Im TRNSYS Deck wird dazu durch ASSIGN der mit Parameter 17 im TYPE 61 "Holztrocknung" bestimmten Logical Unit ein File mit Feuchteleitwerten zugewiesen.

Abbildung C.2 zeigt genäherte summierte Feuchteleitwerte für Fichte. Die entsprechende Datei "FICHTE.MTC" hat folgenden Aufbau (siehe auch [25]):

0.0	20.0	30.0	50.0	75.0					
10.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	60.0	80.0	105.0	115.0
1.8	2.8	5.2	7.0	10.0	12.3	7.6	2.2	2.1	7.6
2.1	3.2	5.8	7.9	11.0	13.0	7.9	3.6	3.0	8.1
2.7	4.3	6.9	9.5	12.3	14.4	9.1	6.0	4.4	10.8
5.2	8.5	12.2	17.8	24.5	23.5	18.0	11.2	7.1	16.2
13.0	20.5	32.4	47.4	49.5	45.0	28.0	18.0	11.0	21.8

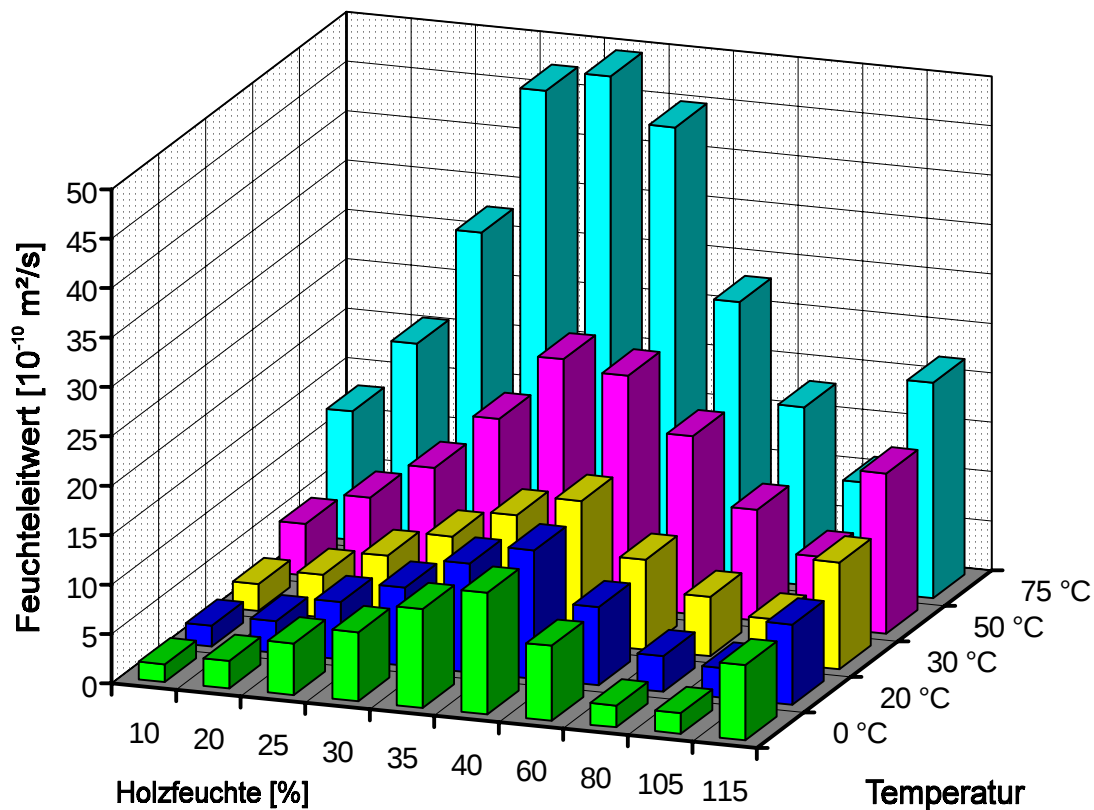


Abb. C.2: (Genäherte) Summierte Feuchteleitwerte für Fichte

Zeile 1: fünf Holztemperaturen ϑ_1 bis ϑ_5 in [°C]

Zeile 2: zehn Holzfeuchten x_1 bis x_{10} in [%]

Zeilen 3 bis 7 (entsprechend ϑ_1 bis ϑ_5):

die summierten Feuchteleitwerte κ_{ij} in [10^{-10} m²/s], die bei der jeweiligen Holztemperatur ϑ_i und Holzfeuchte x_j gelten

Insgesamt können 50 Punkte aus dem Feuchteleitwertdiagramm angegeben werden. Sollten weniger Meßwerte zur Verfügung stehen, können Holztemperaturen oder -feuchten mehrfach angegeben werden. Das Format der Datei muß in der obigen Form erhalten bleiben.

Feuchteleitwerte für Algarrobo:

0.0	20.0	30.0	50.0	65.0					
10.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	60.0	80.0	105.0	115.0
.25	.29	.38	.55	.42	.28	.10	.09	.17	.60
.28	.41	.48	.62	.48	.35	.13	.10	.19	.80
.38	.65	.68	.74	.55	.42	.17	.12	.23	1.20
.58	.91	1.05	1.08	.75	.57	.27	.17	.30	1.80
.92	1.30	1.50	1.52	1.10	.82	.47	.25	.42	2.60

C.3 Sonstige Materialwerte

Vor allem zur Berechnung der Wärmespeicherung im Holzstapel benötigt das Modul "Holztrocknung" die Dichte $\rho_{H,t}$ und die spezifische Wärmekapazität $c_{p,H,t}$ des darrtrockenen Holzes.

Die Dichte $\rho_{H,t}$ des darrtrockenen Holzes läßt sich aus der Dichte feuchten Holzes $\rho_{H,f}(x)$ (für einen Feuchtegehalt x unter etwa 0,25 kg/kg) berechnen [27]:

$$\rho_{H,t} = \rho_{H,f}(x) \frac{1}{1 + x - 8.4 \times 10^{-4} \cdot x \cdot \rho_{H,f}(x)}$$

Nach [1, 27] ergeben sich folgende Dichten für darrtrockenes Holz ($x = 0$):

Holzart:	Dichte $\rho_{H,t}$ [kg/m ³]
Algarrobo	720...815
Buche	680
Fichte	410...430
Quebracho Blanco	847

Die spezifische Wärmekapazität hängt hauptsächlich von der Holzfeuchte und nur in geringem Maß von der Holzart ab [27]. Für darrtrockenes Holz kann deshalb ohne großen Fehler für alle Holzarten mit einem Wert $c_{p,H,t} = 1,5 \text{ kJ/kg K}$ gerechnet werden, wenn der tatsächliche Wert nicht bekannt ist.

Die Rauigkeit k des Holzes beeinflusst die Strömungsverhältnisse im Stapel und damit die Austauschbedingungen.

Als typische Rauigkeitswerte gelten [33, 37]:

	$k = 0,5...5 \text{ mm}$	für unbehandelte Holzbretter
und	$k = 0,2 \text{ mm}$	für gehobelte Bretter

C.4 Werte der Trocknungsanlage in Resistencia

Tabelle C.1 faßt die gemessenen oder aufgrund von Messungen ermittelten Daten der Anlage zusammen (siehe auch [1, 37]). Alle weiteren Annahmen der Modellierung (siehe "B.1 Konfiguration der Komponenten") ergeben sich aus theoretischen Überlegungen und Materialwertetafeln.

Tabelle C.1: Werte der Trocknungsanlage in Resistencia

Gesamte Anlage			
Längengrad:	58,99° westl. Länge	Höhe über NN:	51 m
Breitengrad:	27,46° südl. Breite		
Tunnelkollektor			
Länge:	60,0 m	Absorberfläche:	228 m ²
Breite:	3,8 m	Querschnittsfläche:	5,38 m ²
Höhe:	1,9 m		
Hangneigung:	0°	Ausrichtung:	2° nach Osten (Nord = 0°) (von der Trockn.kammer gesehen)
Foliendicke:			
transparente PE-Folie:	100 nm	Rauigkeit der Folie	
PE-Absorberfolie:	200 nm	(mit Verunreinigungen):	2,2 mm

Trocknungskammer			
Länge:	7,95 m	Innenvolumen:	51,4 m ³
Breite:	3,30 m	Nutzbare	
Höhe:	2,10 m	Trocknungsvolumen:	12 m ³
Wandstärke:	0,15 m	Ausrichtung:	
Wandmaterial:	Ziegel	in Verlängerung des Tunnelkollektors	
Fläche der Frischluftklappen:	je 0,36 m ²		
Kamin			
Innendurchmesser:	2,46 m	Querschnitt:	4,75 m ²
Höhe (über der Trocknungskammer):	12,80 m	Rauhigkeit (mit Einbauten):	0,2 m

Abbildung 6.13 zeigt die Abschätzung der Kollektorwirkungsgradkurven für verschiedene Strahlungsbereiche. Die genäherten Werte werden als Eingabe für die TRNSYS Komponente TYPE 1 "Solarkollektoren" verwendet, um das Kollektorverhalten zu simulieren. Zwischen den angegebenen Werten wird bezüglich der Strahlungsintensität und dem reduzierten Parameter interpoliert.

Die Form der Datei zur Angabe der Kollektorwirkungsgradkurven, "COLECTOR.EFF", ist (siehe auch [25]):

```

720. 1800. 2880.
.0014 .0021 .0028 .0035 .0042 .0049 .0056 .0063 .007 .0077
.2 .31 .42 .51 .6 .69 .77 .8 .82 .84
.25 .4 .55 .65 .75 .78 .8 .81 .82 .82
.22 .35 .48 .59 .65 .7 .75 .77 .78 .79

```

Zeile 1: drei Strahlungsintensitätsbereiche I_1 bis I_3 in [kJ/h m²]

Zeile 2: zehn reduzierte Parameter $(\Delta\vartheta/I)_1$ bis $(\Delta\vartheta/I)_{10}$ in [K h m²/kJ]

Zeile 3 bis 7 (entsprechend I_1 bis I_3):

die Kollektorwirkungsgrade η_{ij} , die bei der jeweiligen Strahlung I_i und dem reduzierten Parameter $(\Delta\vartheta/I)_j$ gelten

Wenn nach einer genaueren Bestimmung der Kollektorwirkungsgradkurven mehr Werte zur Verfügung stehen, muß im TRNSYS Deck die Komponente "Solarkollektoren" geändert werden [25].

Anhang D

Simulation mit TRNSYS am PC

Installation von TRNSYS 14.1

TRNSYS 14.1 wird in Deutschland von der Firma TRANSSOLAR in Stuttgart vertrieben. TRANSSOLAR ist somit der Ansprechpartner für Fragen zu TRNSYS.

Die Anschrift lautet:

TRANSSOLAR Energietechnik GmbH
Nobelstr. 15
70569 Stuttgart

TRNSYS 14.1 hat einen Lieferumfang von drei Installationsdisketten. Zusätzlich gibt es eine Update-Diskette der Firma TRANSSOLAR. Die an der Landtechnik Weihenstephan benötigten eigenen Dateien nehmen eine weitere Diskette in Anspruch. Als Backup-Disketten sind die ausführbaren Dateien TRNSYS.EXE abgespeichert, die sich aus der Lieferversion von TRNSYS 14.1 für Microsoft Fortran 5.1 und Lahey Fortran 5.20 ergeben. Schließlich ist noch die Demo-Version für TRNSYS 14.1 von einer Diskette installierbar. Insgesamt ergibt sich also ein TRNSYS Diskettenpaket von acht Disketten.

Die Installation erfolgt nach folgendem Schema:

- ▶ Diskette 1 (Installation) in das Diskettenlaufwerk einlegen.
A: oder B: eintippen, um auf das Laufwerk zu wechseln.
SETUP eingeben und den Anweisungen des Installationsprogramms folgen.
Schließlich mit "Quit for now" die Installation beenden.
- ▶ Diskette 4 (Update) in das Diskettenlaufwerk einlegen.
A: oder B: eintippen, um auf das Laufwerk zu wechseln.
SETUP eingeben und den Anweisungen des Updateprogramms folgen.

TRNSYS steht hiermit zur Arbeit bereit. Um die in der Landtechnik Weihenstephan vorhandenen zusätzlichen Komponenten benutzen zu können, sind jedoch weitere Schritte nötig. Zunächst werden alle eigenen Dateien dem "Standard-TRNSYS" hinzugefügt:

- ▶ Diskette 5 (Landtechnik) in das Diskettenlaufwerk einlegen.
Alle Dateien auf die Festplatte, auf der TRNSYS installiert wurde, kopieren.
Eventuell bereits vorhandene Dateien sind zu überschreiben.

Jetzt müssen die zusätzlichen Komponenten in die ausführbare Datei TRNSYS.EXE eingebunden werden. **Hierfür muß das in der Landtechnik verwendete Lahey Fortran auf der Festplatte installiert und arbeitsfähig sein. Die Festplatte sollte über wenigstens 2 MB freien Speicherplatz verfügen, um eine ordnungsgemäße Arbeit des Compilers zu gewährleisten.** Zunächst wird TRNSYS gestartet:

- ▶ Verzeichnis auf der Festplatte nach ..\TRNSYS14 wechseln.
TRNSHELL eingeben und aufrufen.

Dann wird TRNSYS auf die Arbeit mit Lahey Fortran umgestellt:

- ▶ Setup-Menü aufrufen (links in der Menüleiste unter "Ξ").
Setup Compiler abändern:
 bei Compile: F77L3
 bei Make: MAKE
Das Setup-Menü mit STORE verlassen.

Das Makefile muß eingerichtet werden, das die zusätzlichen Komponenten enthält, um dann das neue TRNSYS.EXE zu erstellen:

- ▶ MAKEFILE.61 laden und als MAKEFILE. speichern (das alte Makefile ist als MAKEFILE.BK gesichert).
- ▶ Im TRNSYS Menü REBUILD TRNSYS eingeben und ausführen.

Nun kann auch mit Landtechnik-Decks, die nicht standardmäßige TRNSYS-Routinen enthalten, gearbeitet werden.

Arbeit mit TRNSYS

Die Arbeit mit TRNSYS zu erklären, sprengt den Rahmen dieses Anhangs. Erlernen läßt TRNSYS sich anhand des TRNSYS Handbuchs [25] und den dort enthaltenen Beispielen. Dies gilt auch für die TRNSYS unterstützenden Programme zur Gebäudesimulation PREBID und zur Erstellung eines Decks PRESIM. In jedem Fall gilt: Probieren geht über Studieren...

Weitere Hinweise

- ▶ Auch für die Ausführung eines TRNSYS Decks sollten etwa 2 MB Speicherplatz auf der Festplatte verfügbar sein. Nach dem Erstellen der ausführbaren Datei TRNSYS.EXE können aber alle Objektdateien *.OBJ und auch die Quelldateien *.FOR von der Festplatte gelöscht werden, so daß die Arbeit mit TRNSYS möglich wird.
- ▶ Sobald eine Simulation mit TRNSYS gestartet ist, läßt sie sich nur durch einen RESET des Rechners vorzeitig beenden. **Dabei kann es zu schweren Fehlern bei der Speicherung der geöffneten Dateien kommen, die bei der Wiederaufnahme der Arbeit mit TRNSYS nach dem Wiederstarten des Rechners zu Problemen führen.** Laufende Simulationen sollten demnach möglichst nicht unterbrochen werden. Um den ordnungsgemäßen Lauf einer Simulation "auszuprobieren", ist besser in den Probeläufen die Simulationsdauer herabzusetzen und das Ende der (verkürzten) Simulation abzuwarten.
- ▶ In von TRNSYS verwendeten Dateien dürfen keine Tabulatoren enthalten sein. Während in vielen Fällen das Vorhandensein von Tabulatoren zum Programmabbruch führt, kann zum Beispiel bei der Eingabe von Wetterdaten oder Stoffeigenschaften das Einlesen von Tabulatoren zu falschen Ergebnissen führen, ohne daß ein Fehler offensichtlich wird.

Anhang E Bilder

Verzeichnis der Bilder

E.1 Einfache solare Holztrochnungsanlage (CITEMA, Santiago del Estero, Argentinien)	167
E.2 Solare Holztrochnungsanlage mit Zwangskonvektion (G.I.T.E.A., Resistencia, Argentinien)	169
E.3 Solare Holztrochnungsanlage mit natürlicher Konvektion (G.I.D.E.R., Resistencia, Argentinien)	171
E.4 Solare Holztrochnungsanlage mit natürlicher Konvektion: Übergang vom Tunnelkollektor zur Trochnungskammer	171
E.5 Solare Holztrochnungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick auf das Gelände	173
E.6 Solare Holztrochnungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick vom Kamin auf den Tunnelkollektor	173
E.7 Solare Holztrochnungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick in die Trochnungskammer	175
E.8 Solare Holztrochnungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick in den Tunnelkollektor	175
E.9 Traditionelle Holzverarbeitung in einem für die Provinz Chaco typischen kleinen Sägewerk	177



Bild E.1a: Einfache solare Holztrocknungsanlage des Centro de Investigación de la Madera y Afines (CITEMA) in Santiago del Estero, Argentinien; Ansicht von Nordost auf Trocknungskammer und Kollektor



Bild E.1b: Einfache solare Holztrocknungsanlage des Centro de Investigación de la Madera y Afines (CITEMA) in Santiago del Estero, Argentinien; Ansicht der Anlage von Südost



Bild E.2a: Solare Holztrocknungsanlage mit Zwangskonvektion der Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas (G.I.T.E.A.) in Resistencia, Argentinien; Blick auf den Kollektor



Bild E.2b: Solare Holztrocknungsanlage mit Zwangskonvektion der Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas (G.I.T.E.A.) in Resistencia, Argentinien; Blick auf die geöffnete Trocknungskammer



Bild E.3: Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion der Grupo de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (G.I.D.E.R.) in Resistencia, Argentinien; Blick auf die Anlage



Bild E.4: Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Übergang vom Tunnelkollektor zur Trocknungskammer - mit dem an der Trocknungskammer befestigten Strahlungsmeßgerät



Bild E.5: Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick auf das Gelände; links im Bild die Hütte zur Meßwerterfassung, links im Hintergrund das Sägewerk der Firma Kraemer Muebles S. A.



Bild E.6: Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick vom Kamin auf den Tunnelkollektor



Bild E.7: Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick in die Trocknungskammer während des ersten Trocknungsversuchs; vorne im Bild Meßinstrumente für Lufttemperatur, -feuchte und -geschwindigkeit



Bild E.8: Solare Holztrocknungsanlage mit natürlicher Konvektion: Blick in den Tunnelkollektor in Richtung auf die Trocknungskammer; in regelmäßigen Abständen Meßgeräte zur Bestimmung der Lufttemperatur



Bild E.9a: Traditionelle Holzverarbeitung in einem für die Provinz Chaco typischen kleinen Sägewerk; Arbeiter der Firma Kraemer Muebles S. A. beim Bewegen eines Algarrobo-Stammes



Bild E.9b: Traditionelle Holzverarbeitung in einem für die Provinz Chaco typischen kleinen Sägewerk; Arbeiter der Firma Kraemer Muebles S. A. beim Sägen eines Algarrobo-Stammes

Literaturverzeichnis

- [1] A. Aeberhard, N. Sogari:
Secado de Madera,
Universidad Nacional del Nordeste, Departamento de Termodinámica,
Resistencia, Argentinien, 1992
- [2] N. K. Bansal, J. Blumenberg, Ch. Dietl:
*Solare Trocknung mit natürlicher Konvektion, 11. Zwischenbericht:
Entwicklung eines Modells zur Simulation der Trocknungskinetik kapillar-
poröser, hygroskopischer Stoffe*,
Technische Universität München, Lehrstuhl C für Thermodynamik, 1992
- [3] F. Benítez *et al.*:
*Planta Semiindustrial para el Aprovechamiento de la Biomasa Mediante
Tecnologías Apropriadas*,
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Resistencia,
Argentinien, 1994
- [4] L. v. Bertalanffy:
Zu einer allgemeinen Systemlehre,
in: *Biologia Generalis*, Bd. 19 Heft 1, Wien, 1949
- [5] W. Bohl:
Technische Strömungslehre,
Vogel-Verlag, Würzburg, 1978
- [6] G. Böhner:
*Zur Wasserdampf- und Luftdurchlässigkeit verschiedener unbehandelter und
thermisch behandelter Hölzer, Teil 1*,
Holz als Roh- und Werkstoff, 34 (1976), S. 295...307
- [7] G. Böhner:
Persönliche Gespräche am Holzforschungsinstitut der LMU München

- [8] R. S. Boone, Ch. J. Kozlik, P. J. Bois, E. M. Wengert:
Dry Kiln Schedules for Commercial Woods,
Forest Products Society, Madison, 1993
- [9] F. Capra:
The Tao of Physics,
Berkeley, 1975
- [10] A. Connertz:
Simulation solarunterstützter Trocknung pflanzlicher Produkte,
Diplomarbeit,
Technische Universität München, Lehrstuhl C für Thermodynamik, 1994
- [11] J.A. Duffie, A. Beckmann:
Solar Engineering of Thermal Processes,
John Wiley & Sons, New York, 1980
- [12] B. Eck:
Technische Strömungslehre,
Springer-Verlag, Berlin, 1988
- [13] Ralf Fellmann:
Untersuchungen über Wasserdampfsorption und Wasserdampftransport in Flachsfaserdämmstoffen, Diplomarbeit,
Technische Universität München, Landtechnik Weißenstephan, 1994
- [14] D. Feuermann, J. M. Gordon, Y. Zarmi:
A Typical Meteorological Day (TMD) Approach for Predicting the Longterm Performance of a Solar Energy System,
Solar Energy, 35 (1985), pp. 63...69
- [15] E. Hahne, M. Guigas:
Bestimmung von Kennwerten hocheffizienter Flachkollektoren mit Hilfe von Daten aus nichtstationären Zuständen,
in: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. (Hrsg.): 8. Internationales Sonnenforum "Energie und unsere Umwelt", Tagungsbericht, DGS-Sonnenenergie Verlags-GmbH, München, 1992
- [16] K. K. Hansen:
Sorption Isotherms - A Catalogue,
Technical University of Denmark, Building Materials Laboratory, 1986

- [17] L. F. Hawley:
Wood-Liquid Relations,
US. Dept. Agric., Bull. Nr. 248 (1931), p. 8
- [18] B. Hilpert:
Persönliche Gespräche am Centro Tecnológico de la Madera in Montecarlo
(Misiones), Argentinien
- [19] J. Högerl, M. Mahr, J. Blumenberg:
*Solare Trocknung mit natürlicher Konvektion, 10. Zwischenbericht: Analyse
des energetischen Verhaltens von solaren Aufwindtrocknern anhand der
Meßergebnisse*,
Technische Universität München, Lehrstuhl C für Thermodynamik, 1991
- [20] B. Hommels:
*Installation und Kalibrierung der Meßtechnik für den solaren Aufwind-
trockner in Resistencia, Argentinien*, Semesterarbeit,
Technische Universität München, Landtechnik Weihenstephan, 1993
- [21] J. S. Hsieh:
Solar Energy Engineering,
Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986
- [22] L. Imre:
Technical and Economical Evaluation of Solar Drying,
Drying Technology, 4 (1986), pp. 503...512
- [23] G. Kiese, M. Mahr, J. Blumenberg, M. Reuß:
*Solare Trocknung mit natürlicher Konvektion, 1. Zwischenbericht: Aufbau
und Inbetriebnahme der Pilotanlage*,
Technische Universität München, Lehrstuhl C für Thermodynamik, 1989
- [24] B. Klamecki:
Utilizing Solar Energy in the Forest Products Industry,
Forest Products Journal, 28 (1978), pp.14...20
- [25] S.A. Klein *et al.*:
TRNSYS - A Transient System Simulation Program,
University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory, 1994
- [26] H. Klopfer:
Feuchte,
in: P. Lutz (Hrsg.): Lehrbuch der Bauphysik, B. G. Teubner, Stuttgart, 1985

- [27] F. Kollmann:
Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe,
Springer-Verlag, Berlin, 1951
- [28] H. Koponen:
Moisture Diffusion Coefficients of Wood,
in: Mujumdar (Hrsg.): *Drying '87*, Springer-Verlag, Berlin, 1987
- [29] U. Krames:
Holztrocknung mit Solarenergie - Aussichten in Mitteleuropa,
Holz im Handwerk, 10 (1980), S. 18...20
- [30] O. Krischer, K. Kröll:
Trocknungstechnik,
Springer-Verlag, Berlin, 1956
- [31] H. Kuchling:
Taschenbuch der Physik,
Verlag Harri Deutsch, Thun, 1988
- [32] K. Kuhn:
Kernresonanzmessungen und Wasseraktivitätsbestimmungen zur Aufklärung des Trocknungsverhaltens von Kartoffel, Dissertation,
Universität Hamburg, 1986
- [33] B. Laschka:
Strömungsmechanik I, Vorlesungsbegleitendes Manuskript,
Technische Universität München, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, 1990
- [34] U. Lohmann:
Holz-Handbuch,
DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, 1991
- [35] A. W. Lykow:
Transporterscheinungen in kapillarporösen Körpern,
Akademie-Verlag, Berlin, 1958
- [36] M. Mahr:
Numerische und experimentelle Untersuchung des thermodynamischen Verhaltens von solaren Aufwindanlagen, Dissertation,
Technische Universität München, Institut C für Thermodynamik, 1992

- [37] M. Mergans:
Auslegung eines solaren Aufwindtrockners für die Holz Trocknung,
Diplomarbeit,
Technische Universität München, Landtechnik Weihenstephan, 1993
- [38] F. Neelamkavil:
Computer Simulation and Modelling,
John Wiley & Sons, Chichester, 1987
- [39] Philip, H. de Vries:
Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradients,
Trans. Am. Geophysic Union, 38 (1957), pp. 222...232
- [40] K. R. Popper:
Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge,
Routledge & Kegan Paul, London, 1969
- [41] L. Prandtl:
Führer durch die Strömungslehre,
Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1965
- [42] A. Rauh, M. Mahr, J. Blumenberg:
Solare Trocknung mit natürlicher Konvektion, 2. Zwischenbericht: Energetische Analyse des Kollektors und Erstellung eines Simulationsprogramms,
Technische Universität München, Lehrstuhl C für Thermodynamik, 1989
- [43] A. Ringleb:
Trocknung landwirtschaftlicher Produkte mit solarer Energie, Übersicht über Trocknungstechnik und - produkte, Stand der Technik in Deutschland,
Diplomarbeit,
Technische Universität München, Landtechnik Weihenstephan, 1992
- [44] D. A. Rose:
Water Movement in Unsaturated Porous Material,
Relim Bulletin, No. 29 (December 1965), pp. 119...123
- [45] St. Roth:
Konstruktion einer Versuchsanlage zur Durchführung instationärer Trocknungsversuche, Semesterarbeit,
Technische Universität München, Lehrstuhl C für Thermodynamik, 1993

- [46] H. Schauss:
Physikalische Vorgänge der Feuchtigkeitsbewegung und ihre Auswirkungen bei den verschiedenen Verfahren der Holztrocknung, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1940
- [47] W. T. Simpson, J. L. Tschernitz:
Solar Dry Kiln for Tropical Latitudes,
in: IUFRO Drying Conference, 1983, pp. 144...174
- [48] Themelin:
Conception et Implantation d' une Unité Expérimentale de Séchage du Bois à Générateur Solaire en Guyane Française,
Revue Machinisme Agricole Tropical, 98 (1987), p.p. 56...66
- [49] R. Wagenführ, Chr. Scheiber:
Holzatlas,
VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1974
- [50] R. Weidinger:
Untersuchung eines Solaren Aufwindtrockners für Entwicklungsländer unter besonderer Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte, Diplomarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaus, 1992
- [51] N. N.:
DIN 4757 Teil IV Sonnenheizungsanlagen, Sonnenkollektoren, Bestimmung von Wirkungsgrad, Wärmekapazität und Druckabfall,
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1982
- [52] N. N.:
Entwicklung eines solaren Aufwindtrockners,
BINE Informationsdienst, Bonn, 1990
- [53] N. N.:
Produktlinienanalyse - Stein der Weisen?,
Öko-Test, August 1991, S. 22...24
- [54] N. N.:
VDI-Wärmeatlas,
VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1977