

Trocknungsverfahren für die Bambusart *Guadua angustifolia* unter tropischen Bedingungen



Dissertation

**Zur Erlangung des Doktorgrades
des Fachbereichs Biologie
der Universität Hamburg**

**vorgelegt von
Jorge Augusto Montoya Arango
aus
Pereira, Kolumbien**


Hamburg 2006

Titelbild: Solartrockner der Technischen Universität von Pereira, Pereira-Kolumbien

**Genehmigt vom Department Biologie
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
an der Universität Hamburg
auf Antrag von Herrn Professor Dr. J. RESSEL
Weiterer Gutachter der Dissertation:
Herr Professor Dr. M. BARBU
Tag der Disputation: 07. Juli 2006**

Hamburg, den 22. Juni 2006




**Professor Dr. Reinhard Lieberei
Leiter des Departments Biologie**

Danksagung

Prof. Dr. Jörg. B. Ressel gilt mein besonderer Dank für die Annahme des Themas und seine stetige wissenschaftliche Hilfestellung zum Thema Physik der Trocknung, sowie für seine Geduld und sein Verständnis gegenüber dem Thema Bambus. Prof. Dr. Barbu danke ich für die Übernahme des Koreferats, den Professoren Dr. Frühwald und Dr. Dr. mult. h.c. Liese für die Bewertung meiner Disputation.

Auf diesem Wege möchte ich allen Personen meinen Dank aussprechen, die mich bei der Vorbereitung und Durchführung meines Promotionsverfahrens unterstützt haben, insbesondere Dr. Michael Tistl für seine stetige und entschiedene Unterstützung zu Beginn meiner Forschungsarbeiten. Bei Prof. Dr. Dr. mult. h.c. Walter Liese möchte ich mich bedanken für seinen Glauben an mich und seine Einschätzung, dass ich die Promotion als Ziel weiter verfolgen sollte, für seine stetige wissenschaftliche Unterstützung zum Thema Bambus, für seine Freundschaft und für seine permanente Fürsorge im Verlauf meiner Forschungsarbeit. Frau Ximena Londoño gilt mein Dank für ihre Unterstützung in den Anfängen meiner Forschungsarbeiten und bei der Master-Arbeit. Sie hat mich in Kontakt mit Prof. Liese gebracht.

Außerdem möchte ich Dr. Johannes Welling meinen Dank aussprechen für seine Freundschaft, seine wertvolle und wichtige wissenschaftliche Diskussion, seine ständige Hilfestellung in Trocknungsfragen sowie seine Fürsorge um mein Wohlergehen während meines Aufenthaltes in Deutschland.

Mein Dank gilt den Institutionen COLCIENCIAS, GTZ, DAAD, BFH, Universität Hamburg und Zentrum Holzwirtschaft sowie der Universität Pereira und Fakultät der Umweltwissenschaften für die finanzielle und materielle Unterstützung im Rahmen meiner Promotion. Ich danke außerdem den folgenden Firmen, Personen und Institutionen mit Beziehungen zum Thema Bambus: Agroguadua, Colguadua, Dansa Int., Sägewerk von Ing. Luis Guillermo Garcia, Projekt FOMIPYME, Handelskammer von Dosquebradas, CARDER y SENA.

Ich danke meiner Arbeitsgruppe in Kolumbien, speziell Carlos Alberto Orozco H., Maria Esperanza González A., José Rubiel Bedoya, Mauricio Largo, Tito Morales (zu Beginn des Projektes), Albeiro Quintero, Francly Milena Castro, Ramón Elias Jiménez, David Osorio, Juan Sebastian Bahena, sowie der Arbeitsgruppe in Deutschland, hier speziell Frau Dörte Bielenberg, Steffen Hellwig, Nikolaus von Westerholt sowie allen Kollegen aus dem Institut für Holzphysik.

Zu guter letzt möchte ich meiner Gattin Maria Esperanza danken für ihre ständige Unterstützung, ihre Liebe sowie ihre Aufopferung und Hingabe für mein Vorhaben und für meine Kinder. Ich danke meinen Kindern Nathalia, Daniel und Nicolás für ihre Liebe

und die Aufopferung eines Teils ihrer Kindheit (ohne Papa). Meiner Mutter Beatriz Arango de Montoya danke ich für Ihre Unterstützung und Geduld in schweren Zeiten, sowie meinen Brüdern Carlos Alberto, José Fernando y Jhon Jairo für ihre Unterstützung in familiären Angelegenheiten während meines Aufenthalts in Deutschland.

Hamburg, Juli 2006

Jorge Augusto Montoya Arango

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Bambus	2
2	Problemstellung und Zielsetzung	4
3	Guadua als Material und Baustoff	5
3.2	Botanische und anatomische Eigenschaften	5
3.2.1	Leitbündel	6
3.2.2	Faserzellen	9
3.2.3	Das Parenchym	12
3.2.4	Die Rinde	12
3.3	Chemische Zusammensetzung von <i>Guadua angustifolia</i>	13
3.4	Physikalische und mechanische Eigenschaften	18
3.4.1	Physikalische Eigenschaften	18
3.4.1.1	Feuchtigkeitsgehalt	18
3.4.1.2	Gleichgewichtsfeuchtegehalt	20
3.4.1.3	Fasersättigungsbereich	22
3.4.1.4	Dichte	23
3.4.1.5	Rohdichte oder <i>Specific gravity</i>	24
3.4.1.6	Quellung und Schwindung	25
3.4.2	Mechanische Eigenschaften	29
3.4.2.1	Elastizität des Bambusses	30
3.4.2.2	Druckfestigkeit	31
3.4.2.3	Biegung	34
3.4.2.4	Scherfestigkeit	36
3.4.2.5	Zugfestigkeit	37
3.4.3	Trocknungsparameter	39
3.4.3.1	Sorption	39
3.4.3.2	Kapillarwirkung	41
3.4.3.3	Diffusion	48
3.4.3.4	Elektrischer Widerstand und Leitfähigkeit	51
3.5	Waldbauliche und sozioökonomische Aspekte	53
3.5.1	Die Kultur der Guadua	53
3.5.2	Die Forstwirtschaft der <i>Guadua angustifolia</i>	54
3.5.3	Reproduktion und vegetative Verbreitung	54
3.5.3.1	Die "in vitro" Verbreitung	56
3.5.3.2	Verbreitung durch die Chusquines Methode	56

3.5.4	Vorkommen und Wuchsleistung der <i>Guadua angustifolia</i>	57
3.5.5	Verarbeitung und Verwendung der <i>Guadua angustifolia</i>	58
3.5.6	Güter und Umweltdienste der Guadua	64
4	Grundzüge der Trocknung	65
4.1	Physikalische Gesetze	65
4.1.1	Luftfeuchtigkeit	65
4.1.1.1	Sättigungsdampfdruck	66
4.1.1.2	Relative Feuchtigkeit	66
4.1.1.3	Luftzirkulation durch das Trocknungsgut	68
4.1.2	Methoden der Wärmeübertragung	69
4.1.2.1	Konvektion	69
4.1.2.2	Wärmeleitung bzw.	70
4.1.2.3	Wärmeeinstrahlung durch Strahlung	71
4.1.2.4	Kombinierte Wärmeübertragung durch Konvektion, Konduktion, Leitung und Strahlung	73
4.2	Trocknungsmethoden	75
4.2.1	Freilufttrocknung	75
4.2.1.1	Wirkung der Luft	75
4.2.1.2	Trocknungsgeschwindigkeiten	76
4.2.2	Solartrocknung	79
4.2.2.1	Sonnenstrahlung	80
4.2.2.2	Sonnenkollektoren	84
4.2.2.3	Durchsichtige Materialien	85
4.2.3	Konventionelle Trocknungen	86
4.2.3.1	Stoffbilanz	88
4.2.3.2	Energiebilanz	90
4.2.3.3	Kontrolle des Trocknungsprozesses	92
4.2.3.4	Steuerung und Regelung des Systems	92
4.2.3.5	Kontrolle von Energieverlusten bei der Frischluft/Ablufttrocknung	93
5	Ergebnisse der Anwendungen verschiedener Trocknungsmethoden	95
5.1	Trocknungsrelevante Eigenschaften von <i>Guadua angustifolia</i>	95
5.1.1	Abhängigkeiten der Feuchteverteilung im Guaduahalm	95
5.1.1.1	Materialien und Methoden	97
5.1.2	Untersuchung des Schwindungs- und Quellungsverhaltens	102
5.1.2.1	Materialien und Methoden	102
5.1.2.2	Ergebnisse	104
5.1.3	Sorptionsexperiment	113
5.1.3.1	Materialien und Methoden	113
5.1.3.2	Ergebnisse	115

5.2	Ergebnisse Freilufttrocknung	118
5.2.1	Trocknung der Guadua-Halme	118
5.2.1.1	Experiment 1	118
5.2.1.2	Experiment 2	127
5.3	Ergebnisse aus der Solartrocknung	131
5.3.1	Solartrocknung von Latten	131
5.3.1.1	Experiment 1 (1.08.04)	132
5.3.1.2	Experiment 2 (Cerritos 7.04.04)	142
5.3.1.3	Experiment 3 (26.08.04)	145
5.3.1.4	Experiment 4 (29.07.04)	152
5.3.2	Solartrocknung von Guaduahalmen	155
5.3.2.1	Experiment 6 (8.02.05)	158
5.4	Ergebnisse aus der konventionellen Trocknung nach dem Frischlucht-/Abluftverfahren	161
5.4.1	Konventionelle Trocknung von Guaduahalme	161
5.4.1.1	Experiment 1 (30.05.04)	161
5.4.1.2	Experiment 2 (30.07.05)	169
5.4.1.3	Experiment 3 (7.03.05)	176
5.4.1.4	Experiment 4 (15.02.06)	179
6	Diskussion	183
6.5	Trocknungsrelevante Eigenschaften	183
6.5.1	Feuchteverteilung im Guadua-Halm und dessen Abhängigkeit von der Topographie des Herkunftsortes	183
6.5.2	Diskussion des Schwindungs-/ Quellungsexperimentes mit Guadua	184
6.5.3	Diskussion der Ergebnisse der Sorptionsversuche	185
6.6	Diskussion der Ergebnisse aus der Freilufttrocknung	187
6.7	Diskussion der Ergebnisse aus der Solartrocknung	188
6.8	Diskussion der Ergebnisse aus der konventionellen Trocknung nach dem Frischlucht-/Abluftverfahren	189
7	Schlussfolgerungen und Zukunftsaussichten	199
8	Zusammenfassung	202
9	Literaturverzeichnis	204
10	Anhang	216

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Bambushalm (Abd. Razak O. et al. 1995).	6
Abb. 3.2: Dreidimensionale Ansicht des Gewebes eines Halms, mit Leitbündeln eingebettet in Parenchymgewebe (Abd. Razak O. et al. 1995).	7
Abb. 3.3: Komplexe Anordnung der Gefäß-Bündel in den Nodien (Liese W. & Ding Y., 1995)	9
Abb. 3.4: Chemische Zusammensetzung von Holz, (Lohmann U. , 1980)	14
Abb. 3.5: Gleichgewichtsfeuchte-Diagramm (Keylwerth R., 1949; Keylwerth R. & Noack D., 1964; Hawley (1931) in Kollmann F., 1959; Kollmann F. & Côté W., 1968).	21
Abb. 3.6: Scherversuch (ISO 22 157-1:2004)	36
Abb. 4.1: Plan der Ellipse und des Äquators	82
Abb. 4.2: Graphische Darstellung der Inklination θ und des Winkels mit der Breite vom Ort und λ	83
Abb. 4.3: Basisregulationskreis (Kröll K., 1978)	93
Abb. 5.1: topographische Darstellung der untersuchten Zonen	96
Abb. 5.2: Feuchtegehalt der Nodien und Internodien über die Länge des Halmes	99
Abb. 5.3: Feuchtegehalt der Nodien und Internodien über die Länge eines Halmes mit einem Konfidenzintervall von 95%	100
Abb. 5.4: Schematische Darstellung des Schwindungs- und Quellungs experiment mit Proben der <i>Guadua angustifolia</i>	103
Abb. 5.5: Gleichgewichtsfeuchtegehalt bei verschiedenen Klimaten mit einer relativen Luftfeuchte von 35%, 65%, 85% und bei Wasserimmersion	104
Abb. 5.6: Dichte bei 20° C/ 65% relativer Luftfeuchte und einem Feuchtegehalt von 0%.	105
Abb. 5.7: radiale und tangentielle differenzielle Quellung	106
Abb. 5.8: maximale Quellung und radiale, tangentielle und longitudinale Trocknungsschwindung	107
Abb. 5.9: max. Volumenquellung und normale Volumenschwindung von Proben mit Nodien und Internodien und von Proben mit nur Internodien	108
Abb. 5.10: Maximales lineares Quellmaß und lineares Schwindmaß in radialer und tangentialer Richtung	109
Abb. 5.11: Unterschiede in den Gleichgewichtsfeuchtwerten zwischen Nodien und Internodien bei unterschiedlichen Klimaten.	110
Abb. 5.12: Ausdehnung in radialer Richtung zwischen Nodien und Internodien bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen	110
Abb. 5.13: Ausdehnung in tangentialer Richtung zwischen Nodien und Internodien bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen	111
Abb. 5.14: Ausdehnung in longitudinaler Richtung zwischen Nodien und Internodien bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen	111
Abb. 5.15: Verhalten der Quellung bei Dichtezunahmen	112
Abb. 5.16 Gewichtsbestimmung der Proben	114
Abb. 5.17: Probenklimatisierung	114
Abb. 5.18: Probenklimatisierung	115
Abb. 5.19: Probentrocknung	115
Abb. 5.20: Sorptionsisotherme von Bambus (<i>Guadua angustifolia</i> und <i>Phyllostachys pubescens</i>) im Vergleich mit Fichte	116
Abb. 5.21: Zu analysierende Punkte im Experiment 1	119
Abb. 5.22: Proben DC, D, E des unteren Abschnittes eines 3 m Halmes	120

Abb. 5.23: Proben CB, C, CD des unteren mittleren Abschnittes eines 3 m Halmes	120
Abb. 5.24: Proben BC, B, des oberen Abschnittes	120
Abb. 5.25: Halm von 3 m Länge, Abbildung der Abschnitte	120
Abb. 5.26: Feuchtegehalt über die Halmlänge des Teil A, Experiment 1	122
Abb. 5.27: Trocknung an der freien Luft, in Form von Stangen, Trocknungsprojekt der Guadua, Sägewerk Cerritos Ing. Luis G. García.	123
Abb. 5.28: Trocknung an der Freien Luft unter einem transparenten Dach aus Plastik, Finca del Sr. G. G. Londoño	123
Abb. 5.29: Experiment 2, Halme mit durchbohrten Diaphragmen für Trocknung an der freien Luft	123
Abb. 5.30: Guadua-Halme für die Trocknung an der freien Luft	123
Abb. 5.31: Experiment 1 Teil B, Feuchtegehalt von im Freien getrockneten Halmen mit einem Konfidenzintervall von 95%, Feuchtegehalt	124
Abb. 5.32: Experiment 1, Feuchtegehalt von 25 Halmen	124
Abb. 5.33: Experiment 1, im Freien getrocknete Halme, Feuchtegehalt der Trocknungscharge in exponentieller Form dargestellt, durchschnittliche relative Feuchte und Durchschnittstemperatur	125
Abb. 5.34: Bewertung der Risse und der Spalten des 1. Experimentes	127
Abb. 5.35: 2. Experiment, Endfeuchtegehalt von 10 Halmen, mit einem Konfidenzintervall von 95%	128
Abb. 5.36: Trocknungskurve im 2.Experiment, Feuchtegehalt von 9 Halmen	129
Abb. 5.37: 2. Experiment, an der freien Luft getrocknete Halme, exponentielle Darstellung des Feuchtegehaltes, der durchschnittlichen relativen Feuchte und der durchschnittlichen Temperatur	130
Abb. 5.38: Sägen der Halme in Abschnitte, GUADUALCA Alcalá-Valle.	131
Abb. 5.39: Sägen der Latten ASOPRIG; Marsella-Rda.	131
Abb. 5.40: Schematische Darstellung der Herstellung von Latten aus einem Halm	131
Abb. 5.41: Anfangsfeuchtegehalt Basis und Halmmitte, Experiment 1	134
Abb. 5.42: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte, Experiment 1	134
Abb. 5.43: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte am Ende der Latte, Experiment 1	135
Abb. 5.44: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte in der Mitte der Latte, Experiment 1	135
Abb. 5.45: Unterschiede in der Dichte zwischen den Enden der Latten aus der Halmmitte und aus der Basis von trockenen Proben, 1. Experiment	136
Abb. 5.46: Unterschiede in der Dichte im Zentrum der Latten zwischen den Basen und den Halmmitten, Experiment 1	136
Abb. 5.47: Anfangs- und Endfeuchtegehalt von 25 Proben zum Trocknungsbeginn und nach 16 Tagen, Experiment 1	137
Abb. 5.48: Rohdichten in den Enden der Latten aus der Basis und aus der Halmmitte des 1.Experimentes	138
Abb. 5.49: Unterschiede der Dichten in der Mitte der Latte aus der Basis und aus der Halmmitte beim 1. Experiment	138
Abb. 5.50: Darstellung des Feuchtegehaltes von 25 Proben über 16 Trocknungstage	139
Abb. 5.51: Solartrockner in Cerritos, Sägewerk Ing. Luis Guillermo García	139
Abb. 5.52: Trocknungskurve über 16 Tage, Experiment 1	140
Abb. 5.53: Solartrockner in Cerritos, Sägewerk Ing. Luis Guillermo García	140
Abb. 5.54: Qualitätsmängel der Krümmung und Bläue der Guadualatten von 100 x 3 x 1 cm	141
Abb. 5.55: Krümmungsfehler bei der Solartrocknung der Guadualatten im Experiment 1	141
Abb. 5.56: Mängel durch Bläuebefall der Guadualatten im Experiment 1	142

Abb. 5.57: Anfangs- und Endfeuchtegehalt bei der Solartrocknung von Guadualatten	143
Abb. 5.58: Feuchtegehalt der 16 Proben im Verlauf der 13 Trocknungstage	144
Abb. 5.59: Trocknungskurve über 13 Tage, Experiment 2	144
Abb. 5.60: Krümmungsfehler bei der Solartrocknung der Guadualatten, Experiment 2	145
Abb. 5.61: Verfärbung durch Bläue- und Schimmelbefall bei der Solartrocknung der Guadualatten, Experiment 2	145
Abb. 5.62: Anfangsfeuchtegehalt in der Basis und in der Halmmitte im 3. Experiment	146
Abb. 5.63: Solartrockner im botanischen Garten der Technischen Universität von Pereira	148
Abb. 5.64: Solartrockner im botanischen Garten der Technischen Universität von Pereira	149
Abb. 5.65: Trocknungskurve über 18 Tage, Experiment 3	149
Abb. 5.66: Funktionsprinzip des Solartrockners	150
Abb. 5.67: Charakterisierung der Temperatur im Trockner	151
Abb. 5.68: Charakterisierung der relativen Luftfeuchte im Trockner	151
Abb. 5.69: Streuung zwischen Außentemperatur und der Temperatur der eintretenden Luft in den Stapel innerhalb des Solartrockners	152
Abb. 5.70: Streuung zwischen Außentemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit inneren	152
Abb. 5.71: Streuung zwischen der Temperatur des Kollektors und der Temperatur der eintretenden Luft in den Stapel	152
Abb. 5.72: Lineare Abhängigkeit zwischen Außentemperatur und der Temperatur des Kollektors	152
Abb. 5.73: Endfeuchtegehalt nach 15 Trocknungstagen für Basis und Halmmitte, Experiment 4	154
Abb. 5.74: Trocknungskurve über 15 Tage, Experiment 4	154
Abb. 5.75: Trocknungskurve über 21 Tage, Experiment 5	156
Abb. 5.76: Solartrockner für Halme mit einem Nutzungsraum für 500 Guaduas mit 3 m Länge, Experiment 5 und 6	156
Abb. 5.77: Solartrockner für Halme mit einem Nutzungsraum für 500 Guaduas mit 3 m Länge, Experiment 5 und 6	157
Abb. 5.78: Trocknungsqualität des 5. Experimentes	158
Abb. 5.79: Trocknungskurve über 21 Tage, Experiment 6	159
Abb. 5.80: Trocknungsqualität des 6. Experimentes	160
Abb. 5.81: Die Guadua Proben bei der Gewichtsmessung Anfang	162
Abb. 5.82: Die Guadua Proben bei der Gewichtsmessung, 24 Stunden im Ofen	162
Abb. 5.83: Die Proben wurden nach dem Trocknen in einen Exsikkator gelegt	162
Abb. 5.84: Die Guadua Proben bei der Gewichtsmessung Ende	162
Abb. 5.85: Unterschiede in den Anfangsfeuchtegehalten zwischen den Nodien und Internodien aus der Basis und Halmmitte beim 1. Experiment	163
Abb. 5.86: Unterschiede in den Anfangsfeuchtegehalten zwischen Nodien und Internodien aus der Basis und der Halmmitte beim 1. Experiment mit einem Konfidenzintervall von 95%.	164
Abb. 5.87: Unterschiede der Endfeuchtegehalte der Nodien und Internodien aus den Basis- und Halmmitteabschnitten beim 1. Experiment	165
Abb. 5.88: Unterschiede der Endfeuchtegehalte zwischen den Nodien und Internodien aus den Basis- und Halmmitteabschnitten beim 1. Experiment mit einem Konfidenzintervall von 95%	165
Abb. 5.89: Konventionelle Trocknung nach dem Frischluft-/ Abluftverfahren	167
Abb. 5.90: Konventioneller Trockner im botanischen Garten der Technischen Universität Pereira	167

Abb. 5.91: Guadualager für die konventionelle Trocknung	167
Abb. 5.92: Vorbereitung der Guaduahalme für die konventionelle Trocknung	167
Abb. 5.93: Elektrische Feuchtemessung der Guaduahalme im konventionellen Trockner	167
Abb. 5.94: Lagerung der Guadua-Halme im konventionellen Trockner	167
Abb. 5.95: Trocknungskurven für das 1. Experiment, Trocknungsdauer von 21 Tagen	168
Abb. 5.96: Trocknungsqualität beim 1. Experiment, Bewertung der Risse und Spalten	168
Abb. 5.97: Risse beim 1. Experiment	169
Abb. 5.98: Risse und Bläue beim 1. Experiment	169
Abb. 5.99: Unterschiede in den Anfangsfeuchtegehalten zwischen Basis und Halmmittle beim 2. Experiment	171
Abb. 5.100: Unterschiede des Anfangs- und Endfeuchtegehalt für alle Basis- und Halmmittleabschnitte	171
Abb. 5.101: Unterschiede der Endfeuchtegehalte zwischen den Nodien und Internodien aus den Basis- und Halmmittleabschnitten beim 2. Experiment	172
Abb. 5.102: Unterschiede der Endfeuchtegehalte zwischen den Nodien und Internodien aus den Basis- und Halmmittleabschnitten beim 2. Experiment mit einem Konfidenzintervall von 95%	173
Abb. 5.103: Trocknungskurven des 2. Experimentes, Trocknungsdauer 624 Stunden	175
Abb. 5.104: Trocknungsqualität beim 2. Experiment, Bewertung der Risse	175
Abb. 5.105: Trocknungsqualität beim 2. Experiment, Bewertung der Risse der Basis- und Halmmittleabschnitte	176
Abb. 5.106: Trocknungskurven des 3. Experimentes, Trocknungsdauer 864 Stunden.	178
Abb. 5.107: Riss im Guadua-Halm im konventionellen Trockner, Experiment 3	178
Abb. 5.108: Geringe Rissbildung im Experiment 3	178
Abb. 5.109: Trocknungsqualität beim 3. Experiment, Bewertung der Risse	179
Abb. 5.110: Trocknungskurven des 4. Experimentes, Trocknungsdauer von 105 Stunden	181
Abb. 5.111: Trocknungsqualität beim 4. Experiment, Bewertung der Risse und Spalten	181
Abb. 5.112: Trocknungsqualität beim 4. Experiment, Bewertung der Risse in den Basis- und Halmmittleabschnitten	182
Abb. 6.1: Mittlere Sorptionsisotherme von Bambus und Fichte	186
Abb. 7.1: Ergebnisse der Freilufttrocknung von Guaduahalmen aus Experiment 1 und 2	202
Abb. 7.2: Ergebnisse der Solartrocknung von Latten aus Experiment 1- 4	202
Abb. 7.3: Ergebnisse der Solartrocknung von Latten aus Experiment 1- 4 und von Guaduahalmen aus Experiment 5 und 6	203
Abb. 7.4: Ergebnisse des Frischluft-/ Abluftverfahrens von Guaduahalmen aus Experiment 1- 4	203
Abb. A1: Feuchtegehalt der Nodien der Halmbasis aus den unterschiedlichen topographischen Zonen mit einem Konfidenzintervall von 95%	216
Abb. A2: Feuchtegehalt der Basisnodien der verschiedenen geographischen Zonen	216
Abb. A3: Feuchtegehalt der Internodien der Basen aus den unterschiedlichen topographischen Zonen mit einem Konfidenzintervall von 95%	217
Abb. A4: Feuchtegehalt der Internodien der Basen aus den unterschiedlichen topographischen Zonen	217
Abb. A5: Feuchtegehalt der Halmmittelnodien aus den unterschiedlichen topographischen Zonen mit einem Konfidenzintervall von 95%	218
Abb. A6: Feuchtegehalt der Halmmittelnodien aus den unterschiedlichen topographischen Zonen	218

Abb. A7: Feuchtegehalt der Halmmitteinternodien aus den unterschiedlichen topographischen Zonen mit einem Konfidenzintervall von 95%	218
Abb. A 8: Feuchtegehalt der Halmmitteinternodien aus den unterschiedlichen topographischen Zonen	218
Abb. A 9: Feuchtegehalt über die Länge eines Halmes aus der Spitzenzone mit einem Konfidenzintervall von 95%.	219
Abb. A 10: Feuchtegehalt über die Länge eines Halmes aus der Hangzone mit einem Konfidenzintervall von 95%.	220
Abb. A 11: Feuchtegehalt über die Länge eines Halmes aus der Hangzone mit einem Konfidenzintervall von 95%.	221

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Anatomische Eigenschaften der Gefäßbündel der <i>Guadua angustifolia</i> Kunth, im Vergleich mit anderen Arten (Wang Y. C., et al. 1991)	11
Tabelle 3.2: Prozentuale Zusammensetzung verschiedener Halmabschnitten von 9 Arten (Wang Y. C., et al. 1991)	11
Tabelle 3.3: Chemische Zusammensetzung verschiedener Holzarten (Lohmann U., 1980)	15
Tabelle 3.4: Zusammenfassung der chemischen Zusammensetzung (Lohmann U., 1980)	15
Tabelle 3.5: Chemische Zusammensetzung verschiedener Bambusarten (Youdi C., et al. 1985; Liese W., 1985; Abd. Latif M., 1993a; Abd. Othman R., et al. 1995)	16
Tabelle 3.6: Bereiche der chemischen Zusammensetzung von verschiedenen Bambusarten, Nadelhölzern und Laubhölzern.	17
Tabelle 3.7: Faktoren zur überschlägigen Bestimmung der Festigkeiteigenschaften in (N/mm ²) in Abhängigkeit von der Dichte (kg/cm ³)	30
Tabelle 3.8: Analytische Ergebnisse der Bambusknospen, je 100 g frischen Bambus (Visuphaka K., 1985)	61
Tabelle 4.1: Mathematische Modelle für die effektive Wärmeleitfähigkeit (Kneule F. 1975)	71
Tabelle 4.2: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse aus Experimenten zur Trocknung im Freien (Rehman M. A. & Ishaq S. M., 1947)	77
Tabelle 4.3: Eigenschaften der Absorptionbeschichtungen aus „Department of Urban Development and House of the United States“ (Orozco C. A., 1996)	84
Tabelle 4.4: Transmittanz (%) der durchsichtigen Materialien (Saravía L. et al., 1992, in Corvalan R. et al., 1992)	86
Tabelle 4.5: Ergebnisse der Experimente in den Trocknungskammern mit	87
Tabelle 4.6: Ergebnisse der Experimente in den Trocknungskammern mit Bambuslatten (Laxamana M. G., 1985)	87
Tabelle 5.1: Statistische Werte der Proben in Verbindung mit dem Nodien- und Internodienpaar	100
Tabelle 5.2: “t” Test der Proben in Zusammenhang mit den Nodien- und Internodienhalmmittepaaren.	101
Tabelle 5.3: Statistische Werte der Proben in Verbindung mit den Halmmitteinternodien- und Halmmitteinternodienpaaren	101
Tabelle 5.4: “t” Test der Proben in Zusammenhang mit dem Halmmitteinternodien- und Halmmitteinternodienpaar	101
Tabelle 5.5: Ergebnisse für die Gleichgewichtsfeuchte bei verschiedenen Klimaten und die Werte für die Rohdichte, bei einer relativen Luftfeuchte von 65% und 85% sowie 0%.	104
Tabelle 5.6: Ergebnisse für die differenzielle Quellung, den Quellungskoeffizient und Quellungsanisotropie	105
Tabelle 5.7: Ergebnisse für das maximale lineare Quellmaß, für das Trocknungsschwindmaß und die Anisotropie der Trocknungsschwindmaße	106
Tabelle 5.8: Statistische Werte der Proben in Verbindung mit der Dichte	108
Tabelle 5.9: Ergebnisse der t-Test in Verbindung mit den Quell- und Schwindungspaaren	108
Tabelle 5.10: Bezeichnende statistische Werte für die Quellung und Schwindung	112
Tabelle 5.11: Salzlösungen für unterschiedliche Werte der relativen Luftfeuchte in % bei einer Temperatur von 20° C	114
Tabelle 5.12: Ergebnisse für die Werte der Gleichgewichtsfeuchte für verschiedene relative Luftfeuchten	117

Tabelle 5.13: statistische Werte des Endfeuchtegehaltes in unterschiedlichen Teilen einer 3m langen Guadua	121
Tabelle 5.14: statistische Daten aus dem t-Test für Nodien-Internodienpaare	122
Tabelle 5.15: statistische Daten der Feuchte-meßwerte	123
Tabelle 5.16: Trocknungsdaten bei der Freilufttrocknung (Exp.1) im Zeitraum vom 24.11.03 bis 10.2.2004	125
Tabelle 5.17: Statistische Daten des 2. Experimentes für zehn Halme	129
Tabelle 5.18: durchschnittliche Trocknung an der freien Luft, 2. Experiment im Zeitraum vom 20.9.04 bis zum 05.01.2005	130
Tabelle 5.19: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte, Experiment 1	133
Tabelle 5.20: Deskriptive Statistiken des 1. Experimentes	137
Tabelle 5.21: Deskriptive Statistiken des 2. Experimentes	143
Tabelle 5.22: Anfangsfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte	147
Tabelle 5.23: Endfeuchtegehalt in Base und Halmmitte, Experiment 3	147
Tabelle 5.24: Endfeuchtegehalt in Basis und in Halmmitte, Experiment 3	147
Tabelle 5.25: Endfeuchtegehalt im Zentrum der Basis und in Halmmitte,	148
Tabelle 5.26: Statistische Werte des Solartrockners, Experiment 3	150
Tabelle 5.27: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte, Experiment 4	153
Tabelle 5.28: Trocknungsprogramm des 1. Experimentes	163
Tabelle 5.29: Anfangsfeuchtegehalt in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmitte, Experiment 1	164
Tabelle 5.30: Endfeuchtegehalt in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmitte, Experiment 1	166
Tabelle 5.31: Trocknungsprogramm des 2. Experimentes	170
Tabelle 5.32: Anfangsfeuchtegehalt in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmitte, Experiment 2	173
Tabelle 5.33: Endfeuchtegehalt in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmitte, Experiment 2	174
Tabelle 5.34: Endfeuchtegehalt in Basis und der Halmmitte, Experiment 2	174
Tabelle 5.35: Trocknungsprogramm des 3. Experimentes	177
Tabelle 5.36: Trocknungsprogramm des 4. Experimentes	180
Tabelle 6.1: Zusammenfassung des Experimentes 1. und 2.	187
Tabelle 6.2: Zusammenfassung des Experimentes der Solartrocknung von Guadualatten	188
Tabelle 6.3: Zusammenfassung aller Experimente	192
Tabelle 6.4: Bewertung der Schwächen und Stärken in qualitativer Form	193

1 Einleitung

Das Trocknen von Bambus ist eine Basisbehandlung, von großer Bedeutung, die vielleicht noch wichtiger ist als eine Behandlung mit Schutzmitteln. Die Bambustrocknung ist ein notwendiger Schritt in der Produktionskette für die verschiedenen Anwendungen und Verwendungsmöglichkeiten, die dieses Material hat. Eine gute Trocknung vermindert die Möglichkeit biotischer Schäden wie Verformungen und Risse, die üblich für den Bambus sind. Dieses Verhalten liegt begründet in dessen anatomischen Struktur, die gekennzeichnet ist durch die Fasern in longitudinaler Richtung, den hohlen Halm und die harte und sehr dichten Epidermis (Rinde) und den hiervon kontrahierenden relativ weichen inneren Teil der Wand. Weiter schützt die Epidermis vor biotischen Angriffen von Insekten und Pilze.

Bambus zeigt genau wie Holz im grünen Zustand einen hohen Feuchtegehalt, der zwischen 80% und 150% variieren kann. Dies ist Abhängig vom Zeitpunkt des Einschlags und vom Ort, wo der Bambus geschlagen worden ist. Die Jahreszeit ist auch ein wichtiger Faktor, da es deutliche Unterschiede in den Werten zwischen der Regenzeit und der Trockenzeit gibt.

Der optimale Feuchtegehalt hängt besonders von der Anwendungsart und dem Verwendungszweck des Bambus ab. Diese Werte können von 8% bis 18% variieren. Wenn zum Beispiel der Bambus für Parkett oder Laminat für Fußböden in geschlossenen Räumen mit Heizung oder Klimaanlage verwendet wird, muss er auf extreme Werte von 8% getrocknet werden. Wenn der Bambus aber für Bauten oder im Außenbereich verwendet wird, können die Werte in Abhängigkeit vom Umgebungsklima zwischen 12 und 18% variieren.

Eine gute Trocknung bringt die folgenden Vorteile mit sich (Hoheisel H., 1989):

- Sie ruft eine Stabilisierung der Faser hervor, die auf Grund von schwankendem Feuchtegehalt erzeugte Veränderungen verhindert.
- Sie erhöht beachtlich den mechanischen Widerstand und verbessert seine Eigenschaften wie z.B. thermische, akustische und elektrische Isolation.
- Sie verringert sein Gewicht, was den Transport begünstigt und seine Handhabung vereinfacht.
- Sie erhöht den biologischen Widerstand vor Insekten und Pilzen.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedenste Aspekte von Bambus behandelt: seine anatomischen und biologischen Haupteigenschaften, seine anatomische Struktur und seine Hauptteile; dann werden die physikalischen und mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Struktur vorgestellt; zum Schluß werden die für das Trocknen spezifischen Eigenschaften im Allgemeinen verdeutlicht.

Darauf folgen allgemeine Information über den sozialen und wirtschaftlichen Einfluss vom Guadua Bambus, über die Produktion der Fläche, sowie zu Methoden und Formen der Verbreitung. Andere Aspekte sind die verschiedenen Verwendungsbereiche, in denen dieses Material zur Anwendung kommt, wie die Verwendung im Bau von Brücken, Pavillons, Kiosken, im Bau von Gemeinschafts- und Spezialbauten; in der Möbel- und Werkzeugindustrie; in der Herstellung von Laminatböden und Paneelen, und letztendlich die Anwendung im Kunstgewerbe etc..

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei Trocknungsarten für die Bambustrocknung studiert und analysiert: die Freilufttrocknung mit Sonnenenergie, Solartrocknung in Trocknungsanlagen in einer Art von Treibhäusern und das konventionelle Trocknen nach der Frischluft-/Abluftverfahren. Das Trocknen im Freien wird gewöhnlich von der Landbevölkerung und auch von Unternehmern, die Guadua Bambus im runden Zustand vermarkten, angewandt.

Die zweite Trocknungsart ist vergleichbar mit der Trocknung im Treibhaus. Hier zirkuliert die Luft in Kammern mit einer Außenhaut aus Plastik, dessen Funktion es ist, die mittels Kollektoren aus verzinktem Stahlblech eingefangene Sonnenenergie im System zu halten. Bei der Frischluft/Ablufttrocknung wird Gas als Heizenergie verwendet und die Luft quer zu den Stapeln zirkuliert. Ein Steuerungssystem sorgt für die relative Innenfeuchte und für die Temperatur.

1.1 Bambus

Bambus ist ein riesiges Grassgewächs, das auf fast allen Kontinenten mit Ausnahme von Europa wächst. Sein schnelles Wachstum, sein Beitrag zur Erhaltung und Bewahrung der Biodiversität, seine ökologische Funktion und sein Beitrag zur sozioökonomischen Entwicklung der Gesellschaft machen den Bambus zu einem der würdigen Vertreter der „nachhaltigen Entwicklung“ auf der ganzen Erde.

Nach der „National Forest Inventory“ von 1988 umfassen die Bambusflächen in China 3.546.300 ha. Mehr als 100 Millionen Menschen leben direkt und indirekt von dem Anbau, der Produktion und der Bewirtschaftung des Bambusses Xiao J. H. (1989) in Shen Z. R. (1992). Es wird geschätzt, dass seine Vermarktung und Verarbeitung bereits 1988 Einnahmen von bis zu US\$450.000 Millionen erzeugten (Liese W., 1988). Heute dürfte dieser Betrag zigfach überschritten werden.

Es sind 60 bis 90 Gattungen und 1100 bis 1500 Arten, die in dem Bereich zwischen 46°N Breite und 47°S Breite vorkommen (De Flander K., 2005). Es gibt die verschiedensten Verwendungs- und Verarbeitungsmöglichkeiten. Einige Arten sind essbar und dienen als Nahrungsmittel. Taiwan exportiert Bambus im Wert von US\$ 50 Millionen pro Jahr. In der Papierindustrie wird er auch in großen Mengen verarbeitet, insbesondere in Indien, wo er schon seit 1919 verarbeitet wird (Shen Z. R., 1992).

Die taiwanische Bambusmöbelindustrie machte 1978 einen Umsatz von US\$ 500 Millionen und die Philippinen erhöhten ihren Export von 1985 bis 1994 von US\$ 650.000 auf US\$ 1,2 Millionen. In China existiert die Bambusproduktion plywood, plybamboo veneer genannt, seit mehr als 20 Jahren. Dort gibt es mehr als 100 Fabriken, die ungefähr 400.000 Tonnen im Jahr 2000 erzeugten. Ein wichtiger anderer Einsatz liegt im Wohnungsbau, Brückenkonstruktionen und anderen Konstruktionen aus Bambus.

Guadua angustifolia Kunth ist eine der wichtigsten Gattungen in Amerika. Sie erreicht eine Höhe von 20 - 25 m, einen Durchmesser von durchschnittlich 11 cm, mit einer Wachstumsgeschwindigkeit von 10 cm bis 15 cm am Tag und einer Wanddicke von 30 - 35 mm im unteren Drittel des Halmes. Mit der Höhe des Halmes verringert sich die Dicke der Wand bis zu einem Wert von ungefähr 10 mm. Das Wachstum der Knospen entspricht einem täglichen Volumenzuwachs von 500 cm³.

So einen Zuwachs an Biomasse kann kein Baum erreichen. Das Erstaunliche ist, dass er ohne ein Blatt für die Assimilation von Sonnenenergie, die für sein Wachstum notwendig ist, eine Höhe von 20 m erreicht (Liese W., 2005). *Guadua angustifolia* wird für den drittgrößten Bambus der Welt gehalten, der nur noch von den Arten *Dendrocalamus giganteus* und *Dendrocalamus sinicus* übertroffen wird. Aus den 20 wichtigsten Bambusgattungen der Welt wurde sie ausgewählt (Londoño X., 2000).

Guadua angustifolia wurde von den Botanikern Alexander von Humbolt und Aimé Bonpland als *Bambusa guadua* 1808 identifiziert. 1822 vertiefte der deutsche Botaniker Karl S. Kunth die Studien und benannte die Gattung „Guadua“, so wie auch die Eingeborenen aus Kolumbien und Ecuador diesen Bambus nannten.

Später wurde sie nochmals umbenannt in *Guadua angustifolia* Kunth, dessen Bedeutung „Enges Blatt“ ist. Sie umfasst ungefähr 30 Arten in Lateinamerika (Kreuz, 1994) und wächst in fast allen Ländern Lateinamerikas außer in Chile und auf den Karibischen Inseln. Sie kommt von 23° nördlicher Breite in San Luis de Potosí in Mexiko bis sogar 35° südlicher Breite im nördlichen Teil von Argentinien vor. Ihr Entwicklungs- und Wachstumspotential in der ganzen lateinamerikanischen Welt ist sehr groß (Londoño X., 2000).

2 Problemstellung und Zielsetzung

Die *Guadua angustifolia* Kunth besteht aus einem hygroskopischen Material, das Feuchtigkeit in verschiedenen Mengen in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte und der Temperatur ihrer Umwelt adsorbiert. Daher ist der Feuchtegehalt der *Guadua* das Gewicht des Wassers in den Zellstrukturen, das in einigen Fällen 80% bis 150% des Gesamtgewichts der Trockenmasse ausmacht.

Die bekanntesten Probleme bei der Trocknung der *Guadua angustifolia* sind (Giraldo H. *et al*, 1999):

- *Risse*... kleine Öffnungen in länglicher Form, die eine Beschädigung, kleiner als 10 cm, des Internodiums verursachen
- *Spalten*... ein ähnlicher Fehler, wie beim Vorhergehenden, aber größer und tritt bei 2 oder mehreren Internodien auf. Normalerweise kommt dieser Fehler an beiden Seiten der Halmwand und an verschiedenen Teilen der Oberfläche vor und verursacht den Verlust des ganzen Stückes.
- *Verformungen*... Drehungen, Verbiegungen und Verziehungen der Längsachse des Stängels. Wenn die Stängel Drehungen oder Verbiegungen aufweisen, können sie nicht mehr verwendet werden und bei einem Verziehen der betroffenen Internodien, wird der Bereich beseitigt.

Diese Trocknungs- und Schutzproblematiken machen den Bambus, trotz seiner guten physikalischen und mechanischen Eigenschaften, zu einem Material zweiter oder dritter Kategorie, mit einer kurzen Haltbarkeit oder von schlechter Qualität.

Zielsetzung

Ziel ist es, die optimalen Bedingungen zum Trocknen von „*Guadua angustifolia*“ unter tropischen Bedingungen für eine adäquate Verwendung bei unterschiedlichen Klima- und Anwendungsbedingungen zu definieren.

- Systematische Analyse der Trocknung von „*Guadua angustifolia*“ unter Verwendung verschiedener Trocknungsmethoden.
- Bestimmung, Bewertung und Standardisierung der Trocknungsparameter der „*Guadua angustifolia*“ in Abhängigkeit der Art der Verwendung.
- Erarbeitung von Empfehlungen für Praktiken zur Vereinfachung der Trocknung.

3 Guadua als Material und Baustoff

3.2 Botanische und anatomische Eigenschaften

Die taxonomische Klassifizierung der *Guadua angustifolia* innerhalb des Pflanzenreiches gibt H.Cruz (1994) und (Strasburger E. *et al.* 1991):

- Reich: *Eukaryota*
- Abteilung: *Spermatofita*
- Unterabteilung: *Angiosperma*
- Klasse: *Monocotiledoneae*
- Ordnung: *Glumiflorales*
- Familie: *Poaceae oder Gramineae*
- Unterfamilie: *Bambusoideae*
- Hauptstamm: *Bambusodae*
- Stamm: *Bambuseae*
- Unterstamm: *Guadinae*
- Gattung: *Guadua*
- Art: *Guadua angustifolia*

Wissenschaftlicher Name: *Guadua angustifolia* Kunth 1822

Die anatomische Struktur der Halme bestimmt die physikalisch-mechanischen Eigenschaften (Ota, M, 1950; Liese W., 1885; 1992; 2003) und deren Verhalten bei der industriellen Verarbeitung und im Wohnungsbau. Die Grundbestandteile des Halmes sind: Halmpetiole, Halmbasis und oberirdischer Halm, die beiden zuerst Genannten befinden sich im Wurzelstock.

Der Halm setzt sich zusammen aus Nodien (Knoten) und Internodien (*Abb. 3.1*). Die Nodien bestehen aus einer inneren Membranhaut oder Trennwand und zwei kreisförmigen Ringen, der untere äußere Ring heißt Ringscheide und der obere innere Ring wird Halmring genannt. Die Abschnitte der Internodien bestehen aus zylindrischen Wänden und einem inneren Hohlraum. Die Länge, die Zahl und die Form der Internodien hängen von der Bambusart ab. Im Vergleich mit vielen Holzarten zeigt Bambus eine unkomplizierte Beschaffenheit, sie ist einfach und einheitlich (*Abb. 3.2*). Fast alle Bambusarten haben einen hohlen Halm mit einer verschieden dicken zylinderförmigen Wand, die einen Hohlraum umschließt. Nur wenige Arten, wie *strictus de Dendrocalamus*, können einen ausgefüllten Körper bilden (Liese W., 2003). Die Äste schlagen aus den Nodien des oberen Sprossabschnittes aus, wenn der Trieb das Längenwachstum eingestellt hat.

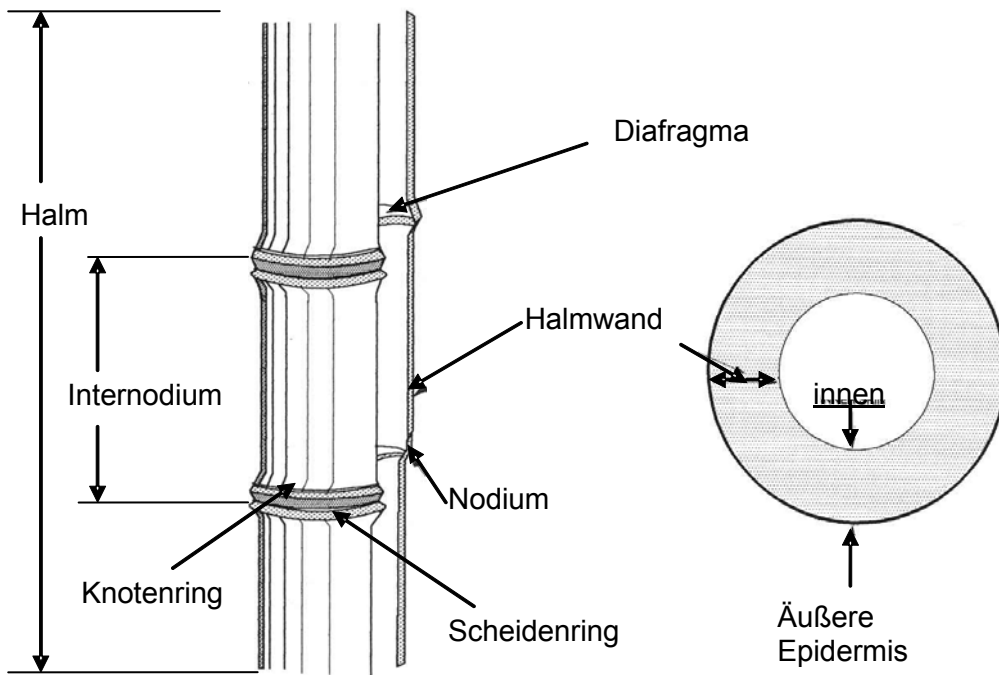


Abb. 3.1: Bambushalm (Abd. Razak O. et al. 1995).

Das Gewebe des Halmes wird aus folgenden Zellen gebildet: a) Parenchymzellen, die das Grundgewebe bilden, b) Leitbündel, bestehend aus Sklerenchymzellen, Gefäßen und Siebröhren des Phloems (Grosser D. & Liese W., 1971). Die Flüssigkeiten zur Ernährung des Sprosses fließen frei in den Leitbündeln der Internodien (Liese W., 2003).

Die Zellstrukturen in den Internodien sind Parallel zur Halmachse ausgerichtet. Die Struktur von Holz weist radial orientierte Zellstrukturen auf, die Bambus nicht vorkommen. Radial ausgerichtete Transportvorgänge im Bambus erfolgen nur von Zelle zu Zelle in Form von Diffusion. Die Länge eines Internodiums variiert zwischen den Bambusarten und auch über die Länge eines Halms. Die Internodien der Halmbasis sind kurz, wo hingegen die Internodien an der Spitze des Halms relativ lang sind. Die Nodien ermöglichen den transversalen Fluss des Wassers (Liese W., 1998). Die kurzen Leitungen im Diaphragma enthalten viele Durchbrechungen als Verbindungselemente zu den anderen Röhren, damit die Flüssigkeiten transversal von einer Seite zur anderen Seite des Halms passieren können.

3.2.1 Leitbündel

Die Anordnung der Leitbündel in der Halmwand ist typisch für den Aufbau einer monocotyledonen Pflanze. Die Form, Größe, Anzahl und Konzentration der Bündel wechselt ununterbrochen von der Peripherie des Halms bis ins Zentrum (Grosser D. & Liese W., 1971; 1973; Liese W., 1998). Die Gefäßbündel werden in vier verschiedene Gruppen klassifiziert: Gruppe I, II, III, und IV.

Die Gruppe *I* besteht aus einem einzigen Teil (zentraler Gefäßstrahl); von einem einzigen Gewebe, wie eine Scheide oder Sclerenchym-Hülle, abgegrenzt; interzellulärer Raum mit Thyloisis¹.

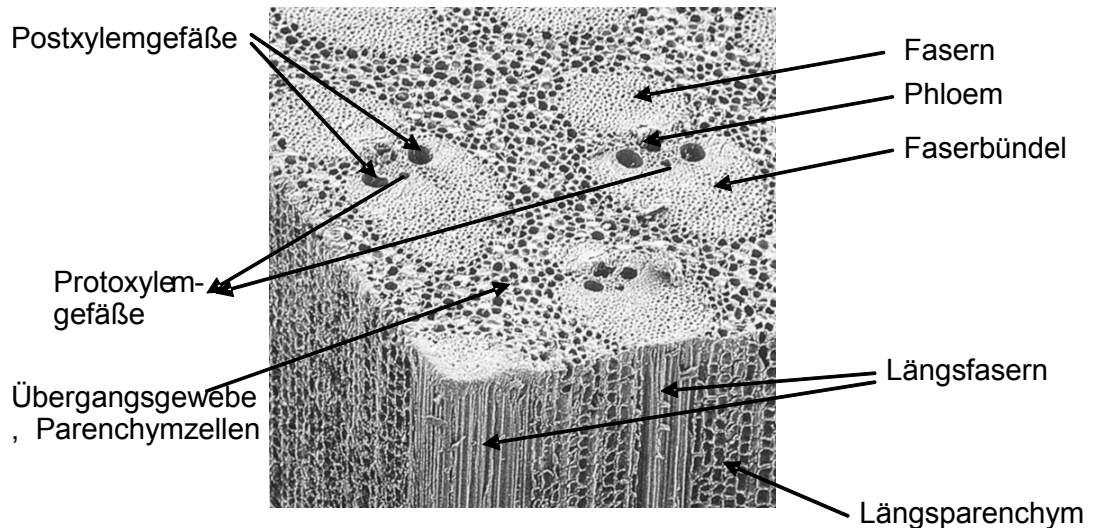


Abb. 3.2: Dreidimensionale Ansicht des Gewebes eines Halms, mit Leitbündeln eingebettet in Parenchymgewebe (Abd. Razak O. et al. 1995).

Gruppe *II* besteht aus einem einzigen Teil (Zentraler Gefäßstrang), von einem einzigen Gewebe, wie eine Scheide oder Sclerenchymhülle, abgegrenzt; die Hülle des interzellulären Raumes (Protoxylem) bei einigen Leitbündeln ist sichtbar länger; interzellulärer Raum ohne Tylose.

Gruppe *III* besteht aus zwei Teilen (Zentraler Gefäßstrahl und einer Schicht Fasern); die Faserschicht befindet sich im zentralen Gefäßstrahl; die Hülle des interzellulären Raumes (Protoxylem) ist im Allgemeinen kleiner als die der anderen Gruppen.

Die Gruppe *IV* besteht aus drei Teilen (Zentraler Gefäßstrahl und zwei Schichten Fasern). Im Allgemeinen sind die Zellreihen außerhalb des zentralen Strahles aus Fasern (Grosser D. & Liese W., 1971).

Später wurde auf Grund der Vertiefung dieses Themas, insbesondere in der Typologie der Gefäßbündel, eine neue Klassifizierung auf die folgende Weise durchgeführt. Der Gruppen-Typ *I* wurde unterteilt in *Ia*, *Ib*, *Ic* und der Gruppen-Typ *II* in *Ila*, *Ilb*, *Ilc*. Die Gruppen-Typen *III* und *IV* behielten ihre Klassifizierung bei. Der Gruppen-Typ *V* und die Gruppen-Typen *VIa*, *VIb*, wurden neu hinzugefügt. Die *Guadua angustifolia* gehört

¹ Thyloisis: Ausstülpungen der Parenchymzellen in die Lumina benachbarter Gefäße

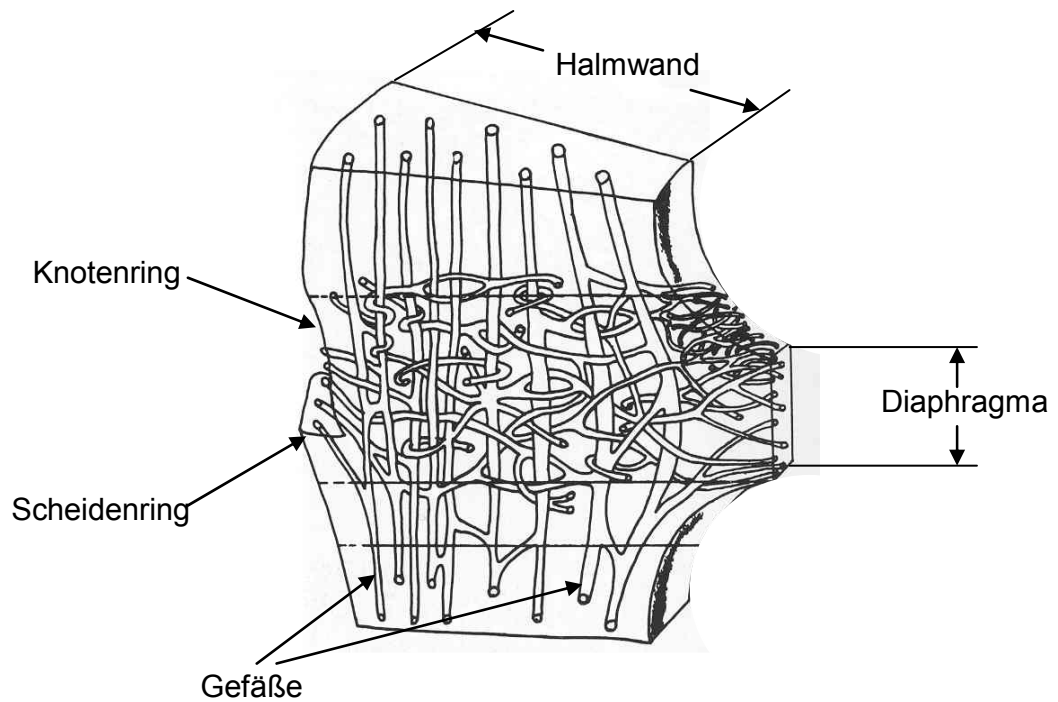
zur Gruppe *Iib*. Hier ist die äußere Sclerenchymhülle auf der Seite des Phloems auffällig größer, als die drei anderen Hüllen (Grosser D. & Liese W., 2000).

Im Querschnitt der Halmwand von *Guadua angustifolia* hebt sich die regelmäßige, dunklere Verteilung der Leitbündel vom Grundparenchymgewebe ab (*Abb. 3.2*). Die Leitbündel werden von zwei großen Postxylem Röhren geformt. Die kleinen Zellen vom Protoxylem befinden sich an der Spitze vom primären Phloem, das ein Paar von Fasern umgebene Siebröhren enthält. Im Durchschnitt besteht das Gewebe aus ca. 50-52% Parenchymzellen, 40-50% Fasern und 8-10% Gefäßgewebe (Leitröhren und Siebröhren) (Liese W., 1985; 1995; 1998; 2003). Ähnliche Werte nennen Londoño X., *et al.* (2002). Die Zusammensetzung zeigt im Allgemeinen eine bestimmte Richtlinie im Spross. Im Querschnitt werden die Gefäßbündel an der Rinde oder Epidermis kleiner und dichter, wie auch von unten nach oben mit der Verringerung des Halmdurchmessers. Diese Gefäßbündel liegen getrennt von einander im Grundgewebe, bzw. Parenchymgewebe eingebettet (*Abb. 3.2*).

Die Leit- oder Gefäßbündel agieren als Wasserleitungen und sind die Haupttransportstrecken für den Wasser- und Nährstofftransport von den Wurzeln des Wurzelstockes zum Halm und vom Halm zu den Blättern für die Transpiration und die Assimilation (Liese W., 1998; 2003). Diese Leitungen dienen für spätere Schutzbehandlungen und werden wie Kanäle für die Schutzlösungen benutzt. Weiter helfen sie auch das im Spross frei vorliegende Wasser abzuführen. Die Gefäße nehmen fast 6-8% der Halmquerschnittsfläche ein. Der Gefäßdurchmesser variiert im Halm und zwischen den Arten von 140 -180 µm (Liese W, 2003). Sie sind größer im dritten Teil der Innenwand und von gleicher Form im unteren Teil des Halmes.

Die langen und ununterbrochenen Leitungen in einem Internodienabschnitt setzen sich aus kurzen Gliedern oder Röhren zusammen, die durch kleine Perforationen (Tüpfel) verbunden sind. Einige von ihnen zeigen spezielle Formen und Verzweigungen, (*Abb. 3.3*). Die Gefäße sind von Fasern umgeben und diese ihrerseits von Parenchymzellen, die wiederum durch kleine Durchbrechungen bzw. Tüpfeln miteinander verbunden sind.

Nach Grosser D. und Liese W. (1971) ist das Phloem und das Xylem eines Leitbündels von einer Sclerenchymnscheide oder Sclerenchymhülle umgeben. Die Leitbündel unterscheiden sich in der Größe, in der von der Bambusart abhängigen Form und in ihrer Anordnung in der Halmwand. Die Leitbündel in der Mitte und in der Innenseite der Halmwand haben 4 Scheiden oder Hüllen, zwei an jeder Seite und zwei polar ausgerichtete. Eine umgibt das Phloem und eine andere umgibt den interzellularen Raum. Diese anatomische Beschreibung der Gefäßbündel ist sehr wichtig für die Charakterisierung bzw. Bestimmung der Bambusarten.



(Abb. 3.3: Komplexe Anordnung der Gefäß-Bündel in den Nodien (Liese W. & Ding Y., 1995)

3.2.2 Faserzellen

Die Fasern verleihen dem Halm die Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften und bestimmen seine physikalischen und mechanischen Eigenschaften (Liese W., 2003). Sie sind Bestandteil der Gefäßbündel und sie umhüllen oder verpacken die zwei Postxylemgefäße, das Protoxylem und das Phloem. Die Faserbündel bilden ein Paar Scheiden um diese herum, aber bei einigen Arten kommen getrennte Scheiden und gleichzeitig zerstreute Faserbündel im Parenchymgewebe vor, wie es bei den Arten *Dendrocalamus latiflorus* (als taiwanischer Riesenbambus bekannt) und *Phyllostachis pubenses* (als Mosobambus gekannt) der Fall ist. Das Ausmaß der Gefäßbündel ist klein und befinden sich im unteren Teil der Rindenschicht. Im Allgemeinen hat der Mosobambus keine Zelltracheiden, aber beim taiwanischer Riesenbambus kommen ein paar Zelltracheiden vor (Hsieh J.S., *et al.* 1991).

Auch die Durchmesser der Fasern variieren über die Dicke der Halmwand. Die Fasern, die sich im Randteil befinden, haben einen Durchmesser von 2 ~ 6 μm , in der Mitte und im Innenteil der Halmwand beträgt der Faserdurchmesser 4 ~ 20 μm . Im Fall des taiwanischen Riesenbambus können sogar bis zu 40 μm erreicht werden (Hsieh J.S. *et al.*, 1991). Während der mittlere Durchmesser der Bambusfasern zwischen 11 ~ 19 μm schwankt, variiert der Durchmesser des Lumens zwischen 2 ~ 4 μm und die Dicke der Zellwand zwischen 4 ~ 6 μm (Liese W., 1985).

Die Fasern haben eine schlanke Form, aber unter den Gattungen existieren große Unterschiede hinsichtlich ihrer Länge. Die Länge beträgt ungefähr 1,5 ~ 2,8 mm (Liese

W., 1985), oder von 1,0-1,9-2,5 mm (Liese W., 2003). Nach Qisheng Z. *et al.* (2001) kann die Länge sogar 4,5 mm erreichen.

Im Allgemeinen liegen die größten Werte und damit die längsten Fasern in der Mitte des Internodiums vor. Von der äußeren Halmwand bis zur Innenseite nimmt die Länge und die Anzahl ab, während infolgedessen die Menge der Parenchymzellen von innen nach außen abnimmt. Ungefähr 50% der Fasern befinden sich im äußeren Drittel der Halmwand (Liese W., 2003). In longitudinaler Richtung nimmt die Anzahl der Fasern von der Halmbasis zum oberen Bereich des Halmes zu, während auch hier eine Abnahme der Menge von Parenchymzellen aufgrund der Formverengung des Halmes festzustellen ist (Liese W., 2003).

Der Faseranteil sowie die Faserlänge, der Durchmesser und die Dicke der Zellwand bestimmen das spezifische Gewicht oder Dichte des Halmes. Diese variiert im Halm bzw. in der Halmwand von ca. 0,5-0,9 g/cm³ (Liese W., 2003). Sie steigt innerhalb der Halmwand von innen nach außen an und nimmt im Halm von unten nach oben zu. Die Dichte variiert aber auch zwischen den Nodien und den Internodien. Im Falle der *Guadua angustifolia* ist die Faserdichte des Nodiums um 20% höher als über die gesamte Länge der Internodien.

Die *Guadua angustifolia* gehört zu der Gruppe der "pachymorph", die durch einen oder zwei Faserstrahlen in ihren Gefäßbündeln identifiziert werden (Hsieh J.S., *et al.* 1986; Londoño X. *et al.* 2002). Da diese keine gesonderten Faserscheiden an den Gefäßbündeln haben, ist der prozentuale Faseranteil gering. Die Ausdehnung der Gefäßbündel ist länger als die anderer Gattungen. Das Format der Gefäßbündel in der Nähe der Epidermis ist im Vergleich zu anderen Arten um 50% größer. Die Leitbündelform in der Wandmitte ist gleich und verändert sich nicht vom zweiten Internodium bis zum 30. Internodium, aber die Größe der Bündel nimmt von unten nach oben ab, (Tabelle 3.1) Die *Guadua angustifolia* zeigt einige spezielle Ergebnisse bezüglich der anderen untersuchten Arten (Wang Y.C. *et al.* 1991). Interessant ist die Beobachtung, dass bei *Guadua angustifolia* keine von den Gefäßbündeln isolierte Fasergruppen vorkommen.

(Tabelle 3.2) zeigt, dass die *Guadua angustifolia* im Durchschnitt aus 77% Parenchym und 9% Fasern besteht. Diese Werte sind deutlich über dem Durchschnitt, der bei 56,6% Parenchym und 29,3% Fasern liegt. Diese Angaben weisen so extreme Werte auf, dass eine Überprüfung zum Thema erforderlich erscheint.

	<i>Bambusa dissemulator</i> Mc Clure	<i>Bambusa Textilis</i> Mc Clure	<i>Bambusa tulda</i> Roxburgh	<i>Bambusa Tuldoidea</i> Munro	<i>Bambusa varigata</i>	<i>Gigantochloa apus</i> (Schultes) Kurz	<i>Gigantochloa verticilata</i> (Willdenow) Munro	<i>Guadua Angustifolia</i> Kunth	<i>Schizostachyum zollingeri</i> steudel
Die Anzahl der Gefäßbündel in 1 mm	1	2~3	1	1~2	2	1	1	2	1~2
Die Form der Gefäßbündel	Kreuz	kurzes Kreuz	kurzes Kreuz	Dreieck	Dreieck	kurzes Kreuz	kurzes Kreuz	Dreieck	kurzes Kreuz
Der Durchmesser (µm) des Metaxylemgefäß	120-150	70-80	120-150	150-200	80-120	110-160	90-160	110-150	90-125
Die Dicke (µm) der Metaxylemgefäßwand	5.0	2.0	3.5	4.0-5.0	2.5	3.0	3.50	2.5	2.5
Die Anzahl der Faserkappen, die das Metaxylem umhüllen	7~9	4~7	8~12	8~12	6~8	4~7	4~7	4~6	4~7
Die Anzahl der Faserkappen, die das Protoxylem umhüllen	3~7	3~7	3~6	5~8	2~5	3~5	3~6	3~6	3~5
Anzahl der Siebröhren	10~17	13~17	16~20	7~13	12~17	10~18	10~15	11~17	13~15
Die Anzahl von Faserkappen, die das Phloem umhüllen	11~16	12~15	10~13	10~13	6~13	6~9	5~7	11~15	7~10
Die Anzahl der Fasern, mit einer einzigen Umhüllung	1	1	1, 2	1	1	1, 2	1, 2	No	1

Tabelle 3.1: Anatomische Eigenschaften der Gefäßbündel der *Guadua angustifolia* Kunth, im Vergleich mit anderen Arten (Wang Y. C., et al. 1991)

Art	Halmbasis			Halmmittle			Spitze			Durchschnittswert		
	Parenchym (%)	Faser (%)	Leitgewebe (%)	Parenchym (%)	Faser (%)	Leitgewebe (%)	Parenchym (%)	Faser (%)	Leitgewebe (%)	Parenchym (%)	Faser (%)	Leitgewebe (%)
<i>B. dissemulator</i>	60.50	30.00	9.50	56.50	30.00	13.00	57.00	31.50	11.50	58.00	30.70	11.30
<i>B. Textilis</i>	54.50	35.50	10.00	47.50	36.00	16.50	51.00	34.00	15.00	51.00	35.20	13.80
<i>B. tulda</i>	63.20	25.80	11.00	52.00	35.00	13.00	39.00	37.00	24.00	51.40	32.60	16.00
<i>B. Tuldoidea</i>	67.80	22.50	9.70	50.00	33.00	17.00	46.00	33.50	20.00	54.80	29.70	15.50
<i>B. varigata</i>	62.50	30.00	7.50	50.00	34.00	16.00	50.00	37.50	12.50	54.20	33.80	12.00
<i>Gigant. apus</i>	64.00	28.70	7.30	54.00	30.50	15.50	50.00	33.80	16.20	56.00	31.00	13.00
<i>Gigant. verticilata</i>	60.00	30.00	10.00	50.00	35.00	15.00	47.00	30.00	23.00	52.30	31.70	16.00
<i>G. Angustifolia</i>	74.00	14.50	11.50	76.00	7.00	16.50	81.00	5.50	14.00	77.00	9.00	14.00
<i>S. zollingeri</i>	57.00	32.00	10.50	54.00	30.00	16.00	50.00	27.00	23.00	53.80	29.70	16.50
Durchschnittswert	62.80	27.80	9.40	54.50	30.10	15.40	52.40	30.00	17.60	56.60	29.30	14.10

Tabelle 3.2: Prozentuale Zusammensetzung verschiedener Halmabschnitten von 9 Arten (Wang Y. C., et al. 1991)

Nach (Londoño X. et al. 2002) besteht die *Guadua angustifolia* aus 51% Parenchym, 40% Fasern und 9% Leitgewebe. Trotzdem setzen neue Studien im Fall der *G. angustifolia* (Londoño X. et al. 2002) andere Prozentwerte für den Faseranteil bezogen auf die Gesamtfläche der Gefäßbündel fest. Diese sind abhängig von der Position in der Halmwand und schwanken für jedes Gefäßbündel zwischen 65% und 97%. Diese größeren Prozentwerte treten in der Randzone und in der Übergangzone der Wand von 90% bis 97%, in der mittleren Zone von 65% bis 87% und im inneren Bereich von 65% auf. Der gesamte Faseranteil, die Gefäßbündel eingeschlossen, liegt bei 56% im apikalen Teil, bei 26% mittleren Teil und bei 29% in der Halmbasis.

Die Zellwand einer Faser setzt sich aus einer größeren Zahl von Lamellen mit verschieden orientierten Mikrofibrillen zusammen, ähnlich dem Sperrholz (plywood), was die Fasern flexibler macht. (Liese W., 2003).

3.2.3 Das Parenchym

Die Parenchymzellen, (Abb. 3.2) bilden ein transversales Grundgewebe in der Halmwand, das die Gefäßbündel umgibt, (Grosser und Liese W., 1971; Liese W. 1998). Die Parenchymzellen mit den Gefäßbündeln tragen zur *"Elastizität des Bambusses"* bei (Liese W., 2003). Sie sind aus kleinen Zellen in Form von Würfeln mit einer Größe von 100 x 20 µm (Liese W., 1985) und aus dünnwandigen länglichen Zellen zusammengesetzt, die im Alter durch Anlagerung von Lamellen verdickt werden (Liese W., 2003).

Nach (Londoño X. *et al.* 2002) wird das Parenchymgewebe im tangentialen longitudinalen Schnitt durch lange und kurze Zellen gebildet, die in den ersten Wachstumsetappen des Schösslings lignifiziert werden. Die langen Zellen besitzen eine dickere Wand, während die Zellwände der kurzen, mehr kubischen Zellen dünner sind. Sie sind durch dichtes Cytoplasma und feine Wände charakterisiert. Die Parenchymzellen sind viel kleiner als die anderen Teile des Zellgewebes (Gefäßbündel) und haben viele Tüpfel (Qisheng Z., *et al.* 2001). Diese „Löcher“ stellen einen entscheidenden Faktor bei der Diffusion auf Zellebene dar.

Bei der Diffusion müssen die Ionen diese Zellwände passieren (Liese W., 2003). Die Parenchymzellen haben ein großes Volumen und bilden den Speicherort für die Nahrung und Nährstoffe des Halmes, insbesondere für Stärke und lösliche Kohlenhydrate, die den Bambus zu einer attraktiven Nahrung für holzfressende Insekten machen (Liese W., 2003). Die Zellen sind miteinander durch Tüpfel verbunden, welche sich hauptsächlich an den tangentialen Wänden befinden, um somit die radiale Verbreitung von Schutzlösungen zu fördern (Liese W., 2003). Das Parenchym ist ein wichtiger Faktor für die Aussteifung und die Stabilität des Halmes im Rahmen seiner zukünftigen Verwendung. Daher ist die Behandlung des Parenchyms von großer Wichtigkeit für den Holzschutz und die Trocknung des Bambus.

3.2.4 Die Rinde

Die Rinde ist der äußere Teil des Bambushalms. Nach Londoño X. *et al.* (2002) ist die Rinde in verschiedene Teile gegliedert: Kutikula, Epidermis, Hypodermis und die Rindenzone. Bei *Guadua angustifolia* besteht die Epidermis aus langen und kurzen Zellen mit Stomata². Die kurzen mit Silica gefüllten Korkzellen liegen paarweise inmitten der länglichen Zellen. Die Hypodermis ist aus 2-3 dicken Schichten Sclerenchymzellen aufgebaut. Im Querschnitt sind ihre Zellen quadratisch oder rechteckig geformt. Einige Forscher (Qisheng Z., *et al.* 2001) nennen diese Schicht Unterhaut. Die parenchymatische Rindenzone der *Guadua angustifolia* ist homogen und aus 8 bis 10 Zellschichten aufgebaut (Londoño X. *et al.* 2002).

² Stomata: griech. Stoma oder Mund, durch welche der Gasaustausch einer Pflanze erfolgt

Die hohe Silicatkonzentration in der Epidermis von *Guadua angustifolia* trägt zu ihrer Härte bei. Die Untersuchung ihrer Beschaffenheit ist für die industrielle Verarbeitung, wie Parkett für z.B. Fußboden, wichtig, da es ein abschleifendes Material ist, das schnell die Werkzeuge bei den Produktionsprozessen abstumpft. Die Epidermis enthält bei einigen Bambusarten häufig eine wachsartige Schicht. Ihre Existenz bei *Guadua angustifolia* ist aber noch nicht bewiesen (Londoño X. *et al.* 2002).

Es ist eine wichtige Funktion der Rinde, den Stängel vor physischen Schäden zu schützen und den Verlust von Wasserdampf aus dem Spross an die Atmosphäre zu vermeiden. Diese kompakte, undurchlässige Rindenform ist aber hinderlich bei der späteren Anwendungen von Schutzbehandlungen, da die Flüssigkeitsaufnahme im Tauchverfahren sehr gering ist.

3.3 Chemische Zusammensetzung von *Guadua angustifolia*

Die chemische Zusammensetzung ist von großer Bedeutung bei der Holz Trocknung, da sie die elektrische Leitfähigkeit beeinflusst. Im Allgemeinen steigt mit wachsendem Lignin- und Feuchtegehalt die elektrische Leitfähigkeit im Holz (Alvarez H. & Fernandez-Golfin J.I., 1992). Das Gleiche gilt für den Bambus mit Bezug auf den Ligningehalt. Die gleichen Autoren weisen außerdem auf den Einfluß von Vorbehandlungen hin, denen der Bambus unterworfen wurde.

Untersuchungen mit Holz haben gezeigt, dass bei chemischen Behandlungen mit in Wasser gelösten Salzen, Säuren (Borax und Borsäure) oder Laugen der Wert des Feuchtegehaltes aufgrund der Elektrolyte oftmals überschätzt wird, weil sich durch die beigegebenen Elektrolyte der Widerstand verringert.

Über die chemische Zusammensetzung von *Guadua angustifolia* gibt es nicht viele Informationen. Doch in neuen Studien (Beraldo A.L. *et al.*, 1998) wurden Vergleiche realisiert, bei denen ihr Cellulosegehalt mit dem von zwei anderen großen Arten *Dendrocalamus giganteus* und *Gigantochloa verticillata* verglichen wurde. Das Ergebnis zeigt Werte für *Guadua angustifolia*, von jeweils ungefähr 52% in der Basis, 52% in der Mitte und 50% in der Spitze des Halmes. Daraus ergibt sich ein Mittelwert von 51,3%.

Die elementare Zusammensetzung des Holzes ist weitgehend unabhängig von den Holzarten, sowie in allen Teilen des Baums (Kollmann F., 1959), wie Stamm und Äste. Folglich sind die Näherungswerte dieses Autors ~ 50% C (Kohlenstoff), 6% H₂ (Wasserstoff), 43% O₂ (Sauerstoff) und nur ein kleiner Teil von 1% N₂ (Stickstoff) und mineralische Elemente, letztere als Asche zusammengefasst (Kollmann F., 1959).

Die molekularen Hauptbestandteile des Bambushalms sind Cellulose, Hemicellulose und Lignin. In geringen Mengen kommen Harze, Tannin, Fette und anorganische Salze vor. Um die verschiedenen Autoren zu verstehen, die das Thema der chemischen

Zusammensetzung des Bambusses bearbeitet haben, werden wir zur Darstellung der Zusammensetzung des Holzes das folgende Diagramm zu Hilfe nehmen (Abb. 3.4).

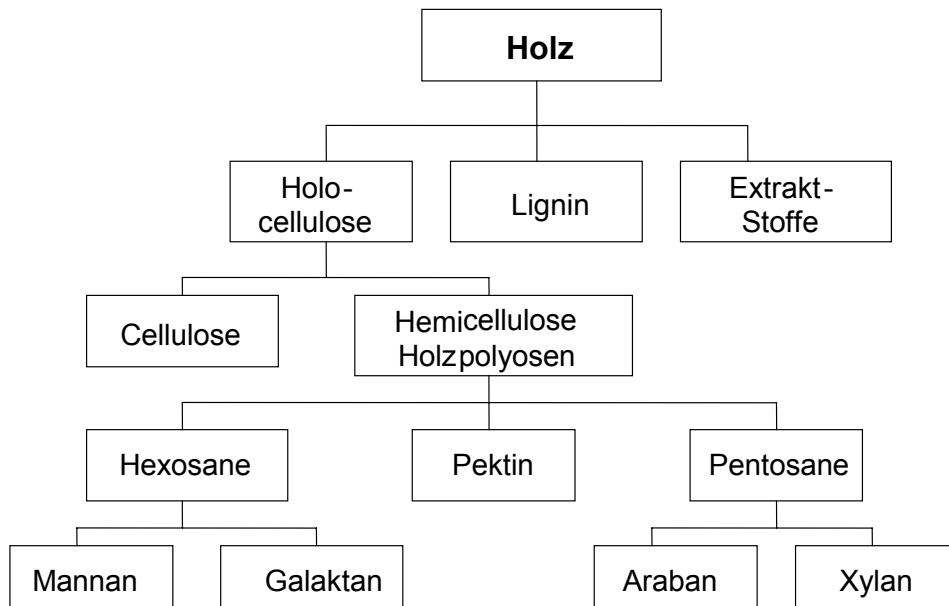


Abb. 3.4: Chemische Zusammensetzung von Holz, (Lohmann U., 1980)

Im Holz erfüllen die Cellulose, sowie zu einen geringen Anteil die Hemicellulosen eine strukturelle Funktion. Das Lignin ist der Zement, der die Strukturen auf zellwand ebene miteinander verbindet (Lohmann U., 1980; Kollmann F., 1959) Daher ist die Cellulose so wichtig für die Zugfestigkeit, während das Lignin für die Druckfestigkeit entscheidend ist (Lohmann U., 1980).

Im Falle des Bambusses ist es wichtig die Begriffe betreffend der chemischen Zusammensetzung gut zu definieren, da es sich hierbei um die gleichen Substanzen wie im Holz handelt, wenn auch mit kleinen Unterschieden in ihre Vorkommenen. In diesem Zusammenhang kann so der Durchschnittswert der verschiedenen Holzarten für den Vergleich verwendet werden, (Tabelle 3.3).

Es scheint, dass im Allgemeinen keine klare Differenzierung für den Prozentsatz von Cellulose, Hemicellulose und Lignin existiert. Sie bilden die Hauptbestandteile, deren Variation insbesondere von der Art, den Standortbedingungen und vom Alter des Baumes zum Schlagzeitpunkt abhängen. Die Angaben in (Tabelle 3.3) zeigen bedeutende Unterschiede in der Hemicellulose, zwischen den Nadelhölzern und Laubbäumen. Die Nadelhölzer haben einen doppelt so hohen Wert an Hexosen wie die Laubbäume.

Art	Klassifizierung	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)		Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Harz /Fett (%)	Asche (%)
			Hexosane (%)	Pentosane (%)				
Tanne	Nadelholz	42,3	13,3	9,2	22,5	28,6	2,3	1,2
Kiefer	Nadelholz	41,9	12,8	8,7	21,5	29,5	3,2	1,3
Esche	Laubholz	40,2	5,7	19,3	25	26,0	2,2	1,3
Buche	Laubholz	45,4	4,4	17,8	22,2	22,7	0,7	1,6
Birke	Laubholz	40,9	4,8	22,3	27,1	27,3	2,2	1,8
Pappel	Laubholz	48,4	3,0	15,2	18,2	21,6	2,4	1,3
Weide	Laubholz	42,9	5,1	16,8	21,9	24,7	2,0	1,2
Mittelwert		43,1	7,0	15,6	22,6	25,8	2,1	1,4

Tabelle 3.3: Chemische Zusammensetzung verschiedener Holzarten (Lohmann U., 1980)

Umgekehrt ist es bei den Pentosen, hier haben die Nadelbäume einen halb so hohen Anteil wie die Laubbäume. Bei dem Anteil des Lignins werden auch hier Differenzen beobachtet. So ist der Ligninanteil der Nadelhölzer höher als der der Laubhölzer, obwohl die Werte zwischen 20 und 30% liegen.

	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Harz/Fette (%)	Asche (%)
Nadelholz	41~43	21~23	27~30	2~3	1,2~1,3
Laubholz	40~48	18~27	20~27	0,5~2,5	1,2~1,8

Tabelle 3.4: Zusammenfassung der chemischen Zusammensetzung (Lohmann U., 1980)

Die molekulare Zusammensetzung des Bambusses ist der des Holzes ähnlich. Die Bestandteile sind ungefähr die Gleichen (Qisheng Z., *et al.* 2001). Insbesondere sind es: ~55% Cellulose, ~25% Lignin und 20% (Pentosane) Hemicellulose. Mehr als 90% der Hemi-cellulose (Abb. 3.4) ist den Xylanen oder Pentosen zuzurechnen. Aus diesem Grund verwenden einige Autoren in ihrer Literatur den Begriff Pentose anstatt Hemicellulose. Die chemische Zusammensetzung des Xylans besteht aus D-glucuranate arabinoxylan, die 4-oxigen-methyl-D-glucuranate enthält, L-arabinose, und D-xylose, mit jeweils einem Verhältnis in mol von 1,0: 1,0~1,3 : 24~ 25 (Qisheng Z., *et al.* 2001).

Die Anteile an Arabinose und Xylanen unter den Pentosen ist bei den Nadelhölzern und Laubhölzern verschieden (Abb. 3.4). Der Pentosegehalt im Bambus schwankt zwischen 19 ~ 23% (90% sind Xylane), dieser Wert ist etwa gleichgroß, wie bei den Laubhölzern. Ein großer Unterschied besteht zu den Nadelhölzern, welche einen Pentosegehalt von 8~15%, (Tabelle 3.3) (Qisheng Z. *et al.* 2001) aufweisen.

Wie auch bei den Nadel- und Laubhölzern nimmt auch im Bambus das Lignin den zweithöchsten Mengenanteil nach der Cellulose ein. Das Lignin des Bambusses ist vom krautartigen Typ, zusammengesetzt aus Paradinum, Guaiacyl und Mauve in einem Verhältnis von 10: 68: 22 (Qisheng Z. *et al.* 2001). Dies bedeutet, dass das

Lignin des Bambusses dem Lignin der Laubhölzer ähnlich ist. Lignin gehört nicht zu den Kohlenhydraten in den Zellwänden. Es ist verantwortlich für die Steifigkeit und Festigkeit der Bambuspflanze.

In der Papierherstellung trägt Lignin zur chemischen Degradierung bei. Es verursacht eine gelbliche Farbveränderung und einen Verlust des Papiergefüges. Für die Papierherstellung bedeutet ein niedriger Ligningehalt im Bambus einen geringeren Bedarf an Chemikalien in der Zellstoffproduktion und erleichtert die Zellstoffverarbeitung.

Der Bambus wächst sehr schnell. Bei diesem Wachstum zeigen sich Verholzungen in verschiedenen Stufen, von der Basis bis zur Spitze des Halmes. Nach Itoh & Shimaji (1981, in Liese W., 1985) schreitet die Lignifizierung in dem Internodium von der Spitze bis zur Basis fort, während sie im Querschnitt von innen nach außen vorrückt. Während der Verholzung der Epidermiszellen und der Fasern rückt sie über das Parenchymgewebe vor. Die Verholzung ist beendet, wenn der Wachstumsprozess des Sprosses beendet ist. Nach Higuchi *et al.* (1966, in Liese W., 1985) gibt es keine Unterschiede in der Zusammensetzung des Lignins zwischen Parenchym und Gefäßbündel.

Art	Fechte- gehalt %	Lignin (%)	Cellulose (%)		Hemi- cellulose (%) (Pentos.)	Asche (%)	Silizi- um (%)	löslich heißes Wasser (%)	löslich kalten Wasser (%)	löslich 1% NaOH (%)	löslich Alcohol Benzol (%)
			Holo- (%)	α -Alfa (pure Cell.)							
<i>Gigantochloa scortechinii</i> (Jamalundin, <i>et al.</i> 1992)		26,4	67,4			1,2		5,9	4,8	19,4	3,3
<i>Gigantochloa levis</i> (Jamalundin & Abd.Latif 1993)		24,9	65,4	36,3		1,7	2,8*	6,0	4,5	25,8	2,0
<i>Gigantochloa aspera</i> (Tamolang, <i>et al.</i> 1980)		25,5	61,3		19,6	4,1	2,4	3,8		21,9	5,4
<i>Bambusa vulgaris</i> (Jamalundin & Abd.Latif 1993)		23,3	68,7	40,5		1,9	1,5*	5,8	4,5	23,8	4,2
<i>Bambusa blumeana</i> (Nor Azah & Azmy 1991)		21,6	69,1	42,7				7,3	4,3	23,3	3,8
<i>Schizostachyum zollingeri</i> (Nor Azah & Azmy 1991)		21,4	71,5	50,6				7,3	4,1	18,4	2,5
<i>Phyllostachys pubescens</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	9,8	24,8	75,1	59,8	22,9	1,1		8,1	8,3	29,3	3,7
<i>Bambusa textilis</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	10,5	19,4	79,4	50,4	20,8	2,1		6,3	7,6	30,6	3,7
<i>Bambusa pervariabilis</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	11,7	21,4	73,3	48,2	20,3	2,3		7,6	7,7	30	2,2
<i>Bambusa sinospinosa</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	11,5	20,5	74,5	49,2	20,7	1,9		9	9,9	30,3	5,5
<i>Lingnania chungii</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	10,3	21,4	73,7	47,7	18,7	2,1		8,1	9,5	30	4,4
<i>Phyllostachys heteroclada</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	8,4	22,4	72,0	58,2	20,4	1,2		13,6	9,6	30,9	5,8
<i>Phyllostachys nigra</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	7,8	24	73,6	58,9	22,1	1,8		10,7	8,53	33,2	5,3
<i>Phyllostachys bambusoides</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	9,1	22,4	72,7	56,7	22,5	1,3		10,5	9	29,9	7,3
<i>Phyllostachys meyeri</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	8,3	23,6	72,8	57,9	22,4	1,3		10,8	8,9	34,3	7
<i>Phyllostachys praecox</i> (Youdi C., <i>et al.</i> 1985)	8,2	24,7	73,3	56,1	22,2	2		11,2	7,7	32,8	3,8
Durchschnitt	9,6	23,0	71,5	50,9	21,1	1,9	2,4	8,3	7,3	27,7	3,4
Xmin	7,8	19,4	61,3	36,3	18,7						
Xprom.	9,6	23,0	71,5	50,9	21,1	1,9	2,4	8,3	7,3	27,7	3,4
Xmax	11,7	26,4	79,4	59,8	22,9						
SD	1,3	2,0	4,3	7,7	1,4						
KV%	12,5	8,6	6,0	15,1	6,4						

Tabelle 3.5: Chemische Zusammensetzung verschiedener Bambusarten (Youdi C., *et al.* 1985; Liese W., 1985; Abd. Latif M., 1993a; Abd. Othman R., *et al.* 1995)

Da keine Untersuchungen über die chemischen Zusammensetzung von *Guadua angustifolia* vorliegen, wurde eine tabellarische Zusammenstellung der Daten einiger Bambusarten gemacht, die schon früher untersucht worden sind (*Tabelle 3.5*). Es wurden einige Autoren konsultiert, um ungefähre Angaben der chemischen Hauptkomponenten des Bambus zu erhalten. Allerdings lassen sich diese Arten in Wirklichkeit nur schwer vergleichen, da keine Informationen über die Vorgehensweise bei der Entnahme der Proben, über das Alter, die Position im Halm und ob sie grün (gerade geschnitten) oder trocken waren, existieren. Trotzdem ist es wichtig alle diese Variablen zu kennen, um Vergleiche durchführen zu können. Die Angaben von Youdi C., *et al.* (1985) wurden an Proben unter Beachtung der chinesischen Norm „Analytical Method for Material of the Pulp and Paper“ gewonnen.

In (*Tabelle 3.5*) wurden folgende Durchschnitte für die chemischen Hauptkomponenten des Bambusses berechnet: ~23% Lignin; ~51% Cellulose, ~21% Hemicellulose. Diese Angaben werden mit der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen Hölzer der *Tabelle 3.3* verglichen: ~25,8% Lignin; ~43,1% Cellulose; 22,6% Hemicellulose. Es zeigt sich, dass im Bambus die Cellulose einen höheren Anteil als in den Hölzern der genannten Tabelle hat. Der Gehalt an Lignin und Hemicellulosen liegt aber leicht unter dem der Hölzer. Der Anteil der Hemicellulose liegt im Bambus bei ~20,5%, während er im Nadelholz nur bei ~22% und bei den Laubhölzern bei ~23% liegt.

	Cellulose (%)	Hemi-cellulose (%)	Lignin (%)	Harz/Fett (%)	Asche (%)
Nadelholz	41~43	21~23	27~30	2~3	1,2~1,3
Laubholz	40~48	18~27	20~27	0,5~2,5	1,2~1,8
Bambus	41~59	19~23	20~ 26		1,1~4,2

Tabelle 3.6: Bereiche der chemischen Zusammensetzung von verschiedenen Bambusarten, Nadelhölzern und Laubhölzern.

Verallgemeinernd kann man sagen, dass Bambus größere Ähnlichkeiten mit den Laubhölzern hat als mit den Nadelhölzern. Beim Lignin wird dies deutlich sichtbar. Hinsichtlich der Hemicellulosen sind die Nadelhölzer sowie die Laubhölzer dem Bambus ähnlich. Zwischen den Koniferen, den Bambussen und natürlich auch den Laubbäumen werden Unterschiede beim Ligningehalt deutlich.

Auch in Bezug auf den Aschegehalt gibt es große Unterschiede. Dies zeigt, dass der Bambus mehr mineralische Bestandteile als die Laub- und die Nadelhölzer besitzt. Der Aschegehalt im Bambus bewegt sich daher im Bereich von 1,1 bis ungefähr 4,2%. Der Grund hierfür könnte die starke Epidermis und insbesondere das Silizium in der Rinde sein.

Untersuchungen von Youdi C., *et al.* (1985) über die chemischen Bestandteile von Bambus sind in *Tabelle 3.5* zu sehen. Youdi untersuchte dabei 10 von 16 Bambusarten verschiedener Altersstufen, d. h. nach einem halben Jahr, nach einem Jahr und nach drei Jahren, und entdeckte hierbei kleine Veränderungen hinsichtlich der chemischen Bestandteile, wie zum Beispiel der Cellulose und des Aschegehaltes, welche sich mit dem Alter des Bambus etwas verringert haben. Die Bambusse mit hohem Holocellulosegehalt und niedrigem Ligningehalt, wie *Bambusa textiles*, *Phyllostachys pubescens* und *Phyllostachys heteroclada*, eignen sich gut für die chemische Verarbeitung.

3.4 Physikalische und mechanische Eigenschaften

Für den Bambus sind die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Die „Festigkeit“ im Bambus hängt von mehreren Faktoren ab, von der Art, vom Alter, vom Feuchtegehalt im Halm und von den klimatischen Bedingungen unter denen er gewachsen ist (Limaye V.D., 1952; Sekhar A.C. *et al.*, 1960).

Die mechanischen Eigenschaften verbessern sich durch die techn. Trocknung sowie durch Freilufttrocknung. Die Proben werden in der Trockenkammer oder im Freien getrocknet. Die Biegefestigkeit vergrößerte sich nach dem Trocknen im äußeren Teil um 38% und im inneren Teil um 11%. Die Scherfestigkeit erhöhte sich um 60%.

Mit abnehmender Feuchte, ausgehend von $12,5 \pm 0,5\%$ bei der Freilufttrocknung bis hin zu einem Feuchtegehalt von $1,0 \pm 0,5\%$ bei der Kammertrocknung erhöht sich laut Suzuki Y. (1950) die Härte für die Art *Phyllostachys pubescens* um 44% im äußeren Teil in „t“(tangentialer)/ „l“(longitudinaler) Ebene, um 48% an der äußeren Seite in „r“(radialer)/„l“(longitudinaler) Ebene; 106% im Innern in t-l Ebene und um 117% im Innern in r-l Ebene.

Diese Veränderung der verschiedenen mechanischen Eigenschaften wurden auch bei luftgetrocknetem *Guadua angustifolia* gemessen (Sotela J., 1990). Eine Schwindung wurde bei den an der Luft getrockneten Proben und bei den in der Trockenkammer getrockneten Proben festgestellt. Die Schwindung in der Trockenkammer war um 2% größer.

3.4.1 Physikalische Eigenschaften

3.4.1.1 Feuchtigkeitsgehalt

Der Feuchtegehalt u , bezogen auf den trockenen Zustand im Holz und im Bambus wird durch das Trockengewicht und durch das Gewicht der feuchten Probe m_g bestimmt.; er kann auch in Prozent ausgedrückt werden (Kollmann F., 1959).

$$u = \frac{m_g - m_d}{m_d} [kg / kg] \quad (3.1)$$

$$u = \frac{m_g - m_d}{m_d} \times 100 [\%] \quad (3.2)$$

Der Feuchtegehalt im Bambus beeinflusst direkt das Verhalten seiner Eigenschaften; Er variiert entlang der Länge, mit dem Alter und mit dem Erntezeitpunkt (Liese W., 1985; Sattar M. A., *et al.* 1991; Liese W. & Kumar S., 2003). Der Bereich an der Halmbasis ist am feuchtesten während die Spitze am trockensten ist (Sattar M. A., *et al.* 1991; Gnanaharan R., 1991; Abd. Latif M., 1996; Liese W. & Kumar S., 2003). Außerdem variiert der Feuchtigkeitsgehalt zwischen den Nodien und Internodien.

In den grünen oder unreifen Bambussen gleicher Art tritt die Feuchtigkeit viel schneller aus dem Halm aus als bei den reifen Halmen. Allerdings beansprucht die Trocknung seines hohen Anfangsfeuchtegehalts viel Zeit (Abd. Latif M., *et al.* 1993a; Abd. Latif M., 1996; Abd. Razak O. *et al.* 1995).

Die Unterschiede im Feuchtegehalt sind aber auch mit den Unterschieden in der anatomischen Struktur verbunden. Der Anteil an Parenchym korrespondiert mit seiner Fähigkeit Wasser einzulagern (Suzuki Y., 1950b; Liese W. & Grover P, 1961). Der Feuchtegehalt variiert seinerseits über die Wanddicke. Er ist höher im Innenteil als im äußeren Teil der Wand (Suzuki Y., 1950b; Liese W., 1985).

Die Jahreszeit hat großen Einfluss auf den Feuchtegehalt in den Halmen. In trockenen Perioden ist er minimal, in Regenperioden ist er am maximal höchsten, in extremen Fällen kann sich der Feuchtgehalt verdoppeln (Liese W., 1985),

In Untersuchungen von Abd. Latif M. (1996) und Abd. Latif M. & Liese W., (1998) wurde der Feuchtigkeitsgehalt für zwei Arten überprüft. Während des Untersuchungszeitraumes (zwei Jahre) variierten die Werte von 50% bis zu 220% bei der Art *G. scortechinii* und von 47% bis zu 157% bei der Art *B. vulgaris*. In diesen Schwankungen ist sowohl ein topographischer Faktor als auch der Zeitpunkt des Einschlags als Faktor enthalten.

Dieser Zusammenhang ist wichtig, wenn am Ende der Trocknung gute Ergebnisse erreicht werden sollen, sei es nun bei der Freilufttrocknung oder bei der technischen Trocknung. Der Feuchtigkeitsgehalt steht in direktem Zusammenhang mit der Festigkeit des Materials. Im Allgemeinen sind die Festigkeit und die mechanischen Eigenschaften im trockenen Zustand größer, als im grünen (frischen) oder gerade

geschnitten Zustand (Suzuki Y., 1950; Abd. Latif M., *et al.* 1991; Abd. Razak O. *et al.* 1995; Liese W. & Kumar S., 2003).

3.4.1.2 Gleichgewichtsfeuchtegehalt

Das Holz und vor ebenso Bambus sind hygroskopische Materialien. Er reagiert nach den Gesetzen der porösen Körper. Frischer Bambus gibt Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte an die Umgebung ab, bis sich ein Gleichgewichtszustand mit dem Umfeld eingestellt hat (Kollmann F., 1959; Kollmann F. & Côté W., 1968; Hoheisel H., 1989; Álvarez Noves H. *et al.* 1992).

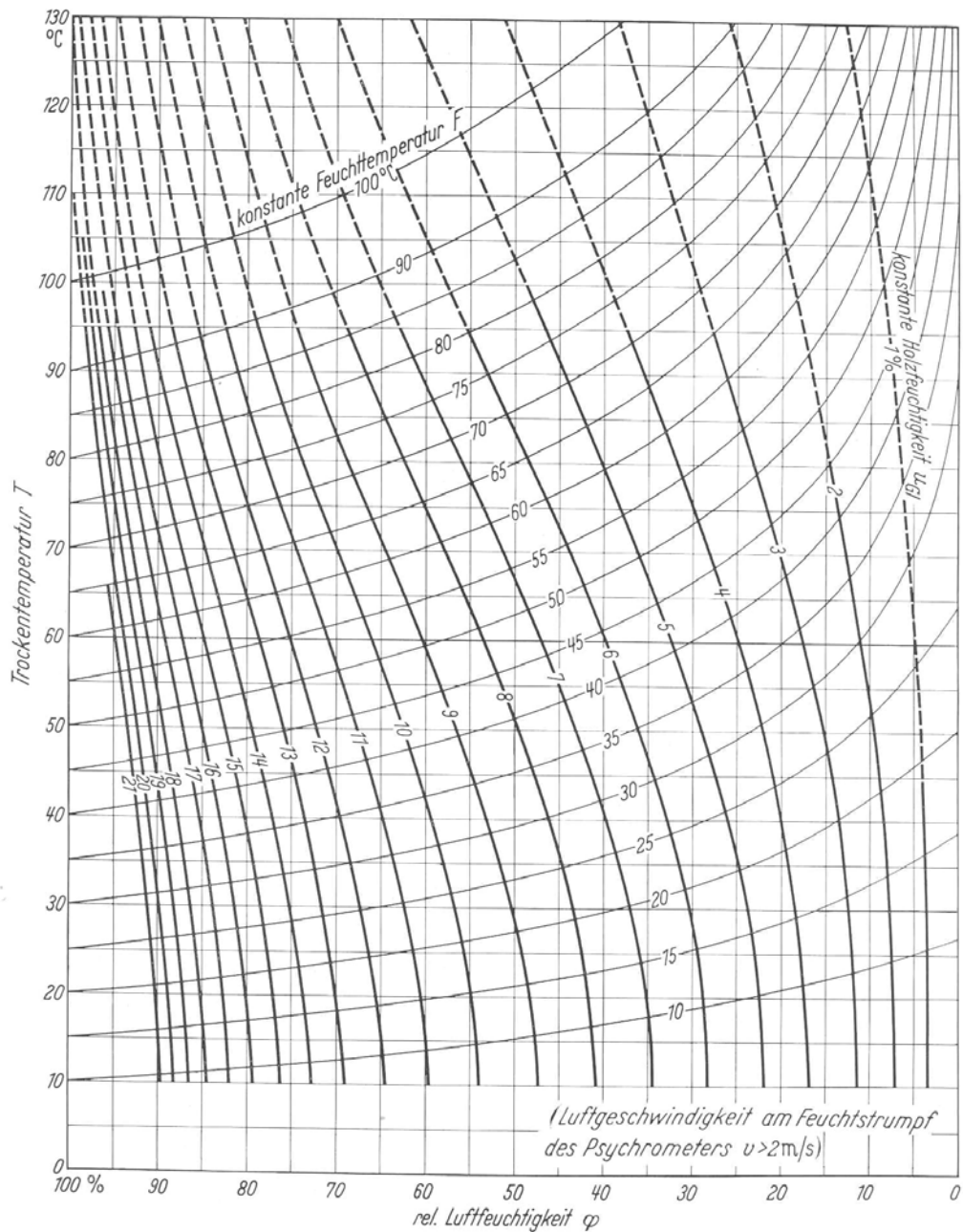


Abb. 3.5: Gleichgewichtsfeuchte-Diagramm (Keylwerth R., 1949; Keylwerth R. & Noack D., 1964; Hawley (1931) in Kollmann F., 1959; Kollmann F. & Côté W., 1968).

Der Feuchtigkeitsgehalt eines hygroskopischen Materials, welches sich im Gleichgewicht mit dem Umgebungsklima befindet, wird Gleichgewichtsfeuchtegehalt (u_{gl}) genannt.

Der Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt ist ein Wert von enormer Tragweite, da jeder Bambus in der Verarbeitung oder im Trocknungsprozess Feuchtigkeit aufnehmen oder verlieren muss um den besagten Wert zu erreichen.

Es sind Untersuchungen gemacht worden um eine Gleichung zu bestimmen, die den Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt berechnen kann (Kollmann F. & Côté W., 1968). Die

Die Gleichgewichtsfeuchte bedeutet sich danach theoretisch aus den drei Parametern, u_1 durch Adsorption, u_2 durch submikroskopisch sichtbare kapillare Kondensation und u_3 durch mikroskopische kapillare Kondensation von freiem Wasser.

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = a\varphi + c_1 * e^{-\frac{1}{2}(b_1\psi-1)^2} + c_2 * e^{-\frac{1}{2}(b_2\psi-1)^2} \quad (3.3)$$

Vorausgesetzt ist $\psi = (\varphi - 1)$ (d.h. $\varphi < 100\%$ bzw. 1,0). Außerdem sind a , c_1 , b_1 , c_2 und b_2 Konstanten, die experimentell bestimmt werden müssen. Der Wert der Gleichgewichtsfeuchte ändert sich mit der Temperatur und besonders mit der relativen Feuchtigkeit der Umgebung.

Der Gleichgewichtsfeuchtegehalt u_{gl} wird generell durch Kurven, wie die aus der *Abb. 3.5* dargestellt. Die Kurven der Grafik ergeben sich aus der Abhängigkeit des Gleichgewichtsfeuchtegehalts des hygroskopischen Materials (Bambus), von der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur des Umgebungsklimas.

Die Kurven (Sorptionisothermen) gleichen sich praktisch bei allen Holzarten sowie bei den Bambusarten. Wenn zum Beispiel ein Bambusstück bei 30°C einer relativen Luftfeuchte von 45% ausgesetzt wird, erreicht es nach *Abb. 3.5* eine Gleichgewichtsfeuchte von ungefähr 8%.

3.4.1.3 Fasersättigungsbereich

Fasersättigungsbereiche (u_{FS}) wird der Feuchtigkeitsgehalt definiert, bei dem kein freies Wasser in den Zellhohlräumen vorliegt, die Zellwände jedoch völlig mit Wasser gesättigt sind. Die Bestimmung stellt sich als schwierig heraus, da die Werte von Holzart zu Holzart variieren (Álvarez Noves H., *et al.* 1992). Holz hat bis einer Temperatur von 20 °C u_{FS} Wert von 22 ~ 32 % (Kollmann F., 1959; Siau J.F., 1984; Hoheisel H., 1989).

Oberhalb Fasersättigung befindet sich tropfbares, freies Wasser in den Zelllumina (Liese W. & Kumar S., 2003). Es muss aber berücksichtigt werden, dass es sich nicht nur um völlig freies Wasser handelt, sondern, dass die Feuchtigkeit durch beachtliche Kapillarkräfte an die Struktur gebunden ist. Diese sind jedoch klein im Vergleich zu den Kräften, die das Quellwasser an die Zellwand binden. Unterhalb Fasersättigung kommt das Wasser vielmehr als eine kolloidal gebundene Flüssigkeit in den Zellwänden in Form von Wasserdampf in den Lumina und Interzellularen vor (Kollmann F., 1959).

Im Falle von Holz liegt die Bedeutung dieser Zone darin, dass oberhalb von ihr die Abmessungen und die mechanischen Eigenschaften des Holzes weitgehend konstant bleiben. Unterhalb Fasersättigung verringert sich mit fallender Holzfeuchte das

Volumen und die mechanischen Eigenschaften verbessern sich (Álvarez Noves H., *et al.* 1992). Im Unterschied zu Holz verringern sich beim Bambus auch oberhalb der Fasersättigungszone die Zellabmessungen bei Wasserentzug. Unterhalb von Fasersättigung verbessern sich die mechanischen Eigenschaften (Liese W., 1985).

Der maximale mögliche Wert der Holzfeuchte u_{max} bezogen auf seine Trockenmasse in einem Holzstück setzt sich zusammen aus dem Durchschnittswert der Fasersättigung (u_{FS}) und am Gehalt an freiem Wasser. Der u_{FS} Wert ergibt sich aus der folgenden Formel (Kollmann F., 1959):

$$u_{max} = u_{FS} + u_k \quad (3.4)$$

Der Gehalt am freien Wasser in den großen Kapillaren und Lumina u_k ergibt sich aus:

$$u_k = \frac{c * v_0 * \rho_w}{m_0} = \frac{1,50 - \rho_0}{1,50 \rho_0}, \quad (3.5)$$

Wobei c = Poren raum anteil,

v_0 = Volumen im Darr Zustand,

ρ_w = Dichte des Kapillerwassers,

m_0 = Holzmasse atro,

ρ_0 = Rohdichte Hoz atro.

Aber, ρ_0 Darr- Rohdict ist u_{max} ergibt sich somit zu:

$$u_{max} = u_{FS} + \frac{1,50 - \rho_0}{1,50 \rho_0}, \quad (3.6)$$

3.4.1.4 Dichte

Die Dichte ist definiert als Masse pro Volumeneinheit bei einem gegebenen Feuchtigkeitsgehalt (Kollmann F., 1959; Lohmann U., 1986). Daher vergrößert sich bei einem Anstieg des Feuchtigkeitsgehalts die Masse sowie auch das Volumen, wobei aber die Masse stärker ansteigt als das Volumen. Die Konsequenz ist eine Erhöhung der Dichte (Hoheisel H. *et al.* 1989; Niemz P., 1993).

Die Dichte kann in [kg/m³] oder in [g/cm³] ausgedrückt werden. Beim Bambus schwankt die Dichte zwischen 0,5 und 0,9 g/cm³ (Liese W., 1985; Abd. Razak O. *et al.* 1995) und laut Qisheng Z. *et al.* (2002) oszilliert sie zwischen 0,4 und 0,9 g/cm³.

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.7)$$

Für Angaben ist der Feuchtegehalt zu bestimmen:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \quad \text{Dichte bei 0\% Feuchtegehalt,} \quad (3.8)$$

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u}, \quad \text{Dichte bei } u \text{ \% Feuchtegehalt,} \quad (3.9)$$

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}}, \quad \text{normale Dichte bei 12\% Feuchtegehalt,} \quad (3.10)$$

(Lagerung im Normalklima 20° C/65% r. h.)

Die Gleichungen (3.8) und (3.10) werden benutzt, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Sie sind auf die Hölzer genau so wie auch auf den Bambus anwendbar. Durch diese Form können verschiedene Eigenschaften verglichen werden. Grundsätzlich hängt die Dichte des Bambusses von der Menge der Gefäßbündel und ihrer Zusammensetzung ab. Die Dichte vergrößert sich vom inneren zum äußeren Bereich der Halmwand und von der Basis bis zur Halmspitze (Liese W., 1985; Abd. Razak O. *et al.* 1995; Qisheng Z. *et al.*, 2002).

Die Dichte der Nodien ist höher als die der Internodien (Ota M., 1953; Liese W., 1985; Qisheng Z. *et al.*, 2002), da in den Nodien weniger Parenchym vorkommt. Die Dichte der Nodien bei der Art *Phyllostachys reticulata* ist um 10% höher als die der Internodien (Ota M., 1953). Trotz dieser hohen Dichte in den Nodien, verringert sich durch die Irregularität der Fasern die Biege-, Druck- und Scherfestigkeit (Liese W., 1985). Die höchste Biegefestigkeit und den höchsten Elastizitätsmodul erhält man in der Halmspitze. Der Grund dafür ist hier die hohe Konzentration von Gefäßbündeln und wenig Parenchym (Liese W., 1985).

3.4.1.5 Rohdichte oder *Specific gravity*

Rohdichte und *Specific gravity* sind nur im Trockenzustand der Zahl nach gleich, solange die Dichte im IS³, oder mit der Wasserdichte in 1 g/cm³ ausgedrückt wird. Diese Eigenschaft wurde schon im Kapitel über die Dichte beschrieben.

Das *Specific gravity* ist der Quotient aus der Trockenmasse eines Holzstückes und dem Gewicht des durch die Holzprobe mit einem gegebenen Feuchtegehalt verdrängtem Wassers (Álvarez Noves H. *et al.* 1992).

³ IS: International System

3.4.1.6 Quellung und Schwindung

Die Schwindung ist vielleicht eine der Eigenschaften, die das Verhalten der Bambushalme aufgrund ihrer anatomischen Form und der weichen Struktur des Parenchyms in den Innenteilen der Halmwand beeinflussen.

Der Bambus verhält sich bei der Trocknung anders als das Holz. Der Bambus beginnt sofort nach dem Einschnitt zu schwinden (Abd. Latif M. *et al.* 1992; Liese W., 1985). Der Beginn der Volumenänderung fällt mit der Migration von Wasser aus den Metaxylemgefäßen zusammen.

Die Schwindung verläuft vom Grünen bis zum darrtrockenen Zustand in etwa gleichmäßig ab. Sie nimmt mit dem Alter und mit der Höhe des Halmes ab. Bei Halmen im ersten Jahr wurde beobachtet, dass die Schwindung in radialer und tangentialer Richtung, verglichen mit drei jährigen Halmen, im Durchschnitt um 15-22% höher war. Dies zeigt, dass die älteren Halme ein beständigeres Verhalten als die Jüngeren aufweisen (Liese W., 1985; 1998). Im Allgemeinen ist ein starkes Schwinden ein Indiz dafür, dass der Bambus in einem zu frühem Alter geschlagen wurde.

Die radiale und tangentiale Schwindung nimmt mit der Höhe des Halmes ab. Das heißt, dass die Halme im oberen Teil eine größere Faserdichte haben und zusätzlich einen niedrigeren Feuchtegehalt. Das Material ist deshalb gegenüber feuchteänderungsbedingter Schwindung beständiger (Abd. Latif M. *et al.* 1996). Untersuchungen von Abd. Latif M. *et al.* (1992) an malaysischem Bambus haben gezeigt, dass bei zweijährigen Halmbasen die radialen Schwindung bei ungefähr 8% und tangentiale bei 19% liegt; die entsprechenden Schwindungswerte für Material aus der Halmspitze liegen bei ungefähr 6% und 12% liegt. Ein hoher Anfangsfeuchtegehalt im Bambus kann zu einer Erhöhung der Schwindung führen. Dies wurde in Untersuchungen bei der Art *Melocanna baccifera* festgestellt (Sattar M.A. *et al.* 1991).

Untersuchungen der physikalischen Eigenschaften und Festigkeiten der *Dendrocalamus strictus* in Indien ergaben, dass die tangentiale Schwindung entlang der Halmlänge konstant ist (Gnanaharan R., 1991). An drei verschiedenen Anbaugebieten, welche sich auf unterschiedlicher Höhe befanden, d.h. 1000m, 200m und 800m üNN, wurde jeweils die Schwindung gemessen. Hierbei ergaben sich jeweils Durchschnittswerte von 11,7%; 11,5% und 7,7%.

Für Hölzer mit größerer Dichte sind die Schwindung und die Quellung erhöht (Kollmann F., 1968). Bei den Experimenten mit der *Dendrocalamus strictus* zeigte sich eine leicht inverse Tendenz (Gnanaharan R., 1991).

Die Schwindung im Bambus beeinflusst die Wanddicke sowie den Umfang. Reife Halme mit einem Feuchtegehalt von 20% weisen eine maximale Schwindung von 4%

bis zu 14% in der Wanddicke und von 3% bis zu 12% im Umfang auf (Liese W., 1985). Das Bambusgewebe zieht sich insbesondere in der radialen Richtung zusammen. Dies tritt aber nur minimal in der axialen oder longitudinalen Richtung auf. Die tangentielle Schwindung der Wand ist höher im äußeren Teil, als im inneren Teil. Hierbei könnte man sagen, dass die Regel, welche für Holz zutrifft, auch hier erfüllt ist, das heißt, je größer die Dichte ist, um so höher ist die Schwindung. Die größte Schwindung wird im äußeren Teil des Halmes erreicht, wo die höhere Dichte vorliegt (Liese W., 1985).

Die Schwindung im Bambus variiert in verschiedenen Richtungen (Qisheng Z., *et al.* 2001). Nachdem der Bambus geschnitten worden ist, ergibt sich die Schwindung beim Trocknungsprozess durch das Verdampfen des Wassers. Bei einer vollständigen Trocknung nimmt der Feuchtigkeitsgehalt bis auf 1% ab. Die differenzielle Schwindung der *Phyllostchys pubescens* beträgt: 0,1822% tangential, 0,1890% radial und 0,024% longitudinal (0,2726%, in den äußeren Bereich der Nodien, 0,1521% in inneren Bereich). Es wird deutlich, dass die radiale gleich der tangentialen Schwindung ist und die longitudinale Schwindung nur minimal ist.

Die Werte für die maximale Schwindung der gleichen Art *Phyllostchys pubescens* sind: tangentielle Schwindung 8,2% im äußeren Wandbereich und 4,1% im inneren Bereich, radiale Schwindung 6,8% im äußeren Bereich und 7,2% für den inneren Bereich, longitudinale Schwindung 0,17% im äußeren Bereich und 0,43% für den inneren Bereich (Liese W., 1985).

Die beobachtete Schwindung erfolgt gleichzeitig mit der Abnahme des Feuchtegehaltes, wobei die Abnahme nicht immer gleichmäßig (linear) ist. Dies ist eine Konsequenz aus dem häufig auftretenden Zellkollaps. Nachdem sich der Feuchtegehalt von 70 auf 40% vermindert hat, erfolgt keine weitere Schwindung. Diese setzt erst wieder ein, wenn der Feuchtegehalt unter FSP absinkt.

Im Bambusgewebe ist die Schwindung des Parenchyms niedriger als im Holz, während die Bambusfasern eine höhere Schwindung aufweisen als Holzfasern. Nach Abd. Latif M. *et al.* (1996) nimmt die Schwindung mit einer Zunahme der Gefäßbündel ab; Bereiche mit hohen Dichten schwinden weniger stark.

Untersuchungen von Sotela J. (1990, 1992) führten zu folgenden Ergebnissen:

Für Proben von 10 cm, welche einen Anfangsfeuchtegehalt von 100% hatten, betrug die Volumenschwindung im Nodium durchschnittlich 27% und im Internodium 32%. Der gesamte Durchschnitt der Schwindung für Nodium und Internodium ist ~ 30%. Für die Schwindung des Durchmessers lag der Durchschnitt bei einer Gleichgewichtsfeuchte von ~ 14% bei 6 - 7% und die Schwindung der Wanddicke des Halmes lag bei 17 - 18%; Für die im Ofen auf einem Feuchtegehalt von 0% getrockneten Proben erhöhte

sich die Schwindung um zusätzliche ~ 2%. Daraus ergibt sich eine totale Schwindungen beim Durchmessers von ~ 9% und bei der Wanddicke von 20%.

Der Autor folgert, dass die Werte für die Rohdichte und die Schwindung, der zwei Regionen, bei der gleichen Art sich sehr ähnlich waren. Daher ist es sehr wichtig, mit den drei physikalischen Grundeigenschaften (Feuchtegehalt, der Schwindung und der Rohdichte) umgehen zu können. Weiter kann gefolgert werden, dass die Schwindung entlang des Halmes ungefähr konstant ist; der leichte Anstieg mit der Halmlänge ist vernachlässigbar. Dies wird durch andere untersuchte Arten untermauert. (Liese W., 1985; Gnanaharan R., 1998).

Die Norm für die Schwindung und für die Quellung ISO 22 157-1 „Bamboo-Determination of physical and mechanical properties“ ist oberflächlich und befasst sich nur mit dem Thema der Quellung. Daher wurden auch einige Konzepte aus der DIN 52184: 1976 „Bestimmung der Quellung und Schwindung“ mit den folgenden Definitionen, verwendet:

Lineares Quellmaß : α

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_0} * 100 (\%) \quad (3.11)$$

Wobei: l_0, l_1, l_2 die Maße des Holzes in einer bestimmten anatomischen Richtung darstellen und l_0 sich auf einen Feuchtegehalt von 0% bezieht.

Max. Quellungmaß : α_{max}

$$\alpha_{max} = \frac{l_W - l_0}{l_0} * 100 (\%) \quad (3.12)$$

Wobei: l_W Maß der maximalen Feuchte

Lineares Schwindmaß : β

$$\beta = \frac{l_2 - l_1}{l_W} * 100 (\%) \quad (3.13)$$

Trocknungs-Schwindmaß : β_N

$$\beta_N = \frac{l_W - l_N}{l_W} * 100 (\%) \quad (3.14)$$

Wobei: l_N Maß bei Trocknung bis zum Gleichgewichtszustand im Normklima 20° C/
65%

Volumenquellmaß: α_V

$$\alpha_V \approx \alpha_t + \alpha_r + \alpha_l (\%) \quad (3.15)$$

Wobei: $\alpha_t, \alpha_r, \alpha_l$ jeweils die tangentielle, radiale und longitudinale Quellung sind.

Volumenschwindmaß: β_V

$$\beta_V \approx \beta_t + \beta_r + \beta_l (\%) \quad (3.16)$$

Quellungskoeffizient: h

$$h = \frac{l_F - l_T}{l_0 (\varphi_F - \varphi_T)} * 100 (\%/%) \quad (3.17)$$

Wobei: l_F, l_T Maße bei einer relativen Luftfeuchte von jeweils $\varphi_F = (85 \pm 5)\%$ und
 $\varphi_T = (35 \pm 5)\%$.

Differenzielle Quellung: q

$$q = \frac{l_F - l_T}{l_0 (u_F - u_T)} * 100 (\%/%) \quad (3.18)$$

Wobei: l_F, l_T Maße bei einer relativen Luftfeuchte von jeweils $\varphi_F = (85 \pm 5)\%$ und
 $\varphi_T = (35 \pm 5)\%$ sind. u_F, u_T Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt bei den
gegebenen relativen Luftfeuchten.

Quellungsanisotropie: A_q

$$A_q = \frac{q_t}{q_r} \quad (3.19)$$

Wobei: q_t, q_r tangentielle und radiale differenzielle Quellung.

Anisotropie der Trocknungs-Schwindmaße: A_β

$$A_{\beta} = \frac{\beta_{N,t}}{\beta_{N,r}} \quad (3.20)$$

Wobei: $\beta_{N,t}, \beta_{N,r}$ tangentielle und radiale Trocknungsschwindungsmaß (Normklima von 20 °C/65% r. h.)

3.4.2 Mechanische Eigenschaften

Bambus ist wie Holz ein inhomogenes und anisotropes Material. Die mechanischen Eigenschaften sind extrem ungleichmäßig (Qisheng Z. *et al.*, 2002). Die mechanischen Eigenschaften des Bambusses sind weltweit intensiv studierte Themen, insbesondere durch verschiedene Wissenschaftler aus Japan, China, Indien, den Philippinen, Malaysia, Thailand und auch Costa Rica, Brasilien und Kolumbien. Die mechanischen Haupteigenschaften, die analysiert werden, sind: Druckfestigkeit, Biegefestigkeit, Zugfestigkeit und Scherfestigkeit, Biege-Elastizitätsmodul (MOE), sowie Proportionalitätsgrenze.

Im Allgemeinen variieren die Ergebnisse der Forschungen, die sich mit dem Thema der mechanischen Eigenschaften des Bambusses befasst haben, entlang der Halmlänge, mit dem Feuchtegehalt, mit der Dichte und mit den Standortfaktoren (Limaye V. D., 1952; Sekhar A.C. *et al.* 1960; Fangchun Z., 1981; Sattar M.A. *et al.* 1991; 1994; Espiloy Z.B., 1991). Normalerweise erhöhen sich die Zugfestigkeit, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul mit dem Alter und mit der Höhe. Dies steht im Gegensatz zu den physikalischen Eigenschaften, dem Feuchtegehalt und der Schwindung. Die mechanischen Eigenschaften werden auch von den klimatischen Bedingungen beeinflusst. Die höhere Festigkeit wird in trockenen Klimaten erreicht (Gnanaharan R., 1991).

Die physikalischen Eigenschaften, welche am stärksten die mechanischen Eigenschaften beeinflussen, sind Feuchtegehalt und Dichte. Ein geringer Feuchtegehalt verbessern die Biegefestigkeit, Druckfestigkeit, Scherfestigkeit und die Härte (Suzuki Y. 1950; Ota M. 1955). Insbesondere schwankt die Dichte mit dem Wachstumsstandort, mit der Art und der Position im Halm etc. (Ota M., 1950; Janssen J.J.A., 2000).

Diese Eigenschaft ist wichtig, weil mehr Masse pro Volumeneinheit, mehr Zellen und Gewebe bedeutet, die das Material dichter machen. Der Einfluß der Dichte auf der Festigkeit wird mit Hilfe einer einfachen Regel bestimmt. Die Biegefestigkeit wird auf 0,14-mal die Dichte in kg/m³ geschätzt. Einige Faktoren bringen die zwei Eigenschaften miteinander in Verbindung (*Tabelle 3.7*) nach Janssen J.J.A. (1981); (2000) wenn die

z.B. Darr-Rohdichte eines Bambusstückes 600 kg/m^3 beträgt, beträgt die Biegefestigkeit überschlägig $0,14 \cdot 600 = 84 \text{ N/mm}^2$. Die zulässige Spannung kann als $1/7$ der Biegefestigkeit angerechnet werden, dies bedeutet für das Beispiel 12 N/mm^2 .

	Druckfestigkeit	Biegefestigkeit	Scherfestigkeit
Bambus Freiluft-trocknung	0,094	0,14	0,021
Bambus frischer Zustand	0,075	0,11	-

Tabelle 3.7: Faktoren zur überschlägigen Bestimmung der Festigkeitseigenschaften in (N/mm^2) in Abhängigkeit von der Dichte (kg/cm^3)

Das Thema Bambus wird in den internationalen Normen behandelt: ISO 22 157-1: 2004 Determination of physical and mechanical properties - Part 1 und ISO 22 157-2: 2004 Bamboo - Determination of physical and mechanical properties - Part 2: Laboratory manuell.

3.4.2.1 Elastizität des Bambusses

Für diese Eigenschaft des Bambus gelten die gleichen Ausdrücke wie beim Holz.

$$E = \frac{1}{\alpha} \quad (3.21)$$

Wobei E der Elastizitätsmodul ist, der im angelsächsischen Sprachgebrauch als Young's Modulus (MOE) bekannt ist und α eine Konstante der Dehnung ist. Durch sie ergibt sich der Widerstand der elastischen Verformung und die Starrheit eines Materials (Kollman F., 1959; 1968; Lohmann oder., 1986). Das Gesetz von Hook legt ein Verhältnis zwischen Dehnung ε und der Spannung σ fest.

$$\varepsilon = \alpha \sigma \quad (3.22)$$

Mit $\varepsilon = \Delta l / l$; Verhältnis aus der Längenzunahme zur ursprünglichen Länge. Infolgedessen gilt für den Elastizitätsmodul.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}; \quad (3.23)$$

Für Holz ist der E -Modul für die Zug-, Druck- und Biegefestigkeit ungefähr gleich. Die Proportionalitätsgrenze liegt aber bei der Druckfestigkeit beachtlich niedriger, als bei der Zugfestigkeit.

Studien über die Verteilung des E -Moduls in der Halmwand bei der *Phyllostachys pubescens* ergab folgende Gleichungen (Ueda K., 1980):

$$E_T = \frac{4}{5}(-2 + 14\varphi - 15\varphi^2)E_R \quad (3.24)$$

Hierbei ist: E_T = tangentialer Elastizitätsmodul,
 E_R = radialer Elastizitätsmodul,
 $\varphi = 0,355$; Längenverhältnis (λ/H) von λ (theoretische Entfernung vom Moment M im Halmzentrum) zu H (Halmwand).

Im Bambus ist der E -Modul im Außenbereich der Halmwand fünf mal größer als im Innenbereich gemäß und wird durch folgende Gleichungen bestimmt (Ueda K., 1980):

$$E_f = (5 - 8\varphi)E_R; E_f \text{ Elastizitätsmodul im Außenbereich,} \quad (3.25)$$

$$E_c = (4\varphi - 1)E_R; E_c \text{ Elastizitätsmodul im Innenbereich.} \quad (3.26)$$

Aber man fand auch heraus, dass der Biege-Elastizitätsmodul Unregelmäßigkeiten in den Lasteinleitungspunkten aufwies. Der Grund für diesen Effekt ist die ungleichmäßige Verteilung des longitudinalen E -Moduls in radialer Richtung, das heißt über den Querschnitt der Halmwand.

In einer Studie von INBAR wird die Beziehung zwischen dem E -Modul und der Dichte eines im Freien getrockneten Bambus beschrieben: $E = 24 \times \rho$; zum Beispiel: $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$, d.h. $E = 24 \times 600 \text{ kg/m}^3 = 14.400 \text{ N/mm}^2$ (Janssen J. A. A., 2000).

3.4.2.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit von Bambus wird nach der ISO 22 157-1: 2004 Bamboo - Determination of physical and mechanical properties - Part 1, mit einem achsparallelen Drucktest bestimmt. In den Untersuchungen mit dem Bambus werden die Druckfestigkeit und der Elastizitätsmodul im Halm bestimmt.

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}; \quad \text{MPa} \quad (3.27)$$

Wobei: σ_{ult} ist die Enddruckfestigkeit, gerundet auf 0,5 MPa,

F_{ult} ist die maximale Last in N, bei der die Probe bricht,

A ist der Querschnitt in mm².

Um den Elastizitätsmodul eines Bambusstückes zu bestimmen, werden aus diesem mindestens zwei gegenüber liegende Stücke herausgeschnitten. Auf diese wird jeweils eine Druckkraft aufgebracht und die Deformation gemessen. Der E-Modul wird aus dem linearen Verhältnis zwischen der Spannung und der Verformung zwischen 20% und 80% der maximalen Druckkraft F_{ult} bestimmt (ISO 22 157-1:2004).

Der Druck Elastizitätsmodul wird gemäß der folgenden Gleichung berechnet (Atrops J. L., 1969):

$$E_c = \frac{(P_2 - P_1) * l_0}{F_0 * l}; \quad (\text{kp /cm}^2) \text{ oder } (\text{N/mm}^2) \quad (3.28)$$

Mit: P_1, P_2 = Kräfte, die die Zugspannung erzeugen,
 l_0 = Distanz der Verlängerung,
 l = ist der freie Raum zwischen den Stützen,
 F_0 = Querschnitt der Probe.

Man erhielt unterschiedliche Ergebnissen für den Elastitätsmodul. Der Druck Elastizitätsmodul war kleiner als der Biege- und der Zug Elastizitätsmodul (Atrops J. L., 1969).

In Untersuchungen der *Guadua angustifolia* in zwei Orten von Costa Rica wurde der Elastizitätsmodul und die Druckfestigkeit bestimmt (Sotela J., 1990;1992). Die Ergebnisse der zwei Standortuntersuchungen waren gleich; der in der Biegeprobe berechnete Durchschnitt für den Elastizitätsmodul war um 35% höher als der Elastizitätsmodul der einfachen Druckprobe.

(Ota M., 1949; 1950) macht die ersten Empfehlungen zur Ausführung der Druckproben. Er findet heraus, dass kleine Proben die optimalen Voraussetzungen für die Untersuchungen darstellen und dass die Bambusmuster eine Größe von $b/a = 1$ und $h/a = 2$ haben sollen, wobei b die Breite, a die Dicke und h die Höhe ist. Ota M., (1953b) schlägt einige Faktoren für die Arten *Phyllostachis pubescens*, *edulis* und *nigra* var vor, die einen Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Dichte darstellen:

$$\sigma'_c = \frac{\sigma_c}{\rho}; \quad (3.29)$$

wobei: σ'_c = das Verhältnis zwischen Festigkeit und Dichte,

σ_c = die Druckfestigkeit ist,

ρ = die Dichte oder das spezifische Gewicht.

$$\sigma_c = ae^{b*u}; \quad (3.30)$$

Hierbei ist u der Feuchtegehalt, a und b sind empirisch zu bestimmende Konstanten. Bei den untersuchten Arten liegt der Durchschnitt von b bei $-0,0450 \pm 0,00247$. Die Konstante a , welche durch das Verhältnis der Druckfestigkeit im frischen Zustand zur Druckfestigkeit nach der Ofentrocknung berechnet wird (a/σ_{cg}), liegt für die drei oben genannten Arten bei $2,19 \pm 0,049$.

Im Allgemeinen erhöht sich die Druckfestigkeit parallel zur Achse mit dem Anteil der Gefäßkappen, Leitbündelkappen und der Menge der Gefäßbündel im Gewebe. Die Beziehung zwischen der Druckfestigkeit (σ_c) und der Anzahl der äußeren Schichten "C_{ext.}" wird durch die folgende Gleichung nach dargestellt (Ota M., 1950).

$$\sigma_c = 1051,8 + 88,7(C_{ext} - 3); \quad (3.31)$$

Die Nodien in den Halmen (Limaye V. D., 1952; Ota M., 1953a; Janssen J. A. A., 1981) zeigen keine bedeutenden Unterschiede in den Druckproben im Vergleich zu den Internodien. Sehkar A. C. (1960) kommt auf das gleiche Ergebnis, aber dieses baut auf den Werten von Limaye (1952) auf.

Arce-Villalobos, O. A. (1993) und später auch Janssen, J. A. A. (2000) schlugen hinsichtlich der Druckversuche an Bambusproben vor, kleine Plättchen zwischen der Oberfläche des Bambusses und der Metalloberfläche der Prüfeinrichtung zu legen. Diese Plättchen sind verkleidet mit Teflon oder Wachs, damit die Reibungskräfte zwischen den Oberflächen möglichst klein gehalten wurden, so dass die Probe in axialer Richtung gedrückt wird und eine unbehinderte Querausdehnung in radialer Richtung erfolgt. Ohne diese Zulage erhalten wir aufgrund der Reibung eine Verformung, so dass die Fasern in der äußeren Schicht der Halmwand der Probe auf Zug und die Fasern in der inneren Schicht auf Druck beansprucht werden.

Die Druckfestigkeit einer Probe hängt sehr von dem Fasergehalt aber auch von der Lage im Halm ab. Für (Janssen J. A. A., 1981) ist die Druckfestigkeit in der Spitze höher als in der Halmbasis. Weiter macht er einen Unterschied zwischen der Druckfestigkeit parallel zur Achse (\parallel) und senkrechten zur Achse (\perp). Sie unterscheidet sich wie folgt: die Druckfestigkeit \parallel zur Achse ist hoch, die Druckfestigkeit \perp zur Achse ist hingegen niedrig (Atrops J. L., 1969; Janssen J. A. A., 1981).

3.4.2.3 Biegung

Die Biegefestigkeit im Bambus wird bestimmt durch die ISO 22 157-1: 2004 Bamboo - Determination of physical and mechanical properties - Part 1. Der Biegetest wird senkrecht zur Halmachse durchgeführt. Mit Hilfe der Bambusproben wird die Biegefähigkeit des Halmes mittels Vier-Punkt-Belastung durchgeführt. Hierbei wird der Elastizitätsmodul (MOE) aus der Belastung und der Durchbiegung der Probe Kurve bestimmt.

$$\sigma_{ult} = F * L * \frac{D}{2} * \frac{1}{6} * I; \quad \text{MPa} \quad (3.32)$$

Wobei: σ_{ult} = maximale Biegespannung ist, sie wird mit einer Genauigkeit von 1 MPa

(oder N/mm²) ausgedrückt,

F = maximal Belastung in N, die Gesamtbelastung wird auf zwei Belastungspunkte verteilt,

L = der freie Bereich zwischen den Stützen in mm,

D = der Außendurchmesser in mm,

I = das Trägheitsmoment in mm⁴.

Der Elastizitätsmodul, auch als Young'sches Modul bekannt, wird experimentell aus der Steigung des linearen Teils des Spannungs-Dehnungsdiagramms ermittelt.

$$E = 23 * F * \frac{L^3}{1296} * \delta * I; \quad \text{MPa} \quad (3.33)$$

Wobei: E = Elastizitätsmodul (MOE) ist,

F = maximal Belastung in N; die Gesamtbelastung wird auf zwei Belastungspunkte verteilt,

L = der freie Bereich zwischen den Stützen in mm,

I = das Trägheitsmoment in mm⁴,

δ = Auslenkung in L/2 in mm ist.

Die statische Biegung wird durch drei Kennwerte bestimmt: Elastizitätsmodul, Biegespannung an der Proportionalitätsgrenze und Biegefestigkeit. Um den Elastizitätsmodul bei der Biegeprüfung zu bestimmen, wurde die folgende Gleichung aufgestellt (Atrops J. L., 1969):

$$E = \frac{(P_2 - P_1)L^3}{48 * I * \Delta y}; \quad (\text{kp/cm}^2) \text{ oder } (\text{N/mm}^2) \quad (3.34)$$

mit: P_2, P_1 = Kräfte sind, die die Spannung erzeugen,

I = Trägheitsmoment in mm^4 ,
 L = der freie Bereich zwischen den Stützen in mm,
 Δy = Auslenkung in Richtung y in mm.

Atrops, J. L. (1969) fand Unterschiede bei den Ergebnissen des Elastizitätsmoduls: $E_D < E_B < E_Z$. Dies ist auf die unterschiedlichen Durchmesser des runden Bambusses zurückzuführen, der ungefähr zwischen 70 –100 mm schwankt. Es wird empfohlen, als Mittelwert für den Elastizitätsmodul von Bambus mit 20.000 N/mm^2 zu rechnen (leider wird die untersuchte Art in der Studie nicht erwähnt).

Der Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit sind gering in der Halmspitze und hoch in der Halmbasis, weil die Basis stärker ist. Dies wird durch die nach unten zunehmend dickere Wand, die beim lebenden Halm den meisten Kräften ausgesetzt ist, hervorgerufen (Limaye V. D., 1952). Diese Beobachtung wird auch in anderen Untersuchungen bestätigt (Janssen J. A. A., 1981; Saltar M. A., 1991; 1992; 1994).

Die Biegefestigkeit ist der größte Vorteil, den der Bambus hat (Janssen J. A. A., 1981). Über die Länge des Halmes ist ein signifikanter Zusammenhang zwischen Höhe und der maximalen Biegespannung feststellbar. Das Material in der Spitze ist schwächer, weil es spröder ist. In den Biegeproben waren die Nodien und die Internodien bedeutend bei kurzen Abschnitten, aber unbedeutend bei langen Abschnitten.

Bei Biegebeanspruchung erhöhte sich der Biege-E-Modul über die Länge des Halmes, dies gilt aber nicht für die Spannung an der Proportionalitätsgrenze und die Biegefestigkeit bei den Arten *Gigantochloa levis* und *Bambusa blumeana* (Espiloy Z. B., 1985). Abd. Latif M. und Mohd. Zin J. (1992) machte dieselbe Beurteilung hinsichtlich der Biegefestigkeit wie Espiloy (1991) bei den Arten *Gigantochloa schortechonii* und *Bambusa blumeana*.

Das Interessante an dieser Studie ist die Übereinstimmung des Verhaltens der Biegefestigkeit für *Bambusa blumeana*. Sie zeigt eine gleichmäßige Tendenz einiger mechanischen Eigenschaften dieser Art auf; allerdings stellt sie auch heraus, dass nicht alle mechanischen Eigenschaften die gleiche Tendenz haben und sich mit der Gattung ändern können.

Sotela J. (1990; 1992) untersuchte 12 Biegeproben von *Guadua angustifolia* um die Eigenschaften der aus zwei Orten aus Costa Rica stammenden Art zu bestimmen. Es wurden lang andauernde und kurze Belastungen durchgeführt. Der Autor fand heraus, dass der Elastizitätsmodul für keine der zwei Orte in an betracht der Biegelasten variiert. Der Elastizitätsmodul der Luft getrockneten Proben war um 28% höher als bei den frischen grünen Proben. Das Biegebruchmodul der aus dem Süden stammenden Proben war um 49% höher als bei den Proben aus der atlantischen Region.

3.4.2.4 Scherfestigkeit

Scherfestigkeit des Bambusses wird bestimmt durch die ISO 22 157-1:2004 Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1. Mit einer Schnittprobe parallel zur Achse einer Bambusprobe wird die Scherfestigkeit der Halme bestimmt.

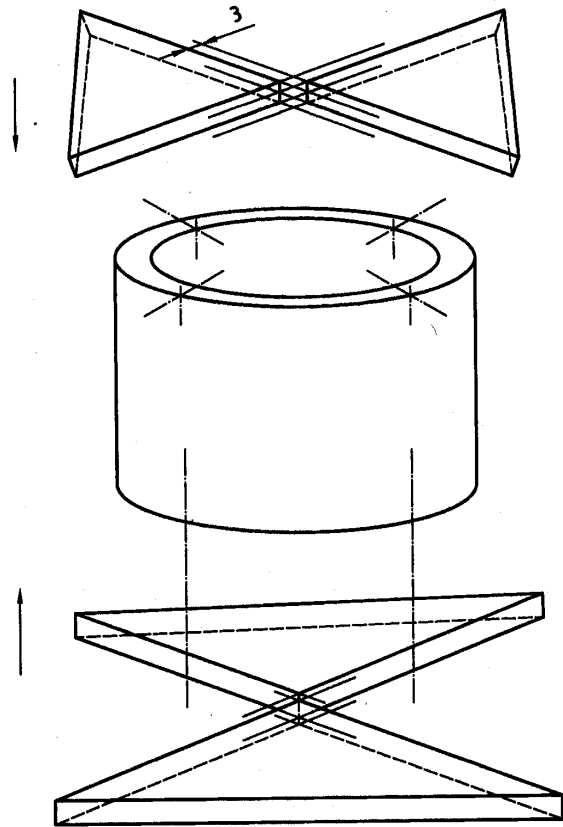


Abb. 3.6: Scherversuch (ISO 22 157-1:2004)

$$\tau_{ult} = \frac{F_{ult}}{\sum(t * L)}; \quad \text{MPa} \quad (3.35)$$

Wobei: τ_{ult} = die Scherfestigkeit, gerundet auf 0,1 MPa,

F_{ult} = die maximale Belastung bei der das Proben bricht, in N,

$\sum(t * L)$ = die Gesamtheit der Punkte, wobei t die Wanddicke und L die genommene Höhe der vier Flächenpunkte sind.

Ota M. (1955b) führte einige Untersuchungen hinsichtlich der Scherfestigkeit an Bambusproben durch. Hierfür sollen die Proben in kleine quadratische Segmente geschnitten werden. Von jedem dieser Segmente nimmt man ein Teil aus einer der Ecken heraus, so dass man die Form einer Trittleiter erhält.

Die höchste Scherfestigkeit erhielt man bei einem bestimmten Verhältnis hinsichtlich der Abmessungen der Probe. Hierbei betrug der vertikale Abstand H zur Stufe als auch der Horizontale Abstand W 2 cm. Die erhaltenen Werte für die *Phyllostachys*

pubescens lagen zwischen 78,3 - 175 kg/cm² und für die *Phyllostachys reticulata* zwischen 74,9 - 202,3 kg/cm²; Später wurden Untersuchungen realisiert, um ein Verhältnis zwischen der Scherfestigkeit und dem Feuchtegehalt zu bestimmen. Man fand heraus, dass die höchste Scherfestigkeit bei einem Feuchtegehalt von 8% vorliegt (Ota M., 1955c). Außerdem hat man einen linearen Zusammenhang zwischen der Scherfestigkeit und dem Feuchtegehalt bei den drei Arten *Phyllostachys pubescens*, *Phyllostachys reticulata* und *Phyllostachys nigra* herausgefunden (Ota M., 1955c):

$$\tau = 290,4 - 7,82u; \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3.36)$$

Wobei: τ = die Scherfestigkeit in (kg/cm²),
 u = Feuchtegehalt in %.

(Atrops J. L., 1969) realisierte Untersuchungen, welche auf DIN 52 187:1979 beruhen. Er untersuchte zwei Probearten, Typ A: Ein ringförmiges Segment, mit zwei Schnittstellen und Typ B: Ein kompletter Ring mit vier Schnittstellen. Als Ergebnis erhielt man eine geringere Scherfestigkeit bei vier Schnittstellen. Er unterschied aber auch in dem Dicken der Probe. Die Scherprüfung bei einer Probendicke von 6 mm ergab einen um 11% geringeren Wert, als bei einer Dicke von 10 mm.

Die Scherfestigkeit \parallel zur Achse verändert sich mit der Länge des Halmes. Genau wie bei der Biegeprobe ist die Spitze schwächer als die Basis, entgegengesetzt zur Druckprobe (Janssen J. A. A., 1981).

Das Vorhandensein von Nodien und Internodien in den Prüfkörpern hat Einfluß auf die Ergebnisse. Es ergab sich, dass die Internodien stärker sind als die Nodien. Die Scherfestigkeit beim Bambus ist ein Problem. Dies hängt damit zusammen, dass der Bambus, anders als Holz, in seinem anatomischen Aufbau keine radialen Strahlen aufweist. Außerdem hat Bambus die Form eines Rohres, während Holz massiv ist.

Untersuchungen an *Guadua angustifolia* ergaben, dass die Scherfestigkeit höher war bei Halmen, die aus dem Süden stammen, als bei denen, die aus der atlantischen Zone stammen. Die Proben mit Nodien zeigten bedeutende Unterschiede zu denen aus den Internodien (Sotela J., 1990, 1992). Die Proben mit Internodien zeigten eine höhere Scherfestigkeit, als die mit den Nodien. Und sie ist in der Spitze höher als in der Halmbasis.

3.4.2.5 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit des Bambusses wird bestimmt nach der Norm ISO 22 157-1: 2004 Bamboo - Determination of physical and mechanical properties - Part 1. In einer Zugprobe wird die maximale Zugspannung parallel zur Faser einer Bambusprobe

durch kontinuierliche Erhöhung der Spannung im Probestück und der Zug Elastizitätsmodul bestimmt.

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{A}; \quad \text{MPa} \quad (3.37)$$

Wobei: σ_{ult} = die Endzugfestigkeit, gerundet auf 0,5 Mpa,

F_{ult} = die maximale Last in N, bei der die Probe bricht,

A = der Querschnitt in mm^2 .

Um den Elastizitätsmodul zu bestimmen, wird an einer Probe an beiden Enden eine Zugkraft aufgebracht. Der E-Modul wird aus dem linearen Teil der Spannungs-Dehnungs-Kurve zwischen 20% und 80% der maximalen Zugfestigkeit F_{ult} berechnet.

Hidalgo-López, O. (2003) erwähnt, dass über erste Forschungen, die sich mit dem Thema Bambus befassen, erstmals durch Von R Bauman (1912) berichtet wurde. Er fand bei der Zugbeanspruchung Unterschiede zwischen den inneren und äußeren Schichten. Die äußeren Schichten weisen eine doppelt so hohe Zugfestigkeit auf wie die Inneren. Die Art wird hierbei nicht erwähnt. Später fand Sioti Uno (1932) in Japan heraus, dass sich die größte Zugfestigkeit des Bambusses in der Mitte befindet. Das heißt, dass die Halmmittle höhere Werte erreicht als die Basis und die Spitze des Halmes. Außerdem sind bei der Art *Bambusa stenostachysa*, die Außenschichten 5,5-mal stärker, als die inneren Schichten. Hidalgo-López, O. (2003) schlägt eine Methode zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Bambusmuster vor.

Die Nodien im Halm zeigen Unterschiede zu den Internodien. Der Elastizitätsmodul parallel zur Achse in den Nodien weist nur etwa 40% des Wertes der Internodien auf (Arce-Villalobos, O. A., 1993). Die Zugfestigkeit parallel zur Achse der Nodien liegt bei 30% des Wertes für die der Internodien. Das heißt, dass die Zugfestigkeit in den Internodien wesentlich höher ist, als in den Nodien.

Die Zugfestigkeit parallel zur Achse ist eine wichtige Eigenschaft des Bambusses (Jannsen J. A. A., 1981). Als Jannsen (1981) seine Zugversuche durchführte, ergaben sich Probleme hinsichtlich der Art der Durchführung, welche von anderen Forschern vorgeschlagen wurde. Das Problem besteht darin, dass das E-Modul bei Druck quer zur Faser sehr viel niedriger ist als in Faserrichtung, wo die Werte 200 bis 300 N/mm^2 erreichen. Dieser geringe E-Modul bzw. die geringe Festigkeit quer zur Faser verursachten Probleme beim Einspannen der Probe. Jannsen (1981) schlussfolgerte aus seinen gescheiterten Zugversuchen, dass das Problem meist in der geringen Scherfestigkeit und Druckfestigkeit quer zur Faser des Bambusses lag.

In Zugversuchen wurde herausgefunden, dass die Bambusproben aus der Spitze eines Halmes um 12% geringere Zugfestigkeit aufwiesen, als die aus der Halmbasis. Um der

Zug-Elastizitätsmodul zu berechnen, wurde folgende Gleichung aufgestellt (Atrops J. L., 1969):

$$E_t = \frac{(P_2 - P_1) * l_0}{F_0 * l}, \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3.38)$$

Wobei: P_2, P_1 = die Kräfte, die die Zugspannungen erzeugen,

l_0 = die Streckung ist,

l = der freie Bereich zwischen den Stützen,

F_0 = der Querschnitt der Probe ist.

3.4.3 Trocknungsparameter

In diesem Unterkapitel werden die Parameter des Trocknungsprozesses vorgestellt, dessen Hauptaufgabe es ist, das Wasser aus einem festen Material zu entfernen, was im Fall der *Guadua angustifolia* mittels eines Verdunstungsprozesses geschieht. Dieser Prozess beinhaltet einige Faktoren, die die Trocknung beschleunigen: Temperatur, Sättigungsdampfdruck, relative Luftfeuchte der Umgebung und die Luftgeschwindigkeit (Alvarez-Noves H. *et al.* 1992).

Das Trocknen der Halme der *Guadua angustifolia* ist ein Prozess, der eine oberflächliche und innere Ausscheidung des Wassers beinhaltet. Die Feuchtebewegung tritt von innen bis nach außen hin auf, von den inneren Gewebeschichten der Gefäßbündel und des Parenchyms schreitet sie bis zu den Außenschichten der Rinde oder bis zur weicheren Innenoberfläche fort. Der Trocknungsprozess wird beschleunigt, wenn die Diaphragmen im Inneren der Halme durchbohrt werden, da im Innern die Dichte der Halmwand niedriger ist und keine Rinde vorhanden ist. Erst durch die Perforation der Diaphragmen wird ein Abtransport der Feuchte aus dem Innenbereich des Halmes ermöglicht.

3.4.3.1 Sorption

Trockenes Holz nimmt, wenn es in Verbindung mit Wasserdampf gebracht wird, Wasser auf bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Holz und der Umgebung einstellt. Dieses Phänomen tritt im Allgemeinen bei allen Kapillar-porösen Körpern auf und wird *Sorption* genannt (Kollmann F., 1959; Kneule F., 1975).

Das Phänomen der Sorption hängt von vielen Variablen und Faktoren ab, die die Ergebnisse verändern können. Insbesondere verändert die Temperatur die Adsorption und auch die Desorption (Kneule F., 1975). Auch das Material bzw. die Holzart ist ein

wichtiger Faktor, der die Sorption beeinflusst. Stoffe mit großer innerer Oberfläche haben die Fähigkeit Feuchtigkeit aufzunehmen und Zuquellen. Die innere Oberfläche des Holzes beträgt schätzungsweise $2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Kollmann F., 1959).

Die Sorption erstreckt sich vom absolut trockenen Zustand (0%) bis zur Fasersättigung. Die Sorption wird in Abschnitte unterteilt: die chemische Sorption, die Adsorption und die kapillare Kondensation (Niemz P., 1993).

a) Die *chemische Sorption*, die auch als Chemosorption oder Einschichtadsorption bezeichnet wird, geht von 0% bis sogar 6% des u_{gl}^4 bei einer relativen Feuchtigkeit von $0 \leq \varphi \leq 20\%$.

b) Bei der *Adsorption*, wo das Phänomen der physikalischen Sorption überwiegt und die auch Multischichtadsorption genannt wird, werden 7% bis 15% in u_{gl} mit einer relativen Feuchtigkeit von max 60% erreicht.

c) Die *Kapillare Kondensation* hat größere Werte von 15% u_{gl} bis zur Fasersättigungszone mit einer relativen Feuchtigkeit von etwa $60\% \leq \varphi \leq 100\%$ (Álvarez Noves H., et al. 1992; Niemz P., 1993).

Aus Untersuchungen wurde eine Gleichung zu bestimmen der Gleichgewichtsfeuchte abgeleitet (Kollmann F. et al. 1975):

$$u = u_1 + u_2 + u_3$$

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = a\varphi + c_1 * e^{-\frac{1}{2}(b_1\varphi-1)^2} + c_2 * e^{-\frac{1}{2}(b_2\varphi-1)^2} \quad (3.39)$$

Vorausgesetzt ist $\psi = (\varphi - 1)$. Außerdem sind a , c_1 , b_1 , c_2 y und b_2 Konstanten, die experimentell bestimmt werden.

Simpson (1973) in (Siau J. F., 1995) fand ein Polynom 5. Grades mit sechs Parametern, welches eine bessere Anpassung der FPL-werte ermöglicht als andere klassischer Modelle. Man erhält eine Gleichung der Form:

$$m = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 \dots + a_n h^n \quad (3.40)$$

oder alternativ:

⁴ u_{gl} : Holzgleichgewichtsfeuchte

$$h = b_0 + b_1 m + b_2 m^2 \dots + b_n m^n \quad (3.41)$$

Die Gleichung (3.40) dient dazu, den Differentialquotienten $\partial m / \partial h$ zu bestimmen, während die Gleichung (3.41) dazu benutzt werden kann, um die Sorptionswärme und die Temperaturunterschiede $\partial h / \partial m$ zu bestimmen. Die folgende Gleichung kann benutzt werden, um die Beziehung zwischen der Kapillarität und der Wasseraufnahme im Material darzustellen.

$$m = c_0 + c_1 \log(-\psi) + c_2 [\log(-\psi)]^2 \dots + c_n m^n [\log(-\psi)]^2 \quad (3.42)$$

Diese Gleichung wird benutzt, um das Wasserpotential mit der kapillaren Struktur des Holzes in Verbindung zu bringen. Da ein umgekehrtes Verhältnis zwischen dem Wasserpotential und kapillarem Radius besteht, wird folgende Gleichung verwendet:

$$\psi = \frac{-1,5 \cdot 10^5}{r} (Pa - \mu m) \quad (3.43)$$

Diese Gleichung wurde von Stone & Scallan (1967) in (Siau, J. F.; 1995) angewandt. Zur Berechnung des Fasersättigungspunktes (FSP) von *Picea mariana*. Der Radius (r) wurde mit $0,4 \mu m$ beim FSP angenommen, der die Grenze zwischen freien Wasser und dem hygroskopisch gebundenen Wasser bildet. Als Ergebnis ergab sich ein FSP von etwa 40%.

3.4.3.2 Kapillarwirkung

Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung tritt an der Grenze zwischen einer *Flüssigkeit und einem Gas* auf. Der Grund dafür ist eine Störung der zwischenmolekularen Anziehungskräfte (Kräfte von Van der Waal) in der Flüssigkeit. Die zwischenmolekularen Kräfte sind im Flüssigkeitskörper im Gleichgewicht, das heißt, es können sich an jedem Molekül in allen Richtungen Kräfte ausbilden. Bei den Molekülen, welche sich an der Oberfläche befinden, bildet sich keine Kraftkomponente zur Grenzfläche hin aus, sondern nur eine nach Innen gerichtete Kraft in die Flüssigkeit hinein. Dadurch wird ein „Kraftnetz“ seitlich zur Oberfläche ausgeübt, während die Oberfläche offensichtlich in Spannung gerät (Siau J. F., 1984; 1995). Die Oberflächenspannung wird als eine Kraft über die gesamte Länge ausgedrückt:

$$\gamma = \frac{F}{x} \quad (3.44)$$

Wobei: γ = Oberflächenspannung (Joule /m),

F = Kraft über die Länge x ,

x = Länge in m.

Die Oberflächenspannung kann als Energie pro Bereichseinheit definiert werden.

$$\gamma = \frac{dW}{dA} \quad (3.45)$$

Wobei: γ = Oberflächenspannung oder spezifische Oberflächenenergie (Joule /m²),

dW = Arbeit, Joule, erforderlich um den Bereich dA zu vergrößern,

dA = Oberfläche in m².

Die Menge der Arbeit kann durch das Produkt des Differentialdruckes und des Volumenzuwachses berechnet werden.

$$\gamma = \frac{(P_0 - P_1)dV}{dA} \quad (3.46)$$

Wobei: P_0 = Druck in gasförmiger Phase, Pa.

P_1 = Druck in flüssiger Phase, an die Zwischenphase angrenzend, Pa.

Diese Gleichung kann durch die Annahme und Ableitung einer kreisförmigen Oberfläche eines Meniskus vereinfacht werden:

$$(P_0 - P_1) = \frac{2\gamma}{r_i} \quad (3.47)$$

Wobei r_i = Radius der Flüssigkeits-Gas Interphase.

Als Ergebnis erhält man die Kräfte, die in Verbindung mit dem Holz wirken. In so einem Fall soll auf Grund des Differentialdruckes ($P_0 - P_1$) die Summe der oberen Komponente der Summe der unteren Komponenten gleich sein. Es folgt:

$$P_0 - P_1 = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} ; \text{ Gleichung nach Jurin,} \quad (3.48)$$

Wobei, θ = Winkel der Befeuchtung, Benetzungswinkel,

r = Kapillarradius.

Die Gleichung kann für die Berechnungen des differentiellen Kapillardrucks der Wasser-Luft greze einer kreisförmigen Kapillare vereinfacht werden. Für einen Benetzungswinkel von 0° und $\gamma = 0,073$ N/m folgt:

$$P_0 - P_1 = \frac{1,46}{r} \text{ atm} * \mu\text{m} \quad (3.49)$$

Wobei : r = Kapillarradius

Nach Kneule F., (1975) kann der kapillare Druck P_k , in (3.47) durch den Differenzdruck in gasförmiger - und flüssiger Phase ($P_0 - P_1$) ersetzt werden. Wenn $\cos\theta = 1$ ist, ergibt die Gleichung:

$$P_k = \frac{2\gamma}{r} ; \quad (3.50)$$

$$P_k = \frac{2\gamma}{r} = H * \rho_l * g \quad (3.51)$$

Wobei: H = Steighöhe des Meniskus ist,

ρ_l = Dichte der Flüssigkeit und gravitationskonstante g .

Die Steighöhe der Wassersäule in einer Kapillare, die in eine Flüssigkeit eintaucht, die dem Umgebungsdruck ausgesetzt ist, lässt sich berechnen nach der Gleichung von Poiseuille, wobei dP_R/dH den notwendigen Druckgradienten ausdrückt, um die Reibung der Flüssigkeit zu überwinden (Kollmann F., 1959; Kollmann F. & Côté W., 1968; Kneule F., 1975).

$$\frac{dP_k}{dH} = \frac{8\eta V}{r^4 \pi} ; \quad (3.52)$$

So ergibt sich aus (3.49), (3.50) y (3.51):

$$H_A = \frac{2\gamma}{r(\rho_l g + \frac{8\eta V}{r^4 \pi})} \quad (3.53)$$

Wobei: H_A = Steigungshöhe in Form des röhrenförmigen Meniskus, in einer unter Druck gesetzten Flüssigkeit (m),

r = Kapillarer Radius (m),

η = dynamische Viskosität (Ns/m²),

V = Wasserfluss (m³/s).

Es wurde herausgefunden, dass das Druckverhältnis des gesättigten Dampfes und des Teildampfdruckes gleich der relativen Feuchtigkeit in einem funktionalen Zusammenhang mit dem kapillaren Druck, dem kapillaren Radius und der Flüssigkeitsdichte steht (Kneule F., 1975)

$$\varphi = \frac{P}{P_0} = e^{-\frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho_l RT}} = e^{-\frac{2\sigma}{r\rho_l RT}} \quad (3.54)$$

Wobei: $2\sigma/r$ = kapillarer Druck; σ Oberflächenspannung und r kapillarer Radius

$\cos\theta = 1$, Randwinkel;

ρ_l = Flüssigkeitsdichte.

Wenn sich die Guadua oder Holz in grünem Zustand befindet, füllen flüssiges und dampfförmiges Wasser alle Zellhohlräume aus. Die Bewegung des kapillaren Wassers vom Inneren bis zum Ort der Verdunstung, wo das Wasser in den gasförmigen Zustand übergeht, wird durch Kapillarkräfte bewirkt, die durch Menisken an den Luft-Wasserübergängen in den so genannten „Tüpfeln“, erzeugt werden.

Tüpfel sind mikroskopisch feine Kanäle „Fenster“, die einen Wasser- und Wasserdampfdurchtritt erlauben (Siau J.F., 1984; Hoheisel H., *et al.*, 1989; Alvarez-Novar H. *et al.* 1992; Siau J. F., 1995). Die Feuchtebewegung in dieser Phase ist vom Kapillarradius abhängig, wodurch die Menisken erzeugt werden. Hierbei sind die Kräfte so groß, dass sie im Einklang mit den engen Kapillaren stehen.

Die Schwerkraft wird nicht berücksichtigt, weil ihr Ausmaß im Vergleich zu den kapillaren Kräften in den meisten Trocknungssituationen zu gering ist. Dieses Prinzip der kapillaren Bewegungen des Wassers im Holz wurden von Hawley L. F. (1931) beschrieben und weiter entwickelt in Siau J.F. (1984; 1995).

Manchmal weisen die Zellwände extrem feine Kapillaren auf, was dazu führt, dass der erzeugte kapillare Zug den maximalen Widerstand der Zellen übertrifft und ein Kollaps des Gewebe auftreten kann (Siau J.F., 1984; Hoheisel H., *et al.* 1989; Alvarez-Novar H. *et al.* 1992). Kollaps kann zusammen mit einer Rissbildung auftreten. Diese Deformation kann in einer oder mehreren Zellen auftreten. Im Allgemeinen tritt dieser Prozess bei der *Guadua angustifolia* zuerst im inneren Teil und dann erst im härteren, äußeren Teil auf (Montoya J.A., *et al.* 2005). Ein anderer Aspekt, der zum Riss im Inneren beiträgt, betrifft die anatomische Struktur. Nach innen ist der Halm völlig hohl und die Halmwand hat einen höheren Anteil an Parenchymzellen und weniger Gefäßbündel.

Osmotischer Druck

Es gibt ein Zusammenhang zwischen dem allgemeine Gasgesetz und der osmotischen Druckgleichung⁵ für eine verdünnte Lösung (Siau J. F., 1995). Diese kann so ausgedrückt werden:

$$PV = nRT \quad (3.55)$$

$$P = \frac{W}{VM_w} RT \quad (3.56)$$

Wobei: W = Masse der gelösten Substanz,

M_w = Molekulargewicht der gelösten Substanz,

V = Volumen der Lösung,

R = 8,31 [J/mol * K].

Es ist Interessant zu beobachten, dass der Wert R in der Gleichung des osmotischen Druckes identisch mit der Gleichung aus dem Gasgesetz ist. Hieraus wird die Analogie zwischen dem osmotischen Druck und dem Gasdruck bestätigt. Die Gleichung (3.56) kann aber mit dem Terminus $(P_0 - P_1)$ aus der kapillaren Gleichung (3.48) beschrieben werden.

$$P_0 - P_1 = \frac{W}{VM_w} RT \quad (3.57)$$

Molvolumen des Wassers;

$$V = \frac{0,018(P_0 - P_1)}{\rho_w} \quad (3.58)$$

$$W = RT \int_{V_0}^V \frac{dV}{V}; \quad (3.59)$$

Daraus folgt

$$W = RT \ln \frac{V}{V_0}; \quad (3.60)$$

⁵ Osmotischer Druck: Der Druck, den die Partikel des Lösungsmittels in einer Lösung über einer halbdurchlässigen Membran ausüben, die die Lösung von einer anderen mit höherer Konzentration trennt.

Es ist aus dem Gesetz von Boyle bekannt, dass $P_0 V_0 = PV$ ist und aus der Gleichung (3.54) ergibt sich,

$$P_0 - P_1 = \frac{\rho_w RT}{0,018} \ln\left(\frac{P_0}{P}\right) \text{ oder } P_0 - P_1 = -\frac{\rho_w RT}{0,018} \ln h \quad (3.61)$$

Wobei h = relativer Dampfdruck, $\left(\frac{P_0}{P}\right)$ oder $\left(\frac{P_D}{P_{DS}}\right)$.

Wobei: P_D = Wasserdampf partialdruck,

P_{DS} = Sättigungsdampfdruck.

Aber diese Gleichung kann umbenannt werden, weil $(P_0 - P_1)$ das relative Wasserpotential und P_0 den Außendruck repräsentiert. Dieser ist bekannt als das Wasserpotential und kann, um das Wasserpotential ψ aufzulösen (3.56), verändert werden.

$$\psi = -\frac{\rho_w RT}{0,018} \ln h \quad (3.62)$$

Nimmt man die Gleichung (3.48) von Jurin und setzt sie mit Formel (3.56) gleich, erhält man die Gleichung nach Kelvin, welche den Kapillarradius mit dem relativen Wasserdampfdruck in Beziehung setzt.

$$r = -\frac{2\gamma \cos \theta}{\psi} ; \text{ Gleichung nach Kelvin} \quad (3.63)$$

Wasserpotential (ψ), Sorptionsisotherme und Fasersättigungspunkt (FSP)

Die Gleichung des Wasserpotentials (3.62) kann als unabhängige Variable in einer Grafik der Sorptionsisothermen verwendet werden, da diese eine Funktion des Dampfdruckes h ist, wie es in der Gleichung (3.62) ausgedrückt wird. Diese Gleichung gilt für die Luft- und ebenso für die Holzfeuchte. Im hygroskopischen Bereich haben beide den gleichen relativen Gleichgewichtsdampfdruck „relative vapor pressure at equilibrium“ (Siau J. F., 1995).

Tiemann (1906) definiert den FSP als Feuchtegehalt, bei dem die Zellwände mit Wasser gesättigt sind, die Lumina und die Interzellularen jedoch frei von flüssigem, tropfbarem Wasser sind. Es scheint experimentell unmöglich, diese zwei Wasserzustände exakt zu trennen, und in der Tat gibt es zwischen beiden keine klare Trennung (Siau, J. F., 1995).

Eine Beschreibung von Methoden zur Bestimmung des FSP für die Holzart *Picea sitchensis* findet sich bei Stamm (1964) in (Siau, J. F., 1995). Er beschreibt die sechs verwendeten Methoden folgendermaßen:

- (1) Die Schwindung wurde auf Null (0%) für volumetrische, tangentielle und radiale Schwindung extrapoliert. Die Ergebnisse für den FSP lagen zwischen 24 -29%;
- (2) Die deutliche Verdichtung des absorbierten Wassers durch die Immersion in Benzol erhielt die Maße der Dichte, die Feuchte der Zellwände und die Verdichtung wurde auf Null extrapoliert. Daraus ergibt sich ein FSP von 30%;
- (3) Die Befeuchtungswärme wurde bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten auf Null extrapoliert, man erhielt als Mittelwert 29% Feuchte.
- (4) Der Schnittpunkt der grafisch dargestellten Logarithmuslinie der mechanischen Kraft gegenüber dem Feuchtegehalt mit der Gesamtquellungskraftlinie des Holzes repräsentiert den FSP, als Ergebnis erhielt man 29%.
- (5) Die lineare Abweichung des Widerstandslogarithmus gegenüber dem Wassergehaltlogarithmus betrug 29% Feuchte.
- (6) Die Extrapolation der Sorptionsisothermen, von einer graphischen Darstellung des Feuchtegehaltes gegenüber einer relativen Feuchte von 100%, ergab einen FSP bei 31%.

Diese Methoden zeigten alle Werte für den FSP, in bezug auf die Sorptionsisothermen, zwischen 24 – 31%. Stamm (1964) setzte den Wert für die Holzart *Picea sitchensis* wegen der Berechnung der Schwindung und wegen Veränderungen der physikalischen Eigenschaften auf 30% fest. Es ist schwer den richtigen Wert zu schätzen, der die Wertespanne am besten präzisiert. Gebundenes und freies Wasser scheinen zusammen in diesem Bereich des Wasserpotentials oder Dampfteildrucks existieren zu können.

Die ermittelten FSP-Werte hängen von vielen Faktoren, ab, z.B. von der verwendeten Technik, den Probandimensionen, der Holzstruktur, der Temperatur, dem Extraktgehalt und vom statischen Druck Wangaard und Grenados (1967) in (Siau, J. F., 1995). Allerdings wird dem Phänomen Fasersättigung durch die Verwendung des Begriffes „Punkt“ in der Bezeichnung Fasersättigungspunkt (FSP) eine scheinbare Genauigkeit beigemessen, die eigentlich auf Grund der weiten Wertespanne nicht zutreffend ist.

Nach Bent (1965) treten ähnliche Probleme bei der Thermodynamik auf, wie dem Curie point, Lambda point, ferroelektrischer Punkt. Bent löste diese, indem er einen neuen wissenschaftlichen Terminus, genannt *Pernt*⁶, verwendete. Daher könnte FSP auch *Fiber Saturation Perent* genannt werden (Siau J. F., 1995).

⁶ Pernt: Ein transitiver Name, ein Punkt mit einer vagen Form, ein Punkt der eine Spanne beschreibt, ein Punkt, der ein Zwischenspiel auf Grund seiner Ungenauigkeit offen lässt (Siau J. F., 1995).

3.4.3.3 Diffusion

Diffusion bezeichnet den molekularen Massenfluss unter dem Einfluss eines Konzentrationsgradienten nach dem 1. Gesetz von Fick. Dieses Gesetz ist analog zu den Gesetzen von Darcy und Fourier (Siau J. F., 1984; Alvarez-Novar H. *et al.* 1992; Siau J. F., 1995). Das Verhältnis des Flusses und der Konzentration des Gradienten wird unter der Bedingung eines stabilen Zustandes „steady state“ dargestellt. Bei Verwendung für die Darstellung des Transportes von Wasserdampf durch das Holz, wird es folgendermaßen ausgedrückt:

$$D = \frac{W/tA}{\Delta c/L} \quad (3.64)$$

Wobei: D = Wasserdampfdiffusionskoeffizient des Holzes, cm^2/s ,

W = die durch das Holz in einer Zeit t übertragene Wasserdampfmasse, in g,

A = Fläche der Probe in cm^2 ,

L = Länge in Flussrichtung, cm,

Δc = Konzentrationsdifferenz, g/cm^3 .

$$J = -D \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (3.65)$$

Wobei: J = Feuchtigkeitsfluss ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$),

D = Diffusionskoeffizient (cm^2/s),

$(\partial c/\partial x)$ = Konzentrationsgradient, (g/cm^2).

Bei der Diffusion ist es wichtig zwischen zwei unterschiedlichen Wegen zu unterscheiden: Der Erste ist die Diffusion von gebundenem Wasser durch das Innere der Zellwände und der Zweite ist die Diffusion des Wasserdampfes durch das Innere der Zell-lumina (Alvarez-Noves H. *et al.* 1992).

Es existieren verschiedene Wege, um die Feuchtebewegung im Holz zu beschreiben. Zusätzlich zu Konzentration und Feuchtegehalt können die Gradienten auf Potentiale des Dampfeildruckes (P_D), auf das Wasserpotential (ψ), auf ein chemisches Potential (μ) und auf dem Ausdehnungsdruck (Φ) basieren. Im Detail wurde dies von Skaar & Babiak (1982) in Siau J. F. (1995) diskutiert.

Alle erwähnten Koeffizienten können in Termini des Diffusionskoeffizienten (D) ausgedrückt werden. Der in der Literatur am meisten Verwendete ist der

Feuchtegehaltskoeffizient (Siau J. F., 1984; Siau J. F., 1995): $K_M = D (\partial c / \partial M)$, solange $\partial c = G \rho_w \partial M / 100$;

Wobei:
$$K_M = \frac{G \rho_w D}{100} \text{ (kg/ms\%)} \quad (3.66)$$

Ähnliche Verfahrensweisen können mit den anderen Konstanten (bzw. Beiwerten) K_P , K_μ , K_ψ y K_ϕ durchgeführt werden.

Andererseits ist bei der Verwendung des Teildruckgradienten als treibende Kraft für die Diffusion zu berücksichtigen, dass bei der Diffusion in Holz die Wasserdampfkondensation in großen und feinen Kapillaren der Zellwände sowie die eigentliche Wasserdampfdiffusion zum Teil nacheinander, zum Teil aber auch gleichzeitig auftreten (Alvarez-Noves H. *et al.* 1992).

Es existieren Studien über die Diffusion von Feuchte beim Bambus *Phyllostachys pubescens* Magel. Diese Art wurde mit einigen Holzarten mit relativ geringen Feuchtegehalt unter normalen Temperaturen verglichen. Das Diffusionsvermögen des Materials wurde durch die Konstante K_c ausgedrückt. Es wurde die Methode von Stamm (1946) in Suzuki Y. & Aoyama T. (1954) angewandt:

$$\dot{Q} = K_c * A * \frac{du}{dx} = K_c * A * \left[\frac{H_1 - H_2}{d} \right] \quad (3.67)$$

Wobei: \dot{Q} = Durchfluss durch einen Querschnitt im stabilen Zustand (g/s),

K_C = Diffusionskonstante (cm²/s).

A = Querschnittsfläche (cm²).

H_1 = enthaltender Dampf der feuchten Luft (g/cm³)

H_2 = enthaltender Dampf der trockenen Luft (g/cm³).

d = Dicke des Schnitts (cm).

Die erste Folgerung aus der Studie war, dass bei Bambus die Diffusionangaben zum Feuchtegehalt, im Vergleich zu denen des Holzes, sehr niedrig waren. Der Grund hierfür wird mit Besonderheiten in der anatomischen Struktur des Bambusses erklärt.

Es wird angenommen, dass der einfache Strukturbereich der Innenteil des Halmes ist, wo man größere Menge an Parenchym vorfindet. Der Widerstand dieses Materials gegenüber dem Feuchtegehalt ist in longitudinaler Richtung höher als der des Holzes, da zu viele Zellen den Durchtritt des Dampfes im Rahmen der Diffusion unterbrechen (Suzuki Y. & Aoyama T., 1954).

Der Widerstand in transversaler Richtung wird für Bambus als höher angenommen, als der des Holzes. Dies liegt an den Schließmechanismen der Tüpfel oder der Poren des Bambusses (Suzuki Y. & Aoyama T., 1954).

Unter relativ trockenen Bedingungen ist die Diffusion des Dampfes durch die Zellhohlräume des Bambusses und durch die Tüpfelmembranen wahrscheinlich höher als der Fluss des gebundenen Wassers durch die Zellwände. Die Diffusion des Dampfes über die Tüpfel des transversalen Bereiches kann im Falle des Bambusparenchyms fast auf Null festgelegt werden (Suzuki Y. & Aoyama T., 1954).

Im Bambus hat auch die Bewegung des gebundenen Wassers durch die Zellwände eine wichtige Wirkung auf das gesamte Diffusionsvermögen. Ihre Schnelligkeit ist nicht von der Gattung abhängig. Dies wird durch experimentelle Daten zur Bambus- und Holz Trocknung mit hohem Feuchtegehalt bestätigt (Suzuki Y. & Aoyama T., 1954).

Die Methode von Stamm wurde für theoretische Berechnungen der Diffusion der Feuchte K_c im Bambus verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Diffusion in longitudinaler Richtung eher von der Länge der Zellen oder der Anzahl der Zellwände abhängt, als vom Zustand der Tüpfel, wobei die Diffusion in transversaler Richtung insbesondere vom letzteren Faktor beeinflusst wird. Dies erklärt die Differenz des Beiwertes K_c zwischen Bambus und Holz. Die Diffusion durch die Fasern der Gefäßbündel ist ähnlich, aber auf Grund der Wanddicke und der kleinen Hohlräumen in den Fasern dennoch geringer als in irgendeiner anderen Richtung. Der mittlere K_c des Bambusses ist geringer als der des Parenchymgewebes. Dies gilt besonders für den äußeren Bereich, wo die Fasern dichter verteilt sind (Suzuki Y. & Aoyama T., 1954).

Dies stimmt mit dem Konzept von (Alvarez-Noves H. *et al.* 1992) überein, in dem er sagt, dass die Diffusion des Wasserdampfes in den Zell-lumina im Vergleich zur Diffusion des gebundenen Wassers in den Zellwänden 1000 bis 100 mal schneller und leichter ist. Die Tüpfel oder Poren verbinden die Lumen der angrenzenden Zellen miteinander; sie begrenzen aber auch diese Art der Diffusion des Wasserdampfes, da ihre Anzahl und Größe begrenzt ist.

Stamm (1964) fand heraus, dass der longitudinale Diffusionskoeffizient des gebundenen Wassers in den Zellwänden näherungsweise dreimal so hoch war, wie über die tangentielle Länge und doppelt so hoch ist wie in radialer Richtung (Siau J. F., 1984; 1995). Bei einem Durchschnittswert von 2,5 kann die folgende Verhältnisgleichung verwendet werden:

$$D_{BL} = 2,5D_{BT} \quad (3.68)$$

Wobei: D_{BL} = Diffusionskoeffizient des gebundenen Wassers in longitudinaler Richtung in den Zellwänden,

D_{BT} = Diffusionskoeffizient des gebundenen Wassers in transversaler Richtung in den Zellwänden.

Zur Beschreibung der kombinierten Wirkung des Feuchtegehaltes und der Temperatur bei der Diffusion des in der Zellwand im Holz gebundenen Wassers verwendet man (Siau J. F., 1984; 1995):

$$D_T = C e^{(-E_b / RT)} \quad (\text{cm}^2/\text{s}), \quad (3.69)$$

Wobei: D_T = Diffusionskoeffizient transversal des im Holz gebundenen Wassers, (cm^2/s),

C = Konstante,

E_b = Aktivierungsenergie; 8500 cal/mol bei 10% Feuchtegehalt.

T = Temperatur in Kelvin.

R = Universalkonstante der Gase [J/mol * K].

Dushman (1962) schlägt die folgende Gleichung vor, um den Diffusionskoeffizienten des Wasserdampfes durch das Lumen zu berechnen:

$$D_a = 0,220 \left(\frac{76}{P} \right) \left(\frac{T}{273} \right)^{1,75} \quad (\text{cm}^2/\text{s}), \quad (3.70)$$

Wobei: D_a = Diffusionskoeffizient des Wasserdampfes in einer Luftkammer., (cm^2/s),

P = Gesamtdruck, cm des „Hg“, oder Quecksilbersäule,

T = Temperatur in Kelvin.

3.4.3.4 Elektrischer Widerstand und Leitfähigkeit

Im trockenen Zustand ist das Holz ein ausgezeichnetes Isoliermaterial. Aber der Ohm'sche Widerstand wird stetig geringer, wenn sich der Feuchtegehalt erhöht. In gesättigtem Holz wird die normale Leitfähigkeit des Wassers erreicht (Kollmann F., 1959). Der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Leitfähigkeit ist unterhalb des FSP sehr stark ausgeprägt, das heißt, die Leitfähigkeit vergrößert sich ungefähr um das 10^6 -fache, wenn das Feuchteverhältnis den hygroscopischen Bereich verlässt und in den Fasersättigungsbereich übergeht, das heißt im Feuchteintervall von $0 \leq u \leq u_{FS}$. Hingegen vergrößert sich die Leitfähigkeit nur ungefähr um das Fünffache, wenn der Wassergehalt von Fasersättigung bis zur totalen Sättigung des Holzes anwächst (Kollmann F., 1959).

Clark & Williams (1933) bestimmten in Kollmann F. und Côté W., (1968) den spezifischen Widerstand⁷ von einigen Holzarten, die bei 105 °C über einige Wochen getrocknet wurden. Es wurden Werte von 3×10^{17} zu 3×10^{18} (Ωcm) erhalten. Stamm (1929) legte Ergebnisse zu Abhängigkeit des elektrischen Widerstands vom Feuchtegehalt zwischen 8 und 170% vor.

Unterhalb Fasersättigung gab er ein lineares Verhalten zwischen dem Logarithmus der elektrischen Leitfähigkeit und dem Holzfeuchtegehalt an. Der gleiche Autor untersuchte eingehend den Einfluss des Wassers auf den elektrischen Widerstand des Holzes. Er überprüfte alle anderen Umstände, wie die Holzart, Dichte und die Form des Holzes, die im Vergleich zum Feuchtegehalt verhältnismäßig geringen Einfluss ausüben.

Für Skaar C. (1988) nimmt oberhalb Fasersättigung der Widerstand mit dem Anstieg des Feuchtegehalts ab, da der Widerstand im starken Maße vom Elektrolytgehalt bei hohem Feuchtegehalt abhängig ist. Dieser wird im wesentlichen beeinflusst von der Anzahl und vom Typ der Ionen im Wasser der Zellhohlräume.

In Kollmann F. (1959) und Kollmann F., Côté W. (1968) werden die folgenden Gleichungen vorgestellt:

$$\log(K) = \log\left(\frac{1}{r}\right) = a * u - C \quad (3.71)$$

oder $\log(r) = -a * u + C \quad (3.72)$

oder $r = 10^{C - a * u} = D * e^{-b * u} \quad (3.73)$

Wobei: K = Leitfähigkeit in $1/\Omega\text{cm}$,
 u = Feuchtegehalt (%),
 r = Widerstand in Ω ,
 a, b, C, D sind Konstanten.

Skaar C. (1988) erwähnt ändern die Wirkung der Temperatur auf den Widerstand erwähnt. Ein Zuwachs der Temperatur im Holz hat die tendenziell gleiche Wirkung auf seinen Widerstand wie ein Anstieg des Feuchtegehaltes. Es wurde ein Verhältnissfaktor zwischen der Temperatur T und dem Feuchtegehalt M in % ermittelt; dM/dT . Dieser Faktor gibt den Zuwachs des Feuchtegehaltes im Holz durch den Anstieg der Temperatur T in (K) an:

$$\frac{dM}{dT} \cong 0,027 + 0,0085M \quad (3.74)$$

⁷ Spezifischer Widerstand: Widerstand in Ohm/Länge in cm, durch den Querschnitt in cm^2 , das heißt Ohm-cm

3.5 Waldbauliche und sozioökonomische Aspekte

3.5.1 Die Kultur der Guadua

Die Guadua ist eine der wichtigsten natürlichen Ressourcen für die Kaffeeregion in Kolumbien. Es ist das "*natürliche Erbe*", das in verschiedenen Perspektiven oder Sichtweisen das Leben des Menschen mitgestaltet. Sie ist eng mit in den kulturellen, sozialen, wirtschaftlichen und technologischen Tätigkeiten verbunden.

Die Gemeinschaften kennen die verschiedensten Verwendungen, die die Guadua unter städtebaulichen Gesichtspunkten besonders bei der Verwendung als Baustoff hat. In Bezug auf die Landschaftsgestaltung harmonisiert seine natürliche Schönheit mit dem Grün der Kaffeepflanzen. Die Guadua Pflanzen erscheinen wie riesige Federn, die mit einem klaren ins gelbliche gehenden Grün einen natürlichen und schönen Kontrast erzeugen. Jedoch soll mehr über die Guadua bekannt werden. Sie ist bis jetzt noch nicht ausreichend studiert und vor allem ihr Wirken zwischen Mensch und Natur ist noch nicht ausreichend untersucht worden.

Seit vorkolumbischen Zeiten 3500 v. Chr. bis 500 v. Chr. wird die Guadua von den Eingeborenen vor allem in der Andenregion genutzt (Borja G., 1978). In dem Buch "Präkolumbische Architektur" wird die Nutzung der Guadua zur Herstellung von "Gefäßen und Wohnungen" erwähnt. Noch ältere Anwendungsmethoden existieren bei den Eingeborenenkulturen aus Ecuador.

Es existieren wichtige Dokumente von Jorge A. Morán Ubidia (2001), von der Universität Guayaquil, "*traditionelle und gegenwärtige Verwendung des Bambusses in Lateinamerika, besonders in Kolumbien und Ecuador*" und von Jorge Enrique Robledo von der nationalen Universität Manizales, mit dem Buch "*100 Jahre des bahareque im alten Caldas*". Diese Dokumente sind vom kulturellen historischen Gesichtspunkt der Guadua von großer Wichtigkeit.

Für die Guadua gibt es seit der Zeit bis vor Kolumbus in die Gegenwart in Amerika die verschiedensten Verwendungsmöglichkeiten. Der Mensch hat im Überlebenskampf den Bambus als die beste Lösung gefunden. Die industrielle Revolution und die neuen Materialien haben die Guadua nicht ersetzen können. Im XXI. Jahrhundert haben Millionen von Familien auf dem amerikanischen Kontinent wirtschaftliche und soziale Lösungen im Zusammenhang mit der Verwendung des Bambusses gefunden. Die traditionellen Verwendungen sowie das uralte Wissen werden moderne Antworten hervorbringen. Es ist notwendig, den außergewöhnlichen Einfluss der *Guadua angustifolia* in der Vergangenheit, in der Gegenwart und in der Zukunft für die Völker Kolumbiens und Ecuadors zu betonen. Dies wird durch die These von James Parson bestätigt: die Existenz der beiden Länder (Kolumbien und Ecuador) beruht auf der „Guaduakultur“ (Parson J. J., 1991).

Diese Kultur ist in den Regionen beider Länder verwurzelt. Sie beginnt im Süden von Antioquia und erstreckt sich über die Kaffeeachse, bis zum „Valle de Cauca“ und Nariño und über die Grenze Ecuadors hinaus, bis in die Esmeralda -, Manabí - und Guayasprovinz im Süden entlang der ganzen pazifischen Küstenregion mit natürlichen Waldbeständen und dort, wo der kommerzielle Anbau von Bambus möglich ist. (Parsons J. J., 1991).

Die Völker des Amazonas haben in den verschiedenen Gattungen des Bambusses und besonders in der Guadua (*Guadua angustifolia*), den Begleiter und Verbündeten für all ihre Anforderungen und Bedürfnisse zum Überleben gefunden.

3.5.2 Die Forstwirtschaft der Guadua angustifolia

Unter dem Begriff Forstwirtschaft werden in Bezug auf die Guadua die einzelnen Etappen beginnend mit der Anlage einer Plantage, ihrer Pflege, ihrer Nutzung, ihrer Zuwachssteigerung, bis hin zu ihrer Ernte für eine spätere Weiterverarbeitung verstanden. Eine kommerzielle Nutzung eines Guadua-Bestandes kann nach dem Projekt Guadua Bambus (2005) mit einem Alter von 6–10 Jahren beginnen (Cruz H., 1994).

Unter den Ober der begriff Forstwirtschaft fällt auch die zeitlich-räumliche Dynamik der Ereignisse und reproduktiven und vegetativen Phasen eines Organismus oder einer Art. Sie wird durch Wechselwirkungen mit verschiedenen biotischen und abiotischen Faktoren der Umwelt bestimmt. Die Mechanismen der Vermehrung und Ausbreitung, das Wachstum, der Zuwachs an Masse sowie die Artensukzession sind nach dem Bamboo-Projekt-Dokument einzigartig für jede Art und besonders für jede Umweltbedingung.

Die für die *Guadua angustifolia* entwickelten forstwirtschaftlichen Systeme sind in ihrem Wesen den im Forst verwendeten Systemen ähnlich. Für die Guadua wurden zwei forstwirtschaftliche Systeme entwickelt: 1) die Handhabung der natürlichen Regeneration, 2) die Anlage neuer Plantagen. Eine Plantage erreicht ihre maximale Produktivität nach 5 -10 Jahren (Castaño F., 1981).

3.5.3 Reproduktion und vegetative Verbreitung

Die Reproduktion und die Verbreitung ist ein sehr weites Thema und von großer Bedeutung für die Entwicklung der Guadua, insbesondere wenn ein *Guadua angustifolia* Anbau begründet werden soll. Dieses Thema wird in diese Arbeit nicht weiter vertieft, jedoch werden die relevanten Aspekte vorgestellt. Die frühesten Erfahrungen, die in Kolumbien über die Vermehrung und Verbreitung gemacht wurden, wurden in der Kaffeeregion realisiert (Cruz H., 1994).

Diese ersten Untersuchungen wurden zu Beginn der 70er Jahre gemacht. Daraus entstand der Terminus „*chusquin*“, welcher die Methode beschreibt, die die besten Ergebnisse erzielte. Darauf entstand 1976 die Corporación Autónoma Regional del Quindío zur Förderung der vegetativen Reproduktion der Guadua.

Die Bambusse können sich vegetativ (oder geschlechtslos) und durch Samen (sexuell) verbreiten. Es gibt verschiedene Arten der vegetativen Verbreitung, wie die schon erwähnte „*chusquin*.“ Sie beruht auf der Nutzung der latenten Knospen, die in den Knoten der Wurzelstöcke lokalisiert sind. Diese treiben aus, wenn die Helligkeit im Innern des Guaduawaldes zunimmt (Manzur-Macías D., 1988). Alle zwei Jahre pflanzt sich *Guadua angustifolia* nach der Blüte durch Samen (sexuell) fort (Manzur-Macías D., 1988). Es existieren aber keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen über dieses Thema. Die genetische Beschaffenheit des offen bestäubten Bambussamens ist noch unbekannt (McClure F. A., 1993). Sie kann heterogen sein und tritt oft durch eine Lichtvariation bei einigen Samen auf.

Die Blüte wird aus sechs Staubgefäßen und zwei federnähnlichen Narben gebildet. Diese besitzen einen individuellen Fruchtknoten den „*cariópside*“, welches einem Reiskorn ähnlich ist (Manzur-Macías D., 1988). Es gibt zwei Arten von Blüten: die Sporadische und die Gesamte; die Erste kommt vereinzelt in Stängeln vor und die Zweite in allen Stängeln des Haines oder Waldes (Cruz H., 1994). Man sagt, dass die Pflanzen nach der Blüte eines gesamten Bestandes sterben.

In Thailand wurde 1994 auf 40.000 ha die Art *Dendrocalamus ásperas* angebaut. Dabei wurde die Erfahrung gemacht, dass der ganze Wald nach der Blüte abstarb. Trotz der langsamen Verbreitung durch die Samen und der Kosten, die dies mit sich bringt, garantiert diese Form die Erhaltung der Art und eine hohe genetische Vielfalt (Cruz H., 1994; Manzur-Macías D., 1998).

Die bekanntesten Methoden der vegetativen Verbreitung sind:

1. Direkte Transplantation,
2. Wurzelstock und Teil des Stängels,
3. Wurzelstock ohne Stängel,
4. Segment vom Stängel,
5. Stängelabschnitt mit Wasser
6. Zweige im Durchschnittsalter,
7. „Matabamba“,
8. „Acodos“,
9. Vegetative Gewebekulturen „in vitro“,
10. Seitliche Äste,
11. „Chusquines“,

Der Wichtigkeit halber, werden nur die folgenden Methoden vertieft: die Verbreitung „in vitro“ und die Verbreitung durch chusquines:

3.5.3.1 Die „in vitro“ Verbreitung

Die „in vitro“ Methode ist der Anbau von Kulturen im Labor. Im Projektdokument Guadua Bamboo (2005) werden zwei Methoden angewandt: die *somatische Embryogenese*⁸ (Lin *et al.*, 2004) und die Verbreitung durch Seitenknospen und *microestacas*⁹ (Ramanayake *et al.*, 2001). Mit den *microestacas* kann eine hohe Fortpflanzungsrate erreicht werden.

In der Kaffeeregion Kolumbiens wurden zur Erforschung der *Guadua angustifolia* Molekularstudien AFLP¹⁰ angewandt. Es wurde herausgefunden, dass die genetische Bandbreite nicht sehr bedeutsam ist (Marulanda, *et al.*, 2002).

Zur Gewinnung von Mikro-Stechlingen oder zum Klonen der Gattung müssen die Anfangsbestände der Mikro-Stechlingen aus den gleichen phänotypischen Wäldern stammen. Sobald die „in vitro“ Entwicklung startet, kann mit der Replikation der Pflanzen durch die Bildung von Wurzelstöcken und Halmen begonnen werden. Die zwei ersten basalen Nodien weisen kapazitive Kräfte auf, um Knospen und vollständige Organe der Pflanze zu bilden (Cruz H., 1994).

3.5.3.2 Verbreitung durch die Chusquines Methode

Die Verbreitung durch die Chusquines Methode wird am meisten angewandte Methode in der Kaffeeregion Kolumbiens in den letzten 15 Jahren. Der Chusquín ist ein aus einer basalen Knospe stammender Setzling des Wurzelstocks, von dem sein Stängel oder Halm profitiert hat (Cruz H., 1994).

Die Methode besteht darin, von einem mehr als 7 Jahre alten Halm die sprießenden Knospen der Wurzelstöcke in kleine Setzlinge von 30 cm Höhe zu schneiden. Bei dieser Methode besteht eine Überlebenschance der Setzlinge von 95-98% unter Treibhausbedingungen. Der Vorteil dieser Methode ist, dass jede Pflanze 4.000 bis 10.000 Setzlinge pro Jahr erzeugen kann (Cruz H., 1995).

⁸ Somatische Embryogenese: Bildungsprozess des Embryos um ungeschlechtliche Zellen zu teilen

⁹ *microestacas*: Verbreitungstechnik „in vitro“ im Klonverfahren, Stängelstücke mit Nodium, in denen die Knospen induziert werden, aus denen die Triebe entstehen, die unterteilt werden (Cruz H., 1994)

¹⁰ AFLP: Amplified Fragment Length Polymorphisms.

Diese Setzlinge sehen nach zwei Monaten den Guadua Stängeln ähnlich. Die kleinen Setzlinge weisen folgende Merkmale auf: Wurzeln, die eine Tiefe von 15 cm erreichen und einen Durchmesser von 0,1-1,5 mm mit kleinen sekundären Wurzeln aufweisen; Stängel mit einer Höhe von 10-30 cm und Durchmesser von 1,0-2,5 mm; 2-5 Blätter an der Spitze des Stängels.

3.5.4 Vorkommen und Wachstumsleistung der *Guadua angustifolia*

Die *Guadua angustifolia* wächst in verschiedenen Waldtypen: im feuchten tropischen Wald, im sehr feuchten tropischen Wald, im trocken tropischen Wald und sehr feuchten Vorgebirgswäldern Holdridge (1967) in Morales D. und Kleinn C., (2004a). In Zonen, die zwischen 900 und 1800m ü NN liegen, mit Temperaturen von 20° bis 25° C und einer relativen Feuchte von 75 bis 85%, mit einer Sonneneinstrahlung von 1800 bis 2000 Stunden/Jahr und mit einer Jahresdurchschnitt solarer Strahlung von 5,12 Kwh/m². Er wächst in sandigen, sandig-schlammigen, schlammigen Böden mit einem pH-Wert von 5,5 bis 6,0 (Held C. & Manzano I. D., 2003), bei einem jährlichen Durchschnittsniederschlag von 2750 mm.

Guadua weist einen Durchmesser von 10,8 cm im Durchschnitt mit einer Standardabweichung von ± 0,5 cm für einen Durchmesserbereich von 9,9 - 11,7cm bei einem Vertrauensbereich 95%; Dies stimmt mit den Ergebnissen (Montoya J. A., 2002) überein, in dessen Rahmen ein mittlerer Durchmesser von 10 -11 cm wurde.

Die mittlere Höhe des Halmes liegt bei 19,1 m mit einem Standardschätzfehler von 0,8 m im 95%-Konfidenzintervall von 17,5 – 20,7 m. Das mittlere Bestandsvolumen beträgt 1053 m³/ha bei einem Standardfehler von 116,9 und einer Spanne von 819,2 -1286,7 m³/ha im 95%-Konfidenzintervall; Dies entspricht einer mittleren Biomasse von 81,5 t/ha mit einem Fehler von 3,4 t/ha im 95%-Konfidenzintervall von 74,7 - 88,3 t/ha; die Anzahl der Halme liegt bei 6.940 Halmen/ha bei einem Standardfehler von 473,3 Halme/ha im 95%-Konfidenzintervall von 5.993,4 – 7.886,6 Halme/ha (Morales D. & Kleinn C., 2004a; Morales D. & Kleinn C., 2004b).

Die Waldfläche der *Guadua* in der Kaffeeregion liegt bei 27.797 ha, was 2,7% der Gesamtfläche der Kaffeeregion Kolumbiens entspricht (1.029.524,7 ha). In dieser Studie wurde auch der Reifezustand der *Guadua*s bestimmt: 4% sind Schösslinge, 19% sind grüne *Guadua* (viche), 70% sind reife *Guadua*s und 8 % sind trockene *Guadua*s. Diese Studie wurde mit einem geographischen Proben- und Luftbildinformationssystem gemacht (Morales D. & Kleinn C. 2004a; Morales D. & Kleinn C. 2004b).

Die Nachfrage nach der Guadua in der Region wurde 2004¹¹ auf ungefähr 33.564 m³ berechnet, von denen der Baubereich, das Handwerk, die Leimholzproduktion und die Möbelindustrie 12.204 m³ im Jahr 2004 verarbeiteten. Davon gingen 4.333 m³ in den Bau, 4.081 m³ an das Handwerk, 2.379 m³ in die Leimholzproduktion und 1.473 m³ in den Möbelbau (Arias M. J. *et al.* 2004). Das Dokument erwähnt nicht wo die restlichen 21.360 m³ verbleiben. Es wird angenommen, dass sie im Bausektor als Sekundärelemente oder als Bauhilfsstoffe (Baugerüst) Verwendung finden.

3.5.5 Verarbeitung und Verwendung der *Guaduas angustifolia*

Dieses pflanzliche Material wird auf Grund seiner Haltbarkeit, seiner Verfügbarkeit und seiner physikalisch mechanischen Eigenschaften in der Kaffeeregion und in einigen anderen Regionen Kolumbiens in Innen- und Außenbau verwendet. Seine Hauptverwendung liegt im handwerklichen Bereich in dekorativen Artikeln (Haus-Utensilien, Lampen, Aschenbecher, Bilderrahmen, Tische, Möbel, Tischdecken, Zigarettenetuis, Likörkaraffen etc.) und im Außenbau (Bänke, Wasserleitungen, Fenstergitter, Fenster, Vogelhäuser etc.).

Das Handwerk ist der dynamischste Bereich in der Produktionskette der Guaduas in der Kaffeeregion. Das Handwerk misst der Guadua einen hohen Wert bei und ist ein Bereich mit kontinuierlichem Wachstum. Zu diesem Bereich gehört die Möbelindustrie, vor allem jene, die manuelle Holzwerkzeuge und Holzverarbeitungsmaschinen verwendet. Als Rohstoff wird hier die Guadua als Rundholz und in geringen Umfang auch als Latten verwendet.

In der Industrie gibt es Verarbeitungsmöglichkeiten der Guadua-Rundhölzer im Wohnungsbau (Möbel, Tische, Betten, Nachttische etc.). Verleimte Guadualatten werden in folgenden Bereichen eingesetzt: Böden, Wandbekleidungen, Träger, Möbel, Tische, Türen, Schreibtische, Stühle etc.. Asien zeigt eine starke Entwicklung in Hinsicht auf die Herstellung von „Leimholz“. Dort wurden Produkte entwickelt wie „Plybamboo“ und „Glulam“ oder „Lambo“, für die wie bei der Leimholzherstellung synthetische Leime verwendet werden.

Im Wohnungsbau und im Außenbereich liegt die wichtigste Verwendung dieses Material im Bau von Konstruktionen mit temporärem oder dauerhaftem Charakter. Unter temporären Konstruktionen werden Wandbekleidungen oder Matten verstanden, die aus offener und gehobelter Guadua bestehen. Weitere temporäre Verwendung findet das Rundholz bei Gerüsten und Ingenieurarbeiten, wo es dazu dient, schwere Lasten zu tragen.

¹¹ SIR: <http://sir.utp.edu.co/guadua/index> .

Unter Konstruktionen mit permanentem Charakter wird der eigentliche Wohnungsbau im weitesten Sinne verstanden. Verschiedene Kulturen haben im Bambus ein wirtschaftliches Baumaterial gefunden. Es bietet gute akustische Eigenschaften, ein gutes Raumklima, leichte Verarbeitbarkeit und wirksamen Schutz (Jayanetti D.L. & Follett P.R., 1998).

Eine typische Konstruktion kann folgende Elemente umfassen: Fundamente, Böden, Wände, Dachstühle, Türen und Fenster und Wasserleitungen. Die verschiedenen Fundamente bestehen aus Bambus direkt in Verbindung mit dem Boden, Bambus auf einem aus Beton geformten Halter, Bambus in den Halter eingegliedert, Verbindung von Säulen aus Beton und Bambus, betonverstärkter Bambus und Bambuspfeiler (Jayanetti D.L. & Follett P.R., 1998).

Im Wohnungsbau gibt es auch andere Verarbeitungsmöglichkeiten, wie das Bodenparket, was eine sehr viel jüngere Entwicklung ist, welche sich noch kaum in der Kaffeeregion Kolumbiens entfaltet hat. Mit dem Plybamboo hat sich eine Technik für die Produktion von Füllungen entwickelt, die im Wohnungsbau, z.B. für Wände in Sozialwohnungen, Verwendung findet. Hierbei kommen vorgefertigte Tafeln mit Abmessungen von 2440 x 1220 x 12 mm zu Anwendung (Gonzalez-Beltrán, G., 2003).

1. Klassifizierung nach der Verarbeitungstechnologie(Qisheng, Z., 2002):

A) Produkte aus Bambuslatten (um 2 oder 3 Schichten herzustellen oder zu kleben)

- a) Plybamboo (gepresst)
- b) Bretter aus verleimtem Bambus
- c) Böden aus verleimtem Bambus

B) Produkte aus Bambuslatten (0,5 - 30 mm dick, 10 – 20 mm breit).

- a) Matten aus Plybamboo
- b) Jalousien aus Plybamboo
- c) Latten aus verleimtem Bambus für Bauholz
- d) Mattenjalousien aus Plybamboo

C) Produkte aus Bambus Partikeln (Wood particleboard)

D) Verbundmaterialien

- a) Sandwichverbindung aus Bambus und Holz
- b) Sandwichverbindung aus Bambusleimholz und Holz
- c) Bodenverbindungen aus Bambus und Holz
- d) Spanplatte mit verstärktem Bambus

- e) Spanplatte mit übereinander liegendem Bambus
- f) Übereinander liegender Plybamboo

2. Klassifikation nach der Produktstruktur (Qisheng, Z., 2002):

- A) Plybamboo Produkte
 - a) Matten aus Plybamboo
 - b) Plybamboo
 - c) Plybamboo Vorhänge
- B) Laminatprodukte: Leimholz aus Bambuslatten
- C) Chipboard products: Bambusbeton
- D) Verbundmaterialien
 - a) Sandwichverbindungen aus Bambus und Holz
 - b) Verleimte Werkstoffe aus Bambus und Holz
 - c) Fußbodenelemente aus Bambus und Holz
 - d) Spanplatten verstärkt mit Bambus
 - e) Spanplatten mit Bambusdeckschicht
 - f) Übereinander liegender Plybamboo

3. Klassifizierung nach der Verwendung (Qisheng, Z., 2002):

- A) Plybamboo in der Fahrzeugindustrie.
 - a) Bretter als Boden für Lastwagen und Busse (Plybamboo, Leimholz aus Bambuslatten)
 - b) Bretter als Boden für Bahnwaggons (Bambusleimholzbretter)
 - c) Bretter für die Wände und Dächer der Bahnwaggons (mit Plybamboo)
 - d) Bretter für die Basis der Plattform der Bahnwaggons (Bretterverbindung aus Bambus und Holz)
- B) Plybamboo in kompakten Verarbeitungsformen:
 - a) Plybamboo in kompakten Formen (Plybamboo aus Mattenjalousien)
 - b) Bambusspanplatten in kompakten Formen
 - c) Dendified Spanplatte in kompakten Formen
 - d) Übereinander liegender Plybamboo in kompakten Formen
 - e) Bambusspanplatte in kompakten Formen
- C) Plybamboo für Boote (Plybamboo Jalousien)
- D) Bambusböden
 - a) Böden aus verleimten Bambus
 - b) Böden aus Bretter aus Bambus und Holz Verbindungen
- E) Plybamboo für die Herstellung von Möbeln und anderen dekorativen Dingen.

Eine andere weitere, erwähnungswerte Verwendung von Bambushalmen ist die Nutzung als Wasserleitungen (Lipangile, T. N., 1985). In Tansania wurde herausgefunden, dass der Flusstyp turbulent ist. Der Rauheitskoeffizient Mannings and Hazen-Willian's wurde zwischen 0,013 - 0,016 n bestimmt. Ein niedriger n-Wert“ zeigt an, dass die Nodien gut entfernt wurden, ein hoher n-Wert zeigt an, dass wenige Nodien entfernt wurden.

Von großer Bedeutung ist zudem die Nutzung des Bambusses als Lebensmittel. Die Bambussprossen sind in China, Japan und Thailand sehr beliebt. In Thailand werden folgende Arten am häufigsten als Lebensmittel verwendet: *Dendrocalamus asper*, *Bambusa blumeana*, *Thyrsostachys siamensis*, *Thyrsostachys Oliverio*, *Dendrocalamus brandisii*, *Dendrocalamus stictus*, *Gigantochloa albociliata* (Visuphaka K., 1985). Bambus als Nahrungsmittel enthält folgende Bestandteile (Tabelle 3.8):

Nährstoffe	Ganz frisches Nahrungsmittel	Konserviertes Nahrungsmittel (Aus der Dose)
Proteine	2,5 g	1,9 g
Fett	0,2 g	0,1 g
Kohlenhydrate : - Zucker	2,9 g	2,9 g
Rohe Fasern	1,0 g	1,8 g
Wassergehalt	92,50%	92,80%
Kalorein	23 cal.	20 cal.
Asche	0,7 g	0,4 g
Kalk	1 mg	1 mg
Phosphor	43 mg	26 mg
Eisen	7 mg	1 mg.
Vitamin A	50 i.u.	50 i.u.
Vitamin B ₁	0,10 mg	0,05 mg
Vitamin B ₂	0,08 mg	0,05 mg
Vitamin C	10 mg	0,0 mg

Tabelle 3.8: Analytische Ergebnisse der Bambussprossen, je 100 g frischen Bambus (Visuphaka K., 1985)

i.u. – internal unit , 1. i. u. Vitamin A = 0,3 µg Retinol (vgl. Wikipedia.org/... 24.07.2006)
 Beim der Errichtung von Bauwerken, wie Brücken, Baugerüste, Speicher, Kioske etc., zeigt die Guadua ein gutes Verhalten. Ihre physikalisch-mechanischen Eigenschaften

sind gut, insbesondere wenn sie einer Biegebeanspruchung bzw. einer Druck- und Zugbelastung parallel zur Achse ausgesetzt wird.

Brücken und Baugerüste fallen aus den Wohnungskontext heraus, weil sie von viel größerem Ausmaß sind (Jayanetti D.L. & Follett P.R., 1998). Die bekanntesten Bambusbrücken sind: Fußgängerbrücken, Brücken mit Geländern und Leichtverkehrsbrücken, etc.

Fast 90% der Baugerüste in Hong Kong werden aus Bambus hergestellt. Sie sind preiswert, widerstandsfähig und praktisch. Lau (1994) sagt in Hidalgo-López O. (2003), dass die Bambusstangen die sich im Bau befindenden Gebäude (Wolkenkratzer) vollkommen umgeben. Insbesondere wird die Art *Bambusa tuldooides* Munro eingesetzt. Sie ist in der Provinz Guandong im Süden Chinas heimisch. Diese Art hat eine der höchsten Dichten ihrer Gattung. Die PROSEA gibt folgende Werte (1995) an: 950-970 kg/m³ Dichte; Biegefestigkeit (mit Nodien): 79 - 94 N/mm²; Biegefestigkeit (ohne Nodien): 84 - 115 N/mm²; Zugfestigkeit (mit Nodien): 95,8 - 112 N/mm²; Zugfestigkeit (ohne Nodien): 98 - 140,5 N/mm²; Scherfestigkeit 50 - 59 N/mm². Die Kosten der Bambusbaugerüste betragen in der Herstellung nur 20 % im Vergleich zu denen aus Metall (Hidalgo-López O., 2003).

Ein wissenschaftlicher Forschungsbericht über die Taxonomie und über die physikalischen Eigenschaften einer Konstruktion wurde von der Nationalen Universität von Kolumbien unter der Führung des Architekten Oscar Hidalgo López, der einige Bücher und Handbüchern publiziert hat, veröffentlicht. Es gibt Lehrbücher, wie eine Brücke nach zu bauen ist (Stamm J., 2001). Es werden wichtige Aspekte, wie das Design, die Schutzbehandlung, strukturelle Kriterien, die Konstruktion und die sehr wichtigen Kostenaspekte erwähnt.

Auf Grund der hohlen Form des einzelnen oder mehrerer verbundener Bambushalme treten bei Strukturbauten Schwierigkeiten in der Anwendung auf. Die längliche Form, die Nodien und der unterschiedliche Umfang führen zu Abweichungen von der perfekten kreisförmigen Form. Die Designer müssen dieses Problem beim Entwerfen vor Augen haben (Janssen J.J.A., 2000).

Die Verbindungen können folgendermaßen klassifiziert werden:

- 1) Eine feste Verbindung von zwei Bambushalmen kann durch Kreuzabschnitte oder durch Konzentration der Kräfte auf die Kreuzungsabschnitte mit dem Verbindungselement hergestellt werden.
- 2) Die Konzentration der Kräfte kann im Innenteil des Kreuzungsabschnittes oder im äußeren Teil auftreten.
- 3) Die Verbindungselemente können parallel oder senkrecht zur Faser eingesetzt werden (Janssen J.J.A., 2000).

Der Bambus ist hinsichtlich seiner anatomischen Struktur und der äußeren Umgebung nach ein anfälliges Material. Daher bringt er Vor- und Nachteile als Baumaterial mit sich.

1) Vorteile des Bambusses als Baumaterial:

- a) Er ist mit außergewöhnlichen physikalischen mechanischen Eigenschaften versehen, die seine Verwendung im Tragwerkbau erlauben.
- b) Seine kreisförmige und hohle Form machen ihn zu einem leicht verarbeitbaren Material.
- c) Nodien, über die gesamte Länge verteilt, sorgen für Starrheit und Elastizität, was Brüche oder Knicken bei Krümmung stark reduziert.
- d) Die Faserstruktur und die longitudinale Faserrichtung machen Transversal- und Längsschnitte mit Handwerkszeug möglich.
- e) Die widerstandsfähige Außenrinde ist glatt, von natürlicher Farbe und muß nicht gestrichen oder poliert werden.
- f) Er bietet die verschiedensten Einsatzmöglichkeiten im Bau.
- g) Er kann mit anderen Materialien gut kombiniert werden.
- h) Er ist ein kostengünstiges Material.
- i) Er ist ein elastisches Material mit einem guten Verhalten bei Erdbeben (Schwingungsdämpfend).

2) Nachteile des Bambuses:

- a) Bei permanentem Kontakt mit Feuchtigkeit fault und verfällt er.
- b) Er ist anfällig gegenüber Insekten und Pilzen.
- c) Wenn er trocken ist, ist er leicht brennbar.
- d) Die unregelmäßigen Formen des Durchmessers und der Nodien machen das Design schwierig.
- e) Die Schwindung des Materials bei der Trocknung.
- f) Die Verbindungen machen auf Grund der hohlen Form Schwierigkeiten.

Im Bereich der chemischen Verwertung muss die Zellstoffherstellung aus Bambus erwähnt werden. Nach Shen (1992) in (Hidalgo-López O., 2003) lag die Weltpapierproduktion 1990 bei 184.200.000 t, von denen 1.685.000 t aus Bambus produziert wurden, was fast 1% ausmacht. Der Bambus wird auf Grund seines raschen Produktionszyklus und der hohen Biomassenproduktion unter den natürlichen Fasern als eine verheißungsvolle Gattung für die nachhaltige Entwicklung gesehen.

In Indien werden 87% des Bambuszellstoffs in der Welt produziert. In 35 Fabriken wurden im Jahr 1980 1.300.000 t hergestellt. Die Bambuszellstoffindustrie in Indien

verwendet insbesondere zwei Gattungen: die *Dendrocalamus strictus* und die *Bambusa arundinacea*. Die Länder, die Indien mit der Produktion folgen, sind: China mit 200.000 t, Vietnam mit 64.000 t, Brasilien mit 58.000 t, Bangladesch mit 42.000 t, Myanmar (Burma) mit 20.000 t, Indonesien mit 11.000 t und Kambodscha mit 1.000 t.

3.5.6 Güter und Umweltdienste der Guadua

Die Guaduwälder, die Guaduales genannt werden, erfüllen eine ökologische Funktion in ihrem Ökosystem. Das Konzept der „Güter und Umweltdienste“ fördert die Vorteile, die die Menschen vom Ökosystem erhalten. Es geht um das Verhältnis zwischen Mensch und der Natur. Die Wälder sind Beschützer und hydrologische Regler der Flusstäler. Es sind Schutzsysteme für die Biodiversität, die Kohlenstoff binden oder umwandeln.

Zusätzlich unterstützen die Guaduwälder die Bildung von Böden, den Nährstoffkreislauf und die Lebensmittelversorgung etc.. Es wurde festgestellt, dass ein Hektar Wald 30.000 Liter pro Tag Wasser speichern kann, soviel um 150 Personen einen Tag zu versorgen. Das Wurzelsystem hält Wasser fest, welches nach und nach an den Boden, Flüsse und Grundwasser abgegeben wird¹².

Eine vollständige Vision von dem, was die Guadua oder ein Guaduwald an verschiedenen Aspekten leisten kann, wird so klassifiziert:

Die Guadua als Versorger: bietet Lebensunterhalt, bietet Gemeinschaften Arbeit für ihren Lebensunterhalt, verschafft Vögeln, Säugetiere, Reptilien und Amphibien Nahrung, liefert Wasser, dient als Energiequelle, liefert Fasern, genetische Ressourcen, natürliche Medikamente, etc...

Die Guadua als Regulierer: Regulierung des Ökosystems, wie die Luftqualität, Regulierung des Klimas, Regulierung des Wassers, Reinigung des Wassers, Erosionsschutz, biologische Kontrolle und Risikominderung.

Die Guadua als Kulturgut: bietet nichtmaterielle Vorteile, wie die Erhöhung der Lebensqualität, kulturelle Abwechslung, religiöse und geistige Werte, traditionelle Erkenntnisse, durch Inspiration, ästhetische Werte, bereichert soziale Verhältnisse, Vermögenswerte, Erholung und Ökotourismus.

Die Guadua als Unterstützer: erfüllt notwendige Kriterien, um andere Dienste zu befördern, Primärproduktion, Bodenbildung, Produktion von Biomasse, Produktion von Sauerstoff, Bestäubung, Bodenbefestigung, Bereitstellung von Lebensraum etc. (Giraldo-Herrera E., 2000).

¹² http://www.crq.gov.co/visual_crq/documentos/bienes_y_servicios_guadua.pdf

4 Grundzüge der Trocknung

4.1 Physikalische Gesetze

In diesem Unterkapitel werden die Eigenschaften des Trocknungsprozesses vorgestellt, dessen Hauptaufgabe es ist, das Wasser aus einem soliden Material zu fördern, was im Fall der *Guadua angustifolia* mittels eines Verdunstungsprozesses geschieht.

Dieser Prozess beinhaltet einige Faktoren, die den Verdunstungsprozess beschleunigen: Temperatur, Sättigungsdampfdruck, relative Luftfeuchte der Umgebung und die Luftgeschwindigkeit (Alvarez-Noves H. *et al.* 1992).

4.1.1 Luftfeuchtigkeit

Feuchte Luft ist eine Mischung aus trockener Luft (Reinluft, aus N₂, O₂, CO₂, ...) und Wasserdampf. Es wird angenommen, dass feuchte Luft genau wie die einzelnen Bestandteile der Mischung, die Gasgesetze erfüllt (Wieslav O. & Ressel J.B., 2004).

Aus der Bilanz der Massen geht hervor:

$$m_a = m_{as} + m_{va} \text{ [kg]} \quad (4.1)$$

Wobei: m_a = Masse der feuchten Luft,

m_{as} = Masse der trockenen Luft,

m_{va} = Masse des Wasserdampfes.

Nach Dalton ist der Gesamtdruck der feuchten Luft (P) oder der atmosphärische Druck die Summe des Druckes der trockenen Luft (P_{as}) und des Wasserdampfdruckes (P_{va}).

$$P_a = P_{as} + P_{va} \text{ [Pa]} \quad (4.2)$$

Wobei: P_a = Gesamtdruck,

P_{as} = Druck der trockenen Luft,

P_{va} = Wasserdampfdruck.

Außerdem hat jede Komponente der Gasmischung die gleiche Temperatur:

$$T = T_{as} = T_{va} \text{ [K]} \quad (4.3)$$

Nach dem Gesetz von Dalton nimmt jede Gaskomponente das gesamte Volumen (V) der Mischung ein (Wieslav O. & Ressel J.B., 2004), daraus lässt sich folgende Beziehung ableiten:

$$PV = m_a R_a T = (m_{as} R_{as} + m_{mv} R_{mv}) T \quad (4.4)$$

4.1.1.1 Sättigungsdampfdruck

Der Dampfdruck bestimmt die Bewegung der Feuchtigkeit und deshalb die Trocknungsgeschwindigkeit des Holzes (Hoheisel H., 1989). Das Gesetz der Teildrücke von DALTON drückt aus, dass jeder Bestandteil einer Gasmischung sich so verhält, wie er sich allein unter der Gemischttemperatur verhalten würde. Daher kann der atmosphärische Druck (Pa) als Summe der Teildrücke der trockenen Luft und des Wasserdampfes betrachtet werden (Siau J. F., 1884; 1995):

$$P_a = P_0 + P_{aire} \quad (4.5)$$

Wobei: P_a = atmosphärischer Druck,
 P_0 = Sättigungsdampfdruck,
 P_{aire} = Teildruck der trockenen Luft.

Die Verdampfung des Wassers wird durch die Temperatur aktiviert. Der Sättigungsdampfdruck kann zwischen 0° C und 100 °C nach der folgenden Gleichung berechnet werden (Siau J. F., 1995):

$$P_0 = 1,3 * 10^{11} * e^{\left[\frac{-43.470}{RT} \right]} \quad (4.6)$$

Wobei: R = Universalkonstante der Gase,
 T = Temperatur in Grad Kelvin,
 43.470 [J/mol] = Energie der Verdampfungswärme bei 40° C.

Die Gleichung von Kirchoff in Siau J. F. (1995), die Ergebnisse mit einer Genauigkeit von 1% zwischen 0° C und 160° C ergibt, lautet:

$$P_0 = e^{[53,421 - 6,516,3/T - 4,125 \ln T]} \quad (4.7)$$

Er ist klar, dass der Sättigungsdampfdruck (P_0) eine Variable ist, die nur von der Temperatur abhängt und unabhängig vom Druck der Umgebung ist (Siau J. F., 1995).

4.1.1.2 Relative Feuchtigkeit

Die relative Luftfeuchte berechnet sich aus dem Verhältnis von Wasserdampfdruck zu Sättigungsdampfdruck bei gegebener Temperatur. Daher ist es wichtig, diese

Drücke vorher zu definieren (Siau J. F., 1884; Hoheisel H., *et al.* 1989; Fernandez-Golfín Seco, *et al.* 1998).

Entsprechend der in der Luft enthaltenen Wasserdampfmenge, die mit dem Dampfdruck wächst, verringert sich die Menge der anderen Komponente und damit auch der von der trockenen Luft ausgeübte Druck. An der Sättigungsgrenze wird dieser Dampfdruck einen sogenannten maximalen Wert, den Sättigungsdruck oder auch Dampfdruck, erlangen (Fernandez-Golfín Seco, *et al.* 1998).

Die relative Feuchtigkeit kann durch die folgende Formel ausgedrückt werden:

$$\varphi = \frac{P}{P_0} * 100 \text{ (\%)} \quad (4.8)$$

Wobei: P_0 = gesättigter Wasserdampfdruck,
 P = Teildampfdruck.

Die relative Feuchte kann auch als Massenverhältnis ausgedrückt werden (Wieslav O. & Ressel J.B., 2004) und mit Hilfe des Dichtekonzeptes kann sie so ausgeschrieben werden:

$$\varphi = \frac{m_{va}}{m_s} = \frac{\rho_{va}}{\rho_s} \text{ (\%)} \quad (4.9)$$

Wobei: m_{va} = Masse des Wasserdampfes,
 m_s = maximaler Wert der Wassermasse,
 ρ_{va} = Dichte des Wasserdampfes,
 ρ_s = maximale Dichte der Wassermasse.

Aus der Gleichung des Gasgesetzes und der Definition der Dichte erhalten wir:

$$P_{va}V = \rho_{va}R_{va}T \quad (4.10)$$

$$P_sV = \rho_sR_{va}T \quad (4.11)$$

Aus (4.10) und (4.11) wird gefolgert, dass $P_{va} / P_s = \rho_{va} / \rho_s$; daher kann die Feuchte, wie in (4.8), so ausgedrückt werden:

$$\varphi = \frac{P}{P_0} = \frac{P_{va}}{P_s} * 100 \quad (4.12)$$

$$h = \frac{P}{P_0} \quad (4.13)$$

Wobei h = relativer Dampfdruck (Siau J. F., 1995)

Die relative Luftfeuchte kann auch durch den Feuchtegehalt (W) und den gesättigten Feuchtegehalt (W_0) berechnet werden, mit:

$$\varphi = \frac{W(P_{atm} - P)}{W_0(P_{atm} - P_0)} * 100 \quad (4.14)$$

Näherungsweise lässt sich die relative Luftfeuchte wie folgt bestimmen:

$$\varphi \approx \frac{W}{W_0} * 100 \quad (4.15)$$

Die relative Luftfeuchte in einer Trocknungskammer muss kontrolliert werden, weil sie direkt den Feuchtegehalt des Holzes beeinflusst, das heißt, wenn die relative Feuchte abnimmt oder zunimmt, dann verringert sich der Feuchtegehalt des Holzes in Richtung des entsprechenden Gleichgewichtszustandes.

Die relative Luftfeuchte und konsequenterweise der Feuchtegehalt des Holzes werden stark von der Temperatur beeinflusst. Die warme Luft braucht eine größere Menge an Wasser, um gesättigt zu werden als die kalte Luft. Daher kann sie eine größere Menge an Wasser vom Holz absorbieren (Hoheisel H. et al., 1989).

4.1.1.3 Luftzirkulation durch das Trocknungsgut

Die Luftzirkulation durch die *Guadua angustifolia* Latten- oder Halmstapel hat einen direkten Einfluss auf die Wasserverdampfung und auf die Trocknungszeit. Wenn die Geschwindigkeit der Luft vergrößert wird, verringert sich die Trocknungszeit, aber die Betriebskosten steigen an, weil sich der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung oberhalb von 2,5 m/s vermindert (Hoheisel H., 1989).

Die Trocknungseffizienz hängt davon ab, ob die Feuchte vom Holzinernen bis zur Oberfläche wandert (Ressel, J. B., 1986 in Hoheisel H., et al., 1989), infolgedessen wird danach gestrebt die Energie weiterzuleiten, um das im Holz enthaltene Wasser zu erwärmen.

Die erforderliche Luftgeschwindigkeit hängt von der gewünschten Trocknungsrate (hohe oder niedrige Temperatur), dem Stapelaufbau, den Brettstärken und vom Holztyp (hartes oder weiches Holz) ab (Simpson W. T., 1991).

Die Luftzirkulation in einem Trockner dient dazu im Holzstapel die gewünschten Bedingungen hinsichtlich Temperatur und relativer Feuchtigkeit einzustellen. Abgesehen davon dient die zirkulierende Luft als Träger der verdampften Feuchtigkeit (Keey R. B., *et al.*, 2000).

Der Verbrauch an elektrischer Energie ist ein wichtiger Kostenfaktor. Daher ist zu berücksichtigen, dass die durch Ventilatoren bewirkte Luftgeschwindigkeit in den für den Prozess notwendigen Grenzen gehalten wird. Drei Proportionalitätsgesetze verdeutlichen dies:

1. Volumenstrom ist proportional zur Drehzahl.
2. Druck ist proportional zum Quadrat der Drehzahl.
3. Leistungsbedarf ist proportional zum Kubus der Drehzahl.

Um die Kosten für die Trocknung zu verringern wird heute eine an den Trocknungsfortschritt angepasste Luftgeschwindigkeit in den Trocknungskammern angewendet. Dies wird durch eine Veränderung der Frequenz des Wechselstroms erreicht (Hoheisel, H. *et al.*, 1989). Die Geschwindigkeitsregulierung wird als variable frequency drive (VFD) bezeichnet. Für Lüfter mit Gleichstrom kann durch die elektronische Kontrolle die Spannung geregelt werden, um die Geschwindigkeit zu verändern; dieses System wird silicon-controlled rectifier (SCR) genannt (Simpson W. T., 1991).

4.1.2 Methoden der Wärmeübertragung

Die Gesetze der Wärmeübertragung sind für das Design und die Herstellung vieler verschiedener Formen von Heizgeräten, Kühlern, Kondensatoren und Verdampfern in der gesamten Industrie von großer Bedeutung.

4.1.2.1 Konvektion

Konvektion ist die Wärmeübertragung von einem zu einem anderen Punkt durch die Vermischung eines Fluidteiles mit einem anderen in einem Fluid, Gas oder Flüssigkeit. Die Bewegung des Fluids kann das Ergebnis unterschiedlicher Dichte, verursacht durch Temperaturunterschiede, sein (natürliche Konvektion). Die Übertragung kann aber auch durch mechanische Mittel hervorgerufen werden (McAdams W., 1942).

4.1.2.2 Wärmeleitung bzw.

Leitung ist die Form der Wärmeübertragung eines Körperteiles an einen anderen Teil des gleichen Körpers, oder von einem Körper zu einem anderen Körper, wenn sich diese berühren ohne nennenswerte Partikelverschiebung des Körpers (McAdams W., 1942).

Nach den Gesetzen von *Fourier* erhält man die folgende eindimensionale Gleichung für die Berechnung des Wärmeflusses durch eine Oberfläche (McAdams W., 1942; Kneule F., 1975; Lienhard J.H. & Lienhard J.H. , 2004):

$$q = -k \frac{dT}{dx}; [\text{W/m}^2] \quad (4.16)$$

Wobei: q = Wärmefluss [W/m^2],

k = Konstante der thermischen Leitfähigkeit [$\text{W/m} \cdot \text{h} \cdot \text{K}$],

T = Temperatur [K],

x = Strecke [m].

Für Feststoffe wird die durch einen konstanten Querschnitt geleitete Wärmemenge (McAdams W., 1942), wie folgt ausgedrückt:

$$q = k_m A \frac{\Delta t}{x}; [\text{W/h}] \quad (4.17)$$

Wobei: q = Wärmefluss durch einen konstanten Querschnitt [W/h],

k_m = Konstante der thermischen Leitfähigkeit des Materials [$\text{W/m h } ^\circ\text{C}$],

A = konstante Fläche [m^2],

x = Entfernung [m],

Δt = Temperatur [$^\circ\text{C}$].

Siau J. F. (1984; 1995) formuliert die Gleichung für den stationären Zustand des Wärmeflusses durch eine Platte folgendermaßen:

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = -k_g A \frac{\Delta t}{\Delta x}; [\text{cal/s}] \quad (4.18)$$

Für anisotrope und nicht homogene Materialien tritt das Phänomen der Trocknung überwiegend bei porösen Körpern auf. Bezüglich der thermischen Leitfähigkeit existiert eine große Differenz zwischen trockenem und feuchtem Zustand (Kneule F., 1975; Krischer O. & Kast W., 1978). Daraus folgt:

$$\dot{Q} = A \frac{\lambda_{eff}}{s} \Delta \mathcal{G}; \quad (4.19)$$

Wobei: \dot{Q} = Wärmefluss,

λ_{eff} = effektive thermische Leitfähigkeit,

$\Delta \mathcal{G}$ = Temperaturdifferenz,

A = Fläche,

s = Distanz oder Dicke der trockenen Zone.

Um die effektive thermische Leitfähigkeit gemäß der Porosität ε zu berechnen, sind verschiedene mathematische Modelle für die Berechnung der Trocknung von porösen Materialien gemacht worden (vgl. *Tabelle 4.1*).

Model	effektive thermische Leitfähigkeit	Autor
A	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_g} = \frac{1}{\frac{1-a}{\lambda_I/\lambda_g} + \frac{1-a}{\lambda_{II}/\lambda_g}} \quad (4.20)$	Krischer (1963)
B	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_g} = \frac{2}{1-\lambda_g/\lambda_s} \left[\frac{\ln(\lambda_g/\lambda_s)}{1-\lambda_g/\lambda_s} - 1 \right] \quad (4.21)$	Schlünder (1966)
C	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_g} = \left[\frac{\lambda_s}{\lambda_g} \right]^{A+B \lg(\frac{\lambda_s}{\lambda_g})} \quad A = f(\varepsilon); \text{porosidad} \quad (4.22)$	Krupiczka (1967)

Tabelle 4.1: Mathematische Modelle für die effektive Wärmeleitfähigkeit (Kneule F. 1975)

Wobei: $\lambda_I = \varepsilon * \lambda_g + (1-\varepsilon)\lambda_s$; Wärmestrom parallele Wärmestromlinien, (4.23)

$$\lambda_{II} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_g} + \frac{1-\varepsilon}{\lambda_s}}; \text{senkrecht Wärmestrom,} \quad (4.24)$$

λ_g = Wärmeleitfähigkeit des gases,

λ_s = Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes.

4.1.2.3 Wärmeeinstrahlung durch Strahlung

Jeder Körper gibt ständig Wärme mittels elektromagnetischer Strahlung ab. Es ist wichtig, zwischen Wärmeenergie und Infrarotstrahlung zu unterscheiden. Die infrarote

Strahlung bezieht sich auf eine besondere Art von Wellenlängen, während sich die Wärme nur auf die Energiestrahlung von einem Körper auf einen anderen bezieht.

Die gesamte Strahlung des Wärmeflusses q passiert die Oberfläche (nicht bei schwarzen Körpern). Ein Teil α der gesamten einfallenden Energie wird als *Absorptionsgrad* bezeichnet. Ein anderer Teil ρ wird als *Reflexionsgrad* und ein Teil τ als *Transmittanz* bezeichnet (Döring E., 1968; Kneule F. 1975; Lienhard J.H. et al. 2005), was die folgende Gleichung verdeutlicht:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (4.25)$$

Das Gesetz von Stefan-Boltzmann für den Strahlungsfluss eines Körpers ist gewöhnlich durch $e(T)$ [W/m²] bestimmt; Kneule F. (1975) und Lienhard J.H. et al. (2005) definieren so:

$$e(T) = \sigma T^4 \quad (4.26)$$

Wobei: σ = Konstante von Stefan-Boltzmann $5,670400 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

T = absolute Temperatur

Das Gesetz von Stefan-Boltzmann wird in der Funktion für zwei Oberflächen mit Hilfe der Konstanten C_{12} ausgedrückt (Grigull U., 1957; Döring E., 1968; Krischer O. & Kast W., 1978):

$$\dot{q} = C_{12} A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (4.27)$$

Die Übertragung der Strahlungswärme kann nach der Gleichung (4.29) mit dem Wärmeübertragungskoeffizienten α_{str} ausgedrückt werden, hier aber nicht für zwei Oberflächen, sondern zwischen der Luft mit einer gewissen Strahlenwärme und der strahlenden Fläche (Kneule F., 1975).

$$\dot{q} = \left[C_{12} \Phi_{12} \left[\left(\frac{T_{str}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_O}{100} \right)^4 \right] \right] (\mathcal{G}_{str} - \mathcal{G}_O) = \alpha_{str} (\mathcal{G}_{str} - \mathcal{G}_O) \quad (4.28)$$

Wobei: \dot{q} = Wärmeübertragungsfluß [J/h],

\mathcal{G}_{str} = Lufttemperatur in Abhängigkeit der Wärmeübertragung durch die Strahlung,

\mathcal{G}_O = Oberflächentemperatur,

α_{str} = Äquivalenter Koeffizient der Wärmeübertragung in Abhängigkeit von der Strahlung,

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} C_s; \text{ Kostante der Strahlung, wobei } \varepsilon_1 \text{ und } \varepsilon_2 \text{ die}$$

Emissionsgrade zwischen der Luft und des
Oberflächenradianten; $C_s = 5,67 \text{ [W/m}^2\text{-K}^4\text{]}$

Sind,

Φ_{12} = Winkelverhältnis zwischen zwei Oberflächen. Wenn der Winkel

zwischen den beiden Oberflächen 0° beträgt, dann ist $\Phi_{12} = 1$.

$$\dot{q}_{str} = \alpha_{str} (\mathcal{G}_L - \mathcal{G}_O) \quad (4.29)$$

4.1.2.4 Kombinierte Wärmeübertragung durch Konvektion, Konduktion, Leitung und Strahlung

In Forschungen zur Ermittlung der Oberflächentemperatur wird angenommen, dass die Wärmeübertragung der Luft auf den Körper rein konvektiven Charakters ist, das heißt, sie erfolgt über die Grenzschicht, wobei der Wärmeübertragungskoeffizient α als maßgebend angesehen wird.

Die Grenztemperatur verändert sich jedoch oft durch den Einfluss von Leitung und Strahlung. Es wird ein Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_{tot} verwendet, der den gesamten Wärmeaustausch der Umgebung ergreift, um diese Gewichte einzubeziehen.

$$\dot{q}_{tot} = \dot{q}_b + \dot{q}_{str} + \dot{q}_l = \left[\alpha_b + \alpha_{str} + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{S_w}{\lambda_w} + \frac{S}{\lambda_f}} \right] (\mathcal{G}_L - \mathcal{G}_O) \quad (4.30)$$

Wobei: \mathcal{G}_L = Lufttemperatur mittels der Wärmeübertragung durch Konvektion,

\mathcal{G}_O = Oberflächentemperatur,

α_b = Wärmeübertragungskoeffizient durch Reibung (Konvektion),

α_{str} = gleichwertiger Koeffizient der Wärmeübertragung durch Strahlung,

α_u = Wärmeübertragungskoeffizient mittels Heizofen/Wand,

λ_w = thermische Leitfähigkeit der Materialwände,

λ_f = thermische Leitfähigkeit der feuchten Zone,

S_W = Distanz oder Dicke des Mediums Heizofen/Wand,

S = Distanz oder Dicke der trockenen Zone plus die Feuchte,

\dot{q}_b = Wärmeübertragung durch Konvektion [J/h],

\dot{q}_{str} = Wärmeübertragung durch Leitung [J/h],

\dot{q}_l = Wärmeübertragung durch Strahlung [J/h].

4.2 Trocknungsmethoden

4.2.1 Freilufttrocknung

Die Freilufttrocknung (oft auch als natürliche Trocknung bezeichnet) besteht darin, das Holz oder die Guadua den klimatischen Bedingungen der Umgebung auszusetzen. Die wesentlichen Faktoren sind dabei die Temperatur, die relative Luftfeuchte der Umgebung und die Luftbewegung. Angestrebt wird ein hygroskopisches Gleichgewicht zwischen der Umgebung und dem zu trocknenden Holz.

Es existieren aber außerdem noch weitere Faktoren, die das Trocknungsverhalten des Bambusses oder der Guadua beeinflussen können. Beispiele hierzu sind: spezielle örtliche Gegebenheiten, die Wanddicke der Halme, Anzahl der Nodien über die Halmlänge, Alter, Dichte, Nodien mit Trennwänden oder Diaphragmen, die Art der Stapelung oder die Anordnung des Trocknungsgutes sowie die Materialherkunft.

Diese Freilufttrocknung wird bei der Guadua derzeit am häufigsten angewandt. Sie wird jedoch stark von den klimatischen Veränderungen beeinflusst. Eine Kontrolle der klimatischen Bedingungen ist nicht möglich, was die Freilufttrocknung zu einem langsamen, schwer vorhersehbaren Prozess macht. Der Trocknungsverlauf kann an manchen bewölkten Tagen oder an Tagen ohne Wind zum Stillstand kommen. An Sommertagen dagegen kann er aber zu schnell von statten gehen (Fernández-Golfín Seco et al. 1998)

Andererseits ist es für industrielle Anwendungen oder bei niedrigen Feuchtegehaltsanforderungen völlig unmöglich, mit dieser Methode Werte im Bereich der üblichen Gebrauchsfeuchte in Innenräumen zu erhalten. In solchen Fällen sind zwingend technische Trocknungsverfahren erforderlich.

Dabei erfolgt die Wärmeübertragung einerseits direkt über die Einstrahlung andererseits indirekt bzw. konvektiv über durch natürliche Kräfte induzierte Luftbewegung.

4.2.1.1 Wirkung der Luft

Die feuchte Luft überträgt ihre Wärme direkt an die Oberfläche der feuchten oder grünen Guadua. Dies veranlasst die Feuchtigkeit aus dem Innern auszutreten. Die warme Luft kühlt sich ab, wenn sie mit der Feuchte in Verbindung kommt und ihr die Verdunstungswärme entzogen wird. Die kalte, feuchte Luft wird durch frische, warme Luft ersetzt, was den Trocknungsprozess fortlaufen lässt (Hoheisel H. *et al.*, 1989).

Die äußeren Holzschichten beginnen Wasser zu verlieren, dadurch entsteht ein Feuchtegradient. Durch unterschiedliche Dampfdrücke entsteht ein ununterbrochener Fluss der Feuchtigkeit vom Inneren des Materials in die äußerer Schichten. Auf diese

Weise wird, während sich die Feuchtigkeit der Guaduas oberhalb der Gleichgewichtsfeuchte befindet, der vorhandene Wasserdampf an die umgebene Luft abgegeben (Hoheisel H. *et al.*, 1989).

Für die Guadua ist der Standort genau so wichtig wie für das Holz, vor allem in der Anfangsphase des Trocknens, wenn das freie Wasser aus der Guadua austritt, ist eine gute Luftzirkulation sehr wichtig. Um eine gute Luftzirkulation zu gewährleisten, werden die Halme vertikal oder scherenförmig stehend angeordnet.

4.2.1.2 Trocknungsgeschwindigkeiten

In Abhängigkeit von der Menge des im Holz vorhandenen Wassers entsteht ein Feuchtegradient, sein Ausmaß kann durch die Gleichung (4.34) berechnet werden (Kollmann F. & Côté W., 1968). Dieser Feuchtigkeitsgradient beeinflusst direkt die Trocknungsrate. Ebenso wie bei der Trocknung im Freien hängt auch bei der technischen Trocknung der Prozess von der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Luftgeschwindigkeit ab.

$$\frac{du}{ds} = \frac{2(u_i - u_e)}{s} \quad (4.31)$$

Wobei $\frac{du}{ds}$ = Feuchtegradient,

u_i = Feuchtegehalt in der Mitte des Holzes,

u_e = Gleichgewichtsfeuchte bei gegebenem Umgebungsklima,

s = Holzdicke.

Die Geschwindigkeit, mit der die Guadua ihre Feuchtigkeit verliert, hängt ab von seiner natürlichen Struktur, dem Ort, wo sie geerntet wurde, der Anzahl der Nodien über seine Länge, seinem Alter und einigen äußeren Umweltfaktoren wie der Temperatur, der relativen Feuchtigkeit und der Luftbewegung.

Folgende zusätzliche Faktoren beeinflussen die Trocknungsgeschwindigkeit: die geographische Höhe des Standorts, die Nähe zu Flüssen, Seen oder Wasserquellen, die Niederschlagsmenge und die Anzahl der Sonnentage im Jahr (Kollmann F. & Côté W., 1968).

Erfahrungen über die Trocknung im Freien verschiedener Bambusgattungen sind in Studien von Rehman M. A. & Ishaq S. M., (1947) im Forest Research Institut, Dehra Dun in Indien, mit den Gattungen *Dendrocalamus strictus*, *Bambusa arundinacea*,

Bambusa butans, *Bambusa tulda* gemacht worden; für ein besseres Verständnis werden sie in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Art	u Halme (%)			u Anfang reif (%)	u Anfang grün (%)	Durchmesser (cm)	Wanddicke (cm)	Trocknungszeit Monate(Tage)	u Ende (%)	Observaciones
	Base	Mitte	Spitze							
<i>Bambusa nutans</i>	72,7	56,5	47,2	60	100	8	0,7-0,8	2,5(75) / 3,0(90)	11	2,5 Monate für 0,7cm Dicke
<i>Bambusa arandinacea</i>	89,1	86,4	76,6	70	100	10	1,0-2,5	2 mes+10 días=(70)	11 a 15	11% für 1,0 cm Dicke
<i>Dendrocalamus Hamiltonii</i>	90,2	70,7	48,2	60	110	12	2,0	2,5(75)	NA	kein Bericht u% Ende
<i>Dendrocalamus strictus</i>	72,5	68,1	58,5	80	100	5	1,0	3,5(105)	18	Braucht viel Zeit

Tabelle 4.2: Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse aus Experimenten zur Trocknung im Freien (Rehman M. A. & Ishaq S. M., 1947)

Von anderen Studien über die Trocknung an der freien Luft berichtet Laxamana M. G. (1985). Er berichtete, dass das Trocknen im Freien für jede Art unterschiedlich ist. Die folgenden Gattungen wurden untersucht: *Bambusa vulgaris* Var. *striata*, *Dendrocalamus merillianus* (Elm.), *Phyllostachis nigra* Munro, *Schizostachyum diffusum* Merr.

Für die Art *Dendrocalamus merillianus* (Elm.), mit einem Anfangsfeuchtegehalt von durchschnittlich 115% in der Basis, in der Mitte und in der Spitze eines Halmes mit Rinde, ergab sich nach 102 bis 116 Tagen Freilufttrocknung ein Endfeuchtegehalt von 17-18%.

Bei der Art *Phyllostachis nigra* Munro lag der Anfangsfeuchtegehalt im Durchschnitt in der Basis, in der Mitte und in der Spitze eines Halmes mit Rinde bei 66%, wobei der Endfeuchtegehalt nach 35 bis 42 Tagen bei 17-18% lag. *Bambusa vulgaris* Var. *striata*, hat einen durchschnittlichen Anfangsfeuchtegehalt von 139% bei einem Halm mit Rinde. Hier lag der Endfeuchtegehalt nach 60 bis 74 Tagen bei 17–18 %. *Schizostachyum diffusum* Merr, mit einem durchschnittlichen Anfangsfeuchtegehalt in der Halmbasis, in der Mitte und in der Spitze von 87% bei einem Halm mit Rinde, erreichte einen Endfeuchtegehalt von 17–18% nach 28 bis 35 Tagen.

Kenntnisse über die *Guadua angustifolia* wurden in Studien in Costa Rica erlangt. Hier ist eine Trocknungszeit von 100 bis 140 Tagen, bei einer Anfangsfeuchte von 100 bis 150% erforderlich, um auf eine Endfeuchtigkeit von 20% zu gelangen (González G. et al., 1992), Diese Ergebnisse stimmen weitestgehend mit eigenen Versuchen überein (Montoya J. A. & Jimenez E., 2006).

In der Kaffeeregion werden schon seit Generationen Erfahrungen bei der Freilufttrocknung von *Guadua* gesammelt. Dabei wird die sogenannte „Fermentation“ bevorzugt angewendet. Die Halme verbleiben nach dem Schnitt über 15 Tage im Wald.

Dort findet dann ein natürlicher „Fermentation“ statt, mit dem Ziel, den Halm vor Insekten und anderen Schädlingen zu schützen. Die Behandlung ist umweltfreundlich. Ihr größter Nachteil ist das Auftreten von Bläue, die sich im Guaduahalm bei der Gärung ausbreitet. Anschließend werden die Halme in einem Boraxtauchbad schutzbehandelt.

4.2.2 Solartrocknung

Die Verwendung der Sonnenstrahlung zur Materialtrocknung ist so alt wie die Zivilisation. Eine Eigenschaft des Verfahrens ist, dass in der Nacht, mit der Verringerung der Außentemperatur, die Luftfeuchte teilweise bis zur Sättigung zunimmt. Dieses kann zu Kondensation von Wasser auf dem Holz führen und die Endqualität des Holzes beeinflussen (Keey R. B. *et al.* 2000). Imré (1995) klassifiziert in Keey R. B. *et al.* (2000) die solar betriebenen Trockner, basierend auf ihrer Energiequelle, in drei Gruppen:

1. *Natürlicher Solartrockner* verwendet ausschließlich die Energie aus der Umgebung.
2. *Halbtechnischer Solartrockner*, mit Lüfter und Motor, der einen ununterbrochenen Luftstrom durch den Trocknungsraum ermöglicht.
3. *Technisch unterstützter Solartrockner* der zusätzlich mit einer Hilfsquelle für konventionelle Energieerzeugung ausgerichtet ist.

Plumptre R. A. & Jayanetti D. L. (1996) wählen eine andere Klassifizierung:

1. *Treibhaustypus*. Hier wird die Strahlung direkt durch die Konstruktion aufgefangen, in Wärme umgewandelt und an das Holz überführt. Dieser kann wie folgt weiter klassifiziert werden:
 - a) Die Luftzirkulation kann natürlich oder zwangsweise durch Lüfter hervorgerufen werden.
 - b) Mit Klappen, die manuell geöffnet oder geschlossen werden können oder mit Fenstern, die durch einen Stellmotor, in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit, der Temperatur oder den Außenbedingungen eingestellt werden.
 - c) Mit einer Isolation oder Folie über der Decke, an den Wänden und/oder im Boden, wodurch die Verluste verringert werden.

Über Erfahrungen mit dem Treibhaustypus berichten u. a. Johnson (1961), Rehman und Chawla (1961), Maldonado & Peck (1962), Peck (1962), Chudnoff (1966), Troxell & Müller (1968), Casin *et al.* (1969), Wengert (1971), Sharma *et al.* (1974), Singh (1976), Bois (1977), Gough (1977), Plumptre (1979), Yang (1980), Langrish & Keey (1992) in (Keey R. B. *et al.* 2000).

2. *Kammer mit außen liegendem Solarkollektor*. Gekennzeichnet durch eine isolierte Solaranlage und eine separate Kammer, die über isolierte Leitungen

mit der Solaranlage verbunden ist. Die Solaranlagen können mit Wasser oder Luft gefüllt werden.

Beispiele für separate Solarsysteme werden von Read *et al.* (1974), McCormick & Robertson (1977), Little (1979), Lumley & Choong (1979), Chen *et al.* (1980) und Simpson & Tschernitz (1984) in (Keey R. B. *et al.* 2000) beschrieben.

4.2.2.1 Sonnenstrahlung

Die globale oder gesamte Sonnenstrahlung setzt sich aus der direkten Sonneneinstrahlung, der difusen, isotropischen Strahlung der Atmosphäre und der vom Boden reflektierten Strahlung zusammen. Da die reflektierte Sonnenstrahlung im Verhältnis zur direkten und difusen die Trocknung auf offenem Feld nur minimal beeinflusst, betrachten wir hier nur die direkte und die difuse Strahlung.

Die Einstrahlung ist der Radiantenergiefluss über eine Oberfläche pro Flächeneinheit (W/m^2). Die über einer horizontalen Oberfläche wirkende Sonnenstrahlung wird über einen gewissen Zeitraum, im Allgemeinen eine Stunde (kWh/m^2), mittels Integration der Einstrahlung bestimmt (Duffie J. & Beckman W., 1991; Corvalan R. *et al.*, 1992; Rodríguez H., 1992 & González F., 1992; Orozco C. A., 1996).

$$I_T = I_b + I_d \quad (4.32)$$

Wobei : I_T = gesamte Einstrahlung,

I_b = direkte Einstrahlung,

I_d = difuse Einstrahlung.

Duffie J. & Beckman W. (1991), Haque M. N. (2002) und Kolliers-Pereira M. (1992) in Corvalan R. *et al.* (1992) bestimmen die gesamte Einstrahlung aus der Summe der drei erwähnten Komponenten:

$$I_T = G_{cb} R_B + G_{cd} \frac{(1 + \cos \gamma)}{2} + (G_{cb} + G_{cd}) \rho_g \frac{(1 + \cos \gamma)}{2} \quad (4.33)$$

Wobei: G_{cb} = die direkte Sonnenstrahlung auf eine ebene Oberfläche,

R_B = der Quotient der direkten Strahlung der geneigten Oberfläche auf die horizontale Oberfläche,

G_{cd} = diffuse Sonnenstrahlung auf eine ebene Fläche,

γ = die Steigung zwischen dem Winkel der Oberfläche und der Horizontalen

Fläche (in Radian),

ρ_g = Bodenreflektion, die laut Duffie J. & Beckman W. (1991) bei 0,2 liegt und laut Collares-Pereira M. (1992) zwischen 0,2 und 0,3; nach Haque M. N. (2002) ausnahmsweise bei 0,7 liegt ().

Die Intensität der Sonnenstrahlung (für jede Wellenlänge integriert) wird von Thekaekara und Drummond (1976) in Orozco-Hincapié C. A. (1996) als *Sonnenkonstante* bezeichnet, auch Corvalan R. *et al.* (1992), Rodríguez H. & González F. (1992), Viehbeck S. (1999) benennen sie:

$$I_0 = 1372,7 \text{ W/m}^2 \text{ (116,4 cal/cm}^2\text{-St.; 428 BTU/ft}^2\text{-St.; 4781 MJ/m}^2\text{-St.)}$$

Auf Grund der Exzentrizität des Erdbits um die Sonne variiert die Konstante während des Jahres zwischen ($1 < n < 365$), diese Funktion hat einen Unterschied im Jahr von 3,3%; das heißt der maximale Wert liegt am 1. Januar bei 1399 W/m^2 und am 1. Juli bei 1309 W/m^2 . Hieraus folgt die Gleichung (Corvalan R., *et al.* 1992; Rodríguez H., 1992 & González F., 1992):

$$I_{0,eff} = I_0 * [1 + 0,033 * \cos(360n / 365,25)] \quad (4.34)$$

Die Erde rotiert um ihre polare Achse. Diese Bewegung verursacht Tag und Nacht. Die Erdachse ist um $23,45^\circ$ bezüglich der Umlaufbahn um die Sonne geneigt. Jeden Mittag bildet eine Gerade, die die Erde mit der Sonne verbindet, einen Winkel mit der Fläche des Äquators, der als *Deklination* δ bezeichnet wird (Cooper (1969), in Duffie J. & Beckman W. (1991), Corvalan *et al.* (1992) Orozco C. A. (1996)). Für diese Definition gilt:

$$\delta = -23,45 * \cos \left[\frac{360(n + 10)}{365,25} \right] \quad (4.35)$$

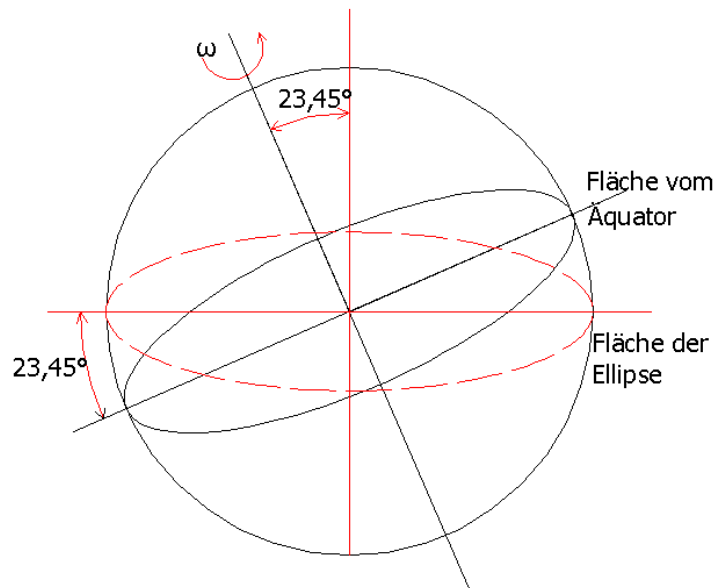


Abb. 4.1: Plan der Ellipse und des Äquators

$\delta = 23,45$; ist der Winkel am 20.Juni,

$\delta = -23,45$; ist der Winkel am 21.Dezember,

$\delta = 0$; am 21.März und am 20.September.

Die Berechnung von θ setzt sich aus der einfallenden Strahlung mit einer Breite λ und einen Winkel ω_0 (für den Aufgang und dem Untergang der Sonne gilt $\theta = 90^\circ$) zusammen. Die Wirkungen der Atmosphäre auf die einfallende Strahlung wird nicht berücksichtigt. Nimmt man die Werte der Abb. 4.1 zur Hilfe, folgt aus den Gleichungen (4.37) (4.38):

$$\cos \theta = \sin \delta * \sin \lambda + \cos \delta * \cos \lambda * \cos \omega \quad (4.36)$$

Hierbei ist θ der Einfallswinkel oder Inklination der Sonne, d.h. der Winkel zwischen der Geraden Erde-Sonne und der Tangentialen des jeweiligen Ortes.

$$\cos \omega_0 = -\tan \lambda * \tan \delta \quad (4.37)$$

Mit dem Wert von $\cos \theta$, einschließlich der Zeit zwischen Sonnenaufgang und Sonnenhöchststand, kann der Wert für die einfallende Sonnenstrahlung auf eine horizontale Fläche berechnet werden ohne die Atmosphäre einzuschließen. Daraus ergibt sich folgendes:

$$H_0 = \int_{t_0}^t I_{0,eff} * \cos \theta dt \quad (4.38)$$

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} * I_{0,eff} \cos \theta (\sin \omega_0 - \omega_0 \cos \omega_0) \quad (4.39)$$

Wobei: H_0 = außerirdische globale Strahlung,

ω_0 = Winkel bei Sonnenaufgang und Sonnenuntergang.

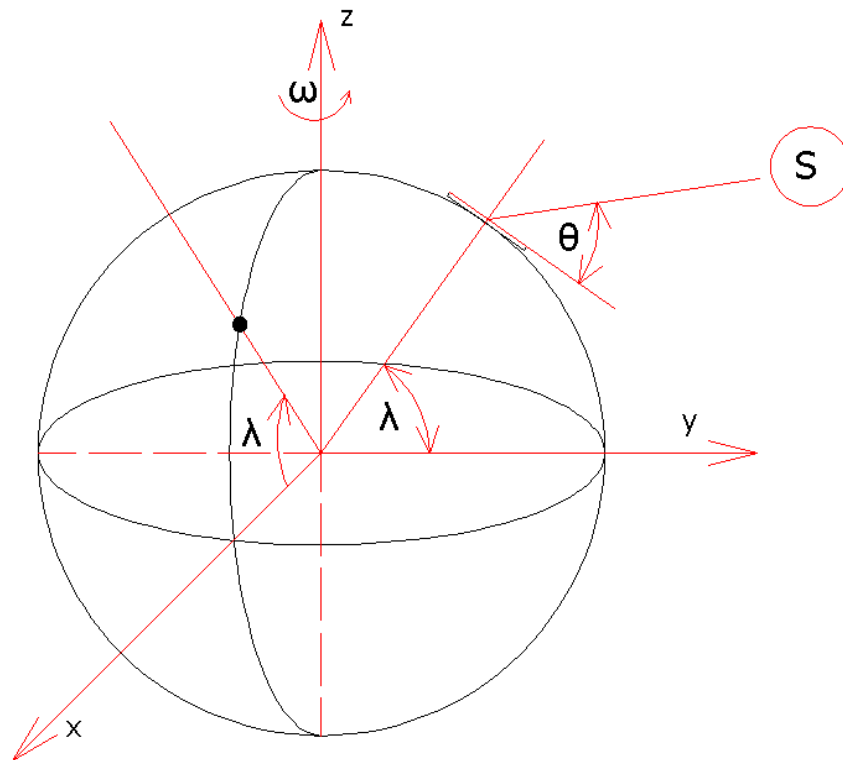


Abb. 4.2: Graphische Darstellung der Inklination θ und des Winkels mit der Breite vom Ort λ

Die Strahlung außerhalb der Erde H_0 schließt die Strahlung in der Atmosphäre nicht mit ein, deshalb wird ein Faktor oder Index eingeführt, der die *atmosphärischen Transparenz* K_t berücksichtigt, um die gesamte einfallende Strahlung zu definieren.

Daraus folgt:

$$H_T = K_t H_0 \quad (4.40)$$

Mit Hilfe der Gleichung (4.35) zur *Einstrahlung*, kann die einfallende Gesamtstrahlung in Form von einfallender direkter Strahlung und einfallender diffuser Strahlung ausgedrückt werden.

$$I_T = I_b + I_d$$

$$H_T = H_b + H_d \quad (4.41)$$

Wobei: H_T = gesamte einfallende Sonnenstrahlung,

H_b = direkte Sonnenstrahlung,

H_d = diffuse Sonnenstrahlung.

4.2.2.2 Sonnenkollektoren

Die Mehrheit der absorbierenden Oberflächen besteht aus metallischen Materialien, die mit matt-schwarzer Farbe bestrichen sind, um eine größere Menge an Sonnenenergie zu absorbieren und diese auf den Luftstrom zu übertragen. Die Beschaffenheit der Oberfläche kann eben, gewellt oder gerillt sein. Es gibt Materialien mit sehr guter Energieabsorption, aber ihre Kosten sind sehr hoch (Keey R. B. *et al.* 2000). Einige Materialien wie z.B. Kupfer haben einen hohen Wärmübergangszahl, dieser liegt zwischen 10 und 25, während das Aluminium bei 0,1 zu 1,1 kW/m² K liegt (Lienhard (IV) J.H. & Lienhard (V) J.H. 2005).

Ein wichtiger Aspekt ist die Eigenschaft der absorbierenden Beschichtungen. Als Beispiel ist die schwarze Farbe zu nennen, die den absorbierenden Materialien eine größere Absorptionsfähigkeit (α) verleiht. Ebenso soll die *Emittanz* (ϵ) geprüft werden. Diese wirkt der Effizienz im Material entgegen, außerdem vergrößern dicke Oberflächen die Absorptionsverluste. In der nachfolgenden *Tabelle 4.3* wird das Verhältnis zwischen den Absorptionsmaterialien und den Beschichtungen verdeutlicht.

Material	Absorptanz (α)	Emittanz (ϵ)	Verhältnis (α/ϵ)
Platiniert mit Schwarzen Chrom	0,87-0,93	0,1	9
Schwarze Akrylfarbe	0,92-0,97	0,84-0,90	1
Schwarze anorganische Farbe	0,89-0,96	0,86-0,93	1
Schwarze Silikatfarbe	0,86-0,94	0,83-0,89	1
Schwarze Emailfarbe	0,9	0,5	1,8
matt schwarz Zinkoberfläche	0,9	0,1	9
Kupferoxid auf Aluminiumoberfläche	0,93	0,11	8,5

Tabelle 4.3: Eigenschaften der Absorptionbeschichtungen aus „Department of Urban Developmente and House of the United States“ (Orozco C. A., 1996)

Bei der Solartrocknung ist die Auswahl des Sonnenkollektors von großer Wichtigkeit. Um die Effizienz eines Sonnenkollektors zu berechnen, werden die Methoden aus der der technischen Norm ASHRAE 99-77 für Luftkollektoren verwendet. Hier wird die Effizienz der Kollektoren beschrieben. Die nutzbare Energie kann nach der folgenden Gleichung (Montoya J. A. & Orozco C. A., 2005) berechnet werden:

$$\dot{Q}_u = \eta_c A_c H_T \quad (\text{kWh/Tag}) \quad (4.42)$$

Wobei: \dot{Q}_u = nutzbare Energie des Kollektors in kWh /Tag,

η_c = Effizienz des Kollektors,

A_c = Fläche des Kollektors,

H_T = gesamte Sonnenstrahlung (kWh/m²-Tag).

4.2.2.3 Durchsichtige Materialien

Die richtige Materialauswahl ist ein wichtiger Faktor und bildet die Grundlage für eine gute Funktion der Holz- oder Bambustrocknungssysteme. Technik, Wirtschaftlichkeit und die Qualität des Endproduktes sind maßgebliche Kriterien für eine erfolgreiche Trocknung.

Die durchsichtigen Abdeckungen der Trocknungsanlagen lassen den Eintritt der Strahlen zu. Ihre wichtigsten Eigenschaften sind: optische Eigenschaften, die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung, die Beschaffenheit und zuletzt die Kosten, (Saravía L. *et al.* (1992) in Corvalan R. *et al.* (1992)).

Unter den optischen Eigenschaften ist die Transmittanz (τ) von größter Bedeutung. Sie wird als Verhältnis zwischen der Strahlung, die die Abdeckung passiert, und der einfallenden solaren Strahlung definiert. Dies hängt natürlich stark ab vom Material der Abdeckung, von der Wellenlänge der einfallenden Strahlen und vom Einfallswinkel (θ), (Saravía L. *et al.* (1992) in Corvalan R. *et al.* (1992)).

Die Wellenlängen der Sonnenstrahlung variiert zwischen 0,3 - 20 μm . In dieser Spanne liegen auch die ultravioletten Strahlen, wobei Wellenlängen bis 0,4 μm unter thermischen Gesichtspunkten unwichtig sind. Dennoch spielen sie eine entscheidende Rolle im Zusammenhang mit der Haltbarkeit des Materials.

Die sichtbare und die infrarote Strahlung, zwischen 0,4 - 2,5 μm , bilden den Bereich, in dem sich der größte Teil der von der Strahlung transportierten Energie konzentriert.

Die *infrarote* Strahlung, zwischen 2,5 -20 μm , erzeugt eine Abstrahlung der im System enthaltenen Wärme der Körper (Corvalan R. *et al.*, 1992; Orozco C. A., 1996).

Eine grundlegende mechanische Eigenschaft des transparenten Materials ist eine gute Zugfestigkeit, wegen der Beanspruchungen, das Material aufgrund des Windes oder anderer äußerer Kräfte ausgesetzt ist. Die Haltbarkeit des durchsichtigen Materials ist insbesondere von der UV Strahlung und der Infrarot-Strahlung (hohe Temperaturen) im Inneren des Trockners abhängig. Hierdurch werden die Transparenz und der mechanische Widerstand beeinträchtigt.

Die Kosten, die bei der Errichtung eines Solartrockners entstehen, sind aus wirtschaftlichen Gründen besonders wichtig. Diese hängen neben den seiner Materialkosten von einer Reihe unabhängiger Faktoren ab, z. B. lokale Zölle, Einfuhrkosten etc..

Material	globale Transmittanz (%)	US\$/m ²
Standard-Glas	0,84	\$ 8,00
Standard-PE	0,92	\$ 0,40
UV Stabilisier PE	0,88	\$ 0,55
PVC	0,93	\$ 1,50
PolyKarbonat	0,75	\$ 20,00
Poly. Glasfaserverstärkt	0,80	\$ 14,00

Tabelle 4.4: Transmittanz (%) der durchsichtigen Materialien (Saravía L. *et al.*, 1992, in Corvalan R. *et al.*, 1992)

4.2.3 Konventionelle Trocknungen

Die technische Trocknung ist die Antwort auf die großen Unabwägbarkeiten, die die Freilufttrocknung oder natürliche Trocknung mit sich bringt. In einem geschlossenen Raum wird ein progressiv wärmeres und trockeneres Klima künstlich hergestellt. Dieses wird über gewisse Zeiträume, nach einem empirisch ermittelten und den Dimensionen und der Art des Holzes angepassten Programms, gehalten. Die klimatischen Veränderungen lassen den Feuchtegehalt in dem Holz oder Bambusgut jedes Mal weiter sinken.

Diese Kammern besitzen integrierte Systeme, wie Heizelemente, Luftumwälzungssysteme, Be- und Endlüftungseinrichtungen, Befeuchtungssysteme

und Klimakontrollsysteme, um den Trocknungsprozess zu kontrollieren. Eine Kammer ist ein thermodynamisches System, wo Materialien und auch Energieformen hinzugeführt und abgeführt werden, mit dem Ziel, das im Holz oder im Bambus enthaltene Wasser zu entfernen.

In Verbindung mit Bambus wurde über Erfahrungen mit der Kammertrocknung durch Laxamana M. G. (1985) für die folgenden Gattungen berichtet: *Dendrocalamus merillianus* (Elm.), *Bambusa vulgaris* Var. *striata*, *Phyllostachis nigra* Munro, *Schizostachyum diffusum* Merr. Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 enthalten Angaben zur Rundholz bambustrocknung der erwähnten Gattungen.

Art	Stapel N°	Anfangsfeuchtegehalt %			Endfeuchtegehalt %			Rohdichte (g/cm³)			Trocknungsbedingungen (°C)			Trocknungszeit (Std)	Beobachtung
		Basis	Mitte	Spitze	Basis	Mitte	Spitze	Basis	Mitte	Spitze	Tt	Tf	ΔT		
<i>Dendrocalamus merillianus</i> (Elm.)	1	86	81	77	16	11	16	0,54	0,6	0,7	60	52	8	103-68	68 Std Spizentrocknung ohne Rinde
	2	110	119	105	15	15	13				60	54,5	5,5	128-80	80 Std Spizentrocknung
<i>Bambusa vulgaris</i> var. <i>striata</i> (Lodd.)	1	109	108	73	11	6	9	0,5	0,52	0,58	60	54,5	5,5	128	
	2	146	192	167	7	8	7				65,5	54,5	11	74-49	49 Std Trocknung der Spitze und der Mitte
<i>Phyllostachys nigra</i> Munro	1	38	38	30	10	10	9	0,61	0,61	0,77	60	52	8	68-26	68 Std Trocknung der Basis
	2	59	58	59	15	14	15				60	54,5	5,5	63	
<i>Schizostachyum diffusum</i> Merr. (Schlingpflanzenbambus)	1	73	85	73	16	16	14	0,53	0,59	0,66	65,5	60	5,5	2	
	2	101	93	90	13	14	13				66,5	54,5	12	21	

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Experimente in den Trocknungskammern mit Bambusrundholz (Laxamana M. G., 1985)

Art	Stapel N°	Anfangsfeuchtegehalt %			Endfeuchtegehalt %			Rohdichte (g/cm³)			Trocknungsbedingungen (°C)			Trocknungszeit (Std)	Beobachtung
		Basis	Mitte	Spitze	Basis	Mitte	Spitze	Basis	Mitte	Spitze	Tt	Tf	ΔT		
<i>Dendrocalamus merillianus</i> (Elm.)	1	99	92	81	13	11	15	NA	NA	NA	60	52	8	82-33	33 Std Trocknung der Spitze
	2	139	139	144	18	19	16	NA	NA	NA	60	54,5	5,5	89-43	43 Std Trocknung der Spitze und der Mitte
<i>Bambusa vulgaris</i> var. <i>striata</i> (Lodd.)	1	110	92	74	7	7	7	NA	NA	NA	60	54,5	5,5	128	
	2	152	158	161	10	10	8	NA	NA	NA	65,5	54,5	11	49	
<i>Phyllostachys nigra</i> Munro	1	25	25	22	11	11	10	NA	NA	NA	60	52	8	26	
	2	56	57	46	14	14	14	NA	NA	NA	60	54,5	5,5	63	
<i>Schizostachyum diffusum</i> Merr. (Schlingpflanzenbambus)	1	101	94	90	13	14	13	NA	NA	NA	65,5	60	5,5	28	
	2	99	87	84	7	8	7	NA	NA	NA	150	52	98	21	

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Experimente in den Trocknungskammern mit Bambuslatten (Laxamana M. G., 1985)

Bei Bambusstangen (Halmen) dauerte die Trocknung der Gattung *Dendrocalamus merillianus* (Elm.), (in der Zeile N°2) mit einem durchschnittlichen Anfangsfeuchtegehalt der Halmbasis, Mitte und Spitze, bei einem Halm mit Rinde, von 111%, auf einen Endfeuchtegehalt von 15% zwischen 80 und 128 Stunden, wobei die Trocknung der Abschnitte der Spitzen 80 Stunden betrug und eine psychrometrische Differenz von 5,5 K aufwies. Wenn die psychrometrische Differenz auf 8 vergrößert wird, verringert sich die Trocknungszeit auf 68 bis 103 Stunden. Dies bedeutet einen Tag weniger, wobei aber auch die Anfangsfeuchte im Durchschnitt unter 81% lag.

Für den Bambus in Latten- oder Tafelform, wies die *Bambusa vulgaris* Var. *striata*, einen durchschnittlichen Anfangsfeuchtegehalt 92% mit Rinde auf. Der Endfeuchtegehalt lag nach 128 Stunden bei 7%.

Eine andere Studie über die Lattentrocknung von Bambus wurde durch Gandhi Y. (2002) durchgeführt. Sie heißt „Preliminary study on the drying of Bamboo (*Bambusa blumeana*) in a Wood waste-fired kiln“. Hier wurde bei der Trocknung von Proben aus der Basis, aus der Mitte und von der Spitze in 56 Stunden ein Feuchtegehalt für die Basis von 25,5% erhalten und für die Spitze von 6,4%.

4.2.3.1 Stoffbilanz

Wenn man für einen Trocknungsprozess die Menge der in den Prozess eingehenden und der den Prozess verlassenden Stoffe bestimmen will, muss man eine Massenbilanz aufstellen. Die Summe aller einströmenden Stoffe wird als $\sum \dot{m}_e$ und die der ausströmenden Stoffe als $\sum \dot{m}_a$ bezeichnet.

So gilt nach Krischer O. & Kast W. (1978):

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_a = -\Delta \dot{m} \quad ; \quad (4.43)$$

Wobei $-\Delta \dot{m} = 0$, wenn keine Feuchtigkeit aus dem Trocknungsgut tritt.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_a \quad (4.44)$$

$$\dot{m}_{D,a} - \dot{m}_{D,e} = -\Delta \dot{m}_W \quad ; \quad \text{diskontinuierliche Trockner}$$

$$\dot{m}_{W,e} - \dot{m}_{W,a} = \dot{m}_{D,a} - \dot{m}_{D,e} \quad \text{kontinuierlich arbeitender} \quad (4.45)$$

Trockner im Beharrungszustand,

Wobei $\dot{m}_{W,e}$ = Massenstrom der Flüssigkeit im Material beim Eintritt,

$\dot{m}_{W,a}$ = Massenstrom der Flüssigkeit im Material beim Austritt,

$\dot{m}_{D,a}$ = Massenstrom des Dampfes beim Austritt,

$\dot{m}_{D,e}$ = Massenstrom des Dampfes beim Eintritt.

Wenn kein Wasser im Material beim Austritt vorliegt, da es trocken herauskommt, kann die Gleichung wie folgt zusammengefasst werden:

$$\dot{m}_{W,L} + \dot{m}_{D,L} = \dot{m}_{D,L} \quad (4.46)$$

Nach Gleichung (4.1) gilt:

$$m_L + m_D = m_L(1 + x) \quad (4.47)$$

Wobei: m_L = Gasmasse,

m_D = Wasserdampfmasse,

x = Dampfgehalt (kg Dampf/kg trockenes Gas).

Es wird angenommen, dass der Feuchtegrad beim Eintritt x_e und beim Verlassen x_a des Systems durch Messungen bekannt ist. Der Feuchtigkeitsgrad $x(t)$ ist eine zeitlich veränderliche Prozessgröße, die von der Dauer des Prozesses abhängt. Bei der kontinuierlichen Trocknung sollten die Ergebnisse der kontinuierlichen oder diskontinuierlichen Messung immer konstant sein.

Für diskontinuierliche Trockner ergibt sich die Gleichung:

$$\dot{m}_L = \frac{\Delta \dot{m}_W \cdot t}{\int_0^t [x_a(t) - x_e(t)] dt} \quad (4.48)$$

Für die kontinuierliche Trocknung gilt:

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{m}_{W,e} - \dot{m}_{W,a}}{x_a - x_e} \quad (4.49)$$

4.2.3.2 Energiebilanz

Eine Energiebilanz zeigt die Summe aller Energieveränderungen in einem System in Gestalt von Wärme oder Arbeit an. Für den Bereich der Trocknung wird die Energiebilanz wie folgt ausgedrückt (Krischer O. & Kast W., 1978):

$$\sum \dot{Q} + \sum L = \sum \dot{E}_a - \sum \dot{E}_e + \Delta \dot{E} \quad (4.50)$$

Wobei die Terme bedeuten:

$\sum \dot{Q}$ = Summe aller Wärmeflüsse in einem Trocknungssystem verstanden. Diese Wärmeströme sind durch Leitung oder Strahlung in das System ab- oder hinzugeflossen. Wärmeströme, die Verluste (in Form von elektrischer oder mechanischer Energie) beinhalten, werden als Arbeit bezeichnet,

$\sum L$ = Ist die Summe aller mechanischen oder elektrischen Leistungen, die in das Trocknungssystem eingebracht werden,

$\sum \dot{E}_e$ = Summe der Energie aller eintretenden Materialien. Für jedes Material ist die Summe seiner Energien (wie z. B. Enthalpie H , kinetische, chemische Energie) einzusetzen,

$\sum \dot{E}_a$ = Summe aller Energien, die mit dem Trocknungsgut aus dem System

austreten. $\Delta \dot{E}$ = zeitliche Energieveränderung eines bestimmten Bereichs.

Die Wärmeströme \dot{Q} und die Arbeit L gelten als positiv, wenn sie in das System eingeführt werden, als negativ wenn sie abgeführt werden. Im Beharrungszustand verändert sich der Energiestatus über einen unbestimmten Zeitraum im System nicht.

Daher ist $\Delta \dot{E} = 0$. Die Enthalpieströme \dot{H} verhalten sich proportional zu den Massenströmen \dot{m} . Aus der spezifischen Enthalpie h folgt also: $\dot{H} = \dot{m} h$.

Eine Trocknungskammer (ein geschlossenes System) soll einen Lüfter, mit der Leistung L_{vent} , und einen Luftherhitzer, der den Luftstrom erhitzt und für einen

Wärmestrom \dot{Q}_{zug} sorgt, enthalten. Die Verluste von Wärmeenergie an die Umgebung

werden mit $(-\dot{Q}_{verl})$ bezeichnet:

$$- \dot{Q}_{\text{verl}} + \dot{Q}_{\text{zug}} + L_{\text{vent}} = \dot{m}_L h_{La} + \dot{m}_{Da} h_{Da} - \dot{m}_L h_{Le} - \dot{m}_{De} h_{De} + \Delta \dot{E} \quad (4.51)$$

Die Energieveränderung in Gestalt der Enthalpie $-\Delta \dot{E}$ ist der Energie des ausgetretenen Wassers $-\Delta \dot{m}_W h_W$ gleich. Die Gleichung für ein geschlossenes System bleibt somit:

$$- \dot{Q}_{\text{verl}} + \dot{Q}_{\text{zug}} + L_{\text{vent}} = \dot{m}_L (h_{La} - h_{Le}) + \dot{m}_{Da} h_{Da} - \dot{m}_{De} h_{De} + -\Delta \dot{m}_W h_W \quad (4.52)$$

Zur Bestimmung der Enthalpie werden von den Stoffen mit gleich bleibendem Aggregatzustand die mittlere spezifischen Wärmen C_p , genommen. Feste oder flüssige Materialien werden gleich behandelt.

$$h = C_p \mathcal{G}; \text{ für Gase,} \quad (4.53)$$

$$h = C \mathcal{G}; \text{ für Flüssigkeiten und feste Stoffe} \quad (4.54)$$

Für Wasserdampf-Gasmischungen (normalerweise Luft) ist es angebracht als Enthalpie h (ohne Index) ein 1 kg trockenes Gas und der dazugehörige Wasserdampf ($x = \dot{m}_D / \dot{m}_L$) festzulegen. Für nicht gesättigte Luft, die überhitzten Dampf erhält, ergibt sich die Gleichung (Krischer O. & Kast W. 1978):

$$h = h_L + x h_D = c_{pL} \mathcal{G} + x (h_{VO} + c_{pD} \mathcal{G}) \quad (4.55)$$

Bei übersättigter Luft (wie bei Nebel) erhält man, wenn der Dampfanteil x'' und der Flüssigkeitsanteil $x - x''$ ist (Krischer O. & Kast W. 1978):

$$h = h_L + x'' h''_D + (x - x'') h_W$$

$$h = c_{pL} \mathcal{G} + x'' (h_{VO} + c_{pD} \mathcal{G}) + (x - x'') c_W \mathcal{G} = h'' + (x - x'') c_W \mathcal{G} \quad (4.56)$$

Wobei: h'' = ist die Entalpie von 1 kg trockener Luft, welche mit Wasserdampf $\varphi = 1$ bei einer Temperatur \mathcal{G} gesättigt ist.

h_{VO} = ist die Entalpie der Verdampfungswärme bei $\mathcal{G} = 0^\circ\text{C}$,

Für übersättigte Luft, wobei die Temperatur unterhalb des Taupunkt liegt, ergibt sich nach (Krischer O. & Kast W. 1978):

$$h = h_L + x'' h''_D + (x - x'') h_W \quad (4.57)$$

4.2.3.3 Kontrolle des Trocknungsprozesses

Der Trocknungsprozess erfordert integrierte Systeme und Komponenten, die insgesamt dazu dienen sollen, die Feuchtigkeit aus dem Holz oder aus der Guadua zu ziehen. Man muss die Trocknungsparameter Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit kontrollieren. Dies kann manuell, halbautomatisch und automatisch erfolgen.

Bezüglich der Kontrolle des Trocknungsprozesses wurden verschiedene Forschungen durchgeführt, die sich u. a. auf die Ergebnisse von Keylwerth (1950; 1951) in Kollmann F. & Keylwerth R. (1950), Kollmann F. & Côté W. (1968) stützen. Für die konvektive Trocknung bei Temperaturen unter 100 °C und für die Trocknung in überhitztem Wasserdampf sind Aspekte, wie die Wahl der angemessenen Temperatur, der relativen Luftfeuchte in der Kammer und des Trocknungsgefälles $TG = \frac{u}{u_{gl}}$; für das

Endergebnis des Prozesses entscheidend. Es wurden Trocknungspläne in Tabellenform aufgestellt zur Kontrolle der Trocknungsbedingungen ($TG, T, \Delta T, \varphi$) die den ges. Trocknungsablauf in Abschnitte untergliedern. Außerdem wurden zeitgesteuerte Trocknungspläne aufgestellt für Laub- und Nadelhölzer.

Die Kontrolle des Trocknungsprozesses beinhaltet die folgenden Aspekte: Produktkontrolle zu Beginn der Trocknung, Kontrolle des Trocknungsablaufs mit Hilfe von Reglern und Stellgliedern und eine abschließende wiederholte Produktkontrolle.

4.2.3.4 Steuerung und Regelung des Systems

Die Trocknungsparameter (Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit) werden für jeden Trocknungsprozess individuell festgelegt. Die folgenden Aspekte werden hierbei berücksichtigt: Holzart, die Holzdicke, Anfangsfeuchte, Endfeuchte und gewünschte Qualität.

Die Regelung des Trocknungsprozesses kann auf unterschiedliche Weise dargestellt werden. In *Abb. 4.3* sind die Zusammenhänge zwischen den für die Regelung des Prozesses wichtigen Größen und deren Interaktionen dargestellt. In *Abb. 4.3* wird die Regelung als Kette dargestellt (Kröll K., 1978).

Während des Prozesses werden ununterbrochen die Messwerte der verschiedenen Parameter (Ist-Werte) registriert und mit den gewünschten Werten (Soll-Werte) des vorher festgelegten Trocknungsprogramms verglichen. Treten Differenzen auf, soll das Kontrollsystem automatisch eingreifen, um die Werte zu korrigieren. Dies wird mit Hilfe eines Regelkreises bewerkstelligt (Brunner R., 1987; Hoheisel H., 1989).

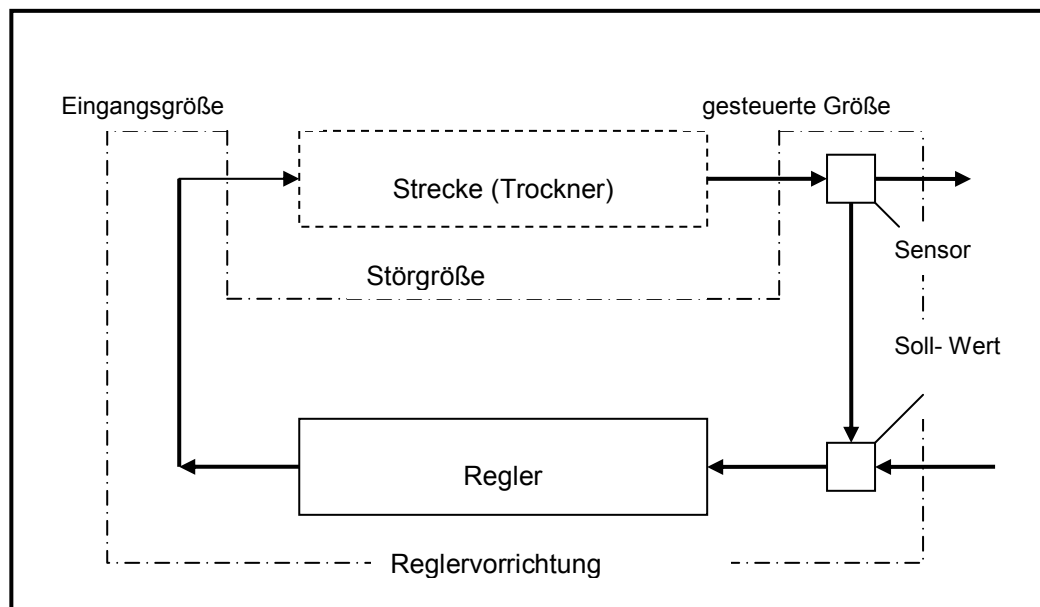


Abb. 4.3: Basisregulationskreis (Kröll K., 1978)

Die Arbeitsweise eines Regelkreises kann man sich folgendermaßen vorstellen: Die Messapparatur überprüft den reellen Wert (Regulierungsgröße) und gibt ihn an den Regler weiter. Wenn der Regler darauf programmiert ist den Parameter, wie z. B. die Temperatur, konstant zu halten, wird er korrigierend eingreifen, um die Differenz zwischen dem reellen Wert und dem erwünschten Wert zu minimieren. Durch die Anpassung des Regelkreises werden Richtung, Größenordnung und die Dauer der Beeinflussung der jeweiligen Stellgröße vorgegeben. Hierbei müssen Störgrößen berücksichtigt werden sowie die Interaktionen zwischen verschiedenen Regelkreisen, die sich gegenseitig beeinflussen können, z. B. Kopplung der Regelkreise für Temperatur und relative Luftfeuchte.

4.2.3.5 Kontrolle von Energieverlusten bei der Frischluft/Ablufttrocknung

Der Prozess erfordert eine geschlossene Kammer mit dampfdichter Innenhaut und guter Isolierung. Die Kammer soll beim konventionellen System aus widerstandsfähigen Materialien gebaut sein, da bei einer relativen Luftfeuchte von 20 bis 95%, Temperaturen bis zu 90°C und bei manchen Trocknern sogar bis zu 130°C erreicht werden können. Die Kammer soll eine gute thermische Isolierung und eine

hermetisch geschlossene Konstruktion besitzen. Wegen der Korrosionsgefahr sollten widerstandsfähige Konstruktionsmaterialien verwendet werden und die Tore sollten die Kammern dicht schließen können.

Zur Bestimmung der thermischen Isolation wird die Summe aller Wärmeleitahlen der Wandmaterialien verwendet und der Wärmedurchgang mit der folgenden Gleichung bestimmt (McAdams W., 1942):

$$q = \frac{\sum(\Delta T)}{\sum_{x=1}^n \frac{L_n}{k_n A_n}} \text{ [W/h-m]} \quad (4.58)$$

Wobei: q = Wärmedurchgang W/h-m,

ΔT = Temperaturdifferenz (innen-außen) in K,

L = Dicke der Schicht in m,

k = Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials in W/(mk),

A = Oberfläche in m².

Mit dieser für die Trockenkammerkonstruktionen angewandten Gleichung können mit der Summe der Wärmedurchgangswiderstände die Energieverluste der Anlage berechnet werden. Die Wärmedurchgangswiderstand kann für einen mehrschichtigen Wandaufbau nach folgender Formel berechnet werden (Grigull U, 1957; Brunner R., 1987):

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_a}; \quad [\text{m}^2\text{K}/\text{W}] \quad (4.59)$$

Wobei: α_i = Verhältnis der Wärmeübertragung zwischen der Innenluft der Kammer und der Inneren Bauteiloberfläche [W/m²K],

α_a = Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Luft außerhalb der Kammer und der äußeren Bauteiloberfläche [W/m²K],

d_n = Schichtdicken der Konstruktionsbestandteile [m],

λ_n = Wärmeleitahl jeder Schicht [W/mK].

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_a}} \text{ [m}^2\text{K/W]} \quad (4.60)$$

5 Ergebnisse der Anwendungen verschiedener Trocknungsmethoden

5.1 Trocknungsrelevante Eigenschaften von *Guadua angustifolia*

5.1.1 Abhängigkeiten der Feuchteverteilung im Guaduahalm

Topographie, Länge des Halmes, Nodium und Internodium

Um den Einfluss der Standortbedingungen auf den Feuchtegehalt im Bambus und auf die in Kapitel 3 erwähnten physikalischen Eigenschaften des Bambusses zu bestimmen, wurden Untersuchungen durchgeführt. Hierbei untersuchte man den Einfluss der Topographie auf den Feuchtegehalt, die Unterschiede über die Länge eines Halmes bzw. in bestimmten Abschnitten, wie Nodien oder Internodien (Abd. Latif M., 1996; Abd. Latif M. & Liese W., 2002).

Die wirtschaftlich genutzten Teile eines *Guadua*-Halmes sind: Basis, Halmmitte, obere Halmmitte und Spitze. Als *Basis* wird der Abschnitt vom Boden bis 4 Meter Höhe bezeichnet. Die *Halmmitte* bildet die darauf folgenden 6 Längenmeter. Die *obere Halmmitte* bezieht sich auf den Abschnitt zwischen dem 10. und 16. Meter. Die *Spitze* reicht vom 16. Längenmeter bis zum Halmende. Jeder dieser Abschnitte hat ca. 18 Internodien (Cruz H., 1994).

Der Einschlag, der für diese Untersuchungen verwendeten Proben, wurde am 20.09.04 durchgeführt. Er erfolgte in drei verschiedenen Zonen in der Region Marselle (Risaralda-Colombia). Diese Region befindet sich auf einer Höhe von 1950 m üNN. Dort liegt ein jährlicher Niederschlag von 2750 mm vor, die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt ca. 20 °C. Im warmen Februar liegt sie bei 20,5 °C und im Oktober, dem frischesten Monat, bei 19,5 °C (Osorio D., 2005).

Die Landschaft um Marsella ist durch ein welliges oder hügeliges Relief geprägt. Die Stadt liegt in der Resaralda Region, einer Bergregion. Die Böden in dieser Zone sind aus vulkanischer Asche entstanden, besitzen eine hohe Porosität und somit eine gute Fähigkeit, Feuchtigkeit zu speichern. Sie haben eine mäßig dicke Konsistenz. Diese Böden liegen nicht nur in der Region um Marsella vor, sondern in der gesamten Kaffeeregion UTP- GTZ (2004) in (Osorio D., 2005).

Die Wasserspeicherfähigkeit der Böden in dieser Region haben eine gute Fähigkeit, Wasser zu speichern, was auch in kurzen Dürreperioden zur Stabilisierung der Vegetation. Außerdem regeln sie den Wasserfluss in den tieferen unteren Bodenschichten. In vielen Fällen, wenn sie von undurchlässigeren Schichten umgeben sind, können sie eine laterale Zirkulation hervorrufen. Diese Untersuchungen hierzu wurden von der UTP- GTZ¹³ (2004) durchgeführt (Osorio D., 2005).

¹³ UTP: Universidad Tecnológica de Pereira
GTZ: Gesellschaft Technische Zusammenarbeit

Die Guaduas wurden auf einer Höhe von 1560, 1600 und 1640 m üNN geschnitten, ungefähr 300 Höhenmeter tiefer als die Hauptstadt der Region Marsella. Die Stichproben für die Untersuchungen wurden an drei Orten entnommen, an der *Bergspitze*, *am Hang* und im *Tal*. Die Zone der *Bergspitze* liegt auf einer Höhe von 1640 m üNN und seine Geländeneigung ist gering (0 -5%); Die *Hangzone* liegt auf einer Höhe von 1600 m üNN und hat ein Gefälle von 12%, und die *Talzone* befindet sich auf einer Höhe von 1560 m üNN und hat ein mäßig gewelltes Relief mit Höhendifferenzen von ungefähr 5 Metern. Die beiden ersten Flächen befinden sich innerhalb des selben Guaduabestandes mit einem horizontalen Abstand von 100 m. Die *Talzone* liegt in einem anderen Guaduabestand mit etwa 1000 m Abstand zu den anderen Beständen.

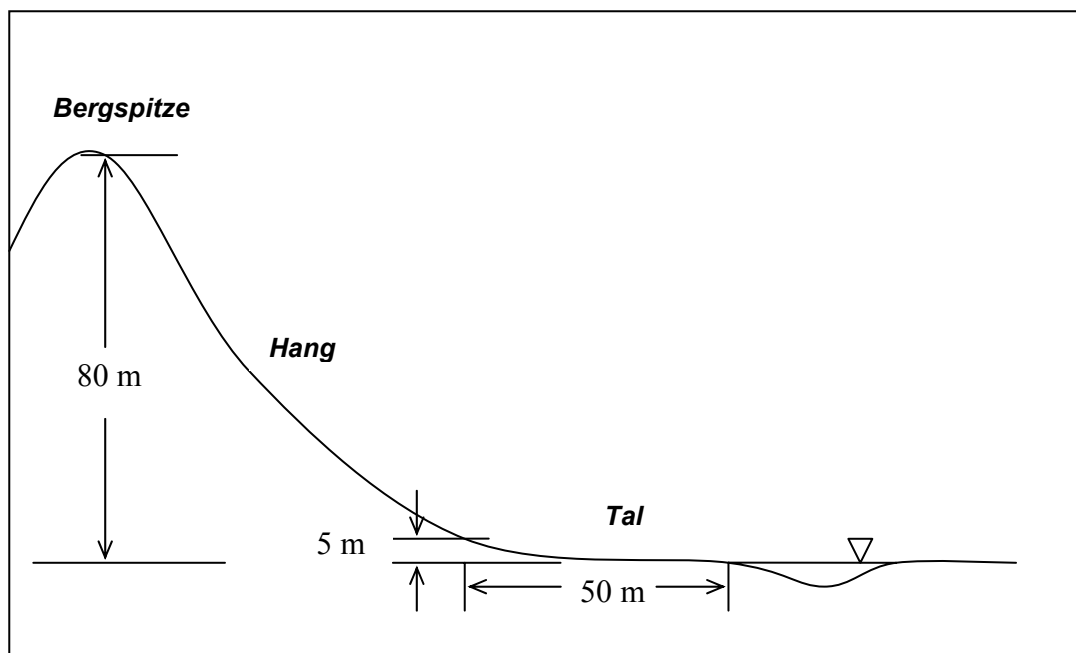


Abb. 5.1: topographische Darstellung der untersuchten Zonen

Im Rahmen der statistischen Absicherung der Feuchtunterschiede in Abhängigkeit von den Standortfaktoren werden folgende Testhypothesen aufgestellt.

Hypothesen für die Feuchteverteilung:

Der durchschnittliche Feuchtegehalt in der Basis ist gleich dem durchschnittlichen Feuchtegehalt in der Halmmittle.

$$H_0 : \bar{u}_{Basis} = \bar{u}_{Halmmittle} \quad (5.1)$$

Der durchschnittliche Feuchtegehalt in den *Nodien* ist gleich dem Feuchtegehalt in den *Internodien*.

$$H_0 : \bar{u}_{Nodium} = \bar{u}_{Internodium} \quad (5.2)$$

Im Rahmen der Überprüfung der Hypothesen wurden die Mittelwertsunterschiede zwischen den Ergebnisgruppen durch Anwendung des t-Tests auf 95%-Niveau verglichen.

Getrennt für die mittlere Halmfeuchte, die Feuchte an der Basis und in der Halmmitte wurden bezüglich den Standortfaktoren folgende Hypothesen aufgestellt:

$$H_0 : \bar{u}_{Spitze} = \bar{u}_{Hang} = \bar{u}_{Tal} \quad (5.3)$$

Es gibt keine bedeutenden Unterschiede innerhalb der Feuchtegehalte in den *Halmmitten und Basis* der drei Standorte.

Allgemein wurden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

Die durchschnittlichen Feuchtegehalte in den *Nodien* und in den *Internodien* sind gleich

$$H_0 : \bar{u}_{Nodium} = \bar{u}_{Internodium} \quad (5.4)$$

Diese Hypothesen wurden auf Konfidenzniveau von 95% geprüft. Mit Hilfe der Varianzanalyse wurden mehrere Vergleiche der durchschnittlichen Feuchtegehalte durchgeführt, um Differenzen der durchschnittlichen Feuchtegehalte unter den Zonen zu entdecken.

Um zu bestimmen, wann eine Hypothese abzuweisen oder zu akzeptieren ist, wurde als Referenz der Wert *Signifikanz (Sig.)* „p“ eingeführt. Es wurde festgelegt, dass, wenn *p* einen Wert unterhalb von 0,05 erreicht, die Hypothese abzuweisen ist. Anderenfalls gibt es keine ausreichend statistisch gesicherten Unterschiede, und die Hypothese wird akzeptiert.

$$p < 0,05 \quad ; \text{ Die Hypothese wird abgewiesen, wenn } \quad (5.5)$$

bedeutsame Differenzen in den Nullhypothesen von (5.1) bis (5.5) existieren.

5.1.1.1 Materialien und Methoden

Es wurden 15 Halme aus jeder Zone entnommen. Insgesamt wurden 45 Guaduas ausgesucht. An jedem Guaduahalm wurden vier Messungen, zwei in der *Basis* (Nodien und Internodien) und zwei in der *Halmmitte* (Nodien und Internodien) durchgeführt; Die

Feuchtebestimmung erfolgte an kleinen Abschnitten von 5 bis 10 cm Länge, was zu einer Gesamtzahl von 180 Proben führte, die es zu bewerten galt.

Die drei unterschiedlichen topographischen Zonen der Stichproben wurden als *Spitze*, *Hang* und *Tal* bezeichnet. In jeder dieser Zonen wurden drei kreisförmige Parzellen, mit einem Radius von 5 Metern ausgewählt. Diese wiesen für den Einschlag angemessene (reife) Guaduas auf. Aus jeder Parzelle wurden fünf Guaduas zufällig ausgewählt. Es wurde hierbei für jede Parzelle einfache aleatorische Stichprobenentnahme angewandt. Die Guaduas einer Parzelle wurden aufgelistet und die aleatorisch ermittelten Werte ausgewählt.

Die Messungen des Feuchtegehaltes wurden mit Hilfe der gravimetrischen Methode durchgeführt. Kreisförmige Halmabschnitte mit einer Länge von 5 cm wurden nach der Norm ISO 22157-1:2004, Nummer (6) zugeschnitten. Die Proben wurden mit einer elektronischen Waage mit einer Präzision von 0,001g gewogen und im Labor der Fakultät für Umweltwissenschaften der technologischen Universität von Pereira bis zur Gewichtskonstanz gedarrt bei $(120 \pm 3) ^\circ\text{C}$.

Für die statistische Analyse der Daten wurde das Statistikprogramm SPSS-10 verwendet. Es wurde, unter Annahme des Vorliegens der Normalverteilung, ein Prüfniveau von 95% gewählt. Die Feuchteunterschiede zwischen Basis und Halmmitte und zwischen Nodien und Internodien wurden verglichen. Die Differenzanalyse der durchschnittlichen Feuchtegehalte in den verschiedenen Zonen wurde mit Hilfe einer Varianzanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse wurden graphisch dargestellt.

5.1.1.2 Ergebnisse

Ergebnisanalyse der verschiedenen topographischen Zonen und Ergebnisanalyse über die gesamte Halmlänge in Anhang A.

Die Hypothesen 5.1, 5.2, 5.3, werden im Anhang A verwendet.

Allgemeine Analyse der Ergebnisse für die Nodien und Internodien

Allgemeine Analyse für die Halmmittle- und Basisnodien

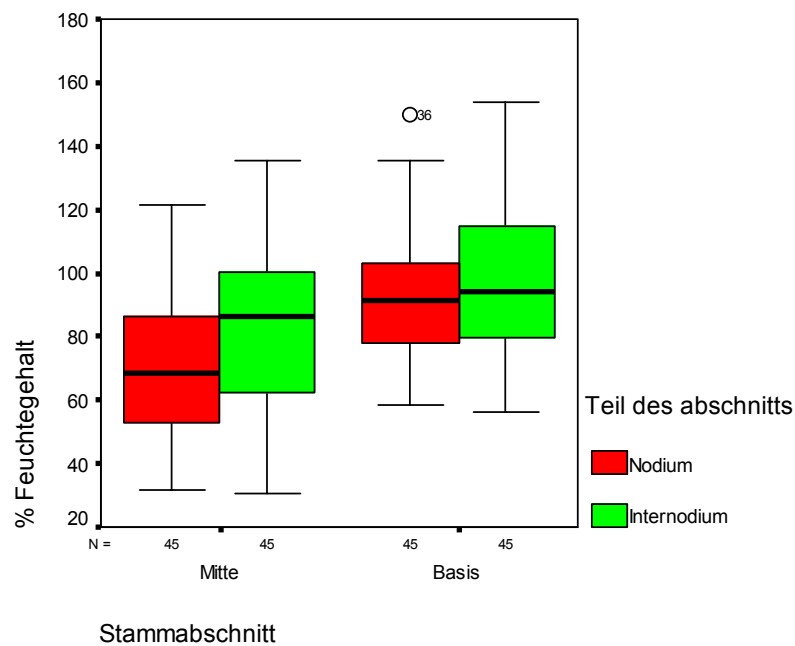


Abb. 5.2: Feuchtegehalt der Nodien und Internodien über die Länge des Halmes

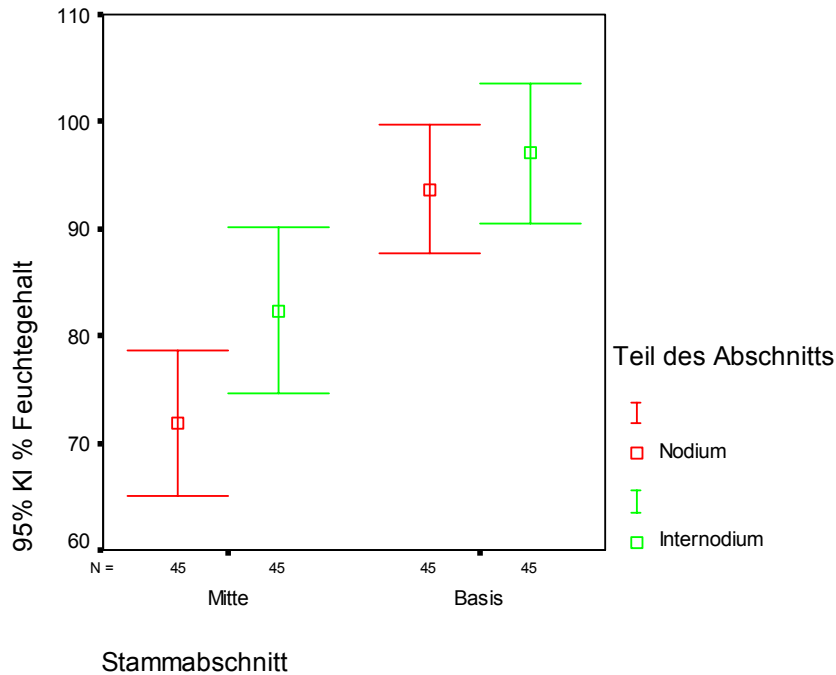


Abb. 5.3: Feuchtegehalt der Nodien und Internodien über die Länge eines Halmes mit einem Konfidenzintervall von 95%

Allgemein treten für die Halmmitte und Basen in der *Abb. 5.5* keine Unterschiede zwischen Nodien und Internodien auf, daher muß ein "t" Test durchgeführt werden, um seine *Signifikanz* zu erhalten.

Basisanalyse

t- Test

Statistiken der Proben in Zusammenhang mit den Basisnodien und Basisinternodien

		Mittelwert	N	Standard abweichung	Standard abweichung des Mittelwertes
Paar 1	Basis Nodium	93.6472	45	19.9399	2.9725
	Basis Internodium	97.0223	45	21.5824	3.2173

Tabelle 5.1: Statistische Werte der Proben in Verbindung mit dem Nodien- und Internodienpaar

Prüfung des Zusammenhangs der Proben

		Unterschiede					t	gl	Sig. (bilateral)
		Mittelwert	Standard abweichung	Standard abweichung des Mittelwertes	Konfidenzintervall 95%				
					Unterer	Oberer			
Paar 1	Basis Nodium - Basis Internodium	-3.3750	19.5005	2.9070	-9.2336	2.4836	-1,161	44	.252

Tabelle 5.2: "t" Test der Proben in Zusammenhang mit den Nodien- und Internodienhalmmittelpaaren.

Analyse der Halmmitten

t- Test

Statistiken der Proben in Zusammenhang mit den Halmmittennodien und Halmmittelninternodienpaaren

		Mittelwert	N	Standard abweichung	Standard abweichung des Mittelwertes
Paar 1	Mittel Nodium	71.8929	45	22.4884	3.3524
	Mittel Internodium	82.3462	45	25.8951	3.8602

Tabelle 5.3: Statistische Werte der Proben in Verbindung mit den Halmmittennodien- und Halmmittelninternodienpaaren

Prüfung des Zusammenhangs der Proben

		Unterschiede					t	gl	Sig. (bilateral)
		Mittelwert	Standard abweichung	Standard abweichung des Mittelwertes	Konfidenzintervall 95%				
					Unterer	Oberer			
Paar 1	Mittel Nodium - Mittel Internodium	-10.4533	14.0922	2.1007	-14.6870	-6.2195	-4,98	44	.000

Tabelle 5.4: "t" Test der Proben in Zusammenhang mit dem Halmmittennodien- und Halmmittelninternodienpaar

Nach der *Tabelle 5.2* ist die *Signifikanz* zwischen den Nodien und Internodien der Halmstöcke gleich $p > 0,05$. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.4, die Feuchtegehalte seien gleich, akzeptiert wird, weil es keinen statistischen Unterschied gibt. Nach der *Tabelle 5.4* ist die *Signifikanz* zwischen den Nodien und Internodien der Basen gleich $p < 0,05$. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.4, die Feuchtegehalte seien gleich, nicht akzeptiert wird, weil es eindeutige statistische Unterschiede gibt.

5.1.2 Untersuchung des Schwindungs- und Quellungsverhaltens

Die Untersuchungen zum Schwind- und Quellverhalten wurde im Labor des BFH - Instituts für Holzphysik durchgeführt. Es wurden die folgenden Normen verwendet:

DIN 52 182: 1976 Bestimmung der Rohdichte, DIN 52 183: 1977 Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes, DIN 52 184: 1979 Bestimmung der Quellung und Schwindung.

Die Dichten der absolut trockenen Proben 0% ist gleich der normalen Dichte bei 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 65%.

$$H_0 : \rho_0 = \rho_{(20/65)} \quad (5.6)$$

Die differenzielle Quellung in radialer und tangentialer Richtung sind gleich.

$$H_0 : q_{,r} = q_{,t} \quad (5.7)$$

Die maximale Volumenausdehnung der Proben mit Nodien und Internodien ist gleich der maximalen Volumenausdehnung bei Probennur mit Internodien.

$$H_0 : \alpha_{\max,v(N+I)} = \alpha_{\max,v(I)} \quad (5.8)$$

Die normale Volumenschwindung bei der Trocknung der Proben mit Nodien und Internodien ist gleich der Volumenschwindung der Proben mit Internodien.

$$H_0 : \beta_{N,v(N+I)} = \beta_{N,v(I)} \quad (5.9)$$

Die maximale radiale Quellung ist gleich der maximalen tangentialen Quellung.

$$H_0 : \alpha_{\max,r} = \alpha_{\max,t} \quad (5.10)$$

Die normale radiale Schwindung ist gleich der normalen tangentialen Schwindung.

$$H_0 : \beta_{N,r} = \beta_{N,t} \quad (5.11)$$

5.1.2.1 Materialien und Methoden

Es wurden 10 Latten *Guadua angustifolia* Kunth ausgewählt und jede in 7 Stücke geschnitten. Davon waren 5 Stücke aus einem Internodienabschnitt und zwei aus einem Nodienabschnitt. Die Proben wurden nummeriert bzw. markiert, insgesamt wurden 50 Internodienabschnitte und 20 Nodienabschnitte auf ein Maß von 15 mm (l) x 30 mm (t) x 8 mm (r) zugeschnitten.

Das Experiment wurde bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten durchgeführt. Hierbei wurden Klimakammern mit den folgenden Werten für die relative Luftfeuchte und für die konstante Temperatur verwendet: 20° C/ 35%; 20° C/ 65%; 20° C/ 85%. Die Proben wurden einige Tage bis zur Gewichtskonstanz diesen Klimaten ausgesetzt. In jedem Klima wurden die Maße und das Gewicht der Proben kontrolliert, bis die Proben ein konstantes Gewicht aufwiesen. Dann wurden die Abmessungen mit Messinstrumenten bestimmt, bevor die Proben in den nächsten Klimaabschnitt überführt wurden.

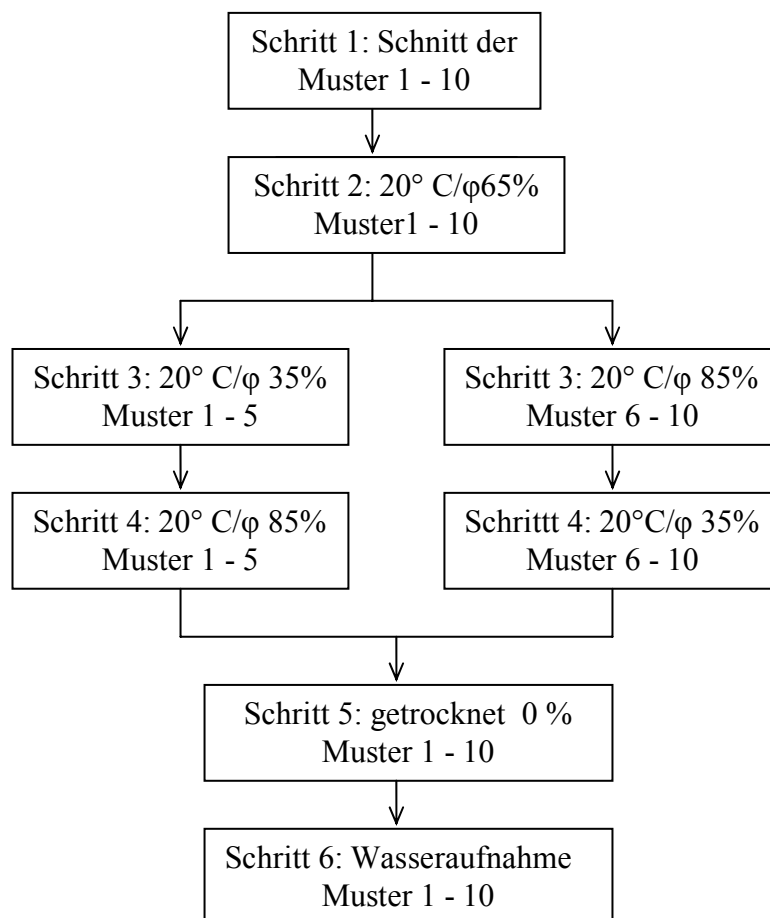


Abb. 5.4: Schematische Darstellung des Schwindungs- und Quellungsexperiment mit Proben der *Guadua angustifolia*

5.1.2.2 Ergebnisse

Gleichgewichtsfeuchte und Dichteschwankungen bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten

	Feuchtegehalt				Rohdichte		
	U _{35%} [%]	U _{65%} [%]	U _{85%} [%]	U _{wasser} [%]	P _{20/85} [g/cm ³]	P _{20/65} [g/cm ³]	P ₀ [g/cm ³]
N:	70	70	70	70	70	70	70
x-min:	5,77	9,06	10,38	63,3	0,444	0,441	0,421
x-mittel:	6,27	10,87	12,15	140,2	0,576	0,574	0,546
x-max:	6,65	13,01	13,38	207,2	0,913	0,910	0,855
SD:	0,19	1,16	0,97	30,89	0,09	0,09	0,09
VK [%]:	3,07	10,69	8,02	22,04	16,39	16,36	16,34

Tabelle 5.5: Ergebnisse für die Gleichgewichtsfeuchte bei verschiedenen Klimaten und die Werte für die Rohdichte, bei einer relativen Luftfeuchte von 65% und 85% sowie 0%.

Die Tabelle 5.5 zeigt die für die *Guadua angustifolia* erhaltenen Werte. Wobei die „x“-Durchschnittswerte, die Maximal- und Minimalwerte, die Standardabweichung „s“ und der Variationskoeffizient „VK“, bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten von 35%, 65% und 85% und die Wasserimmersion betrachtet werden. Diese Tabelle zeigt auch die Dichteänderungen bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten und im Darrzustand.

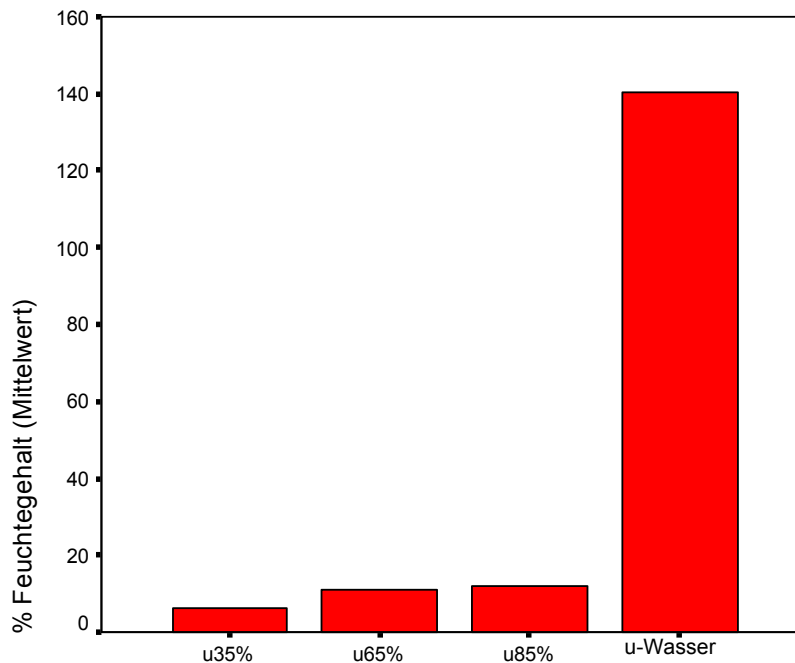


Abb. 5.5: Gleichgewichtsfeuchtegehalt bei verschiedenen Klimaten mit einer relativen Luftfeuchte von 35%, 65%, 85% und bei Wasserimmersion

Die Darr-Rohdichte zeigt bedeutende Unterschiede zu der Dichte bei 20° C/ 65% relativer Luftfeuchte. Die *Signifikanz* liegt bei $p < 0,05$, das bedeutet, dass die Nullhypothese, die Dichten seien gleich, nicht akzeptiert wird, da bedeutende

statistische Unterschiede vorliegen. Nach der *Tabelle 5.5* zeigen die Dichten bei 20° C / 65% relativer Luftfeuchte und 20° C / 85% relativer Luftfeuchte keine Unterschiede.

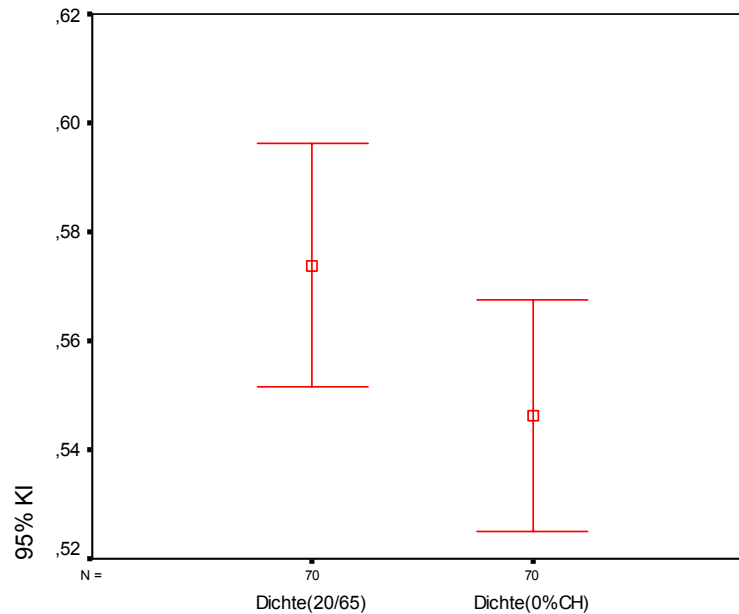


Abb. 5.6: Dichte bei 20° C / 65% relativer Luftfeuchte und einem Feuchtegehalt von 0%.

Differenzielle Quellung, Quellungskoeffizient und Quellungsanisotropie

	Differenzielle Quellung		Quellungskoeffizient		Quellungsanisotropie
	q _r [%/%]	q _t [%/%]	h _r [%/%]	h _t [%/%]	A _q [-]
N:	70	70	70	70	70
x-min:	0,176	0,194	0,0170	0,0201	0,67
x-mittel:	0,271	0,262	0,0322	0,0312	1,00
x-max:	0,387	0,394	0,0535	0,0503	2,20
SD:	0,05	0,04	0,01	0,01	0,26
VK [%]:	19,75	15,85	28,22	26,29	26,07

Tabelle 5.6: Ergebnisse für die differenzielle Quellung, den Quellungskoeffizient und Quellungsanisotropie

Die *Tabelle 5.6* zeigt die für die *Guadua angustifolia* erhaltenen „x“-Durchschnittswerte, die Maximal- und Minimalwerte, die Standardabweichung „s“ und die Variationskoeffizienten „VK“ für die differenzielle Quellung in radialer Richtung q_r, die differenzielle Quellung in tangentialer Richtung q_t, den Quellungskoeffizient in radialer Richtung h_r, den Quellungskoeffizient in tangentialer Richtung h_t und die Quellungsanisotropie A_q, für 70 Proben.

Aus der *Abb. 5.7* sind keine bedeutenden Unterschiede zwischen differenzieller Quellung in radialer und tangentialer Richtung ersichtlich. Das Ergebnis für die Quellungsanisotropie ist etwa „1“. Mit Hilfe der Ergebnisse der *Tabelle 5.6* kann man

auf das gleiche Ergebnis für den Quellungskoeffizient in radialer sowie in tangentialer Richtung schließen. Eine statistische Analyse ist nicht notwendig.

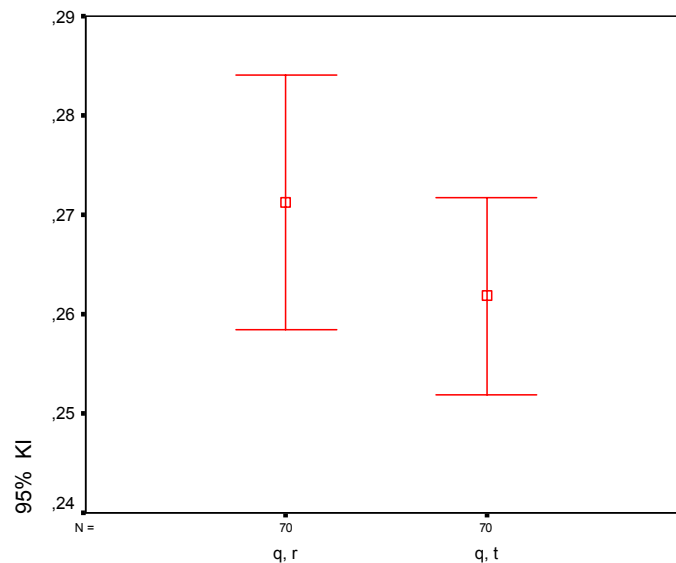


Abb. 5.7: radiale und tangentielle differenzielle Quellung

Maximales lineares Quellmaß, Trocknungsschwindmaß und Anisotropie der Trocknungsschwindmaße

	max. Lineares Quellmaß		Trocknungs-Schwindmaß		Anisotropie der Trocknungs Schwindmaße
	$\alpha_{\max, r}$ [%]	$\alpha_{\max, t}$ [%]	$\beta_{N, r}$ [%]	$\beta_{N, t}$ [%]	A_{β} [-]
N:	70	70	70	70	70
x-min:	4,88	4,65	2,90	2,63	0,38
x-mittel:	10,63	7,02	7,23	4,03	0,61
x-max:	18,60	9,22	13,28	5,15	1,57
SD:	2,73	0,97	2,19	0,60	0,23
VK [%]:	25,71	13,82	30,29	14,91	37,66

Tabelle 5.7: Ergebnisse für das maximale lineare Quellmaß, für das Trocknungsschwindmaß und die Anisotropie der Trocknungsschwindmaße

Die *Tabelle 5.7* zeigt die für die *Guadua angustifolia* erhaltenen „x“-Durchschnittswerte, die Maximal- und Minimalwerte, die Standardabweichung „s“ und die Variationskoeffizienten „VK“ für das maximale lineare Quellmaß in radialer Richtung $\alpha_{\max, r}$, das maximale lineare Quellmaß in tangentialer Richtung $\alpha_{\max, t}$, das Trocknungsschwindmaß in radialer Richtung $\beta_{N, r}$ und in tangentialer Richtung $\beta_{N, t}$ bei einer relativen Luftfeuchte von 65%, für 70 Proben, die unterschiedlichen relativen Luftfeuchten von 35%, 65% und 85% und Wasserimmersion ausgesetzt wurden.

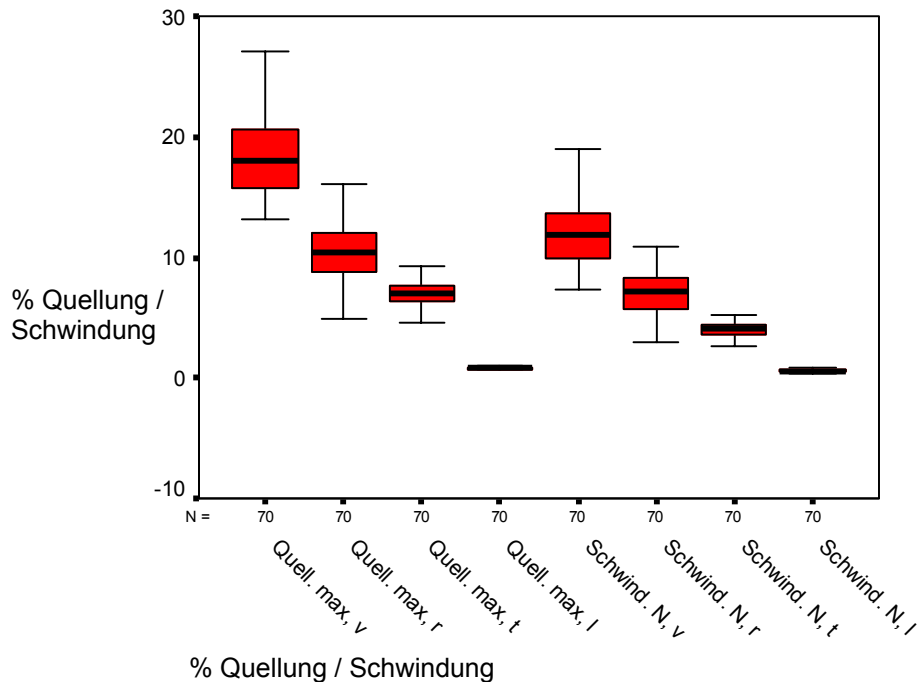


Abb. 5.8: maximale Quellung und radiale, tangentielle und longitudinale Trocknungsschwindung

Die Ergebnisse der Abb. 5.8 zeigen eine höhere radiale Quellung im Vergleich zur tangentialen Quellung; das gleiche gilt für das Trocknungsschwindmaß, wo die radialen Werte größer sind als die tangentialen Werte. Es zeigen sich sowohl radial als auch tangential und longitudinal bedeutende Unterschiede zwischen der Quellung und Schwindung. Weder die Angaben zur longitudinalen Quellung, noch die der longitudinalen Schwindung erscheinen in der Tabelle 5.7. Sie hatten die folgenden Werte: die durchschnittliche longitudinale maximale Quellung lag bei 0,77% mit einer Standardabweichung von 0,13% und der Wert für das maximale Trocknungsschwindmaß in longitudinaler Richtung lag bei 0,58% mit einer Standardabweichung von 0,13%.

Unterschiede zwischen der Quellung und der Schwindung für Proben mit Internodien (ohne Nodien) und für Proben mit Nodien und Internodien

t-Test

Statistische Werte für die Volumenquellung von Proben mit Nodien und Internodien, für die Volumenquellung von Proben nur mit Internodien, für die normale Volumenschwindung von Proben mit Nodien und Internodien und normale Volumenschwindung von Proben nur mit Internodien.

		Mittelwert	N	Standard abweichung	Standard abweichung des Mittelwerts
Paar 1	Quellung max, v (N+I)1	18,40584	49	3,2307945	,4615421
	Quellung max, v (I)2	19,14563	49	3,1713014	,4530431
Paar 2	Schwindung N, v (N+I)2	11,54298	49	2,7631171	,3947310
	Schwindung N, v(I)2	12,47115	49	2,5413444	,3630492

Tabelle 5.8: Statistische Werte der Proben in Verbindung mit der Dichte

		Unterschiede				t	gl	Sig. (bilateral)	
		Mittelwert	Standard abweichung	Standard abweichung des Mittelwertes	Konfidenzintervall 95%				
					Unterer				Oberer
Paar 1	Quellung max, v (N+I)1 - Quellung max, v (I)2	-,7397922	4,7281956	,6754565	-2,0978885	,6183042	-1,095	48	,279
Paar 2	Schwindung N, v (N+I)2 - Schwindung N, v(I)2	-,9281635	3,9455364	,5636481	-2,0614538	,2051269	-1,647	48	,106

Tabelle 5.9: Ergebnisse der t-Test in Verbindung mit den Quell- und Schwindungspaaren

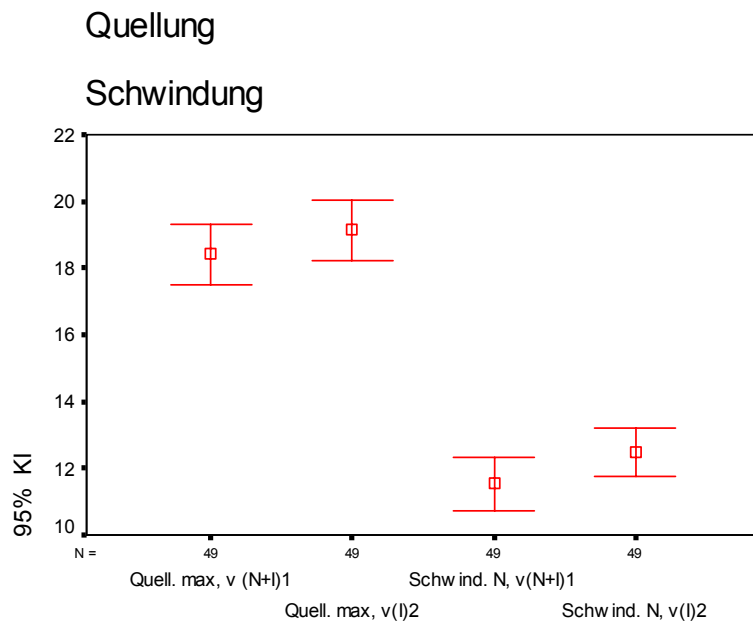


Abb. 5.9: max. Volumenquellung und normale Volumenschwindung von Proben mit Nodien und Internodien und von Proben mit nur Internodien

Nach *Tabelle 5.9* lag die *Signifikanz* für die maximale Volumenausdehnung zwischen Proben mit Nodien und Internodien und Proben mit nur Internodien bei $p > 0,05$. Was bedeutet, dass die Nullhypothese, die zwei Quellungen seien gleich, akzeptiert wird.

Wobei die Nodien die Quellung nur wenig behindern. In der gleichen *Tabelle 5.9* liegt die *Signifikanz* für die normale Trocknungsschwindung (bei 20° C/ 65% relativer

Luftfeuchte) zwischen Proben mit Nodien und Internodien und Proben mit nur Internodien bei $p > 0,05$. Was bedeutet, dass die Nullhypothese, die Schwindung seien gleich, akzeptiert wird, da keine statistischen Unterschiede vorliegen. Die in der *Abb. 5.11* auftretenden Verringerungen sind in beiden Fällen auf die Nodien zurückzuführen.

Unterschiede zwischen radialer und tangentialer Quellung und radialer und tangentialer Schwindung

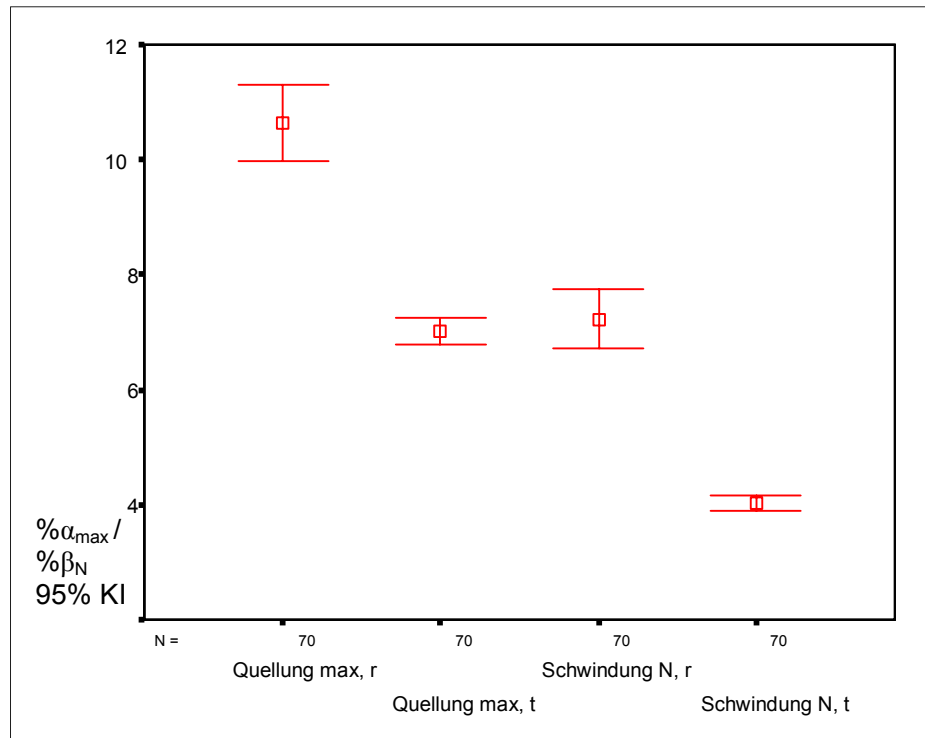


Abb. 5.10: Maximales lineares Quellmaß und lineares Schwindmaß in radialer und tangentialer Richtung

Die praktisch nicht vorhandenen Unterschiede zwischen der maximalen radialen und tangentialen Quellung und dem normalen radialen und tangentialen Volumenschwindmaß bei der Trocknung sind in *Abb. 5.10* dargestellt. Eine statistische Analyse ist nicht erforderlich.

Vergleich des Gleichgewichtsfeuchtegehaltes zwischen den Nodien und Internodien

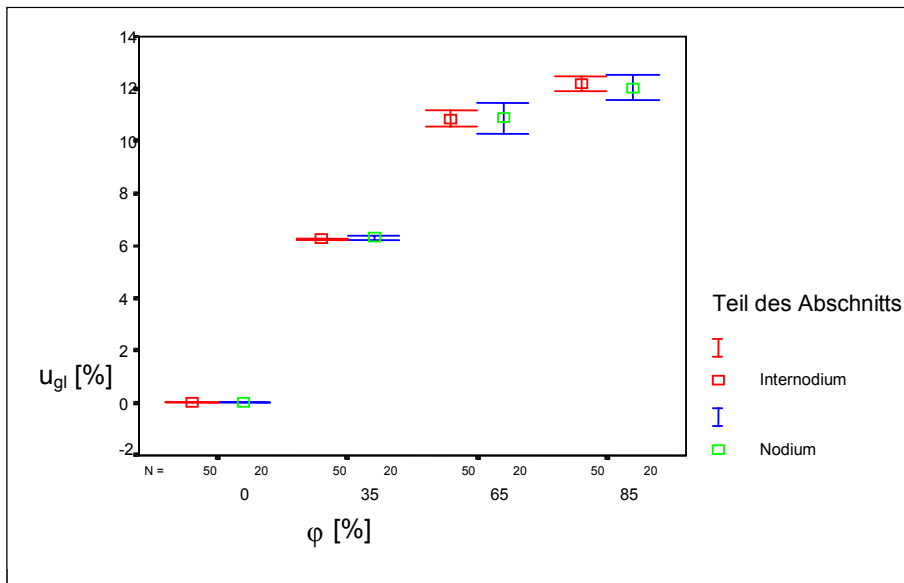


Abb. 5.11: Unterschiede in den Gleichgewichtsfeuchtwerten zwischen Nodien und Internodien bei unterschiedlichen Klimaten.

Die Abb. 5.11 zeigt, dass die Gehalte in den Internodien stabiler sind als die der Nodien. Die Nodien haben höhere Schwankungen im Feuchtegehalt, zeigen aber keine bedeutenden Unterschiede in ihren Werten auf.

Vergleich der Ausdehnung zwischen den Nodien und Internodien in radialer, tangentialer und longitudinaler Richtung bei unterschiedlicher relativer Feuchte

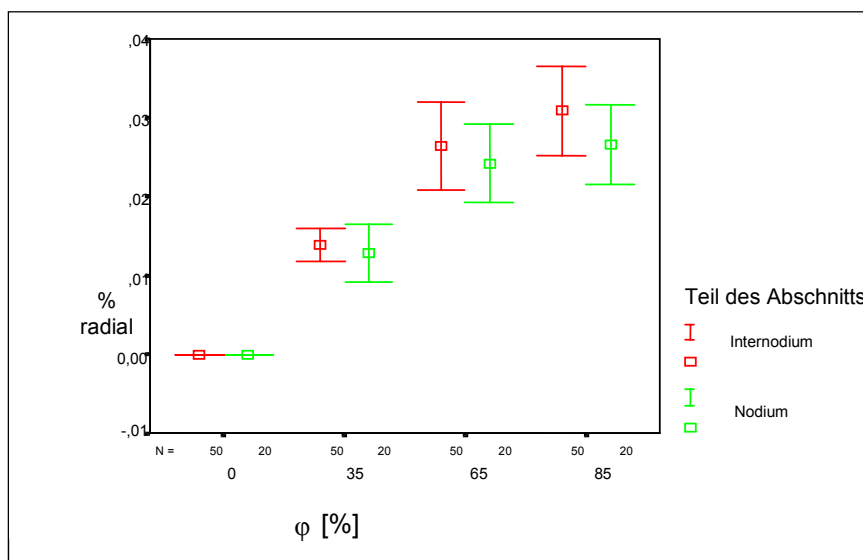


Abb. 5.12: Ausdehnung in radialer Richtung zwischen Nodien und Internodien bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen

Die Abb. 5.12, 5.13 und 5.14 zeigen die Größenunterschiede bei unterschiedlichen Feuchtegehalten zwischen Nodien und Internodien. In radialer Richtung variieren die Nodien weniger als die Internodien. Sie verhalten sich ihrer Größe nach gleich und

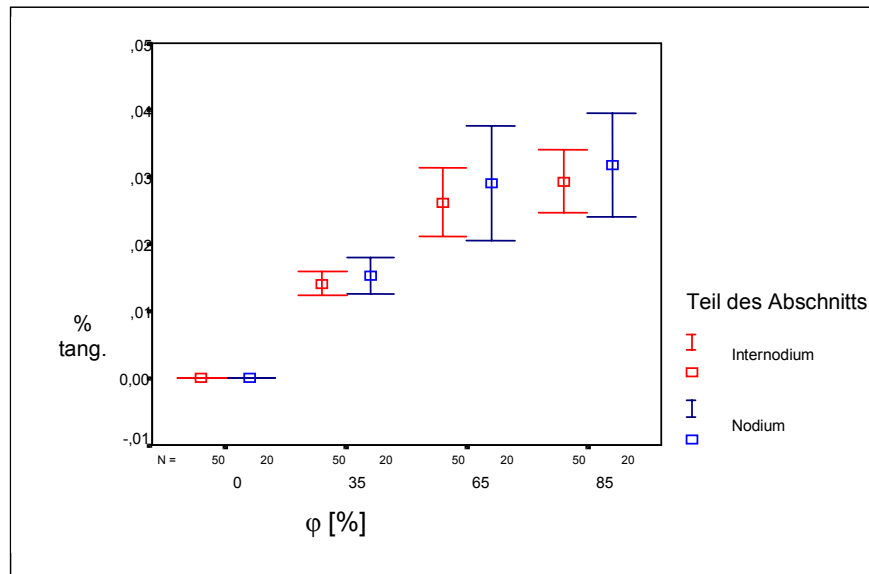


Abb. 5.13: Ausdehnung in tangentialer Richtung zwischen Nodien und Internodien bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen

weisen keine bedeutenden Unterschiede auf. In tangentialer und longitudinaler Richtung weisen die Nodien große Schwankungen bei unterschiedlichen analysierten Klimaten. Aber auch hier zeigen sie keine bedeutenden Unterschiede.

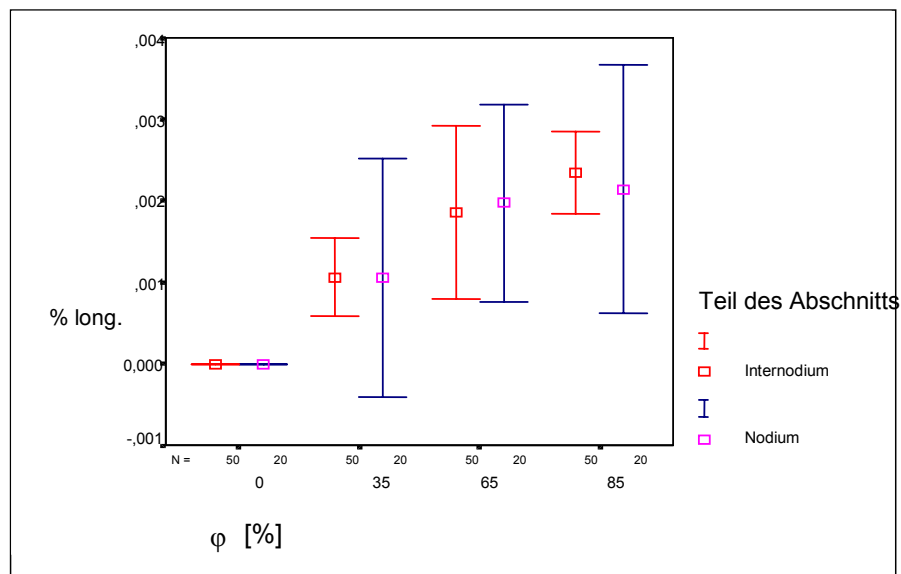


Abb. 5.14: Ausdehnung in longitudinaler Richtung zwischen Nodien und Internodien bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen

Allgemeine statistische Daten zur Quellung und Schwindung

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Quellung max, r	70	4,88402	18,59684	10,63401	2,7338117
Quellung max, t	70	4,65377	9,21849	7,0217003	,9702206
Quellung max, l	70	,01784	1,05430	,7775922	,1323599
Quellung max, v	70	13,14818	27,09053	18,43330	3,0777508
Schwindung N, r	70	2,90064	13,28030	7,2284867	2,1894088
Schwindung N, t	70	2,62798	5,15017	4,0269281	,6002647
Schwindung N, l	70	,04459	1,09273	,5888801	,1371272
Schwindung N, v	70	7,33471	18,94785	11,84429	2,5849796

Tabelle 5.10: Bezeichnende statistische Werte für die Quellung und Schwindung

Maximale volumetrische Quellung der *Guadua angustifolia*:

$$\alpha_{\max,v} = \alpha_{\max,r} + \alpha_{\max,t} + \alpha_{\max,l} \quad (5.12)$$

$$\alpha_{\max,v} = 10,63 + 7,02 + 0,77 = 18,43\%; \text{ Theoretisch ist die Quellung gleich der}$$

Schwindung, daraus folgt:

$$\text{Daraus folgt: } \alpha_{\max,v} = \beta_{\max,v} = 18,43\%$$

Die gesamte Schwindung bei der Trocknung der *Guadua angustifolia* auf Gleichgewichtszustand im Normklima beträgt:

$$\beta_{N,v} = \beta_{N,r} + \beta_{N,t} + \beta_{N,l} \quad (5.13)$$

$$\beta_{N,v} = 7,23 + 4,03 + 0,58 = 11,84\%$$

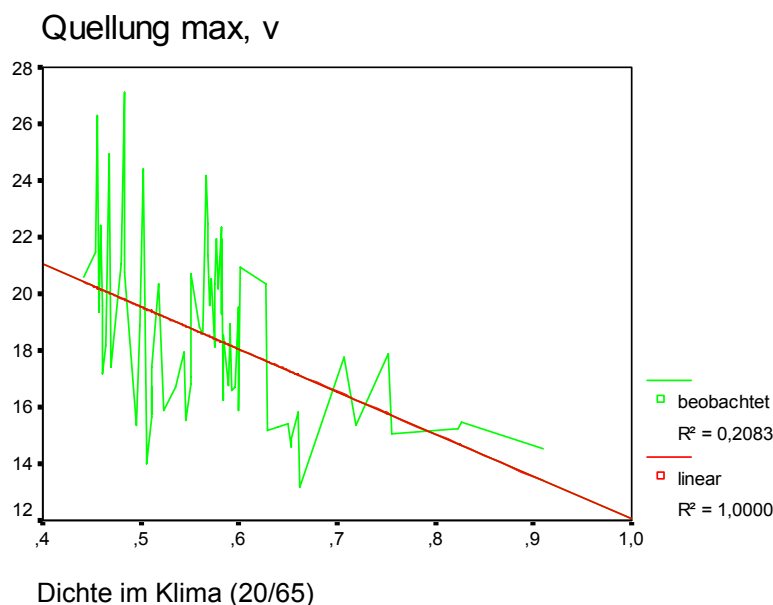


Abb. 5.15: Verhalten der Quellung bei Dichtezunahmen

Die Abb. 5.15 zeigt, dass bei einer Zunahme der Dichte, die Quellung und somit auch die Schwindung abnimmt.

5.1.3 Sorptionsexperiment

Die Bambusproben wurden in kleine Klimakammern überführt. Das induzierte Klima hängt von der Luftfeuchte und dem Wasserdampfdruck der Lösung ab. Jede Klimakammer hatte die gleiche Temperatur und eine wässrige Salzlösung, mit welcher ein bestimmter Wasserdampfdruck in der Luft und damit eine bestimmte relative Luftfeuchte über der Lösung erreicht wurde. Dieser Teildruck ist gegenüber dem Wasserdampfdruck des reinen Wassers klein. Das verwendete Wasser war demineralisiert.

Das Gewicht der Proben wurde so oft kontrolliert, bis ein konstantes Gewicht erreicht wurde. Dies ist der Moment, in dem die Gleichgewichtsfeuchte erreicht wurde. Anschließend wurde an den Proben nach der Norm DIN 52 183: 1977 der Feuchtegehalt bestimmt.

5.1.3.1 Materialien und Methoden

Bei dem im Sorptionsexperiment verwendeten Material handelte es sich um die Bambusarten *Guadua angustifolia* Kunth und *Phyllostachys pubescens* Mazel. Zusätzlich wurden Fichtenstücke zur Kontrolle verwendet. Die Proben von *Phyllostachys pubescens* Mazel waren Parkettbodenstücke. Die Proben der *Guadua angustifolia* Kunth wurden bei niedrigen Temperaturen getrocknet und waren zuvor nicht behandelt worden. Für dieses Experiment wurden, um die Gleichgewichtsfeuchte zu bestimmen, nur Adsorptionsexperimente bei relativen Feuchten zwischen 33% und 100% durchgeführt.

Die 24 Proben der *Guadua angustifolia* wurden ausschließlich aus der Halmmitte entnommen. Jeweils 6 Proben wurden bei 20°C in jede der Klimakammern mit relativen Luftfeuchten von 33%, 65%, 85% und 100% gelegt. Die Maße der Proben betragen: 50 mm (l) x 5 mm (r) x 20 mm (t). Die Proben der *Phyllostachys pubescens* Mazel wurden aus einem einzigen Brett entnommen. Es wurde in 24 Stücke von 50 mm (l) x 10 mm (r) x 10 mm (t) geschnitten. Insgesamt wurden 48 Probestücke verwendet, die den verschiedenen relativen Luftfeuchten ausgesetzt wurden.

Der Feuchtegehalt wurde gravimetrisch nach DIN 52 183: 1977 „Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes“ bestimmt und danach mit der elektrischen Waage der Marke Sartorius LP3200 mit einer Genauigkeit von 0,001g gewogen.

Die Sorptionsexperimente wurden gemäß der Norm DIN 50 008: 1977 „Konstante Klimaten unter der Verwendung von wässrigen Lösungen“ durchgeführt. Es wurden die folgenden Lösungen verwendet, um die Klimakammern unter den Temperaturbedingungen und relativen Feuchtigkeiten von jeweils (20/31), (20/66), (20/86) und (20/100), bei einer konstanten Temperatur von 20°C im Versuchsaal zu halten: $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$, NaNO_2 , KCl und H_2O (Tabelle 5.11)

Lösung	chem. Bezeichnung	Temperatur t° C und relative Luftfeuchte %U
Magnesiumchlorid	$\text{MgCl}_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}$	20° C / 33%
Natriumnitrit	NaNO_2	20° C / 65%
Kaliumchlorid	KCl	20° C / 85%
Wasser	H_2O	20° C / 100%

Tabelle 5.11: Salzlösungen für unterschiedliche Werte der relativen Luftfeuchte in % bei einer Temperatur von 20° C



Abb. 5.16 Gewichtsbestimmung der Proben



Abb. 5.17: Probenklimatisierung



Abb. 5.18: Probenklimatisierung



Abb. 5.19: Probentrocknung

5.1.3.2 Ergebnisse

Die in der *Tabelle 5.12* dargestellten Ergebnisse sind die jeweiligen Gleichgewichtsfeuchten der Bambusarten *Guadua angustifolia* Kunth und *Phyllostachys pubescens* Mazel in den vier untersuchten Klimaten. Die Standardabweichung und der Variationskoeffizient VK wurden für die gravimetrisch bestimmten Feuchtegehalte (MCg) berechnet.

Die *Tabelle 5.12* und *Abb. 5.22* zeigen die Ergebnisse für den Fasersättigungsbereich der Bambusarten *Guadua angustifolia* Kunth und *Phyllostachys pubescens* Mazel. Fasersättigung liegt bei der *Guadua angustifolia* Kunth zwischen 29 und 31% und bei der *Phyllostachys pubescens* Mazel im Rang zwischen 32 und 34%.

Die Sorptionskurven waren bis zu einer relativen Feuchte von 65% einander gleich. Beide Arten lagen bis zu dieser relativen Luftfeuchte unterhalb der Holzart Fichte. Die Standardabweichung lag mit einem Variationskoeffizienten von 14,43% bei der *Guadua angustifolia* Kunth bei 4,37%. Bei der *Phyllostachys pubescens* Mazel lag die Standardabweichung bei 2,36% und der Variationskoeffizient bei 7,13%.

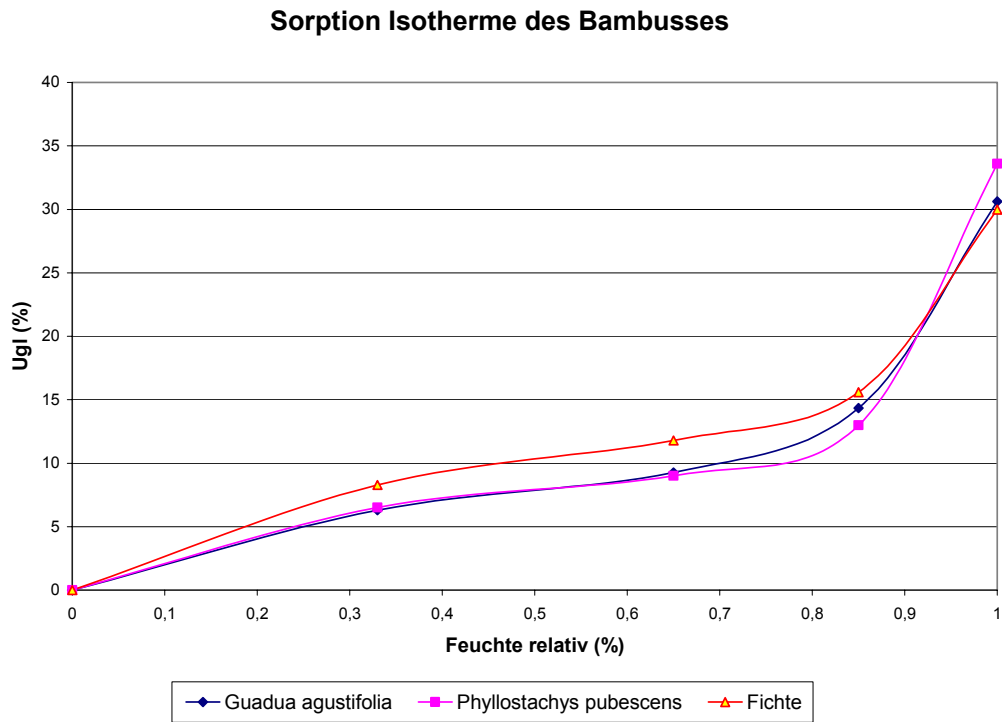


Abb. 5.20: Sorptionsisotherme von *Bambus* (*Guadua agustifolia* und *Phyllostachys pubescens*) im Vergleich mit Fichte

relative Luftfeuchte	N°	<i>Guadua angustifolia</i>	<i>Phyllostachys pubescens</i>
		MCg %	MCg %
33%	1	6,09	6,50
	2	5,96	6,16
	3	6,16	6,72
	4	6,15	6,64
	5	6,50	6,35
	6	6,89	6,57
Durchschnitt		6,29	6,49
Xmax		6,89	6,72
Xpro		6,29	6,49
Xmin		5,96	6,16
s		0,34	0,20
Variationskoeffizient%		5,46	3,15
65%	1	9,38	8,83
	2	9,43	8,91
	3	8,91	9,12
	4	9,19	9,09
	5	9,08	8,93
	6	9,65	9,13
Durchschnitt		9,27	9,00
Xmax		9,65	9,13
Xpro		9,27	9,00
Xmin		8,91	8,83
s		0,27	0,13
Variationskoeffizient%		2,89	1,44
85%	1	17,21	13,14
	2	14,82	12,45
	3	12,18	12,73
	4	13,96	13,80
	5	14,68	13,00
	6	13,20	12,61
Durchschnitt		14,34	12,96
Xmax		17,21	13,80
Xpro		14,34	12,96
Xmin		12,18	12,45
s		1,72	0,48
Variationskoeffizient%		11,96	3,72
100%	1	33,4	33,07
	2	28,2	31,44
	3	34,1	33,01
	4	33,0	37,64
	5	22,6	31,90
	6	30,4	31,36
Durchschnitt		30,29	33,07
Xmax		34,13	37,64
Xpro		30,29	33,07
Xmin		22,58	31,36
s		4,37	2,36
Variationskoeffizient%		14,43	7,13

Tabelle 5.12: Ergebnisse für die Werte der Gleichgewichtsfeuchte für verschiedene relative Luftfeuchten

5.2 Ergebnisse Freilufttrocknung

5.2.1 Trocknung der Guadua-Halme

5.2.1.1 Experiment 1

Zielsetzung

Das Trocknungsverhalten der *Guadua angustifolia* Kunth soll in einem bestimmten Zeitraum mittels Freilufttrocknung bestimmt werden.

In Kapitel 5.1.1 gibt es bedeutende Unterschiede der Feuchtegehalte zwischen den Nodien und Internodien entlang des Halmes und zwischen der Spitzen- und Hangzone. In der Talzone gibt es Unterschiede in der Halmmitte, aber nicht in der Basis. Hier liegen keine Unterschiede zwischen den Nodien und Internodien vor. Daher ist dieses Experiment in zwei Abschnitte gegliedert:

Teil A: Experiment zur Trocknung an der freien Luft mit 100 Halmen; 9 Halme dienen als Stichprobe für das Experiment, um den feuchtesten Teil des Halmes zu verifizieren.

Teil B: Experiment zur Stapeltrocknung mit 320 Halmen, 25 Halme dienen als Stichprobe für das Experiment.

Teil A

Zielsetzung Teil A:

Es soll der Abschnitt des Halmes mit dem höchsten Feuchtegehalt über die Länge des Halmes bestimmt werden, mit dem Ziel diesen Abschnitt allen folgenden Experimenten dieser Studie mit dem Guaduahalm zu unterziehen.

Um im Rahmen der Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Guadua-Halmen den maximalen Feuchtegehalt über die Halmlänge zu bestimmen, wurde die folgende Analyse an 3m langen Halmen durchgeführt, die zuvor nicht imprägniert wurden aber deren Diaphragmen durchstoßen wurden. Jeder Halm wurde in drei Abschnitte *oberer*, *mittlerer* und *unterer Abschnitt*, unterteilt. Jeder Abschnitt wurde nochmals in drei Abschnitte unterteilt. Diese Unterteilungen wurden unabhängig von der *Basis* oder *Halmmitteunterteilung* durchgeführt. Sie wurden auf die folgende Weise benannt:

A: erster Internodienabschnitt von oben oder der oberste Punkt.

B: erstes Nodium vom oberen Halmabschnitt.

BC: zweiter Internodienabschnitt von oben, dem Nodium B folgend.

CB: Internodienabschnitt aus der Mitte des Halmes, dem Nodium C nach oben folgend.

C: Nodium aus der Mitte des 3 m Halmes.

CD: Internodiumabschnitt aus der Mitte des Halmes, dem Nodium C nach unten folgend.

DC: zweiter Internodienabschnitt von unten, dem Nodium D folgend.

D: erster Nodium vom unteren Halmabschnitt,

E: erster Internodienabschnitt von unten oder vom unteren Ende des Halmes.

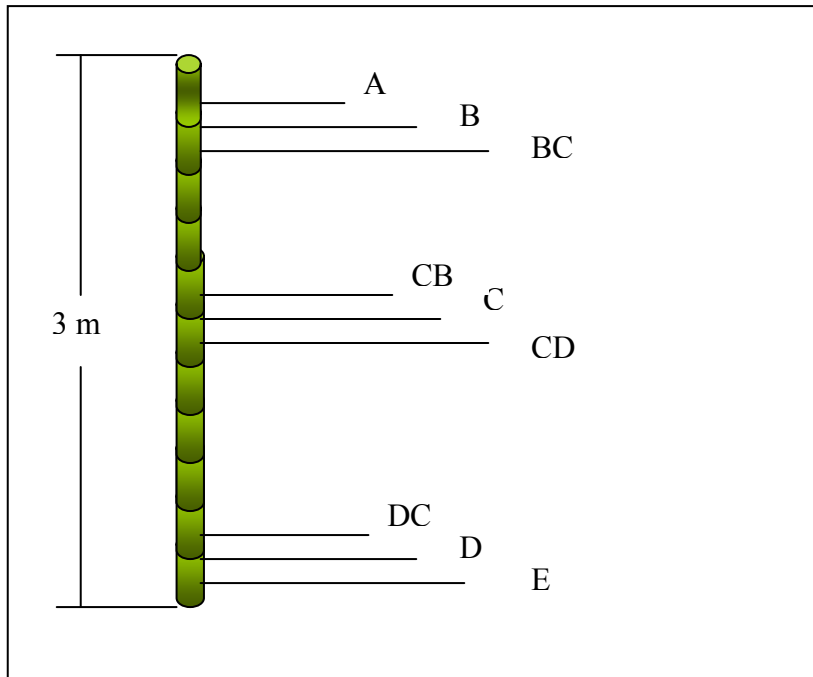


Abb. 5.21: Zu analysierende Punkte im Experiment 1

Es wurden die folgenden Hypothesen für die unterschiedlichen Prozentsätze des Feuchtegehaltes, für alle Untersuchungsabschnitte, auf die folgende Weise aufgestellt:

Hypothesen für den *oberen*, *mittleren* und *unteren Abschnitt* des 3 m Halmes:

Für die Nodien und Internodien des *oberen*, *mittleren* und *unteren Abschnitt* wurde die folgende Nullhypothese aufgestellt:

$$H_0 : \bar{\%u}_B = \bar{\%u}_{BC} = \bar{\%u}_{CB} = \bar{\%u}_C = \bar{\%u}_{CD} = \bar{\%u}_{DC} = \bar{\%u}_D \quad (5.14)$$



Abb. 5.22: Proben DC, D, E des unteren Abschnittes eines 3 m Halmes



Abb. 5.23: Proben CB, C, CD des unteren mittleren Abschnittes eines 3 m Halmes



Abb. 5.24: Proben BC, B, des oberen Abschnittes



Abb. 5.25: Halm von 3 m Länge, Abbildung der Abschnitte

Teil B

Zielsetzung Teil B:

Einen Trocknungsprozess an der freien Luft soll für Halme der Guadua entwickelt werden. Das Verhalten der Guaduahalme während der Trocknung ist zu bestimmen und die Endqualität zu bewerten

Das Experiment wurde mit Halmen der *Guadua angustifolia* durchgeführt. Es wurde ein Stapel mit 320 nicht behandelten und unbeschädigten Guaduas errichtet. Die Proben hatten eine Länge von 3 m.

Bei beiden Experimenten wurden die Proben am gleichen Tag und am gleichen Ort zugeschnitten, und zwar in einer *Spitzenzone* in der Hugelregion von Pereira (Risaralda-Colombia). Diese Region liegt 1000 m uNN und hat einen Jahresniederschlag von 1000 bis 1200 mm. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt zwischen 24 und 26°C, bei einer relativen Luftfeuchte von 65 bis 70%. In der

Trockenzeit, im Januar und Februar, liegt die relative Luftfeuchte zwischen 60 und 65%. Die Sonnenstunden betragen 1825 St./Jahr (5 St./Tag) (Böden der Abt. Quindíos IGAC (1996) aus Martínez-Arenas O. & Giraldo-Herrera E. (2005) in (Jiménez-Arías R. E. 2004).

Ergebnisse im Experiment 1

Ergebnisse des Teil A:

Statistische Deskriptive

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard abweichung
A	9	6,75430	11,11111	8,4369001	1,5766544
B	9	3,52890	10,32450	6,6321754	1,9805928
BC	9	3,12500	36,36364	18,84252	12,9578653
CB	9	2,70270	14,28571	8,3253694	4,0891228
C	9	12,50000	20,00000	15,53641	3,1462158
CD	9	3,33333	29,54545	14,63449	8,4466695
DC	9	4,39100	38,93617	28,15204	9,9381083
D	9	3,03030	25,00000	10,80343	7,7494348
E	9	14,81481	22,70000	19,12516	2,7973018

Tabelle 5.13: statistische Werte des Endfeuchtegehaltes in unterschiedlichen Teilen einer 3m langen Guadua

t- Test

Statistische Werte der Proben im Zusammenhang mit dem Feuchtegehalt der Nodien und Internodienpaare eines Abschnitts von 3 m.

Als Ergebnisse in den Nodien für die Guaduatrocknung im Freien, mit nicht durchstoßenen unbearbeiteten Diaphragmen, werden die Feuchtegehalte der Nodien und Internodien aus dem oberen, dem mittleren und unteren Abschnitt des Halmes in *Tabelle 5.13* und in *Abb. 5.26* dargestellt.

Die *Tabelle 5.14* verdeutlicht die bedeutenden Unterschiede zwischen den Nodien und Internodien, mit Ausnahme des Paares 3 (C-CD). Bei dem Paar 1 (B-BC), dem Paar 2 (CB-C) und dem Paar 4 (DC-D) liegt der Wert für die *Signifikanz P* <0,05. Das zeigt, dass die Nullhypothese, der Feuchtegehalt sei gleich, für die Paare 1, 2 und 4 nicht akzeptiert wird. Nur für das Paar 3, was aus dem Halmmittle stammte, wurde gleiche Feuchtegehalte gefunden.

		Unterschiede					t	gl	Sig. (bilateral)
		Mittelwert	Standard abweichung	Standard abweichung des Mittelwerts	Konfidenzintervall 95%				
					Unterer	Oberer			
Paar 1	B - BC	-12,2103	13,3331450	4,4443817	-22,4591	-1,96158	-2,747	8	,025
Paar 2	CB - C	-7,21104	3,6096706	1,2032235	-9,98568	-4,43640	-5,993	8	,000
Paar 3	C - CD	,9019202	9,7866150	3,2622050	-6,62074	8,4245784	,276	8	,789
Paar 4	DC - D	17,34861	15,7682077	5,2560692	5,2280912	29,46913	3,301	8	,011

Tabelle 5.14: statistische Daten aus dem t-Test für Nodien-Internodienpaare

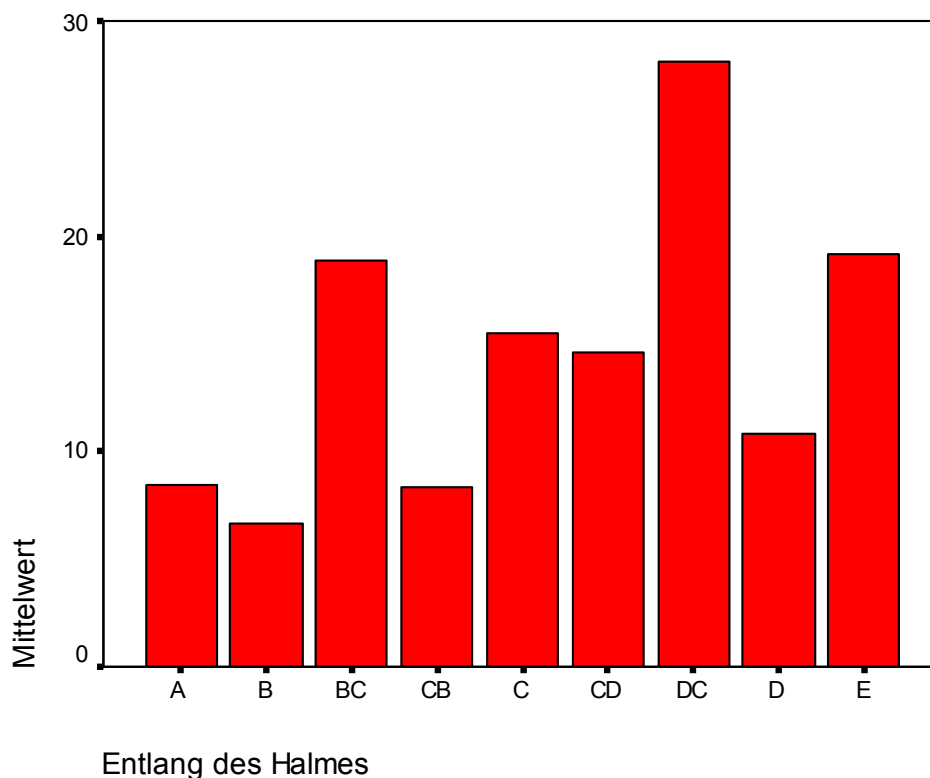


Abb. 5.26: Feuchtegehalt über die Halmlänge des Teil A, Experiment 1

Sowohl in der Abb. 5.26, tritt ein Unterschied im CD Abschnitt, der sich auf dem zweiten Internodium von unten nach oben bezieht, auf. Dies bedeutet, dass trotz der unterschiedlichen Feuchtigkeiten über die Länge aller Halme, der Wert des Feuchtegehaltes für den Mittelpunkt vom zweiten oder nach dem ersten Nodium größer sein wird. Obwohl das Gleiche auch von oben nach unten im dritten Internodium BC auftritt ist die Tendenz von DC größer.

Ergebnisse für Teil B:*Statistische Deskriptive*

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard abweichung
20 Tage	25	35,0	77,0	52,040	12,401
43 Tage	25	13,1	65,2	35,280	14,279
49 Tage	25	15,8	48,9	29,396	7,912
52 Tage	25	5,4	58,8	23,660	13,260
55 Tage	25	4,7	51,2	18,152	11,989
67 Tage	25	6,5	26,0	14,420	5,374
80 Tage	25	9,8	27,3	14,044	4,830

Tabelle 5.15: statistische Daten der Feuchtemeßwerte**Abb. 5.27: Trocknung an der freien Luft, in Form von Stangen, Trocknungsprojekt der Guadua, Sägewerk Cerritos Ing. Luis G. García.****Abb. 5.28: Trocknung an der Freien Luft unter einem transparenten Dach aus Plastik, Finca del Sr. G. G. Londoño****Abb. 5.29: Experiment 2, Halme mit durchbohrten Diaphragmen für Trocknung an der freien Luft****Abb. 5.30: Guadua-Halme für die Trocknung an der freien Luft**

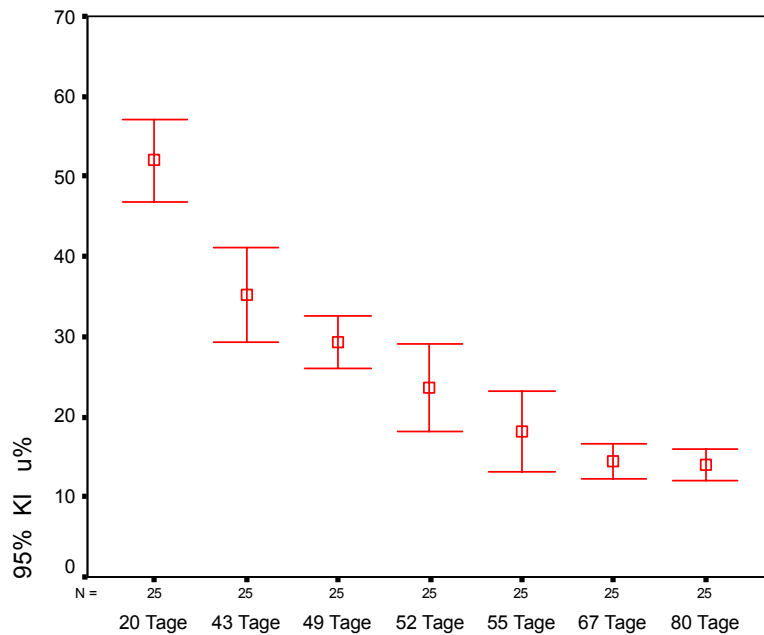


Abb. 5.31: Experiment 1 Teil B, Feuchtegehalt von im Freien getrockneten Halmen mit einem Konfidenzintervall von 95%, Feuchtegehalt

Die Ergebnisse in Abb. 5.31 zeigen die unterschiedlichen Feuchtegehalte nach 20, 40, 49, 52, 67, und nach 80 Tagen. 25 Guadua-Halme wurden hierbei beobachtet. In den ersten 23 Tagen war die Wasserabgabe höher als in den darauf folgenden Tagen. In den letzten 13 Tagen war die Wasserabgabe minimal.

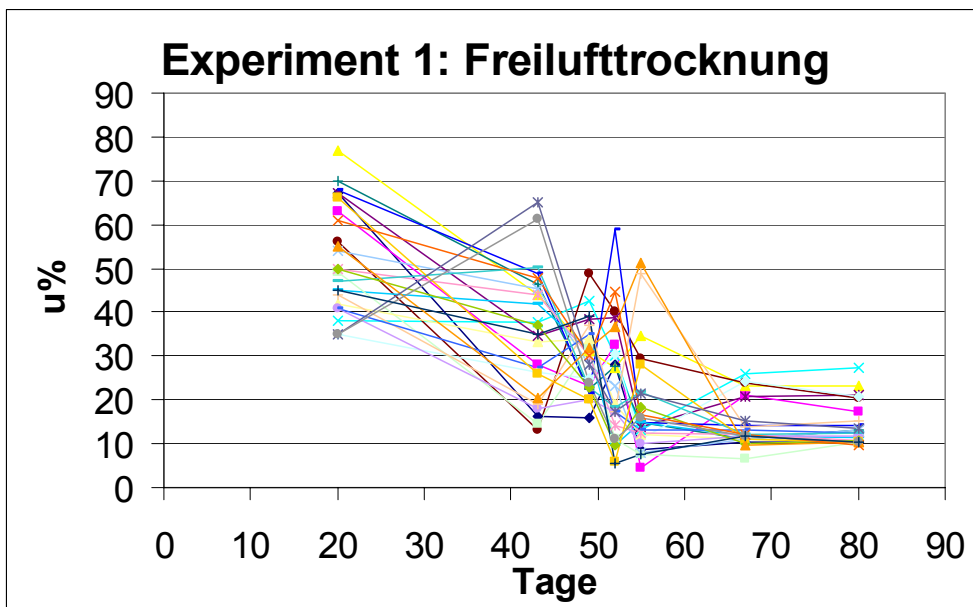


Abb. 5.32: Experiment 1, Feuchtegehalt von 25 Halmen

	T	φ
Mittelwert in Cerritos, Zeitraum zwischen 24.11.03 - 10.02.2004	26,6°C	62,40%
Standardabweichung	2,43°C	6,60%
Varianzkoeffizient (%)	9,2%	10,5%

Tabelle 5.16: Trocknungsdaten bei der Freilufttrocknung (Exp.1) im Zeitraum vom 24.11.03 bis 10.2.2004

Trocknungskurve Experiment 1

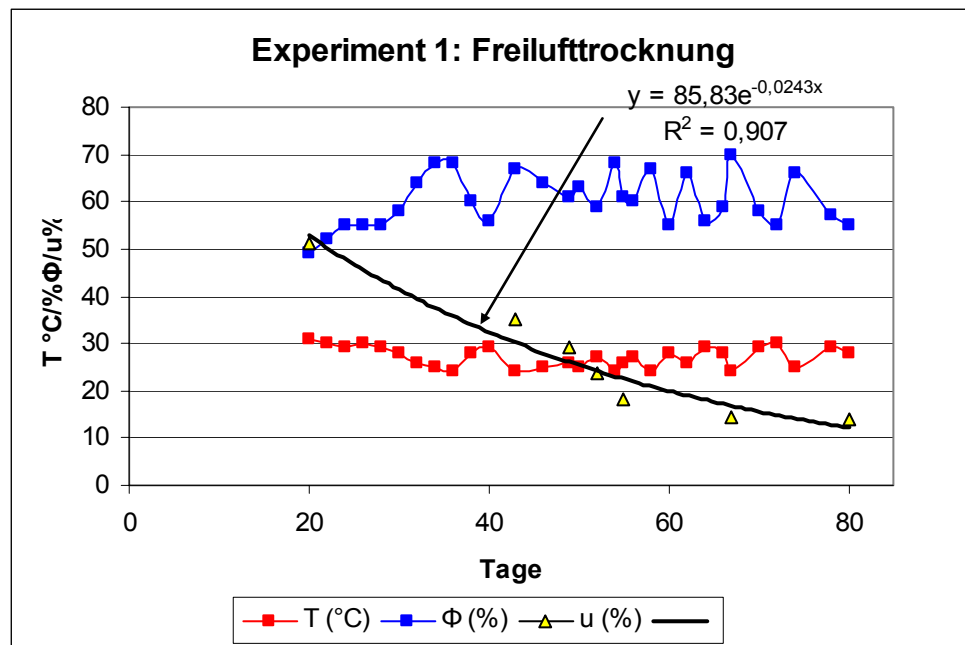


Abb. 5.33: Experiment 1, im Freien getrocknete Halme, Feuchtegehalt der Trocknungscharge in exponentieller Form dargestellt, durchschnittliche relative Feuchte und Durchschnittstemperatur

Die Abb. 5.33 zeigt die Veränderung des Feuchtegehalts des Bambusses in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit des jeweiligen Ortes. Da in den ersten 20 Tagen nach dem Einschnitt die Halme zum Schutz gegen Insekten im Wald vorbehandelt wurden, konnte die Messung des Feuchtegehaltes erst nach dieser Zeit erfolgen. Somit gibt es keine Messwerte in diesem Zeitraum.

Der durchschnittliche Endfeuchtegehalt bei einer Trocknungsdauer von 80 Tagen lag bei 14,04 % bei einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit von 62 % und einer Durchschnittstemperatur von 27°C.

Qualität beim 1. Experiment

Bei der Trocknung von Guadua-Halmen treten zwei Qualitätsprobleme auf. Das erste Problem, das vorgestellt wird, ist ein physikalischer Fehler. Hier treten Spalten und Risse auf. Das Zweite ist das Auftreten von Bläue oder einer bläulichen Verfärbung an der Oberfläche und im Innern der Guadua. Diese Mängel werden in den Abb. 5.96 und 5.97 gezeigt.

Analyse des Auftretens von Spalten und Rissen bei der Trocknung von Guaduahalmen

Durch die von Giraldo H. *et al.* (1999) bekannt gemachten Trocknungsprobleme, wie Spalten, Risse und Verformung und entsprechend den Erfahrungen, die während der Entwicklung des Trocknungsprojektes von *Guadua angustifolia* gemacht wurden, können wir Konzepte aufstellen und die folgende Klassifizierung durchführen:

Spalten sind kleine, längliche, nicht sehr tiefe Öffnungen, welche eine Beschädigung der Nodien und Internodien hervorrufen. Diese sind wie folgt klassifiziert:

A1: 1 bis 3 Spalten in den Nodien oder in den Internodien mit einer Länge von jeweils bis zu 10 cm. Sie werden leichte Spalten genannt.

A2: Zwischen 4 und 5 Spalten in den Nodien oder Internodien mit einer Länge von 10 bis 20 cm. Sie werden mittlere Spalten genannt.

A3: Sechs und mehr Spalten in den Nodien oder in den Internodien mit einer Länge von > 20 cm. Sie werden schwere Spalten genannt.

Risse: Sind tiefere Öffnungen (Mantelrisse) von längeren Ausmaß. sie treten über 2 oder mehr Internodien auf, normalerweise tritt dieser Fehler auf beiden Halmseiten und an verschiedenen Stellen der Oberfläche auf. Dieser Defekt kann den Verlust des ganzen Halmes bedeuten. Die *Risse* können wie folgt klassifiziert werden:

R1: Risse über 2 Internodien und einem Nodium, Risslänge ≤ 10 cm leichte Risse

R2: Risse über 2 Internodien und einem Nodium, Risslänge > 10 cm mittlere Risse.

R3: Risse über 2 Internodien und zwei Nodium, schwere Risse, kann den Verlust des Halmes verursachen.

Verformungen: sind Drehungen, Verschiebungen und Knickungen des Halmes über seine Längsachse. Wenn die zwei ersten Fälle auftreten (Drehung und Verschiebung), kann der Stängel nicht als Strukturelement verwendet werden. Im Fall eines Knicks in einem Internodienbereich, wird der betroffene Bereich entfernt.

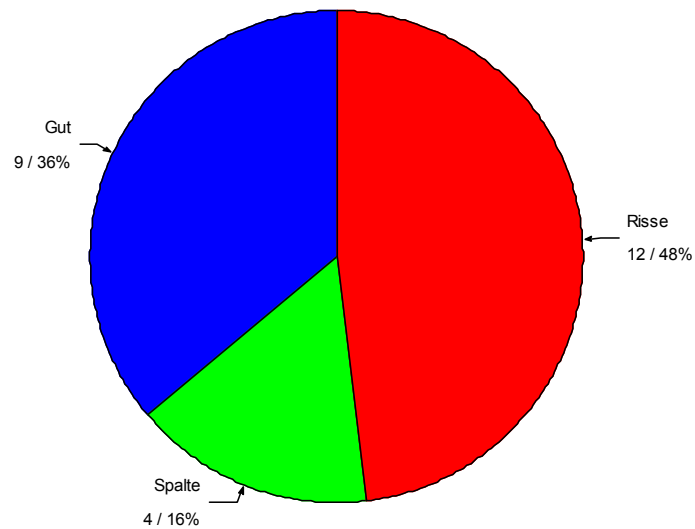


Abb. 5.34: Bewertung der Risse und der Spalten des 1. Experimentes

Die Abb. 5.34 zeigt die Qualitätsprobleme der Halme im Experiment 1. Die Risse und Spalten wurden hier beurteilt. Hierbei wiesen 48% der untersuchten Halme Risse und 16% Spalte auf. Die übrigen 36% waren fehlerfrei.

5.2.1.2 Experiment 2

Zielsetzung

Entwicklung eines Trocknungsprozesses an der freien Luft für Guaduahalme. Dabei ist das Verhalten der Guaduahalme während der Trocknung zu beobachten.

Das Experiment wurde mit *Guadua angustifolia* Halmen durchgeführt. Es wurde ein Stapel mit 120 unbehandelten und nicht durchstoßenen Guaduahalmen errichtet. Die Proben hatten eine Länge von 3 m. Eine Stichprobe von 10 Halmen wurde bestimmt für nähere Untersuchungen.

Bei diesem Experiment wurden die Proben aus der region von Marsella am gleichen Tag eingeschnitten; sie stammten aus drei Höhenlagen: der *Spitzenzone*, der *Hangzone* und der *Talzone*. Die Region liegt 1950 m ü. NN und hat einen Jahresniederschlag von 2750 mm. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 19,9°C. In der Trockenzeit, im Februar, beträgt die Temperatur 20,5°C und im Oktober, dem frischesten Monat, 19,5 ° C (Jiménez-Arías R. E. 2004).

Ergebnisse des 2. Experimentes

Die Trocknungsdauer an der Luft hängt von den klimatischen Bedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit) und von den mit der Guadua selbst in Verbindung stehenden Faktoren (Durchmesser, Wanddicke, Feuchtegehalt, Alter, Position des Abschnittes bezüglich der Länge und Wuchsort) ab. Daher können genaue Zeiten nicht vorgelegt werden. In der Trockenzeit kann die Trocknungsdauer zweieinhalb Monate (Experiment 1) betragen, in der Regenzeit kann sie sich auf vier Monate (Experiment 2) verlängern. In der Winterzeit kann sie sogar bei sechs Monaten liegen, um den gewünschten Gleichgewichtsfeuchtegehalt zu erreichen.

Statistische Auswertung

Die Trocknungsdauer für das 2. Experiment betrug 106 Tage unter den Konditionen in *Tabelle 5.18*, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 61% und einer Temperatur 26 °C, mit einer Standardabweichung der relativen Luftfeuchte von 6,5% und der Temperatur von 2,5°C, mit einem Variationskoeffizienten für die relative Luftfeuchte von 10,6% und für die Temperatur von 9,6%. Diese Ergebnisse entsprechen dem Durchschnitt für die Region von Pereira. In Trockenzeiten liegt der durchschnittliche Gleichgewichtsfeuchtegehalt für die Pereiraregion bei 14% und die jährliche durchschnittliche relative Luftfeuchte und Temperatur für die Pereiraregion liegen bei 75% und 22°C.

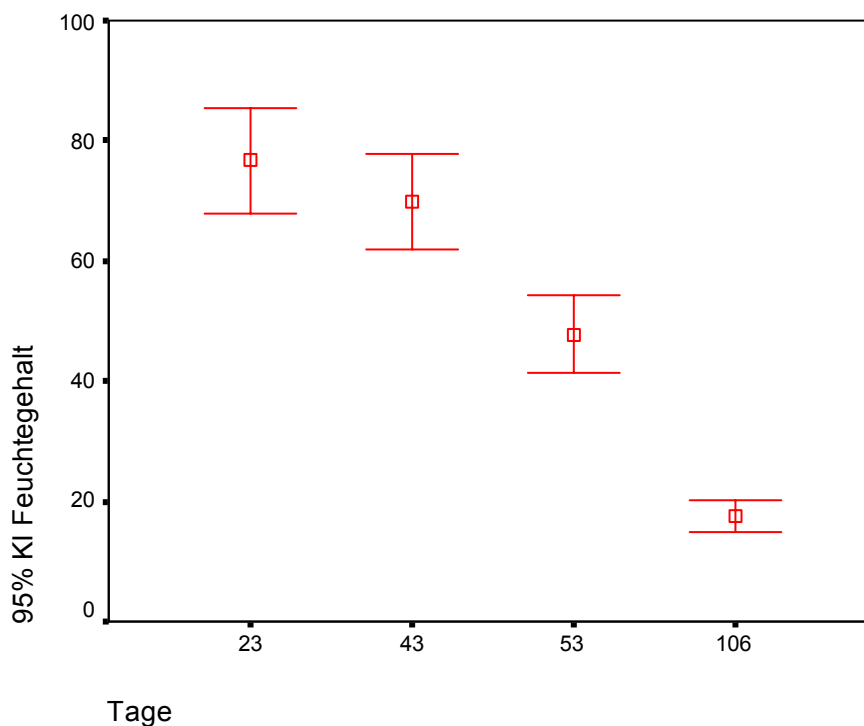


Abb. 5.35: 2. Experiment, Endfeuchtegehalt von 10 Halmen, mit einem Konfidenzintervall von 95%

Die Abb. 5.35 zeigt die Ergebnisse und die Unterschiede des Feuchtegehaltes mit einem Konfidenzintervall von 95% für die am 23., 43., 53. und 106. Tag durchgeführten Messungen.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
23 Tage	10	55,16	98,37	76,7810	12,2457
43 Tage	10	43,95	80,72	69,8280	11,2332
53 Tage	10	31,27	64,56	47,8190	9,0638
106 Tage	10	8,49	22,52	17,5000	3,7387

Tabelle 5.17: Statistische Daten des 2. Experimentes für zehn Halme

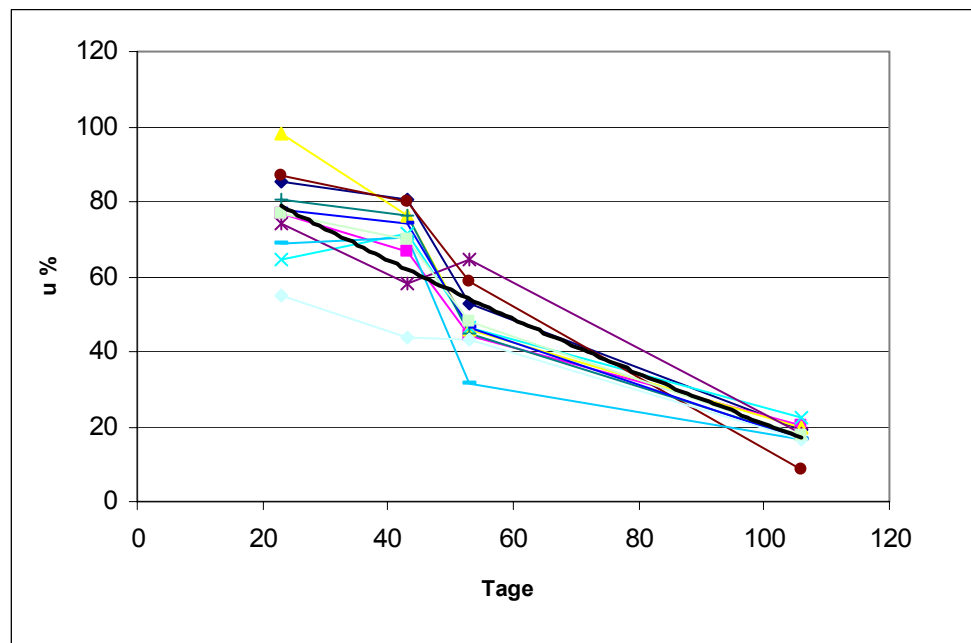


Abb. 5.36: Trocknungskurve im 2. Experiment, Feuchtegehalt von 9 Halmen

Die Abb. 5.36 zeigt die unterschiedlichen Temperaturen und relativen Luftfeuchten des Standortes zusammen mit der Feuchteabnahme. Der durchschnittliche Endfeuchtegehalt lag bei 17,5. Die Trocknung dauerte, bei einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchte von 61% und einer durchschnittlichen Temperatur von 26° C, 106 Tage.

	T	φ
Mittelwert in Universität, Zeitraum zwischen 20.09.04 - 5.01.2005	26,2°C	60,90%
Standardabweichung	2,5°C	6,50%
Varianzkoeffizient	9,60%	10,60%

Tabelle 5.18: durchschnittliche Trocknung an der freien Luft, 2. Experiment im Zeitraum vom 20.9.04 bis zum 05.01.2005

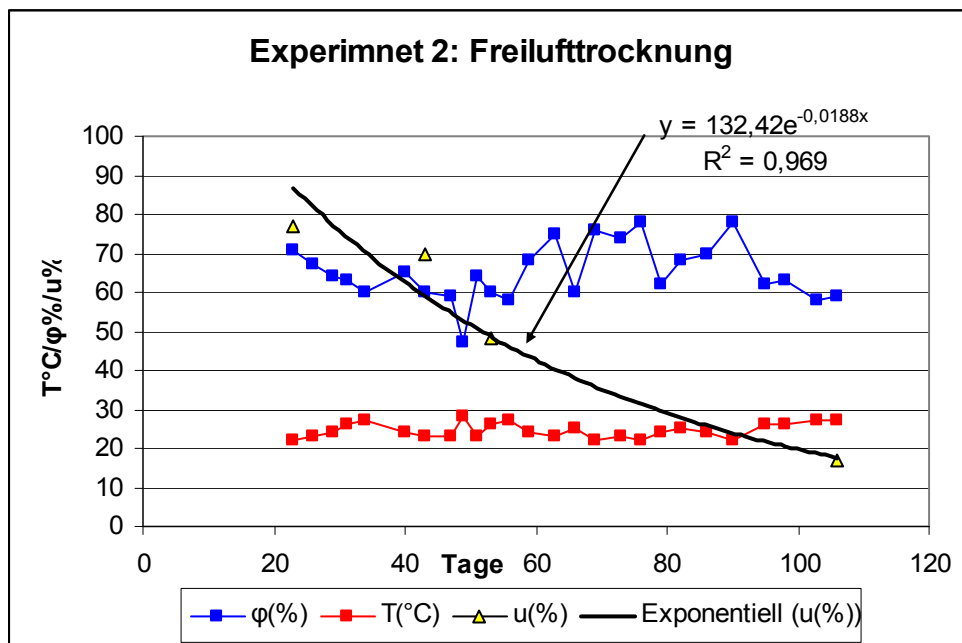


Abb. 5.37: 2. Experiment, an der freien Luft getrocknete Halme, exponentielle Darstellung des Feuchtegehaltes, der durchschnittlichen relativen Feuchte und der durchschnittlichen Temperatur

Im 2. Experiment wurde nicht die Qualität der getrockneten Halme bewertet. Aber im Hinblick auf die Ergebnisse im Experiment 1 ist es offensichtlich, dass auch hier starke Risse und Spalten auftraten.

5.3 Ergebnisse aus der Solartrocknung

5.3.1 Solartrocknung von Latten

Bei der Herstellung der Latten wird zunächst der gesamte Halm in Abschnitte gleicher Länge geschnitten (Abb. 5.38). Danach werden diese Halmabschnitte über zwei Sägeblätter geführt, welche einen gewissen Abstand voneinander besitzen. Der Abstand der Sägeblätter entspricht der gewünschten Lattenbreite. Der Halm wird ca. $\frac{1}{4}$ seines Durchmessers eingeschnitten und nach jedem Schnitt wird dieser mit Hand gedreht und es folgt das Heraussägen der nächsten Latte. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis letztendlich der Halm über seinem ganzen Umfang eingeschnitten ist. Durch die einzelnen Diaphragmen in den Nodien werden die Latten zusammengehalten. Diese lassen sich nach dem Sägevorgang leicht herausbrechen. Man erhält nun einzelne Segmente, welche aufgrund der Rundung des Halmes noch leicht gewölbt sind. Um Latten mit vier geraden Seiten zu erhalten, werden diese einzelnen Segmente erneut zwischen zwei Sägeblätter geführt, dessen Abstand der Dicke der Latte entspricht.



Abb. 5.38: Sägen der Halme in Abschnitte, GUADUALCA Alclá-Valle.



Abb. 5.39: Sägen der Latten ASOPRIG; Marsella-Rda.

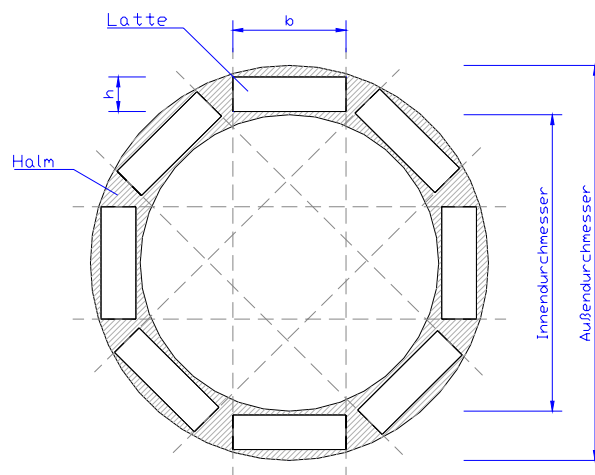


Abb. 5.40: Schematische Darstellung der Herstellung von Latten aus einem Halm

5.3.1.1 Experiment 1 (1.08.04)

Ort der Trocknung: Cerritos,

Koordinaten: 4° 49' 10,1" Nord, 75° 50' 29,5" westlicher Breite,

T °C / φ %: 27°C/ 61%.

(T: Mittelwert =27, $s = 1,63$, VK= 7,57/ φ: Mittelwert =61; $s = 4,61$, VK = 6,12%),

Niederschlag: 2205 mm/Jahr (Meteostationen La Catalina CENICAFE),

Durchschnittliche Sonnenstunden: 7 Std/Tag (Mittelwert = 7,2; $s = 1,32$; VK =18,3%),

Sonnenstrahlung in Pereira: 5,116 kWh /m²-Tag bei 5,4 Std/Tag Sonne (Meteostationen La Catalina-CENICAFE),

Höhe: 1100 m ü.NN.

Für dieses Experiment wurden die folgenden Hypothesen aufgestellt:

Der durchschnittliche Feuchtegehalt in den Enden einer Latte aus der *Basis* ist gleich dem durchschnittlichen Feuchtegehalt in der Mitte der Guadualatte.

$$H_0 : \% \bar{u}_{ENDE} = \% \bar{u}_{ZENTRUM} \quad (5.17)$$

Der durchschnittliche Feuchtegehalt in den Enden einer Latte aus der *Halmmittle* ist gleich dem durchschnittlichen Feuchtegehalt in der Mitte der Guadualatte.

$$H_0 : \% \bar{u}_{ENDE} = \% \bar{u}_{ZENTRUM} \quad (5.18)$$

Die durchschnittliche Dichte am Ende einer Latte aus der *Basis* ist gleich der durchschnittlichen Dichte in der Mitte der Guadualatte.

$$H_0 : \% \bar{\rho}_{ENDE} = \% \bar{\rho}_{ZENTRUM} \quad (5.19)$$

Die durchschnittliche Dichte am Ende einer Latte aus der *Halmmittle* ist gleich der durchschnittlichen Dichte in der Mitte der Guadualatte.

$$H_0 : \% \bar{\rho}_{ENDE} = \% \bar{\rho}_{ZENTRUM} \quad (5.20)$$

Materialien und Methoden

Herkunftsort: Quebrada Negra - Calarcá Quindío,

Topographie der Zone: *Talzone*,

Halmabschnitte: Halmbasis und Halmmitte,

Größe: 100 cm x 3 cm x 0,8 cm.

Menge: 1612 Latten auf 2 Stapel verteilt, je 806 Latten/Stapel, 26 Reihen/Stapel und 31 Latten/Reihe

Die Dichtemessungen wurden gemäß der Norm ISO 22157-1:2004 mit der Nummer (7) und der DIN 52 182:1976 durchgeführt. Die Proben wurden mit einer elektronischen Waage mit einer Präzision von 0,001g gewogen und das Volumen mit einem Kalibrator („Messschieber“) mit einer Präzision auf 0,01 mm gemessen.

Konstruktion und Beschreibung

Die tragende Konstruktion des Solartrockners besteht aus Bambus oder Aluminium, über der eine Plastikfolie gespannt ist. In diesem Trockner befindet sich ein Kollektor, der die Sonnenenergie speichert. Ein Ventilator, welcher für die Zirkulation der Luft verantwortlich ist, transportiert diese in axialer Richtung durch den Stapel der Guadualatten oder –halme.

Trocknungstypus: Solartrocknung, Treibhaustypus,

Größe: 20 m³,

Nutzraum: 1 m³ Guadualatten,

Größe der Kollektor: 5,2 m².

Siehe Anhang B, D

Ergebnisse des 1.Experimentes

Der mittlere Anfangsfeuchtegehalt in der Basis und in der Halmmitte war gleich. Gemäß *Abb. 5.41* gibt es keine Abweichungen. Die Halmmitten zeigen jedoch eine größere Feuchtestreuung als die Halmbasen auf.

Im Experiment wurde folgender durchschnittlicher Endfeuchtegehalt für die Halmbasen und Halmmitten ermittelt:

	Basis und Halmmitte
Mittelwert [%]	8,8
KI 95 [%]	8,54 - 9,1
Minimum [%]	7,4
Maximum [%]	9,8

Tabelle 5.19: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte, Experiment 1

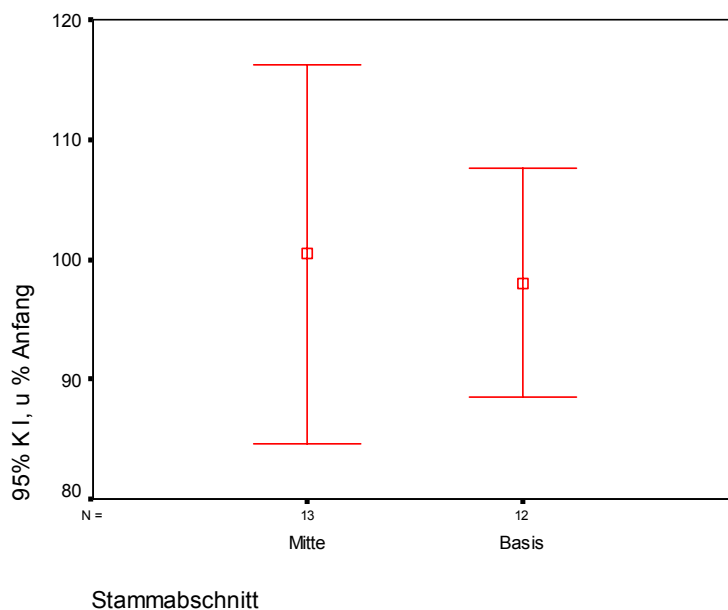


Abb. 5.41: Anfangsfeuchtegehalt Basis und Halmmitte, Experiment 1

Der durchschnittliche Endfeuchtegehalt in den Basen ist nicht gleich der in den Halmmitten. Die Hypothese wurde dem t-Test mit einem Konfidenzintervall von 95% unterzogen. Die Ergebnisse werden in der Abb. 5.44 dargestellt.

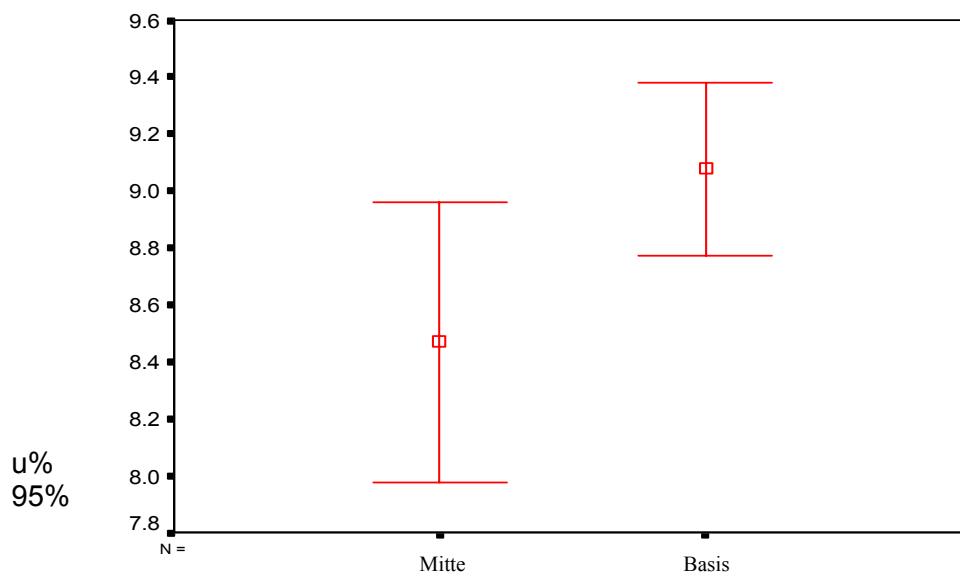


Abb. 5.42: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte, Experiment 1

Die Ergebnisse (Abb. 5.43 und Abb. 5.44) zeigen, dass der Feuchtegehalt am Lattenende und in der Mitte gleich hoch ist. Es treten keine unterschiedlichen Ergebnisse zwischen der Basis und der Halmmitte auf. Deshalb wird die Hypothese

akzeptiert (5.16), (5.17). Für dieses Experiment wurde die Nullhypothese, der Feuchtegehalt in der Lattenmitte sei gleich dem der Lattenenden, mit dem Ziel aufgestellt, zu überprüfen, wo die Entnahme der Probe der 5 cm langen Proben zur Messung des Feuchtegehaltes in gravimetrischer Form am Effektivsten ist.

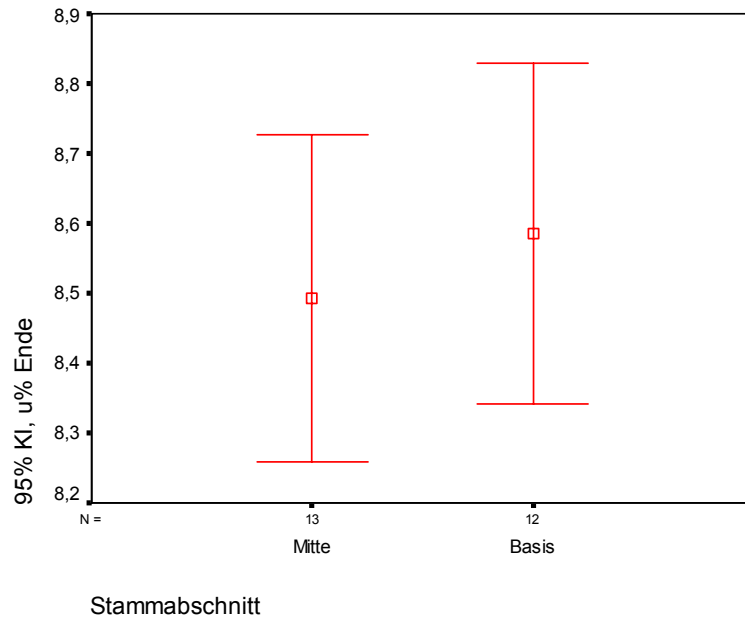


Abb. 5.43: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmittle am Ende der Latte, Experiment 1

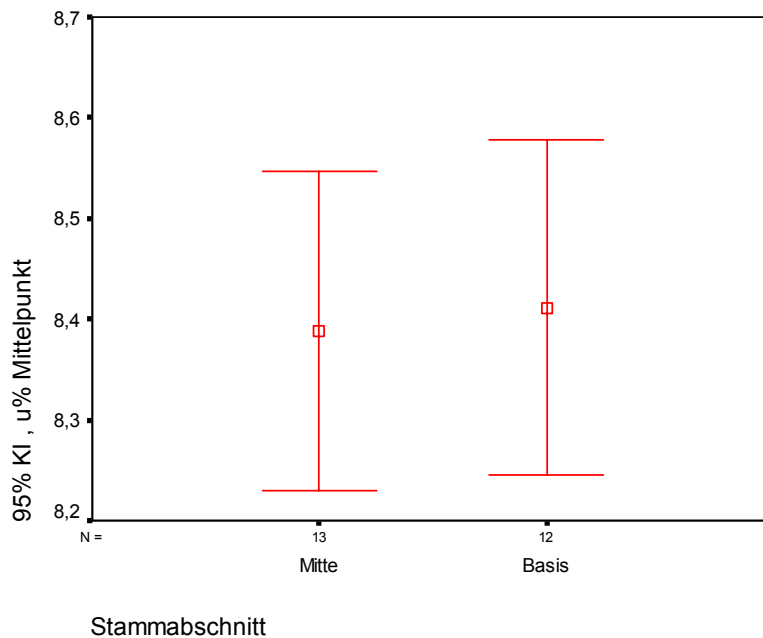


Abb. 5.44: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmittle in der Mitte der Latte, Experiment 1

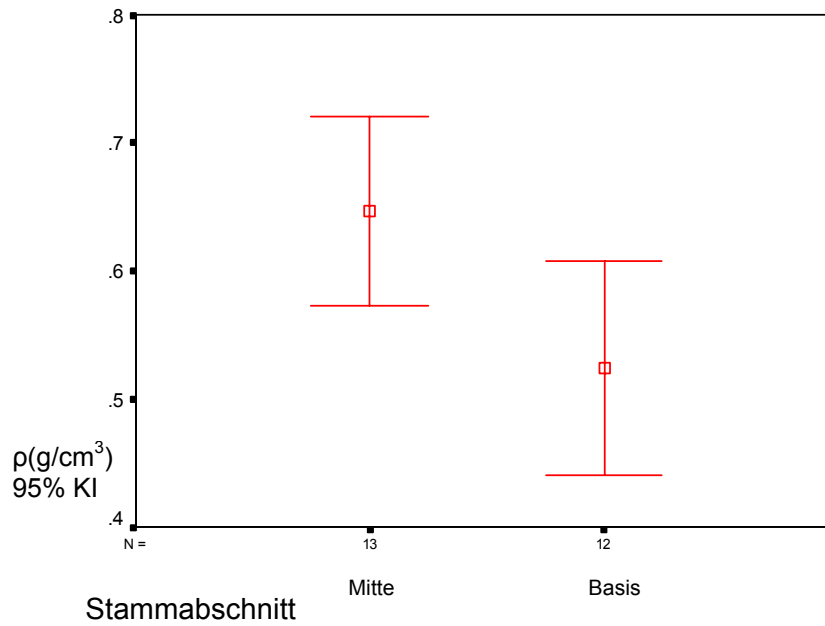


Abb. 5.45: Unterschiede in der Dichte zwischen den Enden der Latten aus der Halmmitte und aus der Basis von trockenen Proben, 1. Experiment

Die Abb. 5.45 und Abb. 5.46 zeigen die in den Enden und im Halmzentrum festgestellten Dichten.

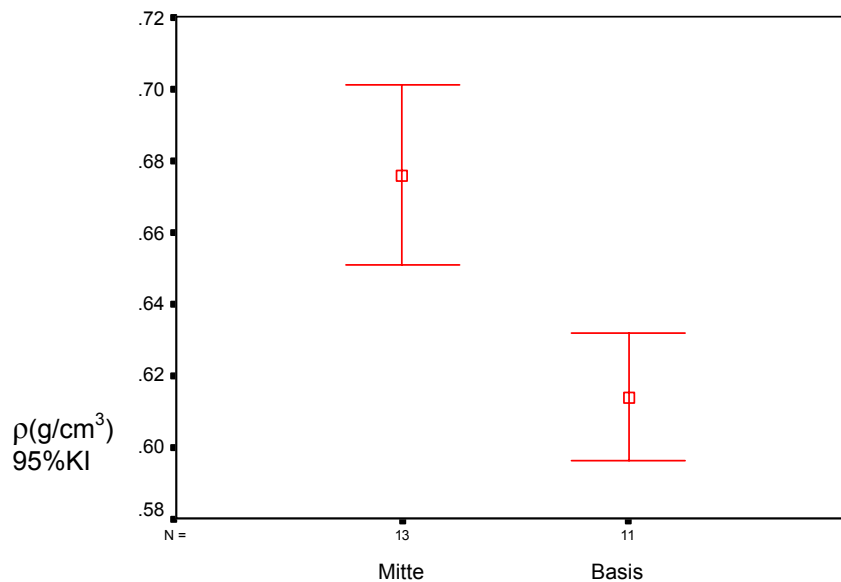


Abb. 5.46: Unterschiede in der Dichte im Zentrum der Latten zwischen den Basen und den Halmmitten, Experiment 1

Die Dichte ist in beiden Fällen (Abb.5.45 und 5.46) in der Halmmitte höher als in der Basis (Abb. 5.48). Das bedeutet, dass die Hypothese (5.17) und (5.18), die Dichten seien gleich groß, nicht akzeptiert wird.

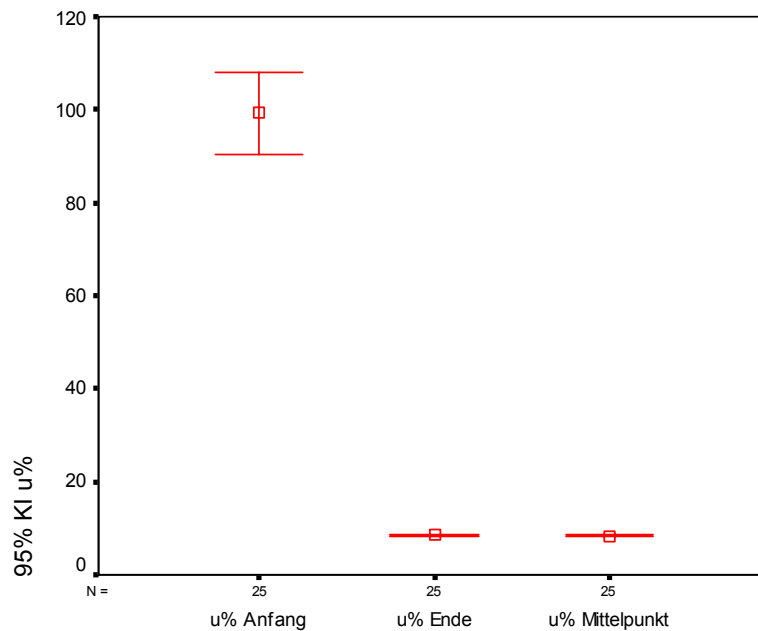


Abb. 5.47: Anfangs- und Endfeuchtegehalt von 25 Proben zum Trocknungsbeginn und nach 16 Tagen, Experiment 1

Die Abb. 5.47 zeigt den Anfangs- und Endfeuchtegehalt von 25 Proben für eine Stichprobe $n = 25$ des gesamten Stapels. Es treten nur minimale Unterschiede in den Endfeuchtegehalten in Lattenmitte und am Lattenende, mit einem Konfidenzintervall von 95%, auf.

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard abweichung
u% Anfang	25	66,7214	165,8006	99,261653	21,151001
u% Kante	25	7,8313	9,2105	8,537395	,379443
u% Mittelpunkt	25	7,9208	8,8496	8,399107	,256733

Tabelle 5.20: Deskriptive Statistiken des 1. Experimentes

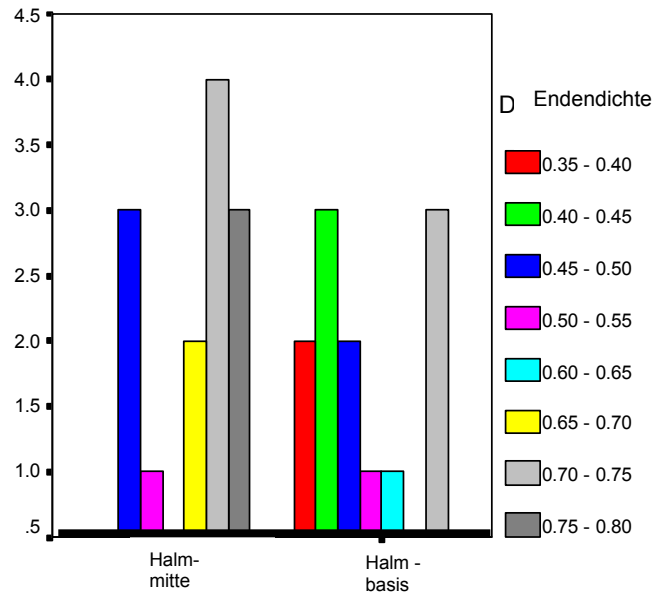


Abb. 5.48: Rohdichten in den Enden der Latten aus der Basis und aus der Halmmitte des 1. Experimentes

Die Abb. 5.48 und 5.49 zeigen die unterschiedlichen Dichten der Latten aus der Halmmitte und aus der Basis für die Enden und die Mitte der Latten bei einem Feuchtegehalt von 0%. Die Abb. 5.48 zeigt, dass die niedrigsten Dichten, zwischen $0,35 \text{ g/cm}^3$ und $0,45 \text{ g/cm}^3$, nur in der Basis vorzufinden sind und dass Dichten von $0,35 \text{ g/cm}^3$, $0,75 \text{ g/cm}^3$ und $0,80 \text{ g/cm}^3$, in der Halmmitte vorzufinden sind. Diese Unterschiede zeigen sich in den Enden der Latte. Der Unterschied im Zentrum ist geringer. Dieser lag zwischen $0,55 \text{ g/cm}^3$ und $0,70 \text{ g/cm}^3$.

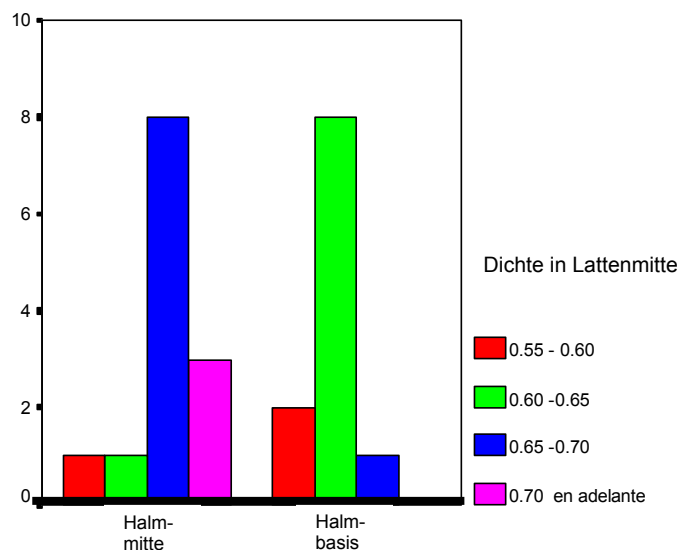


Abb. 5.49: Unterschiede der Dichten in der Mitte der Latte aus der Basis und aus der Halmmitte beim 1. Experiment

Darstellung des Feuchtegehaltes von 25 Proben

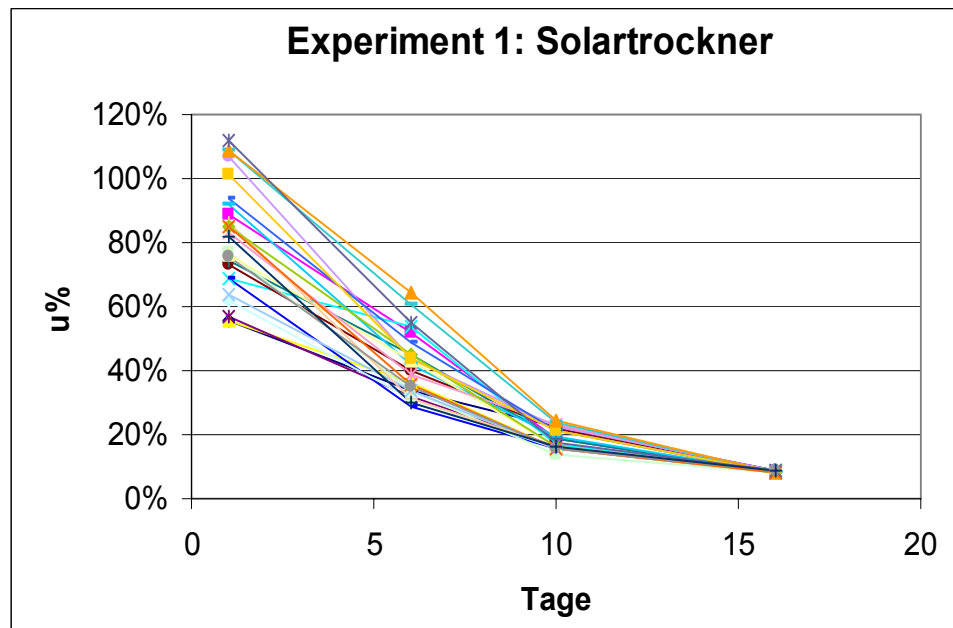


Abb. 5.50: Darstellung des Feuchtegehaltes von 25 Proben über 16 Trocknungstage

Die *Abb.en* 5.50 und 5.51 zeigen die Ergebnisse des 1. Experimentes für die 25 Guaduproben. Der durchschnittliche Anfangsfeuchtegehalt lag bei 99,2% mit einer Standardabweichung von 21,5%. Der Endfeuchtegehalt lag bei 8,5% und die Standardabweichung betrug 0,37%. Die Trocknung dauerte 16 Tage bei einer Umgebungstemperatur von 27° C, einer durchschnittlichen relativen Feuchte von 61% und 7 Stunden Sonne pro Tag im Sommer.



Abb. 5.51: Solartrockner in Cerritos, Sägewerk Ing. Luis Guillermo García

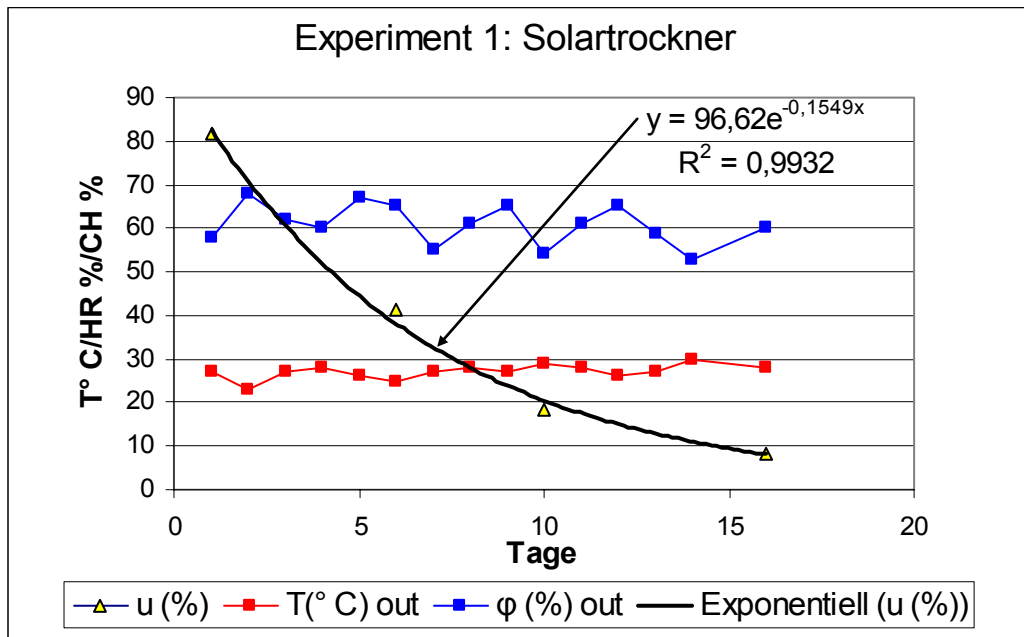


Abb. 5.52: Trocknungskurve über 16 Tage, Experiment 1



Abb. 5.53: Solartrockner in Cerritos, Sägewerk Ing. Luis Guillermo García

Qualität beim 1. Experiment

Bei der Trocknung der Guadualatten treten zwei Arten von Qualitätsproblemen auf. Das erste Problem die Krümmung der Latten¹⁴. Hier treten weder Risse noch Spalten in der Struktur der Latten auf. Das Zweite ist ein biologisches Problem, nämlich das Auftreten von Schimmel und Bläue oder einer bläulichen Verfärbung auf der

¹⁴ In dieser Arbeit wird mit Krümmung die Querkrümmung bzw. das Schüsseln der Latten bezeichnet.

Oberfläche der Latten. Diese Fehler werden in der *Abb. 5.54* dargestellt, wobei "1" die Krümmung ist und "2" die Bläue.

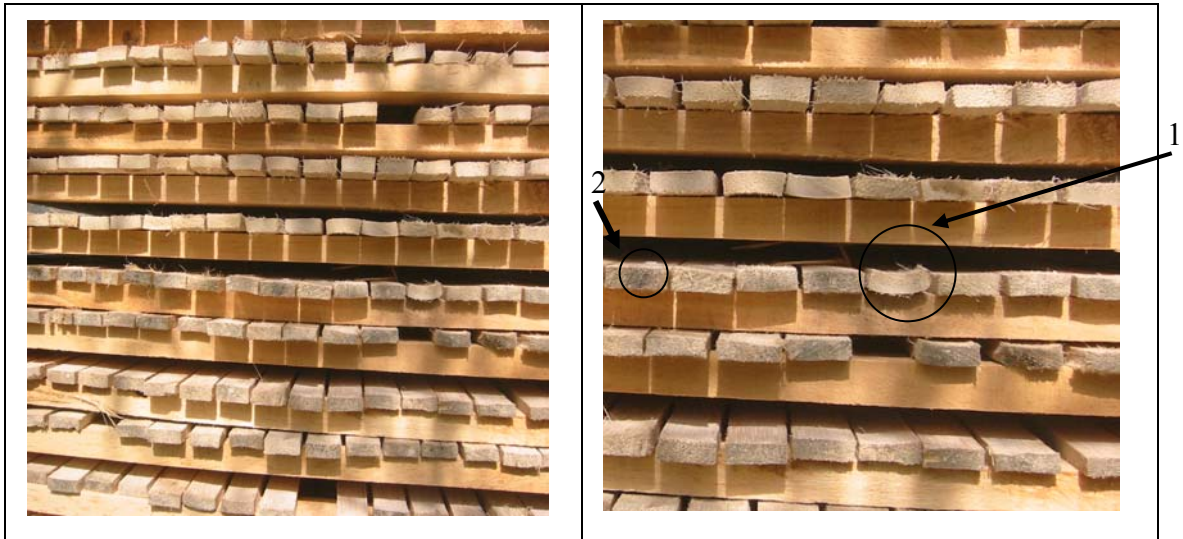


Abb. 5.54: Qualitätsmängel der Krümmung und Bläue der Guadualatten von 100 x 3 x 1 cm

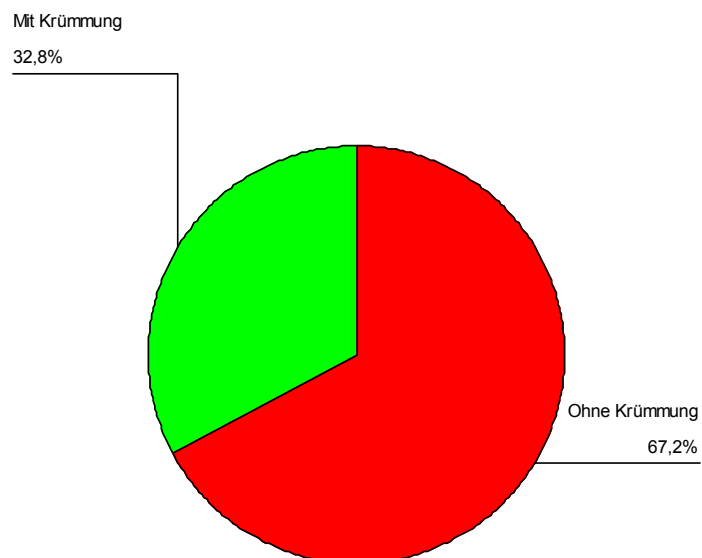


Abb. 5.55: Krümmungsfehler bei der Solartrocknung der Guadualatten im Experiment 1

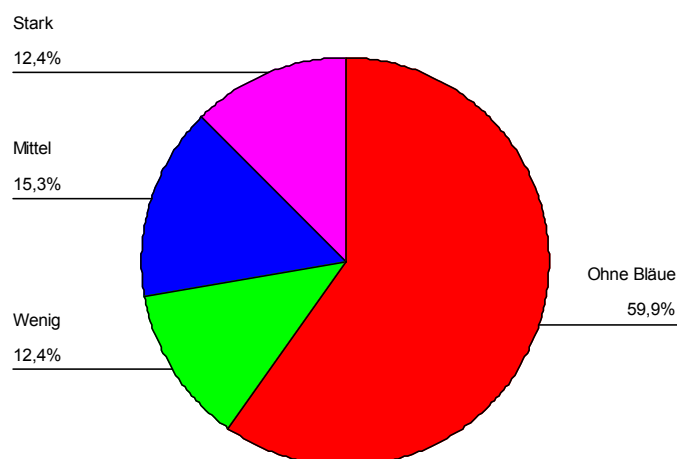


Abb. 5.56: Mängel durch Bläuebefall der Guadualatten im Experiment 1

5.3.1.2 Experiment 2 (Cerritos 7.04.04)

Trocknungsort: Cerritos

Koordinaten: 4° 49' 10,1" Nord, 75° 50' 29,5" westlicher Breite

T ° C / φ %: 26° C / 58%.

(T:Mittelwert =26,4; s =3,42; VK = 13,2 /φ:Mittelwert =58; s =7,6; VK = 13,1%)

Niederschlag: 2.205 mm/Jahr (Meteostationen La Catalina-CENICAFE)

Durchschnittliche Sonnenstunden: 8Std/Tag (Mittelwert= 8,23; s = 1,363; VK=13,95%)

Sonnenstrahlung: 5,116 kWh /m²-Tag bei 5,4 Std/Tag Sonne (Meteostationen La Catalina-CENICAFE)

Höhe: 1.100 m ü.NN

Materialien und Methoden

Herkunft: Quebrada Negra - Calarcá Quindío,

Topographie der Zone: Talzone,

Halmabschnitt: Halmbasis und Halmmitte,

Größe: 80 cm x 3 cm x 0,8 cm.

Menge: 806 Latten auf 1 Stapel verteilt, 26 Reihen/Stapel und 31 Latten/Reihen

Siehe Anhang B, D

Konstruktion und Beschreibung

Trocknungstypus: Solartrocknung, Treibhaustypus,

Größe: 20 m³,

Nutzraum: 1 m³ Guadualatten,

Größe der Kollektorfläche: 5,2 m².

Ergebnisse des 2. Experimentes

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standard abweichung
u% Anfang	16	33,69%	141,36%	83,6195%	34,2047%
u% 13 Tage	16	1,12%	20,79%	10,7526%	6,2004%

Tabelle 5.21: Deskriptive Statistiken des 2. Experimentes

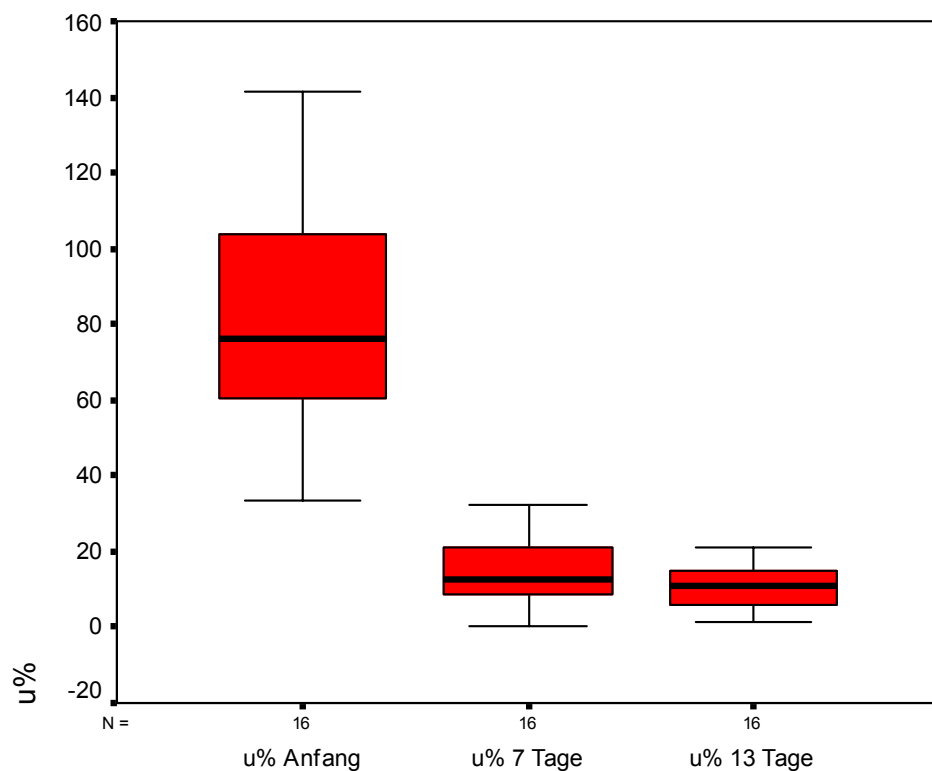


Abb. 5.57: Anfangs- und Endfeuchtegehalt bei der Solartrocknung von Guadualatten

Die Ergebnisse aus dem 2. Experiment werden in den *Abb.en* 5.59 und 5.60 mit dem Trocknungsverlauf der 16 Guaduproben dargestellt. Der Anfangsfeuchtegehalt lag bei 83,6% mit einer Standardabweichung von 34,2%. Der Endfeuchtegehalt lag bei 10,7% mit einer Standardabweichung von 6,2%.

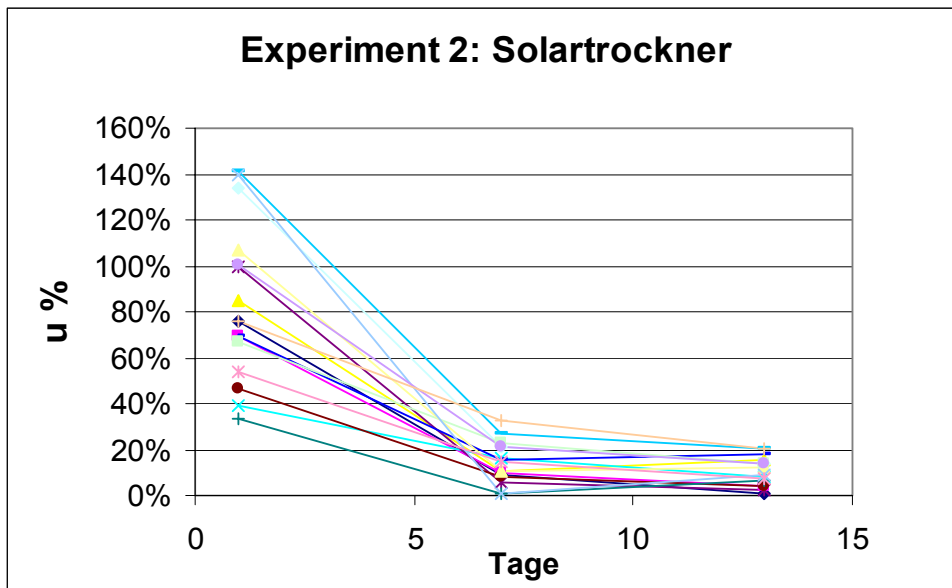


Abb. 5.58: Feuchtegehalt der 16 Proben im Verlauf der 13 Trocknungstage

Die Trocknungsdauer betrug 13 Tage bei einer durchschnittlichen relativen Feuchte von 58%, einer Temperatur von 26°C und bei 8 Std/Tag Sonne im Sommer.

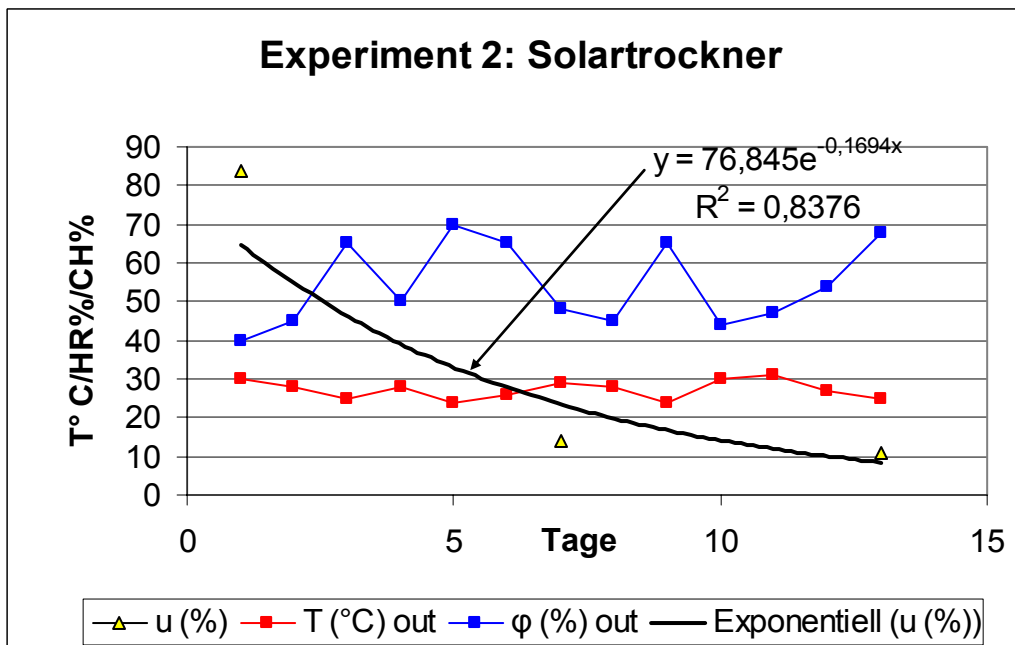


Abb. 5.59: Trocknungskurve über 13 Tage, Experiment 2

Qualität beim 2. Experiment

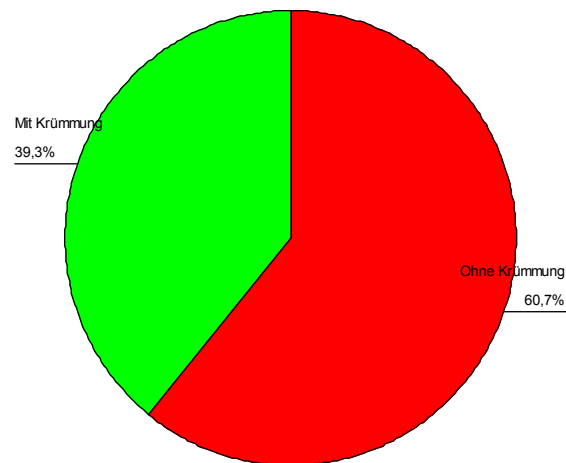


Abb. 5.60: Krümmungsfehler bei der Solartrocknung der Guadualatten, Experiment 2

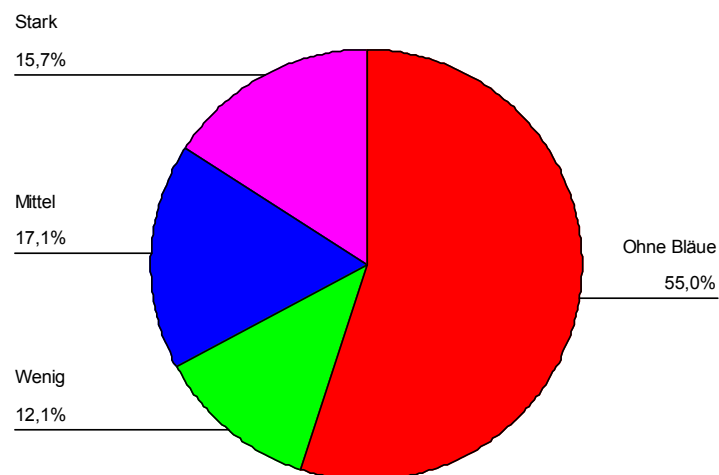


Abb. 5.61: Verfärbung durch Bläue- und Schimmelbefall bei der Solartrocknung der Guadualatten, Experiment 2

5.3.1.3 Experiment 3 (26.08.04)

Trocknungsort: Technologische Universität von Pereira,

Koordinaten: 4° 47' 40,2" Nord, 75° 41' 35,1" westlicher Breite,

T ° C / φ %: 25° C / 74%,

(T: Mittelwert =25,04; s =3,79, VK = 15,13%/ φ: Mittelwert =73,7; s =11,64, VK = 15,79%),

Niederschlag: 2.440 mm/Jahr (Mittelwert von den Meteostationen El Cedral y La Catalina-CENICAFE),

Durchschnittliche Sonnenstunden: 5 Std/Tag (Mittelwert= 5,38; $s = 1,12$; $VK=16,15\%$),
 Sonnenstrahlung: 5,116 kWh /m²-Tag bei 5,4 Std/Tag Sonne, Meteostationen El
 Cedral y La Catalina-CENICAFE),
 Höhe: 1.450 m ü.NN.

Für dieses Experiment wurde die folgende Nullhypothese aufgestellt:

Der durchschnittliche Feuchtegehalt in den Enden der Latte aus der Basis ist gleich dem durchschnittlichen Feuchtegehalt der Guadualatten aus der Halmmitte.

$$H_0 : \%u_{BASIS} = \%u_{MITTE} \quad (5.21)$$

Materialien und Methoden

Herkunft: Quebrada Negra - Calarcá Quindío,
 Topographie der Zone: *Talzone*,
 Halmabschnitt: Halmbasis und Halmmitte,
 Größe: 100 cm x 3 cm x 0,8 cm.
 Menge: 1.612 Latten auf 2 Stapel mit je 806 Latten/Stapel verteilt,

Siehe Anhang B, D

Ergebnisse des 3. Experimentes

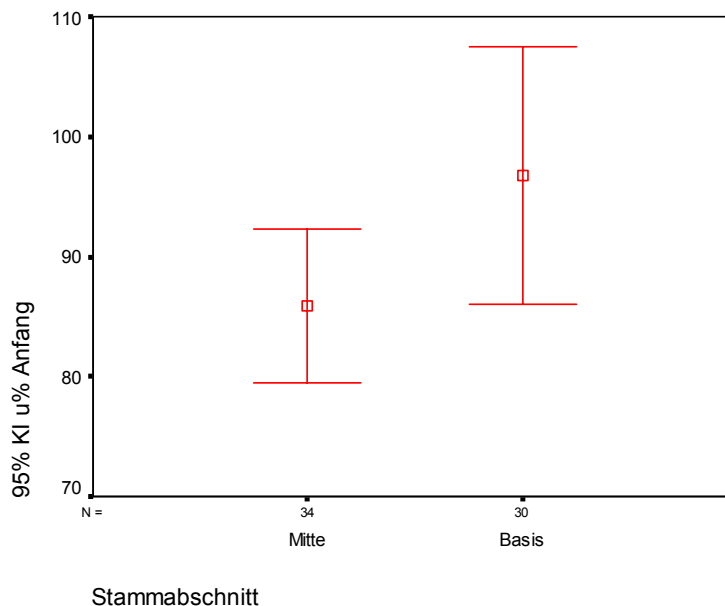


Abb. 5.62: Anfangsfeuchtegehalt in der Basis und in der Halmmitte im 3. Experiment

	Basis	Halmmitte
Mittelwert [%]	96,7	85,8
KI 95 [%]	85,97 - 107,51	79,4 - 92,2
Minimum [%]	51,8	61,8
Maximum [%]	173,8	130,6

Tabelle 5.22: Anfangsfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte

Beim Test der Hypothese traten keine Unterschiede zwischen den durchschnittlichen Feuchtegehalten der Guaduaabschnitte auf.

Bei der Überprüfung (Abb. 5.64) der Hypothese stellte sich heraus, dass es bedeutende Unterschiede unter den durchschnittlichen Feuchtegehalten gibt. Die Feuchtegehalte waren in der Basis höher. Die Angaben werden folgendermaßen zusammengefasst:

	Basis	Halmmitte
Mittelwert [%]	16,2	14,7
KI 95 [%]	15,71 - 16,64	14,37 - 15,12
Minimum [%]	14	12,8
Maximum [%]	19,5	17,8

Tabelle 5.23: Endfeuchtegehalt in Base und Halmmitte, Experiment 3

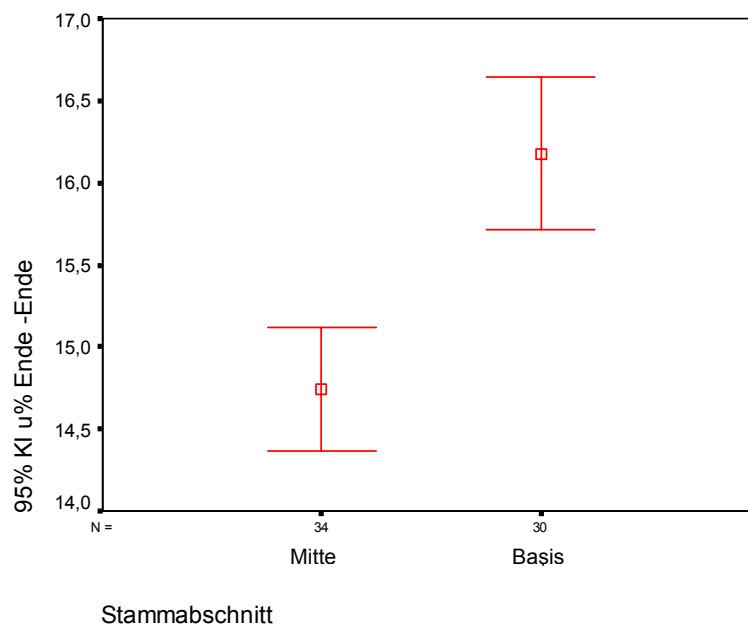


Tabelle 5.24: Endfeuchtegehalt in Basis und in Halmmitte, Experiment 3

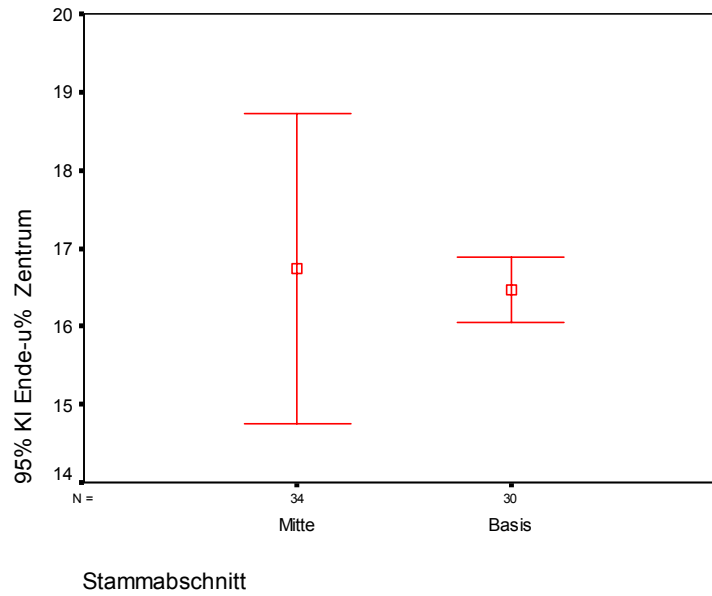


Tabelle 5.25: Endfeuchtegehalt im Zentrum der Basis und in Halmmittle,

Experiment 3

Solartrockner für Latten



Abb. 5.63: Solartrockner im botanischen Garten der Technischen Universität von Pereira



Abb. 5.64: Solartrockner im botanischen Garten der Technischen Universität von Pereira

Das Ergebnis aus dem 3. Experiment wird in der Abb. 5.67 mit dem Trocknungsverlauf der Stichprobe aus 64 Gadua-Latten, 30 aus der Basis und 34 aus der Halmmittle, dargestellt. Der Anfangsfeuchtegehalt lag bei 99,2% mit einer Standardabweichung von 34,2%. Der Endfeuchtegehalt lag bei 14,7% für die Halmmittle und bei 16,2% für die Basen. Die Trocknungsdauer betrug bei einer durchschnittlichen relativen Feuchte von 73%, einer Umgebungstemperatur von 23° C und bei einer durchschnittlichen Sonnenscheindauer von 5 Std/Tag Sonne in der Regenzeit, 18 Tage.

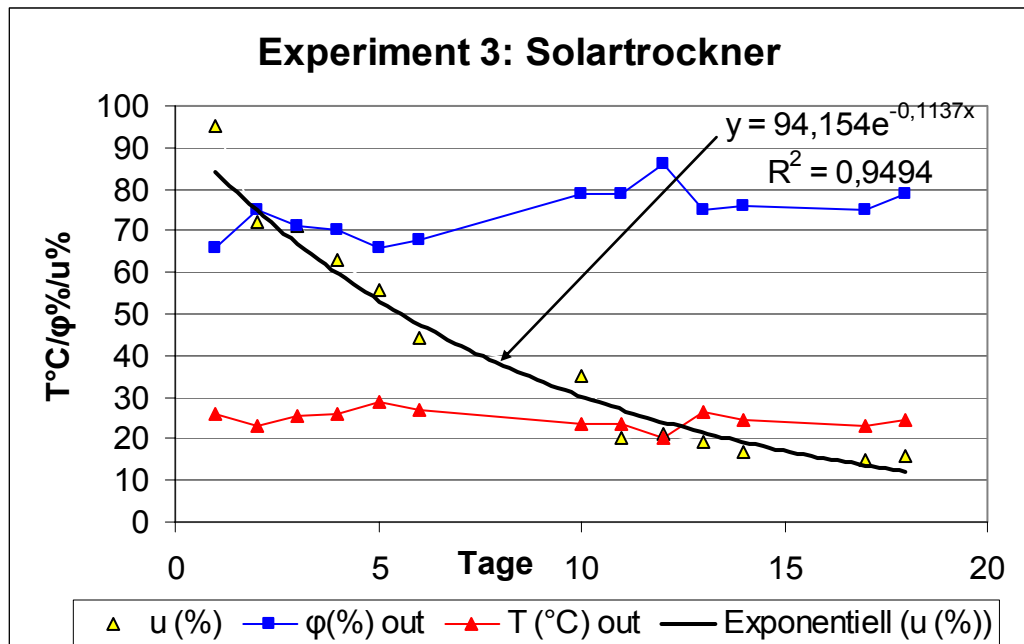


Abb. 5.65: Trocknungskurve über 18 Tage, Experiment 3

Funktionsprinzip des Solartrockners

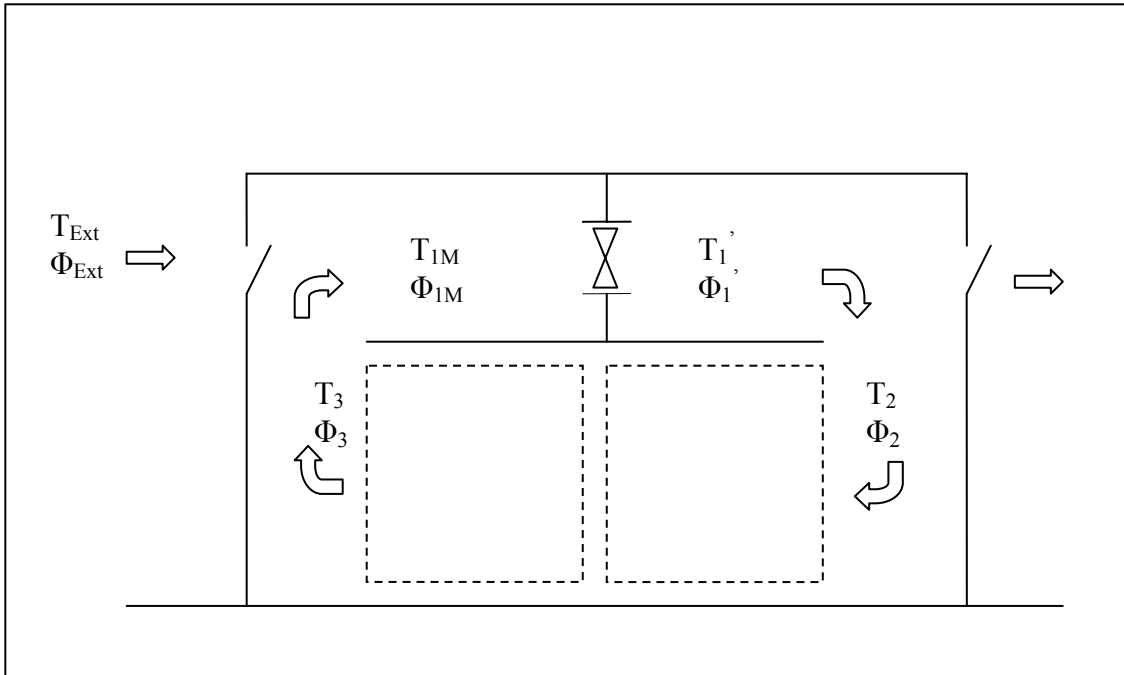


Abb. 5.66: Funktionsprinzip des Solartrockners

Siehe Anhang C: Luftzustände im Solartrockner bei der Trocknung von *Guadua angustifolia*

Charakterisierung des Solartrockners

	N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standart abweichung
T°C out	201	19,000	34,800	25,04627	3,79526
T°C in- Eintritt	201	19,900	43,300	28,57960	4,47972
T°C in- Austritt	201	20,200	39,800	28,93731	4,30016
T° C Kollektor	201	18,700	50,100	32,78657	8,65189
Diff. Temperatur (Ein/Aus)	201	-7,60	4,90	,3577	1,7600
relative Feuchte% out	201	42,90	92,80	73,7463	11,6413
relative Feuchte% in-Ein	201	62,10	99,90	86,2905	7,7852
relative Feuchte% in-Aus	201	68,20	99,90	92,2284	7,7874
Diff. relative Feuchte%	201	-8,90	23,10	5,9378	3,9879
Luftgeschwindigkeit oben	201	,500	1,400	,73930	,15747
Luftgeschwindigkeit unten	201	,800	2,200	1,10746	,15230

Tabelle 5.26: Statistische Werte des Solartrockners, Experiment 3

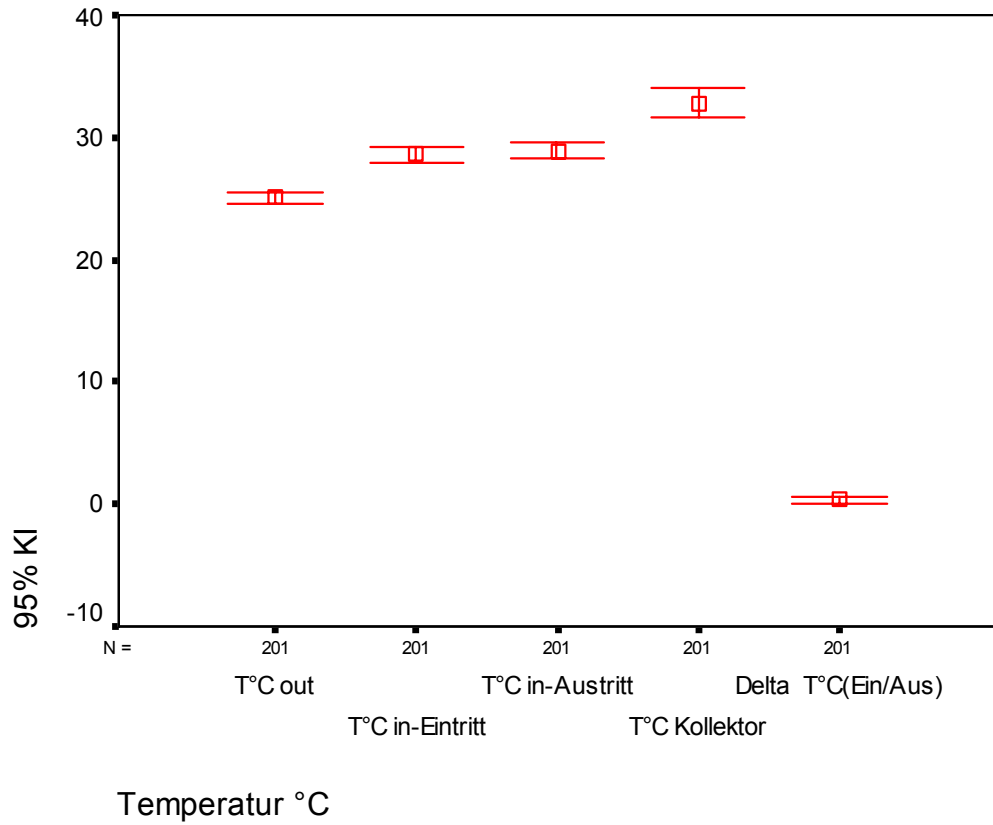


Abb. 5.67: Charakterisierung der Temperatur im Trockner

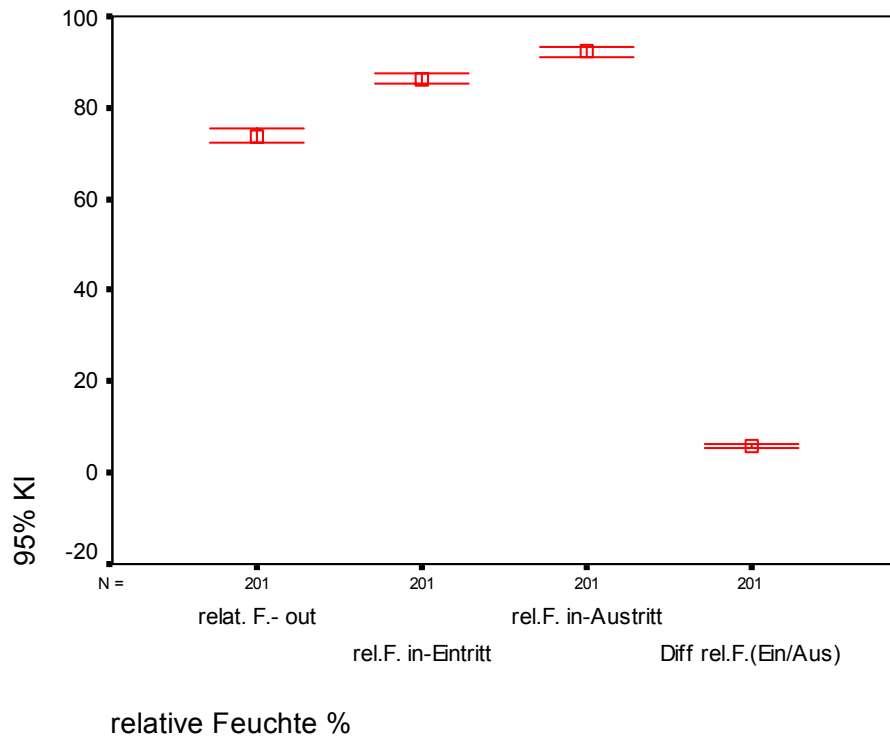
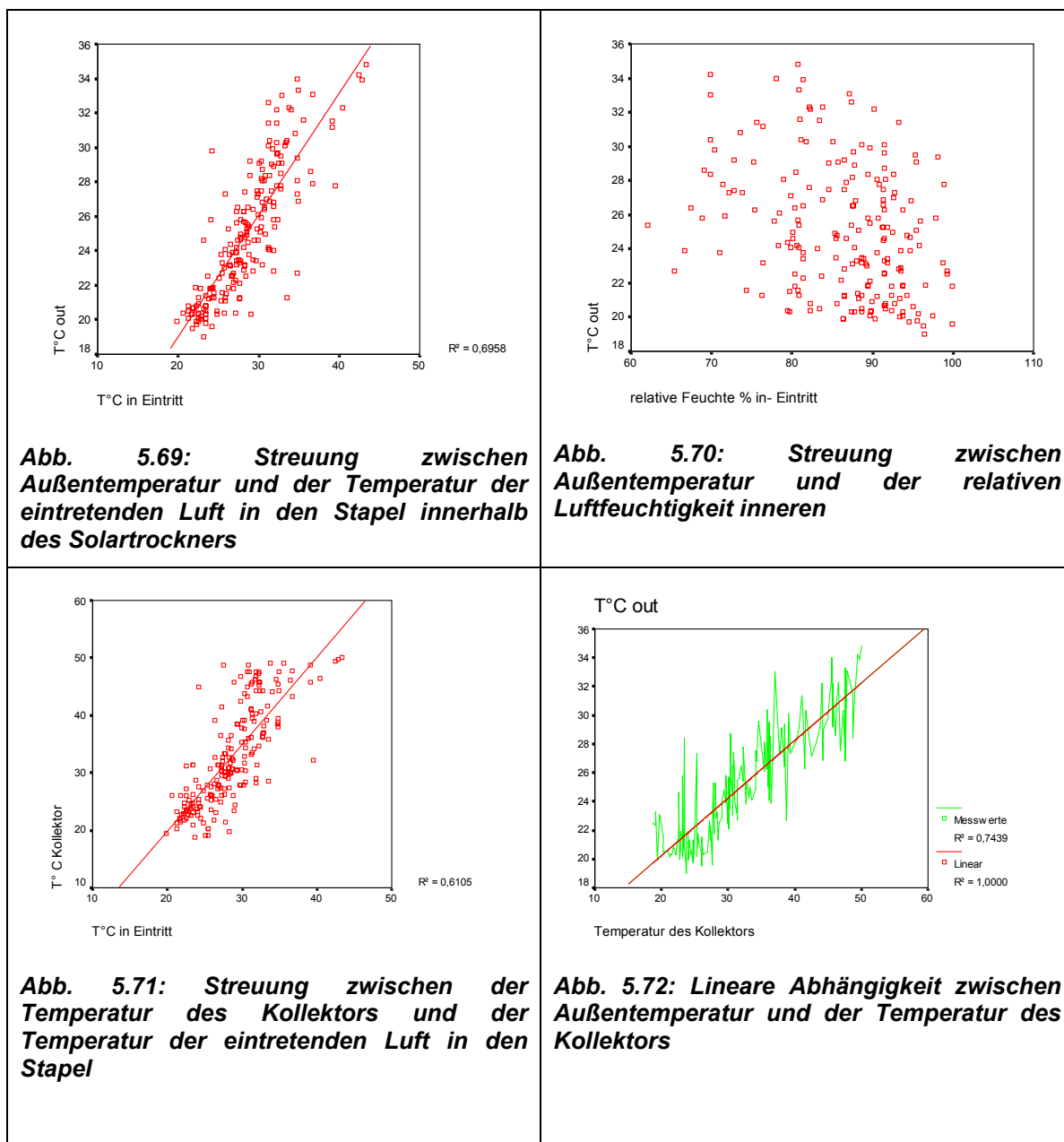


Abb. 5.68: Charakterisierung der relativen Luftfeuchte im Trockner



5.3.1.4 Experiment 4 (29.07.04)

Trocknungsort: Technologische Pflanzen Universität von Pereira,

Koordinaten: 4° 47' 40,2" Nord, 75° 41' 35,1" westlicher Breite,

T ° C / φ %: 25° C / 66%,

(T:Mittelwert =25,0; s =1,99; VK = 7,85 /φ:Mittelwert =66; s =5,08; VK = 7,71%)

Niederschlag: 2.440 mm/Jahr (Mittelwert von den Meteostationen El Cedral y La Catalina-CENICAFE),

Durchschnittliche Sonnenstunden: 6 Std/Tag (Mittelwert= 6; s =0,92; =1,27;

VK=15,43%),

Sonnenstrahlung in Pereira: 5,116 kWh /m²-Tag, bei 5,4 Std/Tag Sonne (Estación La Catalina-CENICAFE),

Höhe: 1.450 m ü.NN.

Für dieses Experiment wurde die folgende Nullhypothese aufgestellt:

Der durchschnittliche Feuchtegehalt in den Enden der Latte aus der Basis ist gleich dem durchschnittlichen Feuchtegehalt in der Guadualatte aus der Halmmitte.

$$H_0 : \% \bar{u}_{BASIS} = \% \bar{u}_{MITTE} \quad (5.19)$$

Materialien und Methoden

Herkunft: Quebrada Negra - Calarcá Quindío,

Topographie der Zone: *Talzone*,

Halmabschnitt: Halmbasis und Halmmitte,

Größe: 100 cm x 3 cm x 0,8 cm,

Menge: 2 Stapel mit je 806 Latten

Konstruktion und Beschreibung

Trocknungstyp: Solartrockner, Treibhaustyp,

Größe der Kollektorfläche: 5,2 m²

Lüftung: Longitudinal

Größe: 20 m³,

Siehe Anhang B, D

Ergebnisse des 4. Experimentes

Für die Basen und Halmmitten erhielt man die folgenden Ergebnisse (*Abb. 5.75 und Tabelle 5.26*):

	Basis	Halmmitte
Mittelwert [%]	9	8,4
VK [%]	8,72 - 9,36	7,98 - 8,96
Minimum [%]	8,1	7,3
Maximum [%]	9,8	9,5

Tabelle 5.27: Endfeuchtegehalt in Basis und Halmmitte, Experiment 4

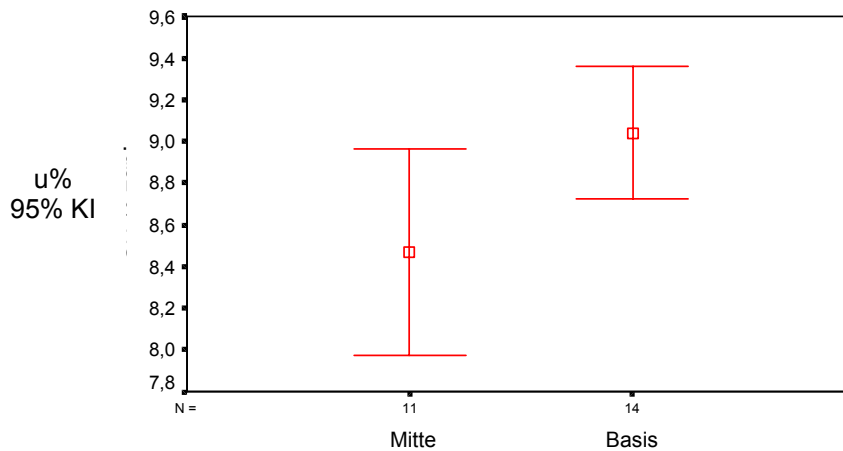


Abb. 5.73: Endfeuchtegehalt nach 15 Trocknungstagen für Basis und Halmmittle, Experiment 4

Der durchschnittliche Feuchtegehalt in den Basen ist höher als in den Halmmitteln. Diese Hypothese wurde durch einen t-Test mit einem Konfidenzintervall von 95% überprüft.

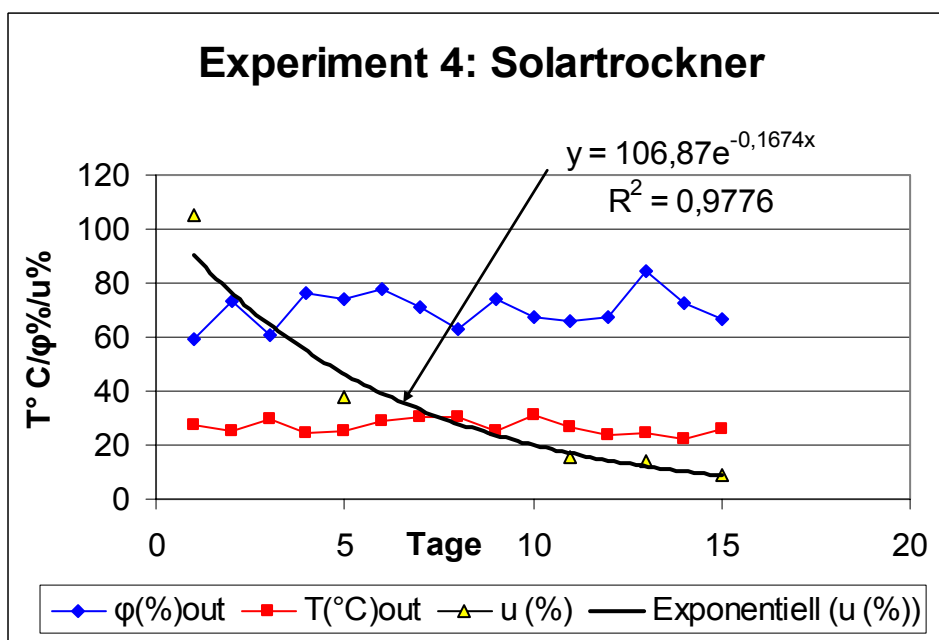


Abb. 5.74: Trocknungskurve über 15 Tage, Experiment 4

Die *Abb. 5.76* zeigt die Trocknungskurven des 4. Experimentes mit dem Trocknungsverlauf der 25 Guadualattenproben, 14 aus der Basis und 11 aus der Halmmitte. Der Anfangsfeuchtegehalt lag bei 105%. Der Endfeuchtegehalt lag bei 8,7%. Die Trocknungsdauer betrug bei einer durchschnittlichen relativen Feuchte von 66%, einer Umgebungstemperatur von 25° C und bei 6Std/Tag Sonne in der Trockenzeit, 15 Tage.

5.3.2 Solartrocknung von Guaduahalmen

5.3.2.1 Experiment 5 (3.01.05)

Ort der Trocknung: El Tigre,

Koordinaten: 4° 48' 34" Nord, 75° 47' 20" westlicher Breite,

T ° C / φ %: 26° C/ 63%,

(T:Mittelwert =25,9; *s* =2,51; VK = 9,66 /φ:Mittelwert =63,46; *s* =8,18; VK = 12,90%),

Niederschlag: 2.205 mm/Jahr (Meteostationen La Catalina-CENICAFE),

Sonnenstunden:7Std/Tag (Meteostationen La Catalina-CENICAFE),

Höhe:1.100 m ü.NN.

Materialien und Methoden

Herkunftsort: El Tigre,

Topographie der Zone: Bergspitze

Halmabschnitt: Halmmitte und obere Halmmitte,

Größe: 300 cm x 8 cm Ø,

Menge: 457 Guaduahalme/ Stapel,

Anordnung im Trockner: Guaduas quer (⊥) zum Luftstrom,

Beobachtungen: Die Halme wurden nach der Methode von Boucherie¹⁵ behandelt und im Schatten vorgetrocknet. Die Guaduas wurden mit nicht durchstoßenen, intakten Diaphragmen getrocknet.

Konstruktion und Beschreibung

Trocknungstyp: Solartrockner, Treibhaustyp,

Größe: 66 m³,

Nutzraum: 500 Guaduas mit einer Länge von 3 m

Größe der Kollektorfläche: 12 m².

Siehe Anhang E

¹⁵ Die Boucherie-Methode oder „Sap displacement“ ist eine Behandlungsmethode, in der mit hohem Druck eine Flüssigkeit zum Schutz vor Insekten in die Halmwand eingepresst wird und somit den eigenen Saft des Halmes verdrängt.

Ergebnisse des 5. Experimentes

Trocknungskurven der Solartrocknung

Die Abb. 5.69 zeigt die Trocknungskurve des 5. Experimentes mit dem Trocknungsverlauf der 25 Guadualattenproben. Der Anfangsfeuchtegehalt lag bei 31,1%. Der Endfeuchtegehalt lag bei 7,4%. Die Trocknungsdauer betrug bei einer durchschnittlichen relativen Feuchte von 63%, einer Temperatur von 26° C und bei 7 Std/Tag Sonne in der Trockenzeit, 21 Tage.

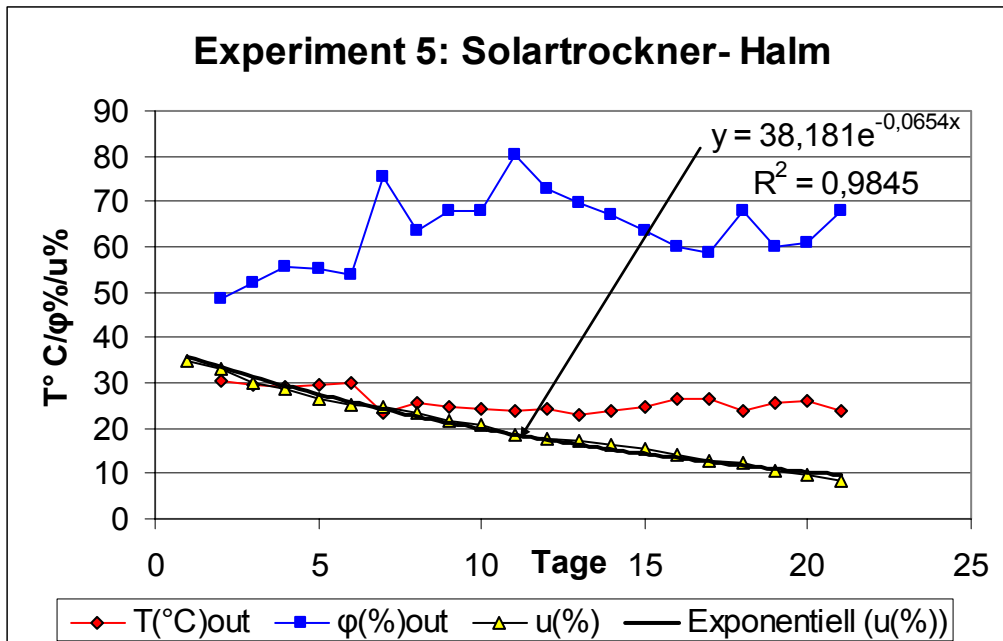


Abb. 5.75: Trocknungskurve über 21 Tage, Experiment 5

Solartrockner von El Tigre (Dansa Int.)



Abb. 5.76: Solartrockner für Halme mit einem Nutzungsraum für 500 Guaduas mit 3 m Länge, Experiment 5 und 6



Abb. 5.77: Solartrockner für Halme mit einem Nutzungsraum für 500 Guaduas mit 3 m Länge, Experiment 5 und 6

Qualität beim 5. Experiment

Die Abb. 5.79 zeigt die Ergebnisse aus der Bewertung der Risse und der Spalten des 5. Experimentes über die Solartrocknung von Guadua-Halme. Es traten weder kleine oder moderate Risse noch moderate oder leichte Spalten auf. Schwere Risse lagen bei 10% vor und schwere Spalten lagen bei 7% vor.

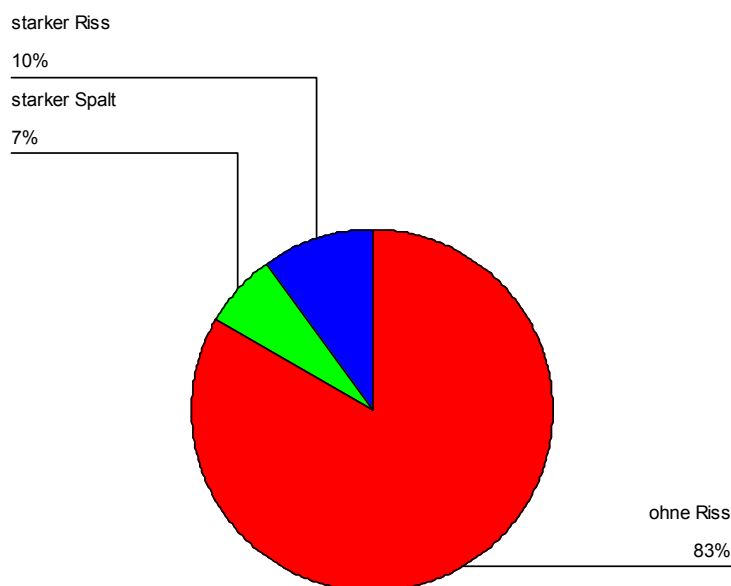


Abb. 5.78: Trocknungsqualität des 5. Experimentes

5.3.2.1 Experiment 6 (8.02.05)

Ort der Trocknung: El Tigre,

Koordinaten: 4° 48' 34" Nord, 75° 47' 20" westlicher Breite,

T ° C y φ %: 25° C/ 61%,

(T:Mittelwert =25,4; s =2,57; VK = 9,85 /φ:Mittelwert =61,45; s =6,26; VK = 10,18%),

Niederschlag: 2.205 mm/Jahr (Meteostationen La Catalina-CENICAFE),

Sonnenstunden: 7Std/Tag (Meteostationen La Catalina-CENICAFE),

Höhe:1100 m ü.NN.

Materialien und Methoden

Herkunftsort: El Tigre,

Topographie der Zone: Bergspitze,

Halmabschnitt: Halmmittle und obere Halmmittle,

Größe: 300 cm x 10 cm Ø,

Menge: 500 Guaduahalme/ Stapel,

Anordnung im Trockner: Guaduas quer zum Luftstrom,

Beobachtungen: Die Halme wurden nach der Methode von Boucherie (siehe oben) behandelt und im Schatten vorgetrocknet. Die Guaduas wurden mit intakten Diaphragmen getrocknet, sie wurden nicht durchbohrt.

Konstruktion und Beschreibung

Trocknungstypus: Solartrocknung, Treibhaustypus,
 Größe: 66 m³,
 Nutzungsraum: 500 Guaduas mit einer Länge von 3 m
 Größe der Sammelfläche: 12 m².

Ergebnisse des 6. Experimentes

Trocknungskurven der Solartrocknung

Die Abb. 5.70 zeigt die Trocknungskurve des 6. Experimentes mit dem Trocknungsverlauf der 18 Guaduproben. Der Anfangsfeuchtegehalt lag bei 41%. Der Endfeuchtegehalt lag bei 8,2%. Die Trocknungsdauer betrug bei einer durchschnittlichen relativen Feuchte von 61%, einer Temperatur von 25° C und bei 7 Std/Tag Sonne in der Trockenzeit, 21 Tage.

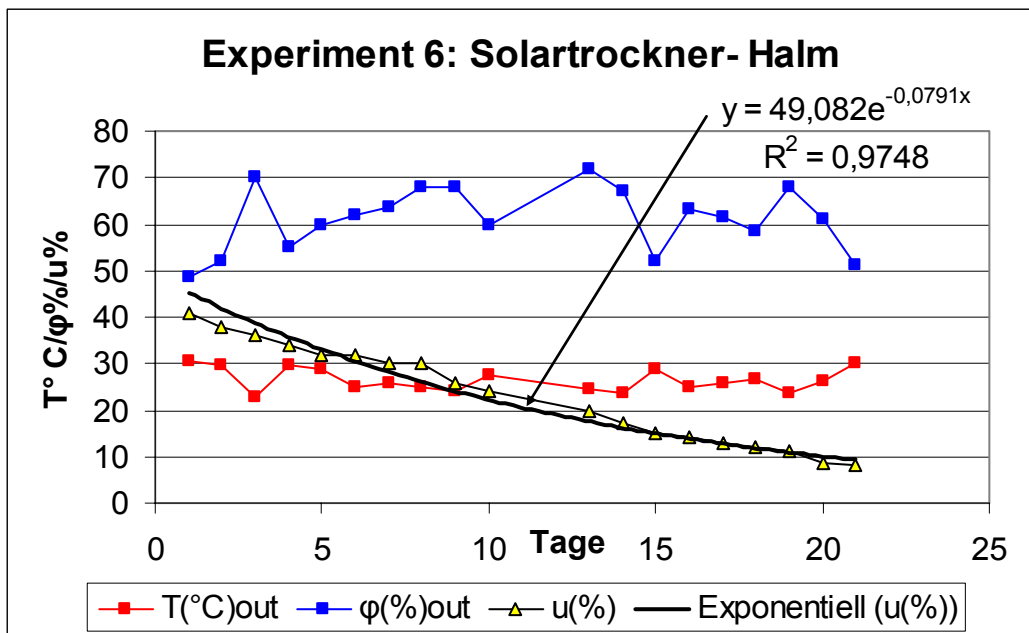


Abb. 5.79: Trocknungskurve über 21 Tage, Experiment 6

Qualität beim 6. Experiment

Die Abb. 5.60 zeigt die Ergebnisse aus der Bewertung der Risse und der Spalten des 6. Experimentes über die Solartrocknung von Guaduarundholz. Es traten weder kleine leichten Risse noch moderate oder leichte Spalten auf. Schwere Risse lagen bei 4% vor, moderate Risse lagen bei 3,8% vor und schwere Spalten lagen bei 4,2% vor.

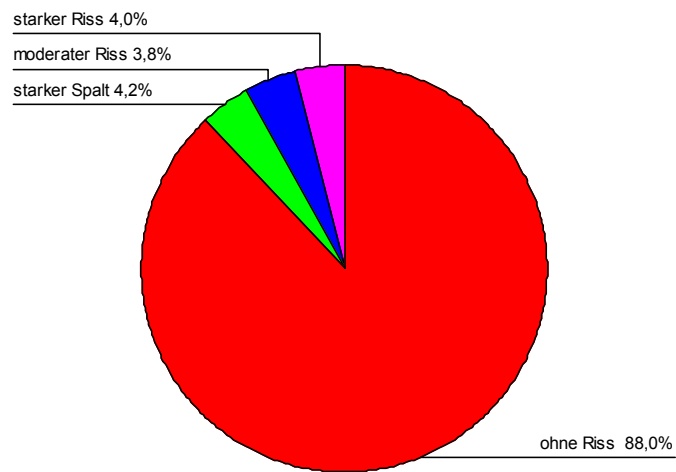


Abb. 5.80: Trocknungsqualität des 6. Experimentes

5.4 Ergebnisse aus der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft-/Abluftverfahren

5.4.1 Konventionelle Trocknung von Guaduahalme

5.4.1.1 Experiment 1 (30.05.04)

Ort der Trocknung: Technische Universität von Pereira,

Trocknungsart: konventionelle Trocknung nach dem Frischluft-/Abluftverfahren,

Nutzraum: 20 m³,

Trocknungskapazität: 135 Guaduas mit einer Länge von 5,65m, Ø ≤14 cm.

Für dieses Experiment wurden die folgenden Nullhypothesen aufgestellt:

Der durchschnittliche Anfangsfeuchtegehalt im Internodium aus der *Basis* ist gleich dem durchschnittlichen Anfangsfeuchtegehalt der Nodien der Guadua.

$$H_0 : \% \bar{u}_{INTERNODIUM} = \% \bar{u}_{NODIUM} \quad (5.20)$$

Der durchschnittliche Anfangsfeuchtegehalt im Internodium aus der *Halmmitte* ist gleich dem durchschnittlichen Anfangsfeuchtegehalt der Nodien der Guadua.

$$H_0 : \% \bar{u}_{INTERNODIUM} = \% \bar{u}_{NODIUM} \quad (5.21)$$

Der durchschnittliche Endfeuchtegehalt im Internodium aus der *Basis* ist gleich dem durchschnittlichen Endfeuchtegehalt der Nodien der Guadua.

$$H_0 : \% \bar{u}_{INTERNODIUM} = \% \bar{u}_{NODIUM} \quad (5.22)$$

Der durchschnittliche Endfeuchtegehalt im Internodium aus der *Halmmitte* ist gleich dem durchschnittlichen Endfeuchtegehalt der Nodien der Guadua.

$$H_0 : \% \bar{u}_{INTERNODIUM} = \% \bar{u}_{NODIUM} \quad (5.23)$$

Materialien und Methoden

Herkunftsort: Montenegro – Quindío,

Topografie der Zone: Hangzone,

Abschnitt im Halm: Basis und Halmmitte,

Göße: 5,64 m; $\bar{\phi}_{BASIS} = 11,0$ cm, $\bar{\phi}_{MITTE} = 9,5$ cm,

Durchschnittliche Wanddicke in der Basis 1,51 cm,

Durchschnittliche Wanddicke in der Halmmitte 1,10 cm,

Menge: 120 Guaduas,

Anordnung im Trockner: Guaduas quer zum Luftstrom.

Diaphragmen: mit einem Bohrer \varnothing von 12,5 mm durchbohrt,

Beobachtungen: Die Halme wurden zuvor mit Borax behandelt, einem Gärungsprozess unterworfen, und die Diaphragmen wurden durchbohrt.

Die Messungen des Feuchtegehaltes wurden mit Hilfe der Darmmethode durchgeführt. Aus den Halmen wurden Abschnitte von 5 cm Länge nach der Norm ISO 22157-1:2004, Nummer (6) und der DIN 52 183 zugeschnitten (Abb. 5.71,5.72).

Die Proben wurden mit einer elektronischen Waage, mit einer Präzision von 0,001g, gewogen und in den Laboratorien der Fakultät für Umweltwissenschaften der Technischen Universität von Pereira nach den Normvorschriften getrocknet.



Abb. 5.81: Die Guaduproben bei der Gewichtsmessung Anfang



Abb. 5.82: Die Guaduproben bei der Gewichtsmessung, 24 Stunden im Ofen



Abb. 5.83: Die Proben wurden nach dem Trocknen in einen Exsikkator gelegt



Abb. 5.84: Die Guaduproben bei der Gewichtsmessung Ende

*Trocknungsprogramm der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft/
Abluftverfahren*

Trocknungsprogramm Experiment 1					
	u%	Tt °C	Tf °C	φ%	ΔT° C
Schritt 1	> 40	36	31	68	5
Schritt 2	30-40	36	30	63	6
Schritt 3	25-30	40	33	65	7
Schritt 4	20-25	40	32	55	8
Schritt 5	10-20	48	40	52	10
Schritt 6	< 10	48	40	52	10

Tabelle 5.28: *Trocknungsprogramm des 1. Experimentes (Tt = Trockentemperatur, Tf = Feuchttemperatur, ΔT = psychometrische Differenz)*

Konstruktion und Beschreibung der Trocknungsanlage

Siehe Anhang F: Entwurf Montoya J. A. und Zeichnung von Bahena J. S. (2005)

Ergebnisse des 1. Experimentes

In diesem Experiment wurden die Anfangsfeuchten für die Basen und für die Halmmitten analysiert. Weiter wurde auch eine Analyse der Nodien und Internodien durchgeführt.

Anfangsfeuchtegehalt der Basen (Nodien und Internodien)

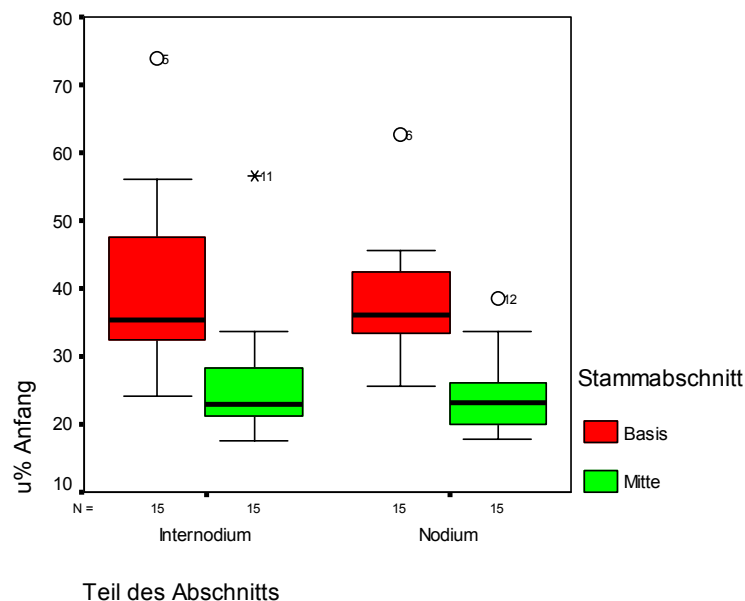


Abb. 5.85: *Unterschiede in den Anfangsfeuchtegehalten zwischen den Nodien und Internodien aus der Basis und Halmmitte beim 1. Experiment*

Die Abb. 5.86 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Nodien und Internodien der Halmabschnitte und der Anfangsfeuchtegehalten der Basisabschnitte und der

Halmmitteabschnitte. Die Abb. 5.87 zeigt die gleichen Unterschiede mit einem Konfidenzintervall von 95%.

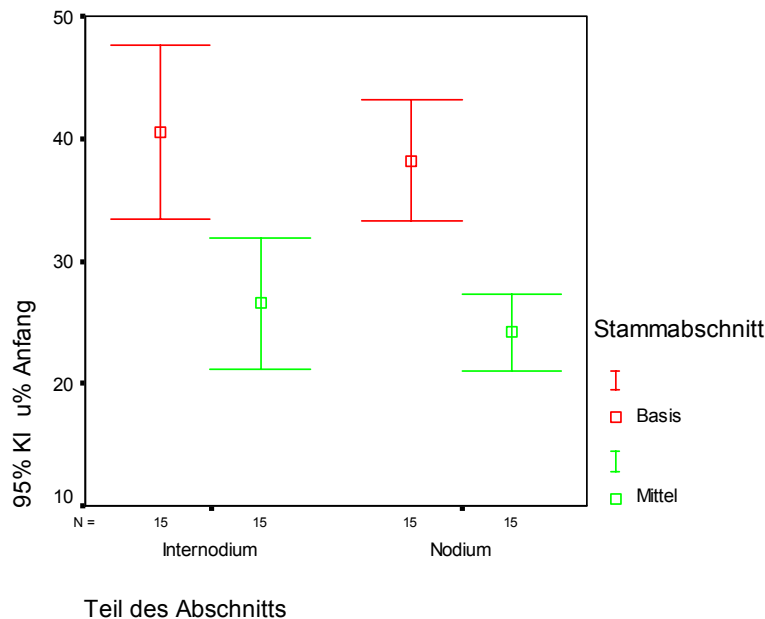


Abb. 5.86: Unterschiede in den Anfangsfeuchtegehalten zwischen Nodien und Internodien aus der Basis und der Halmmitte beim 1. Experiment mit einem Konfidenzintervall von 95%.

Die Abb. 5.87 und 5.88 zeigen, dass die Nodien und Internodien aus den Basisabschnitten keine bedeutenden Unterschiede in den Anfangsfeuchtegehalten aufweisen. Die Hypothese (5.23), sie seien gleich, wird angenommen. Ausserdem zeigen die Abb., dass die Nodien und Internodien aus den Halmmitteabschnitten keine bedeutenden Unterschiede in den Anfangsfeuchtegehalten aufweisen. Die Hypothese (5.24), sie seien gleich, wird akzeptiert.

Werte zu den Anfangsfeuchtegehalten in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmitte

	Basis		Halmmitte	
	Nodium	Internodium	Nodium	Internodium
Mittelwert [%]	38,19	40,45	24,15	26,56
s [%]	8,98	12,83	5,72	9,67
VK [%]	23,51	31,71	23,72	36,44
Minimum [%]	25,55	24,25	17,83	17,5
Maximum [%]	62,58	73,8	38,53	56,52

Tabelle 5.29: Anfangsfeuchtegehalt in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmitte, Experiment 1

Endfeuchtegehalt der Basen (Nodien und Internodien)

Endfeuchtegehalt der Halmmitten (Nodien und Internodien)

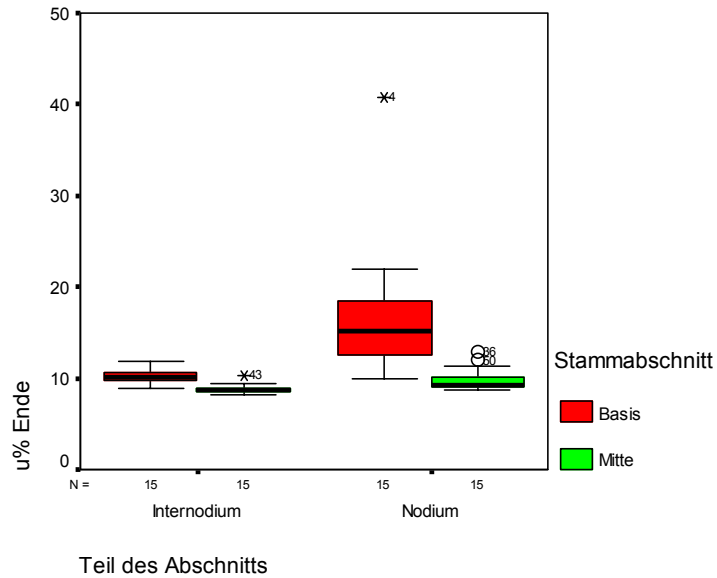


Abb. 5.87: Unterschiede der Endfeuchtegehalte der Nodien und Internodien aus den Basis- und Halmitteabschnitten beim 1. Experiment

Die Abb. 5.89 verdeutlicht die Unterschiede der Endfeuchtegehalte zwischen den

Nodien und Internodien der Halmabschnitte aus der Basis und Halmitte. Die Abb. 5.90 zeigt die gleichen Unterschiede mit einem Konfidenzintervall von 95%. Der Endfeuchtegehalt für die Nodien aus der Halmitte ist deutlich erkennbar.

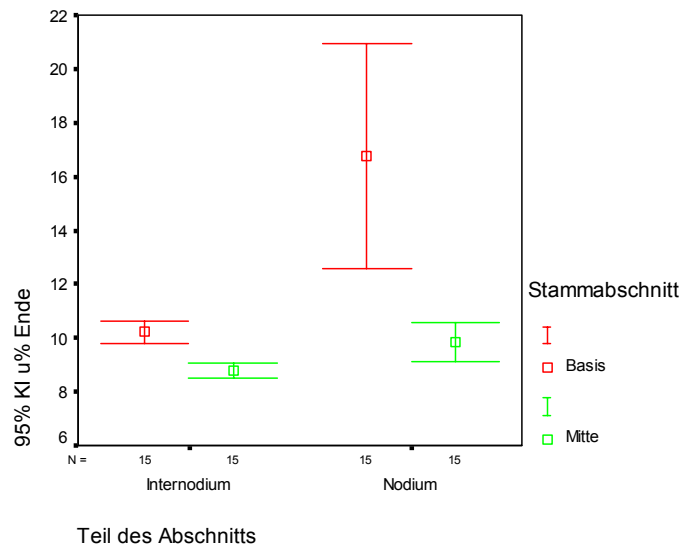


Abb. 5.88: Unterschiede der Endfeuchtegehalte zwischen den Nodien und Internodien aus den Basis- und Halmitteabschnitten beim 1. Experiment mit einem Konfidenzintervall von 95%

Die Abb. 5.89 und 5.90 zeigen, dass die Nodien und Internodien aus den Basen bedeutende Unterschiede in ihren Endfeuchtegehalten aufweisen. Die Hypothese (5.25), sie seien gleich, wird abgelehnt. Ausserdem zeigen die Abb., dass die Nodien und die Internodien aus den Halmitteabschnitten bedeutende Unterschiede

hinsichtlich ihres Endfeuchtegehalts aufweisen. Die Nullhypothese (5.26), sie seien gleich, wird zurück gewiesen

Werte zu den Endfeuchtegehalten in Nodium und Internodium der Basis und Halmmittle

	Basis		Halmmittle	
	Nodium	Internodium	Nodium	Internodium
Mittelwert [%]	15,04	10,21	9,83	8,79
s [%]	3,78	0,74	1,29	0,53
VK [%]	25,13	7,33	13,15	6,08
Minimum [%]	9,96	8,95	8,763	8,137
Maximum [%]	21,89	11,87	12,97	10,33

Tabelle 5.30: Endfeuchtegehalt in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmittle, Experiment 1

Die *Abb. 5.96* zeigt die Trocknungskurve für das 1. Experiment über einen Trocknungsverlauf von 21 Tagen (504 Stunden) mit einem Anfangsfeuchtegehalt von 32,33% und mit einer mittleren Endfeuchte für die Basis- und Halmmittleabschnitte von 11,41%.



Abb. 5.89: Konventionelle Trocknung nach dem Frischluft-/ Abluftverfahren



Abb. 5.90: Konventioneller Trockner im botanischen Garten der Technischen Universität Pereira



Abb. 5.91: Guadualager für die konventionelle Trocknung



Abb. 5.92: Vorbereitung der Guaduahalme für die konventionelle Trocknung



Abb. 5.93: Elektrische Feuchtemessung der Guaduahalme im konventionellen Trockner



Abb. 5.94: Lagerung der Guadua-Halme im konventionellen Trockner

Trocknungskurven der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft/ Abluftverfahren

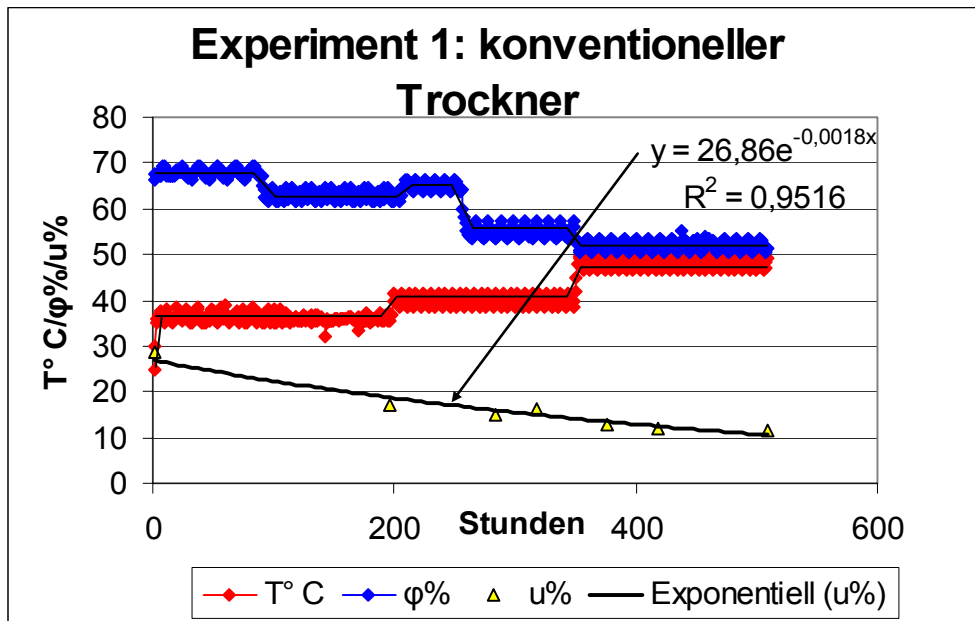


Abb. 5.95: Trocknungskurven für das 1. Experiment, Trocknungsdauer von 21 Tagen

Qualität beim 1. Experiment

Bei der Trocknung von Guadua-Halmen treten zwei Qualitätsprobleme auf. Das erste Problem betrifft Spalten und Risse. Das Zweite ist das Auftreten von Bläue in Guadua-halmen. Diese Mängel werden in den Abb. 5.97 bis 5.99 gezeigt.

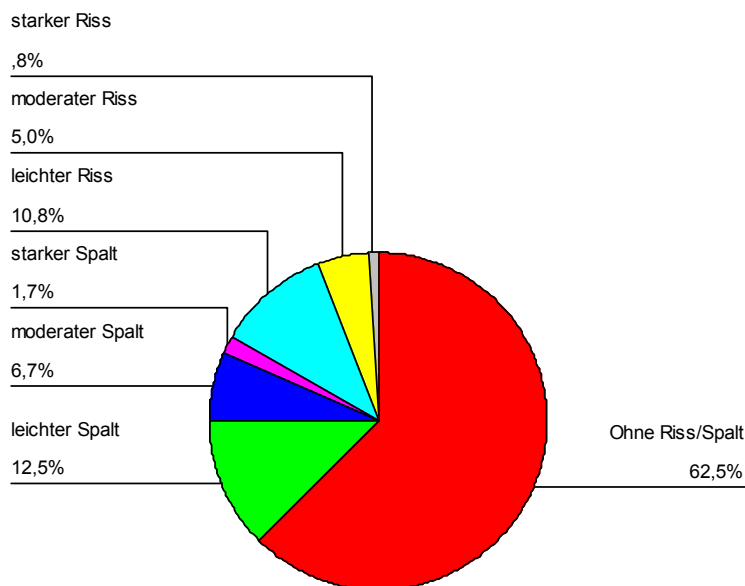


Abb. 5.96: Trocknungsqualität beim 1. Experiment, Bewertung der Risse und Spalten

Die Abb. 5.97 zeigt die Ergebnisse aus der Bewertung der Risse und der Spalten des Halmes. 62,5% der Guaduas zeigten weder Risse noch Spalten. Risse lagen bei 16,6% und Spalten lagen bei 20,9% vor.

Die Abb. 5.97 und die Abb. 5.98 zeigen die Risse die beim 1. Experiment aufgetreten sind. Sie zeigen Proben mit schweren Rissen und auch den Befall von Bläue und Schimmel. Eine qualitative Bewertung des Bläuebefalls wurde nicht durchgeführt, da es sich hier um einen Qualitätsmangel handelt, welcher in fast jedem Halm vorkommt.



Abb. 5.97: Risse beim 1. Experiment



Abb. 5.98: Risse und Bläue beim 1. Experiment

5.4.1.2 Experiment 2 (30.07.05)

Ort der Trocknung: Technische Universität von Pereira,

Trocknungsart: konventionelle Trocknung nach dem Frischluft-/Abluftverfahren,

Nutzraum: 20 m³,

Trocknungskapazität: 135 Guaduas mit einer Länge von 5,65 m, $\varnothing \leq 14$ cm.

Für dieses Experiment wurden dieselben Hypothesen 5.23 5.24, 5.25 und 5.26, aufgestellt, wie für das 1. Experiment.

Materialien und Methoden

Herkunftsort: Montenegro – Quindío,

Topografie der Zone: *Hangzone*,

Abschnitt im Halm: Basis und Halmmitte,

Göße: 5,50 m; $\bar{\phi}_{BASIS} = 11,3$ cm, $\bar{\phi}_{MITTE} = 9,2$ cm,

Durchschnittliche Wanddicke in der Basis 1,48 cm,

Durchschnittliche Wanddicke in der Halmmitte 1,09 cm,

Menge: 120 Guaduas,

Anordnung im Trockner: Guaduas quer zum Luftstrom,

Diaphragmen: mit einem Bohrer \varnothing von 12,5 mm durchbohrt,

Beobachtungen: Die Halme wurden zuvor mit Borax behandelt und die Diaphragmen durchbohrt.

Trocknungsprogramm der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft/Abluftverfahren

Trocknungsprogramm Experiment 2					
	u%	Tt °C	Tf °C	ϕ %	ΔT °C
Schritt 1	> 40	43	32	47	11
Schritt 2	30-40	36	25	25	11
Schritt 3	25-30	36	25	25	11
Schritt 4	20-25	36	25	25	11
Schritt 5	10-20	36	25	25	11
Schritt 6	< 10	36	25	25	11

Tabelle 5.31: Trocknungsprogramm des 2. Experimentes (Tt = Trockentemperatur, Tf = Feuchttemperatur, ΔT = psychometrische Differenz)

Ergebnisse des 2. Experimentes

In diesem Experiment wurden die Anfangsfeuchten für die Basen und für die Halmmitten analysiert. Weiter wurde auch eine Analyse der Nodien und Internodien durchgeführt. Dieser Stapel hatte weniger Basisabschnitte als Halmmittelsabschnitte. Es waren insgesamt 32 Basisabschnitte und 8 Halmmittelsabschnitte, und von den 8 Halmmittelsabschnitten wurden 7 im Internodium und eins im Nodium geschnitten.

Anfangsfeuchtegehalt der Basen und Halmmitten

Die Abb. 5.100 zeigt die Anfangsfeuchtegehalte zwischen Basis- und Halmmittelsabschnitten. Es treten bedeutende Unterschiede für die Basen als auch für die Halmmittelsabschnitten auf. Die Nullhypothese (5.23), (5.24), sie seien gleich, wird nicht akzeptiert.

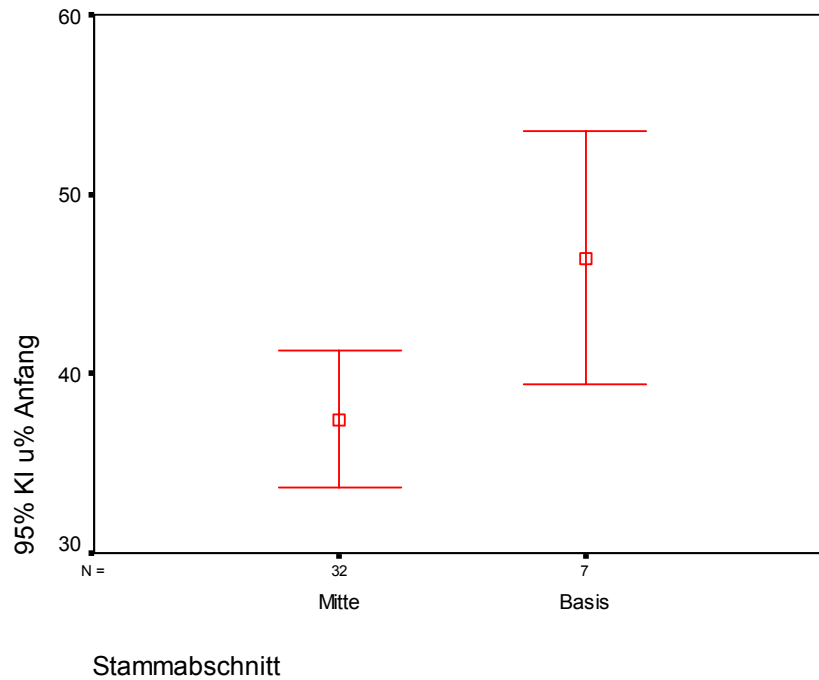


Abb. 5.99: Unterschiede in den Anfangsfeuchtegehalten zwischen Basis und Halmmittle beim 2. Experiment

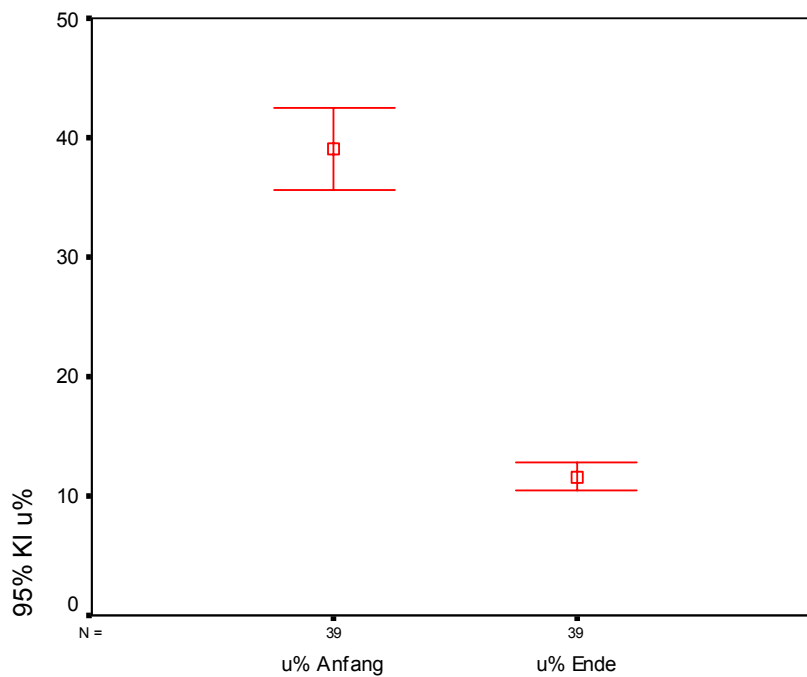


Abb. 5.100: Unterschiede des Anfangs- und Endfeuchtegehalt für alle Basis- und Halmmittleabschnitte

Die Abb. 5.101 zeigt die Anfangs- und Endfeuchtegehalte des 2. Experimentes für die Basis und die Halmmittle. Diese Halmabschnitte wurden an der freien Luft vorgetrocknet.

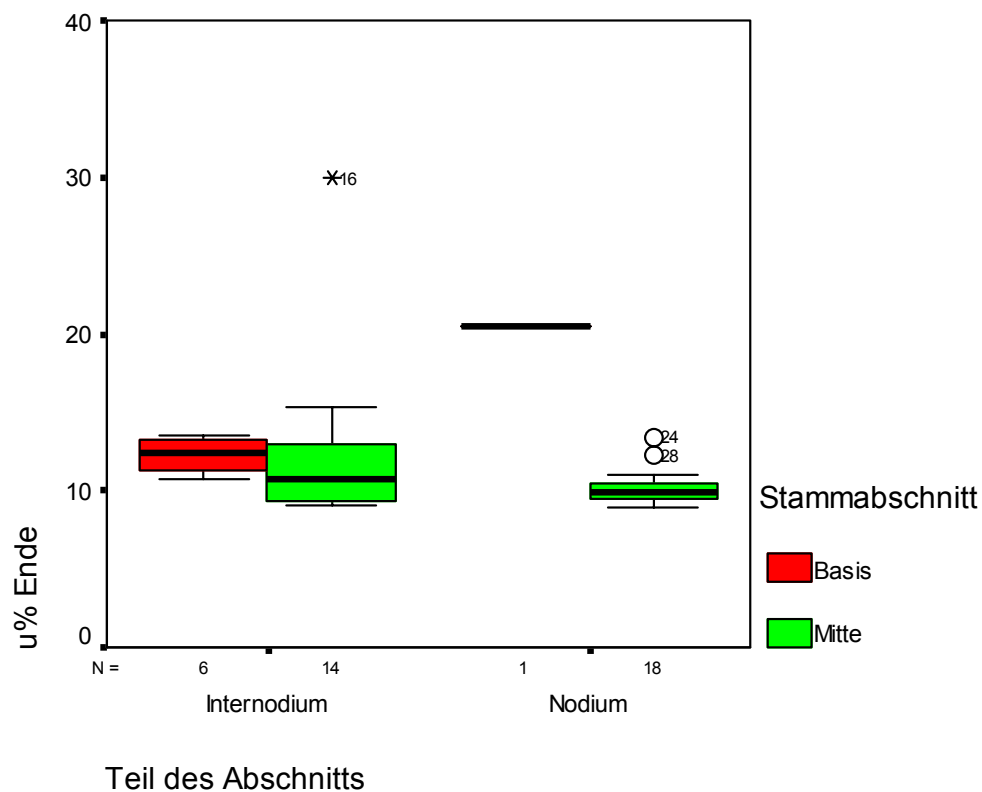


Abb. 5.101: Unterschiede der Endfeuchtegehalte zwischen den Nodien und Internodien aus den Basis- und Halmmittleabschnitten beim 2. Experiment

Die Abb. 5.102 und 5.103 zeigen die Endfeuchtegehalte der Internodien aus den Basis- und Halmmittleabschnitten. Es treten keine bedeutende Unterschiede sowohl für die Internodien der Basen als auch für die Internodien der Halmmitteln auf. Die Nullhypothese (5.28), sie seien gleich, wird akzeptiert.

Es konnten aufgrund fehlender Daten keine Unterschiede zwischen den Nodien aus der Basis und aus der Halmmittle zur Unterstützung der Hypothese (5.29) festgestellt werden.

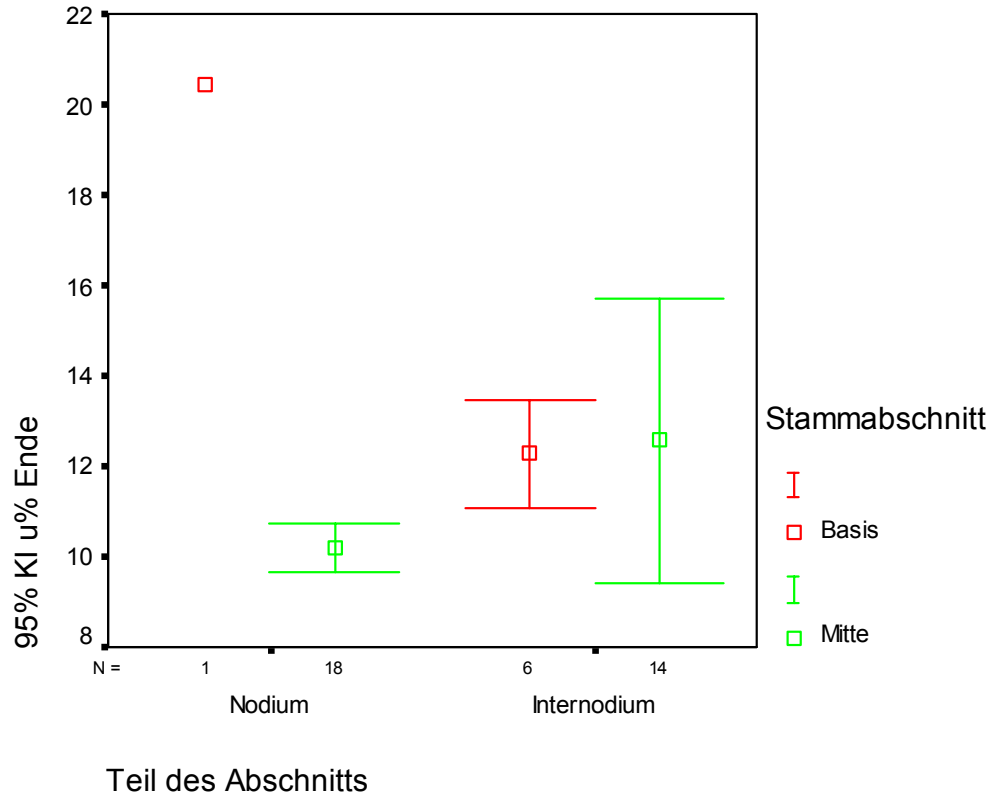


Abb. 5.102: Unterschiede der Endfeuchtegehalte zwischen den Nodien und Internodien aus den Basis- und Halmmitteabschnitten beim 2. Experiment mit einem Konfidenzintervall von 95%

Werte für den Anfangsfeuchtegehalt der Basen und der Halmmitten.

	Basis und Halmmitte	
	Nodium	Internodium
Mittelwert [%]	35,8	42,91
s [%]	9,16	11,07
VK [%]	25,58	25,79
Minimum [%]	15,74	17,48
Maximum [%]	50,34	57,12

Tabelle 5.32: Anfangsfeuchtegehalt in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmitte, Experiment 2

Werte für den Endfeuchtegehalt der Basen und Halmmitten.

	Basis und Halmmitte	
	Nodium	Internodium
Mittelwert [%]	10,71	12,48
s [%]	2,52	4,52
VK [%]	23,52	36,21
Minimum [%]	8,97	9,03
Maximum [%]	20,45	29,93

Tabelle 5.33: Endfeuchtegehalt in Nodium und Internodium der Basis und der Halmmitte, Experiment 2

Für den Endfeuchtegehalt wurde nur für die Halmmitte eine statistische Hochrechnung durchgeführt, weil nur diese Proben die Probengröße erfüllen, nicht aber die der Basisabschnitte.

	Basis und Halmmitte	
	Basis	Halmmitte
Mittelwert [%]	13,45	11,22
KI 95%	ohne KI	(9,86%-12,6%)
s [%]	3,25	3,79
VK [%]	24,22	33,81
Minimum [%]	10,77	8,97
Maximum [%]	20,45	29,93

Tabelle 5.34: Endfeuchtegehalt in Basis und der Halmmitte, Experiment 2

Trocknungskurven der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft/ Abluftverfahren

Die Abb. 5.104 zeigt die Trocknungskurve für das 2. Experiment über einen Trocknungszeitraum von 624 Stunden mit einem durchschnittlichen Anfangfeuchtegehalt von 39,35% und einem durchschnittlichen Endfeuchtegehalt zwischen den Basis- und Halmmitteabschnitten von 11,59%. Im Rahmen dieses Experimentes wurde der Trockner nur tagsüber betrieben. In der Nacht wurde Heizung sowie Luftumwälzung abgeschaltet.

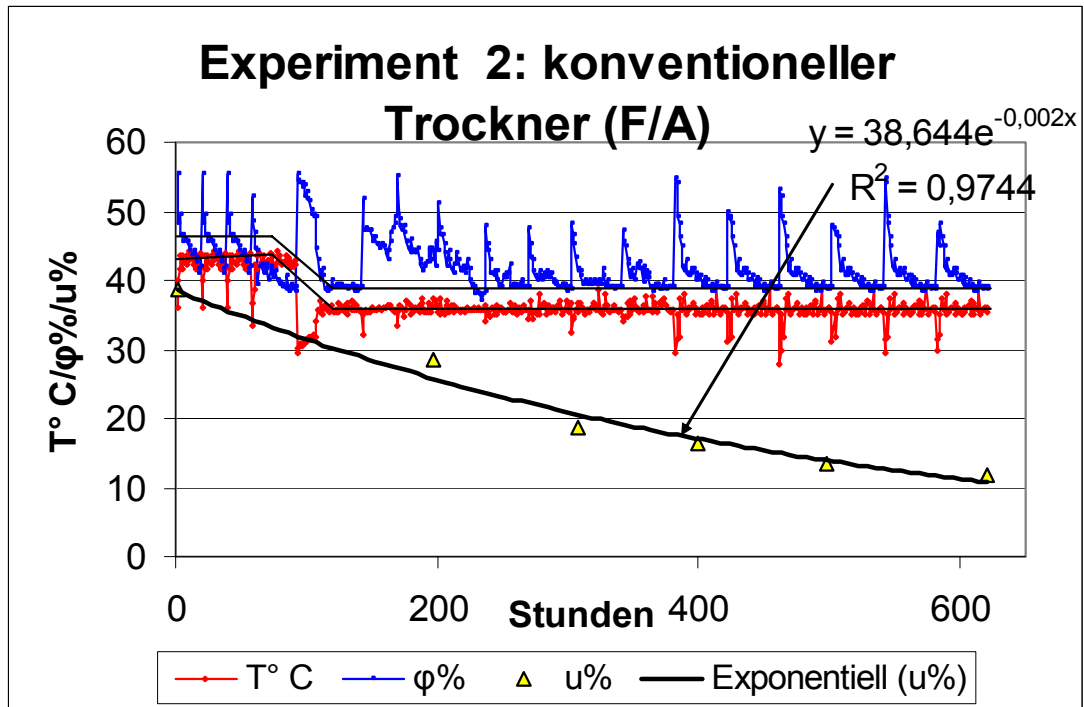


Abb. 5.103: Trocknungskurven des 2. Experimentes, Trocknungsdauer 624 Stunden

Qualität beim 2. Experiment

Die gesamte Charge wies nach dem Experiment Bläue auf.

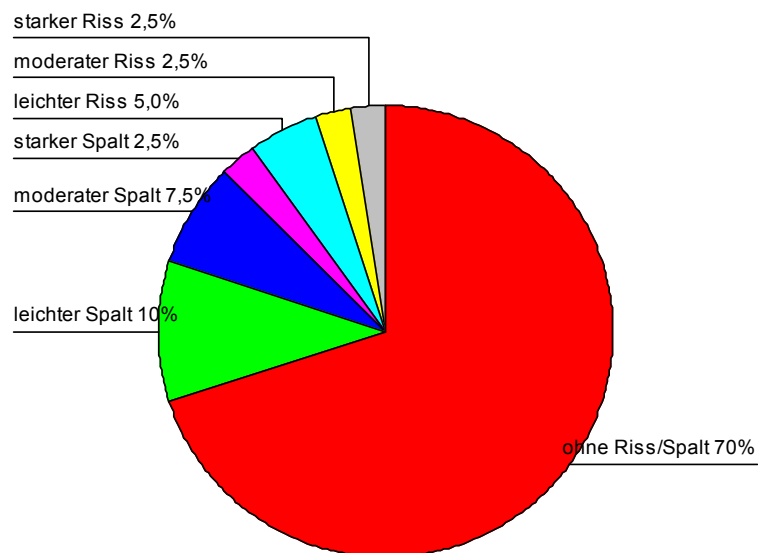


Abb. 5.104: Trocknungsqualität beim 2. Experiment, Bewertung der Risse

Die *Abb. 5.105* zeigt die Ergebnisse aus der Bewertung der Risse und Spalten des Halmes. 70% der Guaduas zeigten weder Risse noch Spalten. Schwere Risse lagen bei 2,5% und leichte Spalten lagen bei 10% vor.

Die Risse treten (*Abb. 5.106*) zu einem höheren Prozentsatz von 22,5% in den Halmmittleabschnitten und die Spalten mit 7,5% in den Basisabschnitten auf.

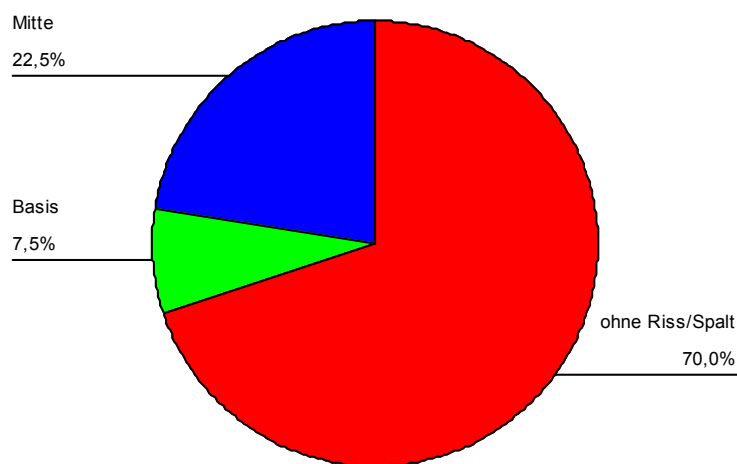


Abb. 5.105: Trocknungsqualität beim 2. Experiment, Bewertung der Risse der Basis- und Halmmittleabschnitte

5.4.1.3 Experiment 3 (7.03.05)

Ort der Trocknung: Montenegro – Quindío,

Trocknungsart: konventionelle Trocknung nach dem Frischluft-/Abluftverfahren,

Nutzraum: 20 m³,

Trocknungskapazität: 120 Guaduas mit einer Länge von 5,65 m, $\emptyset \leq 14$ cm.

Materialien und Methoden

Herkunftsort: Botanischer Garten der Technischen Universität von Pereira,

Topografie der Zone: Hangzone,

Abschnitt im Halm: Basis und Halmmittle,

Größe: 5,50 m; $\bar{\phi}_{BASIS} = 13,5$ cm, $\bar{\phi}_{MITTE} = 11,3$ cm, $\bar{\phi}_{DURCHSCHNITT} = 12,5$ cm,

Durchschnittliche Wanddicke in der Basis und der Halmmittle 2,35 cm,

Menge: 120 Guaduas,

Anordnung im Trockner: Guaduas quer zum Luftstrom.

Diaphragmen: mit einem Bohrer \varnothing von 12,5 mm durchbohrt,

Beobachtungen: Der Halm wurde zuvor mit Borax schutzbehandelt und die Diafragmen durchbohrt.

Trocknungsprogramm der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft/ Abluftverfahren

Trocknungsprogramm Experiment 3					
	u%	Tt °C	Tf °C	ϕ %	ΔT °C
Schritt 1	> 60	40	32	55	8
Schritt 2	50-60	40	32	55	8
Schritt 3	40-50	40	32	55	8
Schritt 4	30-40	40	32	55	8
Schritt 5	20-30	36	26	42	10
Schritt 6	10-20	36	26	42	10
Schritt 7	<10	36	26	42	10

Tabelle 5.35: Trocknungsprogramm des 3. Experimentes (Tt = Trockentemperatur, Tf = Feuchttemperatur, ΔT = psychometrische Differenz)

Ergebnisse des 3. Experimentes

In diesem Experiment werden die Basis- und Halmmittleabschnitte nicht im Detail analysiert, da diese schon in den vorherigen Experimenten analysiert wurden.

Trocknungskurven der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft/ Abluftverfahren

Die Abb. 5.107 zeigt die Trocknungskurve für das 3. Experiment über einen Trocknungszeitraum von 864 Stunden mit einem durchschnittlichen Anfangsfeuchtegehalt von 74,9% und mit einem durchschnittlichen Endfeuchtegehalt zwischen den Basis- und Halmmittleabschnitten von 10,8%.

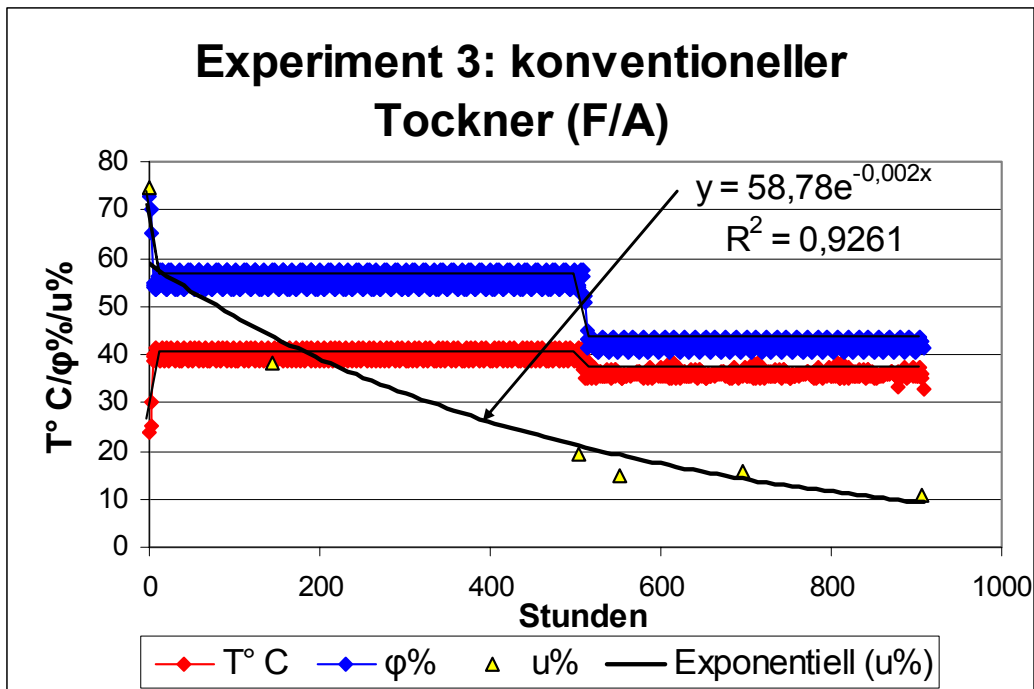


Abb. 5.106: Trocknungskurven des 3. Experimentes, Trocknungsdauer 864 Stunden.

Qualität des 3. Experimentes

Die gesamte Charge wies nach dem Experiment Bläue auf.



Abb. 5.107: Riss im Guadua-Halm im konventionellen Trockner, Experiment 3



Abb. 5.108: Geringe Rissbildung im Experiment 3

Die Abb. 5.110 zeigt die Ergebnisse aus der Bewertung der Risse und der Spalten des Halmes. 91,9% der Guaduas zeigten weder Risse noch Spalten. Schwere Risse lagen bei 4,4% und Spalten lagen 3,7% vor. Es wurden fast keine anderen Risse und Spalten festgestellt.

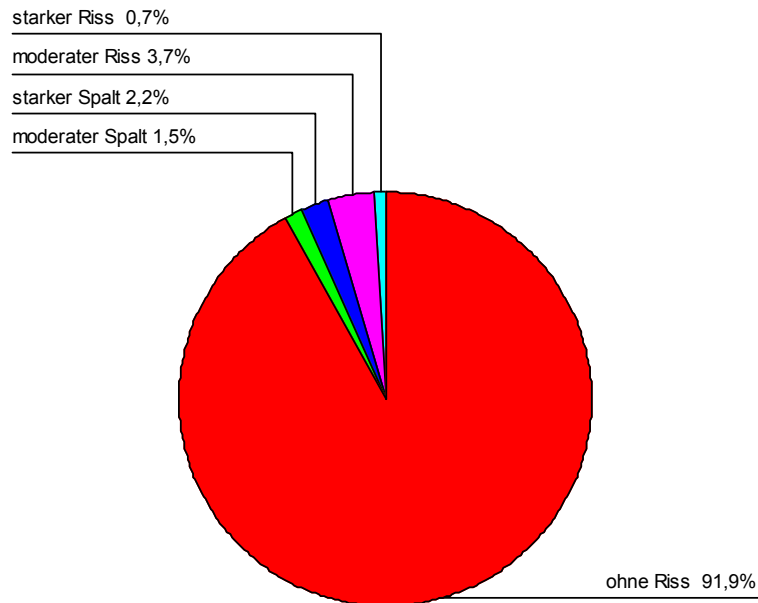


Abb. 5.109: Trocknungsqualität beim 3. Experiment, Bewertung der Risse

5.4.1.4 Experiment 4 (15.02.06)

Ort der Trocknung: Technische Universität von Pereira

Trocknungsart: konventionelle Trocknung nach dem Frischluft-/Abluftverfahren,

Nutzraum: 20 m³,

Trocknungskapazität: 135 Guaduas mit einer Länge von 5,65 m, $\varnothing \leq 14$ cm.

Materialien und Methoden

Herkunftsort: Botanischer Garten der Technischen Universität von Pereira,

Topografie der Zone: *Hangzone*,

Abschnitt im Halm: Basis und Halmmitte,

Größe: 1,80 m; $\bar{\phi}_{BASIS} = 13,5$ cm, $\bar{\phi}_{MITTE} = 11,0$ cm,

$$\bar{\phi}_{DURCHSCHNITT} = 12,25 \text{ cm,}$$

Durchschnittliche Wanddicke in der Basis und der Halmmitte 2,35 cm,

Menge: 120 Guaduas,

Anordnung im Trockner: Guaduas parallel mit \varnothing von 65 mm zum Luftstrom.

Diaphragmen: von einem speziellen Gerät
mit \varnothing von 65 mm durchbohrt,

Beobachtungen: Die Halme wurden nicht behandelt, die Diaphragmen wurden fast vollständig entfernt.

*Trocknungsprogramm der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft/
Abluftverfahren*

Trocknungsprogramm Experiment 4					
	u%	Tt °C	Tf °C	φ%	ΔT° C
Schritt 1	> 70	42	35	61	7
Schritt 2	60-70	45	36	55	9
Schritt 3	50-60	50	37	41	13
Schritt 4	40-50	54	37	30	17
Schritt 5	30-40	60	36	20	24
Schritt 6	20-30	63	36	15	27
Schritt 7	10-20	63	36	15	27

Tabelle 5.36: Trocknungsprogramm des 4. Experimentes (Tt = Trockentemperatur, Tf = Feuchttemperatur, ΔT = psychometrische Differenz)

Ergebnisse des 4. Experimentes

Trocknungskurve zur konventionellen Trocknung nach dem Frischluft-/Abluftverfahren

Die Abb. 5.111 zeigt das Verhalten der Trocknungskurve des 4. Experimentes über einen Trocknungszeitraum von 105 Stunden mit einem durchschnittlichen Anfangsfeuchtegehalt von 125% und einem durchschnittlichen Endfeuchtegehalt für die Basis-, Halmmittle- und oberen Halmmittleabschnitten von 6%. Dieses Experiment wurde bei Tag und Nacht fortgeführt.

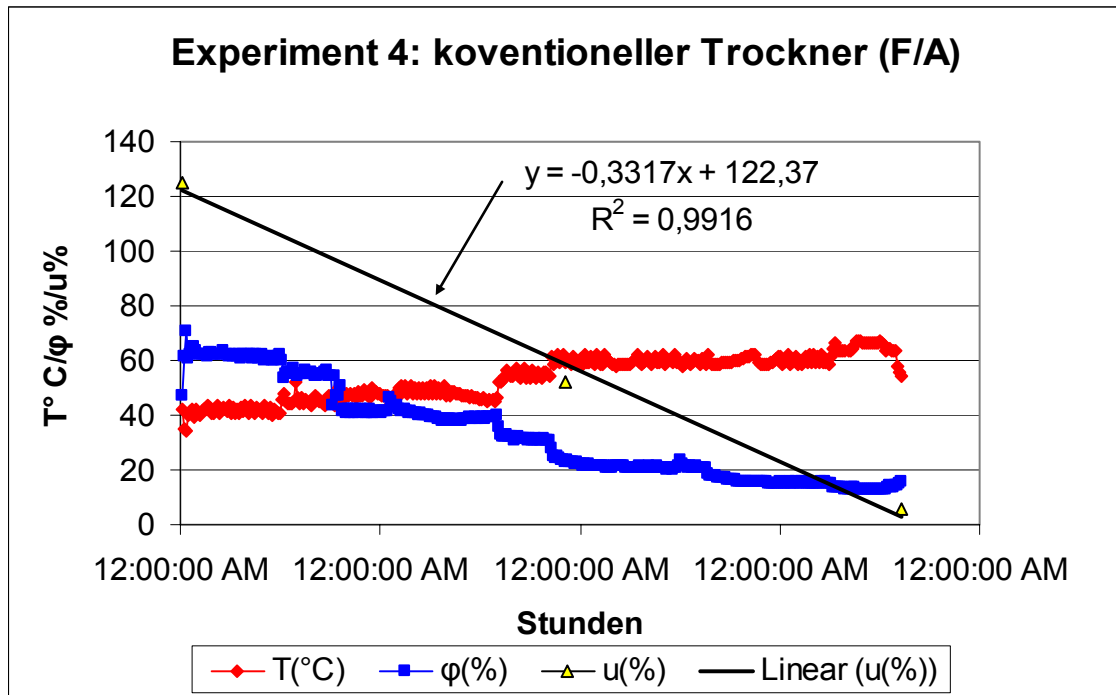


Abb. 5.110: Trocknungskurven des 4. Experimentes, Trocknungsdauer von 105 Stunden

Qualität des 4. Experimentes

Ein wichtiges Resultat dieses Experimentes lag darin, dass keine Bläue der Halme aufgetreten ist. Die schnelle Trocknung ist effektiv gegen den Bläue. Die Abb. 5.112 zeigt die Ergebnisse aus der Bewertung der Risse und der Spalten des Halmes. 65% der Guaduas zeigten weder Risse noch Spalten auf. Risse lagen bei 26,6% und Spalten lagen bei 8,3% vor. Leichte Spalten traten nicht auf.

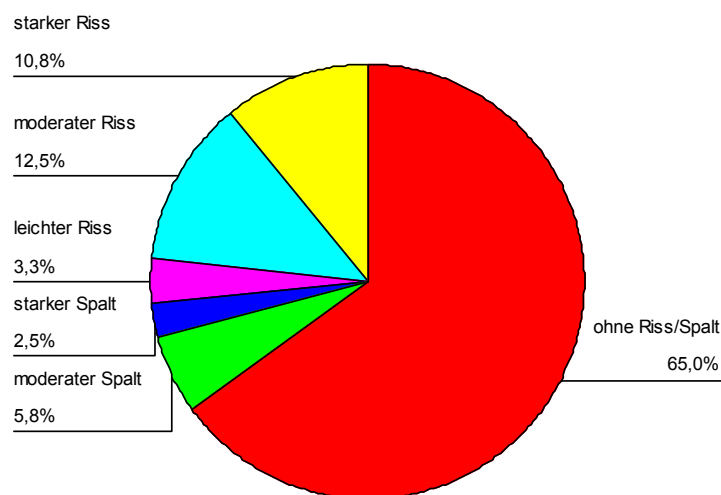


Abb. 5.111: Trocknungsqualität beim 4. Experiment, Bewertung der Risse und Spalten

Die Risse und Spalten treten nach der *Abb. 5.113* in höheren Prozentzahlen in den oberen Halmmitteabschnitten mit 14,2%, in den Basisabschnitten mit 12,5% und in den Halmmitteabschnitten mit 8,3% auf.

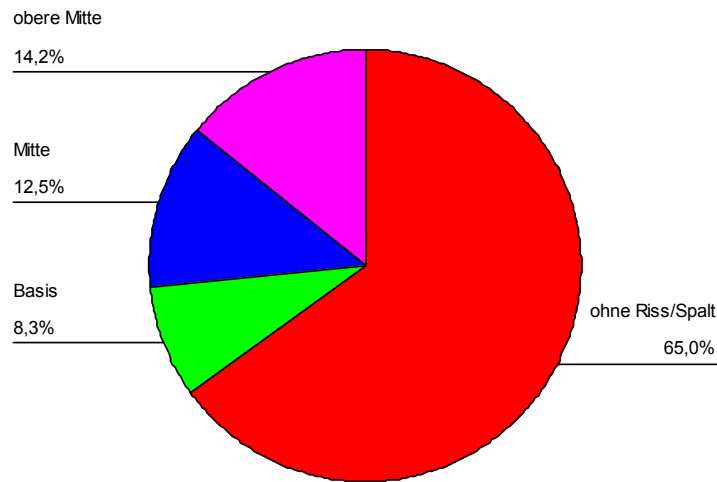


Abb. 5.112: Trocknungsqualität beim 4. Experiment, Bewertung der Risse in den Basis- und Halmmitteabschnitten

6 Diskussion

6.5 Trocknungsrelevante Eigenschaften

6.5.1 Feuchteverteilung im Guadua-Halm und dessen Abhängigkeit von der Topographie des Herkunftsortes

Es wurden Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, Feuchteverteilung an unterschiedlichen Bambushalmen aus verschiedenen topografischen Zonen zu bestimmen. Hierfür wurde eine Varianzanalyse der Feuchtegehalte über die Länge der Halme und für verschiedene Nodien- und Internodienabschnitte durchgeführt.

Der Feuchtegehalt schwankte über einen Zeitraum von zwei Jahren bei der Art *Guadua Scortechinii* zwischen 50% und 220%, und bei der Art *Bambusa vulgaris* lag die Feuchte zwischen 47% und 157% für die aus einem Standort entnommenen Proben (Abd. Latif M., 1996; Abd. Latif M. & Liese W., 2002). Diese Autoren haben sich auch mit dem Thema der Topographie beschäftigt, welche ein wichtiger Faktor für den Feuchtegehalt ist. Außerdem hat die Jahreszeit großen Einfluß auf den Feuchtegehalt in den Halmen. In der Trockenzeit ist er minimal und in der Regenzeit maximal. Manchmal kann die Feuchte des Halmes in der Regenzeit das Doppelte seines normalen Feuchtegehaltes betragen (Liese W., 1985).

Die eigenen Ergebnisse festigen die Thesen vieler Autoren. Der Feuchtegehalt variiert über die Länge des Halmes (Liese W., 1985; Sattar M. A., *et al.* 1991; Liese W. & Kumar S., 2003). Die Basis weist den höchsten Feuchtegehalt und die Spitzen den niedrigsten auf (Sattar M. A., *et al.* 1991; Gnanaharan R., 1991; Abd. Latif M., 1996; Liese W. & Kumar S., 2003). Außerdem schwankt der Feuchtegehalt zwischen Nodium und Internodium.

Diese Untersuchung ist besonders für die Trocknung der *Guadua angustifolia* wichtig, da sie dazu beiträgt, im Fall der konventionelle Trocknung ein adäquate Trocknungsprogramm auszuwählen. Eine hohe Homogenität des Anfangsfeuchtegehaltes im Halm ist für das Endergebnis des Trocknungsprozesses bestimmend. Außerdem ist es wichtig, die Guadua-Halme nach Herkunftsort bzw. lokaler Topographie zu separieren sowie den Halm entsprechend der Sektionen mit unterschiedlichen Feuchtegehalten aufzuteilen, da sich diese Faktoren auch auf die Endqualität der Trocknung auswirken.

6.5.2 Diskussion des Schwindungs-/ Quellungsexperimentes mit *Guadua*

Die Probestücke wurden für diese Untersuchung maschinell bearbeitet, das bedeutet, dass die Rinde entfernt wurde, um rechteckige Querschnitte zu erhalten. Die Ergebnisse beziehen sich auf 2/3 der Wanddicke, von der Innenseite zur Außenseite.

Die durchschnittliche radiale lineare Quellung $\alpha_{\max,r}$ ist größer als die durchschnittliche tangentielle lineare Quellung $\alpha_{\max,t}$. Dieses Ergebnis steht entgegengesetzt zu dem Quellungsverhalten von Holz (Kollmann F. & Côté W., 1968). Dieses Verhalten tritt auch bei der radialen Schwindung $\beta_{N,r}$ und bei der tangentialen Schwindung $\beta_{N,t}$ bei der Trocknung auf. Die radiale Schwindung ist größer als die Tangentiale.

Die Anisotropie der Schwindung A_β beim Trocknen von Bambus unterscheidet sich von der der Hölzer. Für die Hölzer ist sie normalerweise $\gg 1,0$ (1,2 – 2,0). Im Falle von *Guadua angustifolia* ist die Anisotropie $< 1,0$, da die radiale Schwindung größer als die tangentielle Schwindung ist.

Die differenzielle Quellung q_r und q_t , sowie auch der Quellungskoeffizient h_r und h_t , zeigen in radialer und tangentialer Richtung im Durchschnitt keine bedeutenden Unterschiede. Der Wert für die Anisotropie der durchschnittlichen Quellung ist somit etwa gleich 1, während er bei Holz normalerweise zwischen 1,4 und 1,8 liegt.

Die maximale Quellung von *Guadua angustifolia* beträgt in radialer Richtung 10,6%, in tangentialer Richtung 7,0% und in longitudinaler Richtung 0,8%. Die gesamte Volumenquellung bzw. -schwindung liegt bei 18,4%. Die Unterschiede zwischen der radialen, tangentialen und longitudinalen Schwindung sind deutlich erkennbar. Das Trocknungsschwindmaß von *Guadua angustifolia* beträgt in radialer Richtung 7,2%, in tangentialer Richtung 4,0% und in longitudinaler Richtung 0,5%. Die gesamte Volumenschwindung bis etwa 12% Feuchte beträgt 11,8%.

Im Gegensatz zu Holz verringern sich Schwindung und Quellung mit der Zunahme der Dichte. Diese Ergebnisse stimmen mit denen von Kishen *et al.*, 1958 und Sekar & Rawat, 1964 aus (Liese W., 1985) überein.

Die Rohdichte im darrtrockenen Zustand zeigt bedeutende Unterschiede zur Dichte bei 20°C /65% relativer Feuchte, während zwischen den Ergebnissen für die Dichten bei 20°C/65% und 20°C/85% keine signifikanten Unterschiede feststellbar waren. Dies lässt sich durch den flachen Verlauf der Sorptionsisotherme zwischen den Stützpunkten 35% und 85% rel. Luftfeuchte erklären. Diese Erkenntnis ist für die tropischen Länder sehr wichtig, da hier die relative Luftfeuchte im Durchschnitt über 70% beträgt. Bei der Bestimmung der Dichte im Gleichgewichtszustand muss man dann nicht allzu sehr auf die Klimabedingungen achten.

Die Nodien in den Guaduahalmen beeinträchtigen in ihrer Gesamtheit weder die Schwindung noch die Quellung der Halme. Dies wurde statistisch mit Hypothesentests überprüft.

Die Ergebnisse der Quellung und der Schwindung sind wichtig, weil sie die Vorteile und Nachteile der *Guadua angustifolia* gegenüber anderen Bambus- und Holzarten verdeutlichen. Ein Wert von 1 für die Quellungsanisotropie bedeutet eine höhere Stabilität und eine bessere Verwendungsmöglichkeit in der Industrie. Man sollte ein Material genau kennen, um es industriell oder konstruktiv zu nutzen.

6.5.3 Diskussion der Ergebnisse der Sorptionsversuche

Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung lassen sich Aussagen zur Gleichgewichtsfeuchte bei vier untersuchten Klimata und zur Fasersättigung der Bambus-Arten *Guadua angustifolia* Kunth und *Phyllostachys pubescens* Mazel ableiten.

Die Sorptionsergebnisse für den Bambus in diesem Experiment stimmen mit den zuvor erhaltenen Werten für die Art *Phyllostachys pubescens* Mazel überein (Montoya J. A. & Welling J., 2006). Fasersättigung liegt bei Bambus zwischen 30 und 34% (bei der *Guadua angustifolia* Kunth zwischen 30 und 32% und bei der *Phyllostachys pubescens* Mazel zwischen 32 und 34%).

Beim Vergleich des Verlaufes der Sorptionskurven von Bambus und von mitteleuropäischer Fichte zeigen sich große Ähnlichkeiten. In dem für die Holzverwendung relevanten Bereich zwischen etwa 35 und 85% relativer Luftfeuchte liegt allerdings die Gleichgewichtsfeuchte von Bambus um etwa 2 Prozentpunkte unter der des Fichtenholzes.

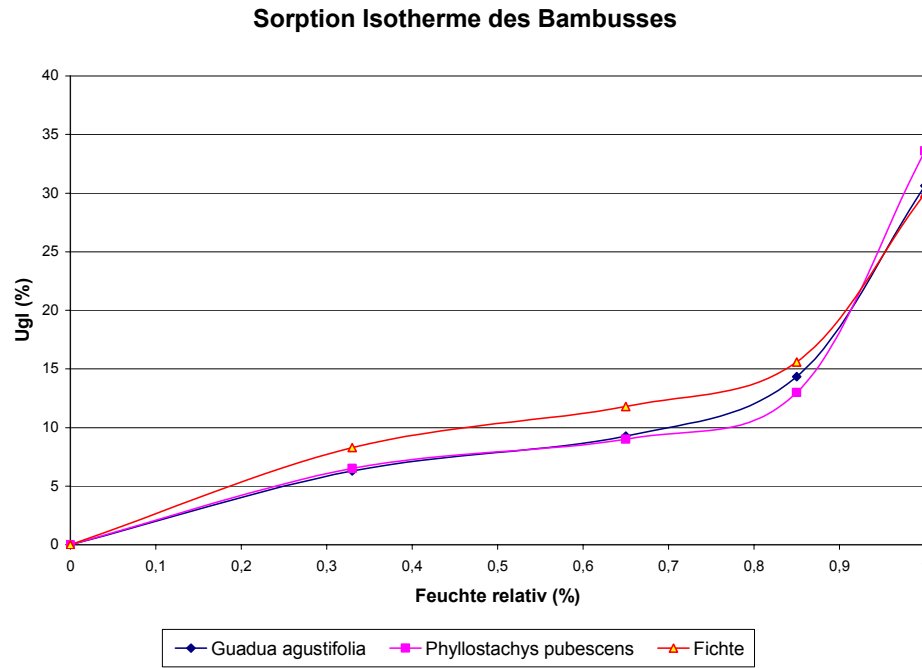


Abb. 6.1: Mittlere Sorptionsisotherme von Bambus und Fichte

6.6 Diskussion der Ergebnisse aus der Freilufttrocknung

Das erste Experiment zur Freilufttrocknung wurde in zwei Teile, Teil A und B, gegliedert. Das Ziel des Teil A war es, den Teilabschnitt des Guadua-Halmes mit dem höchsten Feuchtegehalt zu ermitteln. Hierzu wurde der Feuchtegehalt für an Probestücken aus den 3 m langen Guadua-Halmabschnitten mittels der gravimetrischen Methode (Darmmethode) bestimmt.

Dieser variiert über die Länge des Halmes und zwischen den Nodien und Internodien. Die höchsten Werte finden sich im DC Abschnitt von zweiten Internodium aufwärts. Das bedeutet, dass trotz der Feuchteschwankungen über die gesamte Länge des Halmes der Mittelwert die Mitte des zweiten Internodiums oder der Abschnitt nach dem ersten Nodium den höchsten Feuchtegehalt aufweist. Es ist wichtig hervorzuheben, dass das erste Internodium des Abschnittes generell am trockensten ist.

Die Ergebnisse aus dem 1. Experiment Teil B zeigten unterschiedliche Feuchtegehalte nach jeweils 20, 43, 49, 52, 55, 67 und 80 Tagen. Während der ersten 23 Tage verringerte sich der Feuchtegehalt stärker als in den folgenden Tagen. In den ersten Tagen tritt aus den Guaduastrukturen das freie Wasser aus, welches in den großen Metaxylemgefäßen der Leitbündel vorliegt, bis Fasersättigung erreicht ist (Abd. Latif M., et al. 1992; Liese W., 1985). Bei der Guadua angustifolia wird Fasersättigung (30 - 32%) nach 52 Tagen erreicht, wobei der Prozess der Wasserabgabe immer langsamer wird. In den letzten 13 Tagen ist die Wasserabgabe nur noch minimal.

Die Feuchteentwicklung während der Freilufttrocknung über die Zeit folgt einem exponentiellen Kurvenverlauf. Mit folgenden Funktionen lassen sich Feuchteabnahmen in den Versuchen 1 und 2 gut beschreiben:

Versuch	Funktion	R ²	Mittlere Klimadaten	Endfeuchte
1	$u = 85,83 e^{-0,0243t}$	R ² = 0,906	T: 27°C; φ = 61%	u _{ende} = 14,1%
2	$u = 132,42 e^{-0,0188t}$	R ² = 0,968	T: 26,2°C; φ: 60,9%	u _{ende} = 17,5%

Tabelle 6.1: Zusammenfassung des Experimentes 1. und 2.

Trocknungsversuch 2 weist eine höhere Endfeuchte auf als Versuch 1, was zum einen dadurch zu erklären ist, dass bei Versuch 2 die Diaphragmen der Nodien nicht durchstoßen waren wie bei Versuch 1. Dies führte zu einer Verzögerung der Trocknung. Gleichzeitig muss aber auch gesagt werden, dass bei Versuch 2 einige Tage zum Ende der Trocknung fehlten. Wäre die Trocknung noch weiter geführt worden, so hätte man eine höhere Homogenität bei den Endergebnissen erreichen können.

6.7 Diskussion der Ergebnisse aus der Solartrocknung

Hierbei handelte es sich ausschließlich um die Trocknung von Latten aus Guadua-Halmen.

Experiment	MATERIAL			METHODE					ERGEBNISSE					
	Topographie	Abschnitt	Maße(cm)	Energieform	geograph. Standort, Ort der Trocknung (Nord/Ost)	Sonnenstrahlung (Std./Tag)	Temperatur und relative Luftfeuchte (°C/%)	Richtung der Luft	% Feuchtegehalt		Trocknungsdauer (Std./Tag)	Trocknungsrate (%/Std.)	Trocknungsqualität	
									u% Anfangs-	u% End-			Krümmung (%)	Blau-schimmel (%)
1	Tal	Basis/Halmmitte	100x3,0x0,8	Solar/ Strom	4° 49' 10,17" 75° 50' 29,5"	7	27/60	(⊥)	99	8	384/16	0,24	32,8	40,1
2	Tal	Basis/Halmmitte	100x3,0x0,8	Solar/ Strom	4° 49' 10,17" 75° 50' 29,5"	8	27/58	(⊥)	84	11	312/13	0,23	39,3	45
3	Tal	Basis/Halmmitte	100x3,0x0,8	Solar/ Strom	4° 47' 40,27" 75° 41' 35,1"	5	25/74	(⊥)	99	16	384/18	0,22	>50	>50
4	Tal	Basis/Halmmitte	100x3,0x0,8	Solar/ Strom	4° 47' 40,27" 75° 41' 35,1"	6	25/66	(⊥)	105	9	360/15	0,27	>50	>50

Tabelle 6.2: Zusammenfassung des Experimentes der Solartrocknung von Guadualatten

Der erste Solartrocknungsversuch diente dazu festzustellen, an welcher Stelle Proben aus den Guadua-Latten entnommen werden mussten, um deren mittlere Feuchte möglichst genau mit der gravimetrischen Methode bestimmen zu können. Es konnten sowohl für die Basis- als auch für die Mittenabschnitte aus den Guadua-Halmen keine Unterschiede in den End- und Mittelbereichen festgestellt werden. Daher wurden für dieses Experiment und die folgenden Experimente die Proben aus den Endbereichen entnommen.

Die Ergebnisse für den Endfeuchtegehalt weisen eine sehr geringe Standardabweichung von < 0,5% für die End- und Mittelbereiche der Guadualatten auf. Daraus folgt, dass die Charge eine sehr gleichmäßige Feuchte aufweist, was einerseits auf die dünne Form der Latten (maximale Dicke von 8 mm) und andererseits auf die zuvor erfolgte "Entrindung" zurückzuführen ist. Daher unterscheidet man zwischen der Lattentrocknung und der Trocknung von Guadua-Halmen.

Der durchschnittliche Endfeuchtegehalt in der Basis gleicht nicht dem in der Halmmitte. Der Endfeuchtegehalt in den Basisabschnitten ist höher als in den Halmmitten. Dieses Ergebnis stimmt mit anderen Studien überein (Liese W., 1985; Sattar M. A., *et al.* 1991; Liese W. & Kumar S., 2003).

Die Dichte in den Halmmitteabschnitten ist höher als die Dichte in den Basisabschnitten und variiert von der Basis bis zur Spitze des Halmes. Diese Ergebnisse werden durch andere Studien bekräftigt (Liese W., 1985; Abd. Razat O., *et al.* 1995; Qisheng Z., *et al.*, 2002).

Das 3. Experiment wurde in der Übergangszeit von der Regen- in die Trockenzeit durchgeführt. Die mittlere Umgebungstemperatur war niedriger als beim 1. und 2. Experiment. Und auch die relative Luftfeuchtigkeit war höher im Vergleich zu den ersten beiden Experimenten. Der Endfeuchtegehalt stabilisierte sich bei 15,5%, die Trocknungszeit betrug 18 Tage, was also länger als bei dem 1. und 2. Experiment, die nach jeweils 16 und 13 Tagen bei niedrigeren Endfeuchten beendet werden konnten.

Der Endfeuchtegehalt beim 4. Experiment war in den Basisabschnitten höher als in den Halmmiteabschnitten. Der Durchschnitt lag bei 9,0% für die Basisabschnitte und bei 8,4% für die Halmmiteabschnitte. Diese Werte bekräftigen zuverläßige Ergebnisse.

Die Proben zeigten beim 6. Experiment Risse und Spalten. Weder leichte noch moderate Risse und Spalten traten auf. 4% waren schwere Risse, 3,8% mittlere und bei 4,2% lagen schwere Spalten vor (*Tabelle 6.3*).

6.8 Diskussion der Ergebnisse aus der konventionellen Trocknung nach dem Frischluft-/Abluftverfahren

Hierbei handelte es sich ausschließlich um die Trocknung von Guaduahalmen.

Experiment	MATERIAL			METHODE				Ergebnisse						
	Topographie	Abschnitt	durchstoßene Diafragmen Ø (Bohrung)	Trocknungsmethode	Energieform	Trocknungsprogramm (Tbs°C/ΔT°C)Anfangs- (Tbs°C/ΔT°C)End	Lufrichtung im Stapel	% Feuchtegehalt		Trocknungszeit (h/d)	Trocknungsrate (Δu%/h)	Trocknungsqualität		Beobachtung
								u% Anfangs	u% End			Risse /Spalten (%/%)	Blau-schimmel (%)	
1	Tal	Basis/Halmmitte	Bohrung der Diaf. / 12,5 mm	konventionelle Trocknung	Gas/ Strom	(36/5)(48/10)	(⊥)	32	11	504/21	0,042	5,8/8,4	100	
2	Hang	>Halmmitte	Bohrung der Diaf. / 12,5 mm		Gas/ Strom	(43/11)(36/11)	(⊥)	39	12	624/26	0,043	5,0/10,0	100	
3	Hang	Basis/Halmmitte	Bohrung der Diaf. / 12,5 mm		Gas/ Strom	(40/8)(36/10)	(⊥)	75	11	864/36	0,074	4,4/3,7	100	
4	Hang	Basis/Halmmitte	Bohrung der Diaf. / 60 mm		Gas/ Strom	(42/7)(63/27)	()	125	6	105/4	1,133	23,3/8,3	0	
5	Spitze	Basis/obere Halmmitte	Mit Diafragma	Solar-trocknung	Solar / Strom	ohne Programm	(⊥)	35	7	504/21	0,056	10,0/7,0	dunkler Ton	Boucherie Behandlung
6	Spitze	Basis/obere Halmmitte	Mit Diafragma		Solar / Strom	ohne Programm	(⊥)	41	8	504/21	0,065	7,2/4,2	dunkler Ton	Boucherie Behandlung

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Experimente mit den Guaduahalmen, konventionelle und solare Trocknung

Die Analyse und Diskussion der Ergebnisse aus der konventionellen Trocknung von Guadua-Halmen wird in gleicher Weise durchgeführt wie bei der Solartrocknung von Guadua-Halmen. Die Vorbehandlungen sowie die Trocknungsbedingungen bei den beiden Verfahren unterschieden sich sehr.

Im Falle der Solartrocknung wurde die Guadua vor der Trocknung mit dem Saftverdrängungsverfahren nach Boucherie behandelt. Hierbei wurden Guaduas aus der von der Bergspitze, meist Abschnitte aus der oberen Halmmitte und der Halmmitte ohne Durchbohrungen der Diaphragmen verwendet. Die Guaduas, die bei der konventionellen Trocknung verwendet wurden, wurden mittels Tauchverfahren (Immersion) behandelt. Sie stammten aus der *Hang-* und *Talzone*, wobei es sich meist um Abschnitte aus der Halmbasis oder der Halmmitte handelte. Ihre Nodien wurden zuvor durchbohrt.

Es existieren einige Studien über die Bambustrocknung, über die in der Literatur berichtet wird. Gandhi Y. (2002) beschreibt die Trocknung von Guadualatten, nicht jedoch die Trocknung von Bambus-Halmen (Rundholz) im Frischluft/Ablufttrockner. Laxamana M. G. (1985) berichtet über Trocknungsversuchen von Halmen der Art *Dendrocalamus merillianus (Elm.)*. Das Material mit Rinde hatte in der Basis, in der Mitte und in der Spitze einen mittleren Anfangsfeuchtegehalt von 111%. Zum Ende der

Trocknung lag ein Feuchtegehalt von 15% vor. Die Trocknungsdauer betrug, bei einem psychometrischen Unterschied von $\Delta T = 5,5^\circ\text{C}$ bei einer Trocknungstemperatur von $T_t = 60^\circ\text{C}$ 128 Stunden. Als die psychometrische Differenz auf $\Delta T = 8^\circ\text{C}$ bei $T_t = 60^\circ\text{C}$ erhöht wurde, verringerte sich die Trocknungsdauer auf 103 Stunden. Das bedeutet einen Trocknungstag weniger. Aus den Angaben lässt sich eine durchschnittliche Trocknungsrate von $0,93\%/Std.$ berechnen. Dieser Wert liegt sehr nah an dem Wert, der im Rahmen der eigenen Untersuchungen für das 4. Experiment erhalten wurde (siehe *Tabelle 6.3*). Laxamana (1985) berichtet jedoch leider nicht über die Schäden durch Risse, Spalten und Bläue- bzw. Schimmelfall und erwähnt auch nicht, ob diese Trocknung an Halmen mit oder ohne durchstoßenen Diaphragmen durchgeführt wurde.

Experiment 1 wurde bei niedrigen Temperaturen durchgeführt. Die psychometrische Differenz ΔT lagen bei 5°C am Anfang und bei 10°C am Ende. Die Trocknung erstreckte sich über einen Zeitraum von 21 Tagen (504 Stunden).

Die Ergebnisse aus dem 1. Experiment zeigen, dass die Nodien und Internodien aus den Basisabschnitten am Ende der Trocknung bedeutende Unterschiede zwischen den Feuchtegehalten aufweisen. Diese lagen bei den Nodien bei $15,04\%$ und bei den Internodien bei $10,21\%$, während der Feuchtegehalt für die Nodien und Internodien in den Halmmittleabschnitten bei $9,83\%$ bzw. bei $8,79\%$ lag. Die Unterschiede sind mit beeinflusst durch die Herkunft der Halme, die hier aus der *Talzone* stammten.

Es wurde ein Trocknungsprogramm mit einer psychometrischen Differenz $\Delta T = 11^\circ\text{C}$ verwendet. Dieser Wert wurde vom Anfang bis zum Ende der Trocknung konstant gehalten. Die Trocknungskurve des 2. Experimentes zeigt einen Trocknungszeitraum von 624 Stunden und einen durchschnittlichen Endfeuchtegehalt für Basis und Halmmittle von $11,59\%$ an. Die Trocknung wurde nur am Tag durchgeführt, in der Nacht wurden Ventilatoren und Heizung abgeschaltet und die Klappen geschlossen. Die Abschaltzeiträume wurden nicht als Trocknungszeit gezählt.

Die im Experiment 2 erreichte Trocknungsqualität wurde hinsichtlich Rissen und Spalten qualitativ bewertet. 70% der Guaduas zeigten weder Risse noch Spalten. $10,0\%$ der Guaduas hatten Risse und $20,0\%$ Spalten. Wenn die leichten Spalten und Risse vernachlässigt werden, verbleiben $5,0\%$ mit mittleren und starken Rissen und $10,0\%$ mit mittleren und starken Spalten. Das heißt, dass im Experiment 2. 15% Risse und Spalten aufwiesen, gegenüber $14,2\%$ beim Experiment 1., Die Ergebnisse der beiden Experimente waren somit hinsichtlich der erzielten Qualität fast gleich.

Beim Experiment 3 wurde ein Trocknungsprogramm mit niedrigen Temperaturen verwendet. Die psychometrische Differenz hatte einen Anfangswert von 8°C und einen Endwert von 10°C . Die Trocknung dauerte bei Experiment 3 insgesamt 864 Stunden. Die Trocknungszeit war länger, dennoch wurde wegen der wesentlich höheren

Anfangsfeuchte eine größere Trocknungsrate erreicht als in den Experimenten 1 und 2. Bei diesem Experiment traten weniger Risse und Spalten auf.

Beim Experiment 4 wurde ein Trocknungsprogramm mit mittleren Temperaturen angewendet. Die psychometrische Differenz nahm Werte zwischen 7°C und 27°C an. Die Trocknung umfasste einen Zeitraum von nur 105 Stunden. Ausgehend von einer Anfangsfeuchte von 125% wurde innerhalb dieser Zeit ein durchschnittlicher Endfeuchtegehalt zwischen Basis, Halmmitte und oberer Halmmitte von 6% erreicht. Bei diesem Experiment wurde die Trocknung bei Nacht und bei Tag (24 Stunden) durchgeführt.

Beim 4. Experiment erhielt man mit 31,6% Rissen und Spalten das höchste Ergebnis, was letztlich gleichbedeutend mit niedriger Qualität ist. Dieses Ergebnis hängt mit der schnellen Trocknung zusammen. Hierdurch trat keinerlei (0%) Bläue auf, während bei allen anderen Trocknung praktisch alle Proben zu 100% verblaut waren. Der Energieverbrauch war bei diesem Experiment doppelt so hoch wie bei den Experimenten zuvor. Die Trocknungsrate lag jedoch oberhalb von 1,0%/Std, was im Vergleich zu den anderen Trocknungen als sehr hoch bezeichnet werden kann. Wegen der recht scharfen Trocknungsbedingungen zu Beginn und gegen Ende des Versuchs ist die Qualität schlechter als bei den vorausgegangenen Trocknungen ausgefallen. Weiter ist es wichtig zu erwähnen, dass der Querschnitt des Bohrers zum Durchbrechen der Diaphragmen größer war als bei den anderen Trocknungsversuchen. Dies ist erforderlich, um im Rahmen der achsenparallelen Durchströmung des Stapels eine Durchströmung des Halminnenen in Längsrichtung zu ermöglichen. Hierdurch wird der Trocknungsprozess ganz erheblich erleichtert. Gleichzeitig muss aber auch im Rahmen weiterführender Untersuchungen analysiert werden, ob das Durchstoßen der Diaphragmen die Struktur der Guaduas mit geringerem Durchmesser, die Halmmitten oder obere Halmmitten beschädigt.

Die Qualitätsverluste durch Risse und Spalten in den Basis- und Halmmittelabschnitten wurden im Rahmen des 2. und 4. Experiments analysiert. In beiden Fällen lagen höhere Qualitätsverluste, in den Halmmitten im 2. Experiment und in den Halmmitten und oberen Halmmitten im 4. Experiment vor.

Dieses kann auf die höhere Dichte, stärkere Schwindung und die damit verbundene erhöhte Bildung von Rissen und Spalten in der Struktur zurückgeführt werden. Bei Holz mit hoher Dichte ist die Schwindung höher (Kollmann F., 1968). Andere Autoren sagen, dass der Halm zur Spitze hin spröder wird (Janssen J. A. A., 1981) und deshalb eher zum Reißen neigt.

Experiment	Material	Trocknungsmethode	Trocknungsrate(%/Std.)	Formel	Korrelationskoeffizient
1	Guaduahalme	Freilufttrocknung	0,044	$u = 85,83 e^{-0,0243 t}$	$R^2 = 0,906$
2			0,052	$u = 132,42 e^{-0,0188 t}$	$R^2 = 0,968$
3	Guadualatten	Solar-trocknung	0,24	$u = 96,62 e^{-0,154 t}$	$R^2 = 0,9932$
4			0,23	$u = 76,04 e^{-0,169 t}$	$R^2 = 0,837$
5			0,22	$u = 94,15 e^{-0,113 t}$	$R^2 = 0,949$
6			0,27	$u = 58,78 e^{-0,167 t}$	$R^2 = 0,977$
7	Guaduahalme	Konventionelle Trocknung	0,042	$u = 26,86 e^{-0,0018 t}$	$R^2 = 0,9516$
8			0,043	$u = 38,64 e^{-0,002 t}$	$R^2 = 0,9744$
9			0,074	$u = 58,78 e^{-0,002 t}$	$R^2 = 0,9261$
10			1,133	$u = 122 - 0,3317 t$	$R^2 = 0,9916$
11	Guaduahalme	Solar-trocknung	0,056	$u = 38,18 e^{-0,065 t}$	$R^2 = 0,984$
12			0,065	$u = 49,09 e^{-0,079 t}$	$R^2 = 0,978$

Tabelle 6.3: Zusammenfassung aller Experimente

Die Rahmenbedingungen waren bei den Experimenten 1 und 2 sehr ähnlich. Die folgende Gleichung ergab sich bei einer Durchschnittstemperatur von 26,5° C und einem ϕ von 60% bei der Freilufttrocknung. Sie kann auch bei den anderen Trocknungsmethoden, wie der Solartrocknung von Latten oder Guaduahalmen und der konventionellen Trocknung angewandt werden. Hier waren die Gleichungen praktisch gleich. Eine allgemeine Gleichung ist:

$$u_m = u_b e^{-\alpha t} \quad (6.1)$$

Wobei: u_m = Endfeuchtegehalt (%),

u_b = Anfangsfeuchtegehalt (%),

t = Trocknungszeit t [Tage],

α = Trocknungskonstante .

Die Trocknungskonstante α hängt von verschiedenen Faktoren ab. Die wichtigsten sollen erwähnt werden: An erster Stelle steht die Trocknungsmethode, an zweiter Stelle der Trocknungstyp und seine Eigenschaften, die Materialform (Halm/Latte) und ob die Diaphragmen durchstoßen sind oder nicht.

Diese Gleichung ist deshalb so wichtig, weil man mit ihr die Dauer der Trocknung relativ gut voraussagen kann, wenn man den Anfangsfeuchtegehalt u_b bestimmt hat.

Diese Gleichung kann auch bei der Trocknung von Laub- und Nadelholz zur

Anwendung kommen (Kollmann F., 1959; Kollmann F. & Côté W., 1968). Bei der Trocknung von Holz wird die Konstante α verwendet. Bei einer Holzdicke von 25,4 mm und bei einer Trocknungstemperatur von $< 65^\circ \text{C}$ beträgt die Konstante bei der konventionellen Trocknung für Nadelholz $\alpha = 0,047$ und für Laubholz $\alpha = 0,026$.

Die Trocknung wird, wie ein Diffusionsproblem, mit gleicher Gleichung beschreiben. Diese wird nach dem 2. Gesetz von Fick aufgestellt. In Analogie zur Theorie von Fourier ergibt sich die Gleichung zur Trocknung von Hart- und Weichholz.

Die Trocknungsrate der Guaduahalme bei der Freilufttrocknung gleicht der der Solartrocknung. Bei beiden Trocknungsmethoden hängt die Halmrocknung von den äußeren Bedingungen ab. Die kürzere Trocknungszeit, um einen Endfeuchtegehalt von $< 10\%$ zu erhalten, ist ein Vorteil der Solartrocknung gegenüber der Freilufttrocknung.

Die allgemeinen Kosten der unterschiedlichen Trocknungsmethoden wurden in anbeacht von unterschiedlichen Umständen, wie z. B. der nicht klar definierten Trocknungsprozesse und der nicht standardisierten Produktion der *Guadua angustifolia*, qualitativ analysiert. Es sind noch sehr unausgereifte Trocknungsprozesse, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden. Man kann die Bambustrocknung aufgrund der runden und innen hohlen Form der Halme und wegen der unterschiedlichen physikalischen Beschaffenheit des Bambusmaterials nicht mit der Holztrocknung gleichsetzen.

	Freiluft-trocknung	Solar-trocknung	konventionelle Frischluft/Abluft Trocknung
Trocknungs-zeitraum	- - -	+ -	+ + +
Trocknungs-qualität	- - -	+ -	+ + +
Anfangs-investition	+ + +	+ +	- - -
Arbeits-kosten	- - -	+ + +	+ + +
Bestandhalt-ungskosten	+ -	+ +	- -
Energiever-brauch	NA	+ + +	- -
Umweltfreund-lichkeit	+ + +	+ + +	- -
Komplexität des Systems	+ -	+ + +	- - -

Tabelle 6.4: Bewertung der Schwächen und Stärken in qualitativer Form

empfehlenswert:	+ + +
gut:	+ +
mittelmäßig:	+ -
schlecht:	- -
sehr schlecht:	- - -
nicht anwendbar:	NA

7 Schlussfolgerungen und Zukunftsaussichten

Die industrielle Entwicklung des Bambus und seine verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten in der Wirtschaft sind abhängig vom technischen und wissenschaftlichen Kenntnisstand. Es ist wichtig, seine Schwächen und Stärken, seine Wechselbeziehungen mit den Umgebungsbedingungen, unter denen er verwendet wird, und die richtigen Verarbeitungsmethoden zu kennen.

Aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Trocknung der *Guadua angustifolia* Kunth können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Die Schwindungs/Quellungsanisotropie von Bambus unterscheidet sich von der des Holzes. Im Durchschnitt ist die radiale Schwindung von Bambus *Guadua angustifolia* größer als die des Holzes. Die Schwindung vermindert sich bei zunehmender Dichte. Das maximale Volumenschwindmaß $\beta_{\max, v}$ liegt bei etwa 18,4%, das Volumetrocknungsschwindmaß $\beta_{N, v}$ beträgt etwa 11,8%.

Die durchschnittliche Schwindungsanisotropie $A_q = 1,0$ lässt auf gute Eignung der *Guadua* für die industrielle Verarbeitung, z.B. zur Parketherstellung oder zum Bau von Wänden, schließen.

Die Rohdichte der *Guadua angustifolia* Kunth schwankt zwischen $0,42 \text{ g/cm}^3$ und $0,86 \text{ g/cm}^3$. Der Durchschnittswert liegt bei $0,55 \text{ g/cm}^3$. Die Dichte variiert über die Länge des Halmes. In der Halmmitte ist sie höher als in der Spitze.

Der Feuchtegehalt der *Guadua angustifolia* Kunth im frischen bzw. vorgetrockneten Zustand variiert mit der Topographie des Standorts, über die Länge des Halmes sowie zwischen Nodien und Internodien. Die Guaduahalme, die aus der Talzone stammen, haben immer einen um 10-30% höheren Feuchtegehalt über die gesamte Länge des Halmes als die Halme aus den Hang und Spitzenlagen. Allgemein sind die Nodien und Internodien aus der Halmbasis der *Guadua angustifolia* Kunth, unabhängig von der Topographie, 10 bis 20% feuchter als die Nodien und Internodien aus der Halmmitte.

Die Fasersättigungszone liegt bei der Bambusart *Guadua angustifolia* Kunth zwischen 30 und 32% und bei der Bambusart *Phyllostachys pubescens* Mazel zwischen 32 und 34%.

Die Sorptionsisothermen der beiden untersuchten Bambusarten zeigen ein in etwa gleiches Verhalten. Bei höheren relativen Luftfeuchten trennen sich die Sorptionskurven, allerdings nicht sehr stark. Im Vergleich zu Fichtenholz ergibt sich für den Bambus im Bereich zwischen 35 und 85% relativer Luftfeuchte eine um etwas mehr als 2 Prozentpunkte niedrigere Gleichgewichtsfeuchte.

Die Freilufttrocknung ist eine Trocknungsalternative, die unter adäquaten Bedingungen zu durchaus brauchbaren Endergebnissen führt. Der Standort für die Trocknung sowie die Auswahl von für das Trocknen geeigneten Materials sind wichtige Aspekte, die zu beachten sind.

Die Freilufttrocknung, als Vortrocknung, verkürzt die Trocknungsdauer bei der abschließenden Kammertrocknung und bei der Solartrocknung. Die Trocknungskosten, vor allem für thermische Energie und Strom, werden hierdurch verringert. Die Qualität der Trocknung leidet allerdings während der Freiluftvortrocknung, da ein Verblauen des Materials und ein Schimmelwachstum auf den Oberflächen unvermeidlich ist. Wegen der hohen Betriebs- und Energiekosten bei der konventionellen Kammertrocknung, ist es notwendig die Trocknungszeit in den Trocknungskammern auf ein Minimum zu reduzieren.

Verglichen mit einer sofortigen Kammertrocknung frischen Materials ist es normalerweise billiger, den anfänglichen Feuchtegehalt der Halme von 120% im Rahmen der Freilufttrocknung auf einen Feuchtegehalt von 30 bis 35% zu reduzieren, auch wenn das Stapeln und Wenden der Guadua Halme bei der Freilufttrocknung viel Arbeitskraft und Zeit kostet.

Um niedrige Endfeuchten zu erreichen, muss die Guadua nach der Freilufttrocknung entweder solar oder konventionell endgetrocknet werden.

Die Solartrocknung ist unter Kostengesichtspunkten wahrscheinlich die empfehlenswerteste Trocknungsmethode, wenn die spätere Verwendungsform es erlaubt, dass bei der Trocknungsqualität Abstriche bei Bläue und Schimmelbefall gemacht werden können. Die Trocknung von Guadua-Latten sollte immer in konventionellen Trocknern durchgeführt werden, da nur hier das Auftreten von Bläue und Schimmel sicher vermieden werden kann. Hierfür ist es allerdings auch erforderlich, dass nach der Ernte des Bambus innerhalb von maximal 5 Tagen der Zuschnitt zu Latten durchgeführt wird, die Schutzbehandlung erfolgt und mit der Trocknung begonnen wird.

Die Solartrocknung hängt stark von den Standort- und Klimabedingungen (T , φ) ab. Bei dieser Methode kann, im Gegensatz zur Freilufttrocknung, im Sommer ein Endfeuchtegehalt von 8% erreicht werden. Der Solartrockner sollte in Nord-Südrichtung ausgerichtet sein und die solar erwärmte Luft sollte in Form eines Kreislaufs zirkuliert werden, der an die Geometrie der Trocknungsanlage angepasst ist. Die natürliche Konvektion allein ist für einen guten Trocknungsfortschritt nicht ausreichend.

Bei der Solartrocknung kann die Trocknungszeit durch den Einsatz zusätzlicher Energiequellen, wie z.B. Erdgas oder Propangas, verringert werden. Durch die Zusatzenergie wird die Wasserkondensation in der Nacht verhindert und der Trocknungsprozess kann somit Tag und Nacht hindurch fortgeführt werden.

Bei der Trocknung von Latten tritt ein Qualitätsfehler auf, der Krümmung oder Schüsseln genannt wird. Hierbei handelt es sich um eine Deformation der Latten, die auf Grund der anatomischen Struktur und der zwangsläufig auftretenden Feuchteunterschiede über den Querschnitt unvermeidbar ist. Auf der Innenseite der tangential-logitudinalen Lattenebene liegt mehr Parenchymgewebe vor als auf der Außenseite. Die wegen der einseitig geringeren Dichte entstehenden asymmetrischen Feuchteverteilungen führen zur Deformation der Latten. Dieser Qualitätsfehler tritt aber nicht bei allen Latten in einem Stapel auf, sondern nur bei etwa 30 bis 40%. Die Deformation kann durch anschließende maschinelle Schleif- oder Hobelprozesse beseitigt werden.

Bei der konventionellen Trocknung verhindert die unmittelbar an die Ernte anschließende schnelle Trocknung des Halmes das Auftreten von Bläue und Schimmelbefall der Oberflächen. Ein in dieser Arbeit verwendetes Trocknungsprogramm (Experiment 4), welches mit einem ΔT von 8° begann und mit ΔT 20° endete, war offensichtlich zu scharf, sodass hierbei mehr Qualitätsfehler in Form von Rissen und Spalten auftraten als bei den anderen Versuchen. Das Programm muss optimiert werden, um in Zukunft eine bessere Qualität zu erzielen.

Bei einer sich unmittelbar an die Ernte anschließenden Kammertrocknung verdoppelt sich wegen der hohen Anfangsfeuchte der Energieverbrauch gegenüber einer Kammertrocknung von freiluft-vorgetrocknetem Material.

Bei der konventionellen Trocknung ist die Art der Luftführung bzw. die Anordnung der Guadua-Halme in Relation zum Luftstrom von großer Relevanz. Die Halme sollten am besten parallel zum Luftstrom angeordnet werden, wobei die Diaphragmen vor der Trocknung großflächig durchbohrt worden sein sollten, wie dies beim Experiment 4 erfolgt ist.

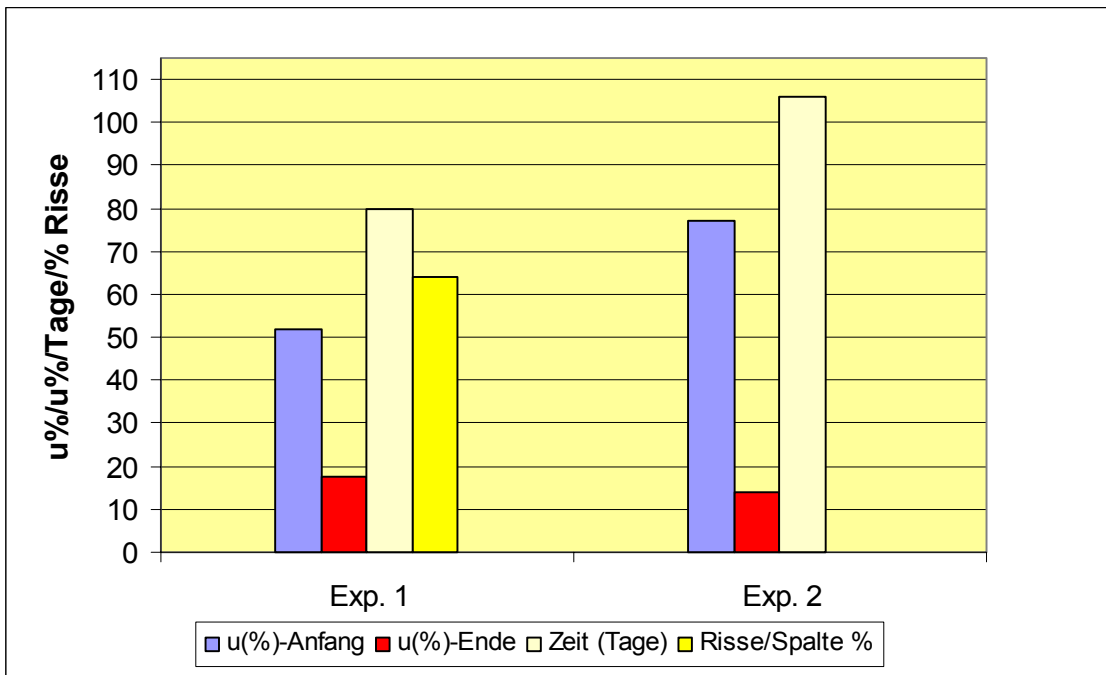


Abb. 7.1: Ergebnisse der Freilufttrocknung von Guaduahalmen aus Experiment 1 und 2

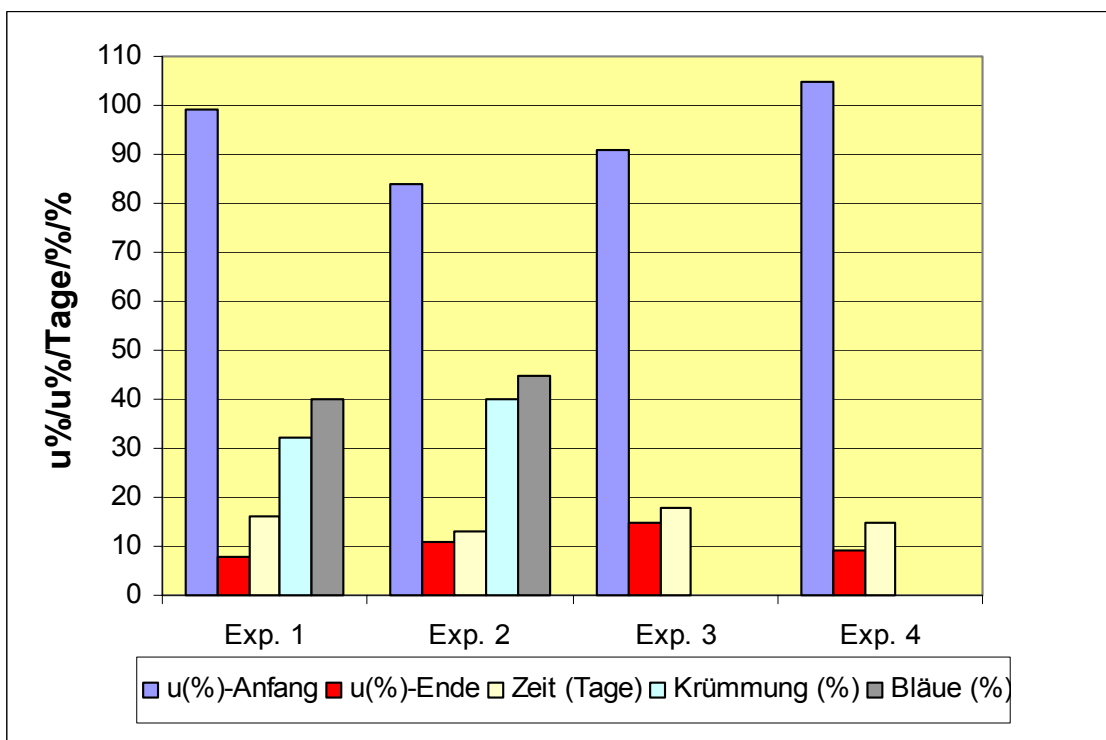


Abb. 7.2: Ergebnisse der Solartrocknung von Latten aus Experiment 1- 4

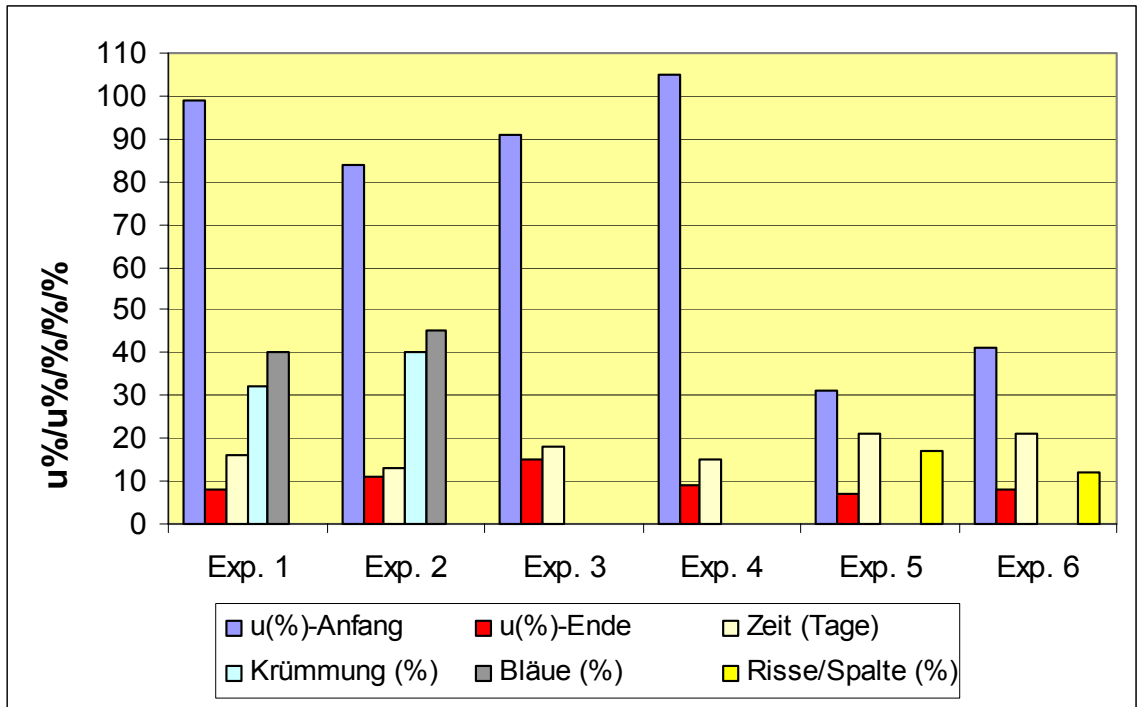


Abb. 7.3: Ergebnisse der Solartrocknung von Latten aus Experiment 1- 4 und von Guaduahalmen aus Experiment 5 und 6

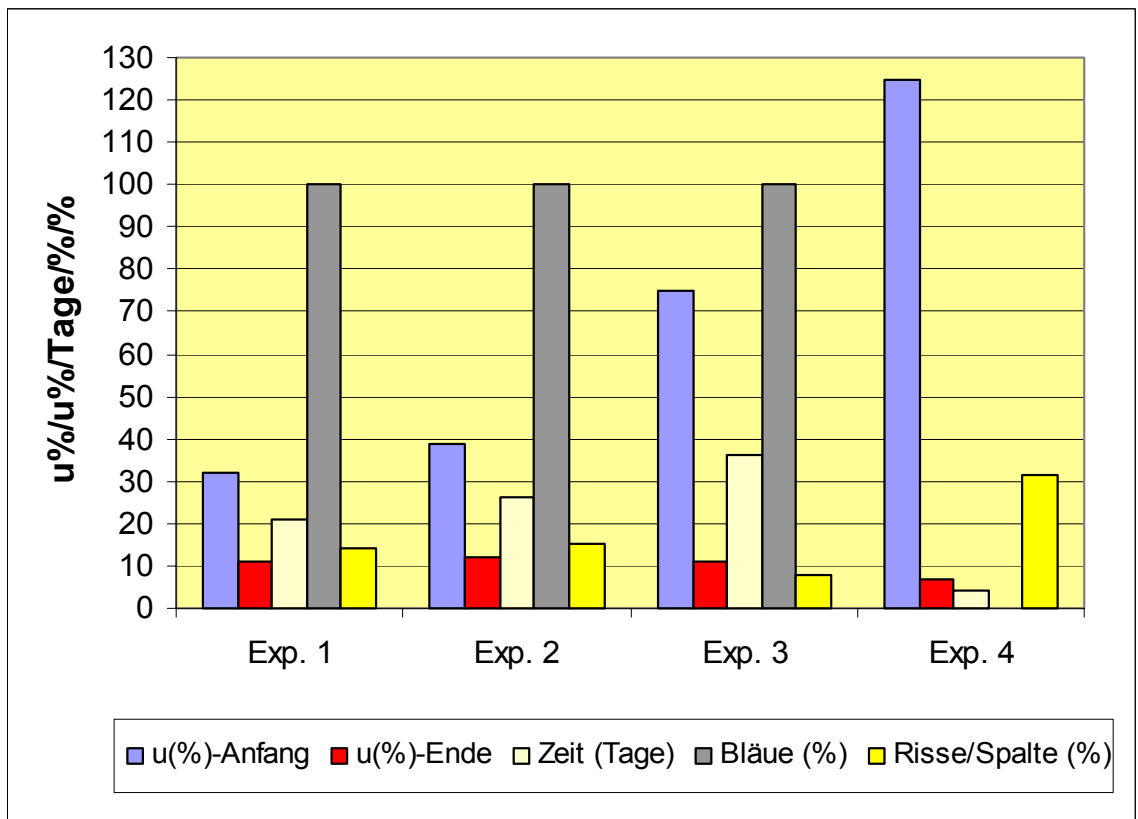


Abb. 7.4: Ergebnisse des Frischluft-/ Abluftverfahrens von Guaduahalmen aus Experiment 1- 4

8 Zusammenfassung

Die Bambusart *Guadua angustifolia* Kunth ist in Zentral-Amerika und im nördlichen Teil von Süd-Amerika weit verbreitet. Insbesondere für die Kaffee-Region Kolumbiens ist Guadua-Bambus ein wichtiger, schnell wachsender und nachhaltig verfügbarer Rohstoff, der seit langer Zeit durch die Bevölkerung genutzt wird und zum Einkommen der ländlichen Region einen wichtigen Beitrag leistet. Bisher wird Guadua zum überwiegenden Teil in Form von Stangen als Baumaterial genutzt. In der Zukunft soll Guadua-Bambus jedoch auch in anderen Bereichen, z.B. als Ausgangsmaterial für die Parkettproduktion oder die Herstellung von Leimholzplatten, verwendet werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings eine qualitativ hochwertige Trocknung.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die vergleichende Untersuchung verschiedener, unter tropischen Bedingungen anwendbarer Trocknungsverfahren. Im Einzelnen wurden untersucht: Freilufttrocknung, Solartrocknung mit und ohne zusätzliche Heizquelle, konventionelle Kammertrocknung nach dem Frischluft-Abluftverfahren. Guadua wurde sowohl als Rundmaterial als auch in Form von Latten getrocknet. Zum besseren Verständnis des Trocknungsverhaltens und zur der Optimierung der Trocknungsverfahren wurden eine Reihe von grundlegenden Untersuchungen durchgeführt.

Im Rahmen der Versuche wurde Material verschiedener Provenienzen untersucht, wobei sich Standorte hinsichtlich ihrer Topographie (Tal, Hang, Bergspitze) unterschieden. Bestimmt wurde die Anfangsfeuchte in Abhängigkeit von der Topographie, die Feuchteverteilung über die Halmlänge sowie zwischen Nodium und Internodium. Die Ermittlung der Rohdichte und deren Veränderung über die Halmlänge und zwischen Nodien und Internodien dienen ebenfalls dem besseren Verständnis des Trocknungsverhaltens. Als wichtiges Kriterium für die spätere Verwendung des getrockneten Materials gilt das Sorptionsverhalten. Im Rahmen von Klimatisierungsversuchen wurden die Sorptionsisotherme bei 20°C sowie der Fasersättigungsbereich bestimmt. Außerdem wurden alle trocknungs- und verwendungsrelevanten Schwind- und Quellwerte ermittelt.

Derzeit wird in Kolumbien praktisch die gesamte Guadua-Produktion mittels Freilufttrocknung getrocknet. Die Freilufttrocknung gilt deshalb als eine Art Referenzverfahren. Aufgrund der Nähe zum Äquator, der über das ganze Jahr fast gleichmäßigen Temperatur sowie der hohen Sonneneinstrahlung bietet sich die Solartrocknung als mögliche Variante an. Die tageszeitlichen Unterschiede und die Abhängigkeit vom Wetter können nur durch die F/A-Trocknung ausgeschaltet werden.

Im Rahmen der vergleichenden Untersuchungen wurde festgestellt:

- Die Unterschiede hinsichtlich der Anfangsfeuchte des Materials sind erheblich. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Endfeuchte erscheinen deshalb eine Vorsortierung des Materials (hinsichtlich Topographie und Position im Halm) und die anschließende separate Trocknung empfehlenswert.
- Bei der Freilufttrocknung und bei der Solartrocknung kann das Auftreten von Bläue und Schimmel praktisch nicht vermieden werden.
- Die Freiluft- und Solartrocknung kann deshalb nur für Material zur Anwendung kommen, bei dem Bläue und Schimmel nicht als Qualitätsmangel angesehen wird (z.B. Rundmaterial für den Bausektor).
- Die Freilufttrocknung dauert im Sommer ca. 100 Tage, im Winter jedoch wesentlich länger. Materialfeuchten unter 14% können nicht erreicht werden.
- Durch die Solartrocknung kann der Trocknungsprozess erheblich beschleunigt werden bei gleichzeitig verbesserter Kontrolle der Trocknungsbedingungen. Hierdurch lässt sich eine bessere Trocknungsqualität (weniger Risse und Spalten) sowie eine niedrigere Endfeuchte erreichen.
- Bei der Solartrocknung kommt die Trocknung während der Nachtphasen zwangsläufig zum Erliegen. Durch eine Zusatzheizung (z.B. Gas) kann dieser Nachteil beseitigt werden.
- Im Rahmen der konventionellen Kammertrocknung nach dem F/A-Verfahren kann sowohl Guadua-Rundmaterial als auch Guadua in Form von Latten innerhalb kurzer Zeit und mit hoher Qualität getrocknet werden.
- Bei der Trocknung von Rundmaterial kann bei einer Längsdurchströmung des Stapels eine beträchtliche Verkürzung der Trocknungszeit erreicht werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings das großflächige Durchstoßen der Diaphragmen in den Nodien. Erst hierdurch wird eine Durchströmung des Halminneren erreicht.
- Um getrocknetes Guadua-Material ohne Bläue und Schimmel zu erhalten, ist eine Verkürzung der Zeit zwischen Ernte und Trocknung auf max. 5 Tage, besser 2 Tage, erforderlich.

Für eine Ausweitung der Verwendung von Guadua im qualitativ anspruchsvollen Bereich sowie im Rahmen einer industriellen Verwertung ist die Einführung und Anwendung von technischen Trocknungsverfahren eine zwingende Voraussetzung.

9 Literaturverzeichnis

- Abd. Latif M. & Mohd. Zin Jusoh (1992): Culm Characteristics of *Bambusa blumeana* and *Gigantochloa scortechinii* and its effects on physical and mechanical properties. International Symposium on Industrial Use of Bamboo held in Beijing, China. pp 118-128.
- Abd. Latif M., Abd. Razak O. and Hong L. T. (1993a): The present State and Problems of Bamboo Utilitation for Rural Development Activities in Peninsular Malaysia. Bamboo J. V.10, pp 10-19.
- Abd. Razak O., Abd. Latif M., Liese W., Norini H. (1995): Planting and utilization of bamboo in peninsular Malaysia. Kuala Lumpur, Malaysia: FRIM Report No.118.117pp.
- Abd. Latif M. (1996): Some Preselected Properties of Two Malaysian Bamboo Species in Relation to Age, Height, Site and Seasonal Variations. Dissertation University Pertanian Malaysia. 282 pp.
- Abd. Latif M., Liese, W. (1998): Moisture content of Two Malasyan Bamboos in relation to age, culm height, site and harvesting month. Proceedings of the V International Bamboo Congress and VI International Bamboo Workshop, INBAR Proceedings N°7, Costa Rica San José. pp. 257-268.
- Alvarez-Noves H., Fernandez-Golfin Seco J. I. (1992) : Fundamentos teóricos del secado de la madera. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Editorial: Neografis S. L., Madrid, 193 pp.
- Anon. - Wood Structural Design Data. American Forest & Paper Association. Internet: <http://www.awc.org/pdf/wsdd/toc.pdf> demand on 20.08.2005.
- Anon. - Proyecto Guadua Bamboo, Capitulo 5: Propiedades de la madera. <http://web.catie.ac.cr/guadua/propie.htm>
- Arce-Villalobos O.A. (1993): Fundamentals of the design of bamboo structures. Dissertation. Eindhoven, Netherlands: Technische Universiteit. 261 pp.
- Arias-Galvis M. J., Ocampo D. A., Garcia-Sierra J. H. (2004): Análisis del Mercado de la Guadua con características Especiales en el Eje Cafetero. Proceedings International Symposium Guadua 2004. Pereira-Colombia, 4 pp.
- Aristizabal V. (2004): Memorias Simposio Internacional - Guadua 2004. Colombia: Universidad Tecnologica de Pereira, Pereira-Colombia. 563 p.

- Atrops J. L. (1969): Elastizität und Festigkeit von Bambusrohren. Der Bauingenieur 44 Heft 6, pp 220 -225.
- Bahena J. S. (2005): Documentación técnica de los hornos para secado de la Guadua convencional y solar-asistido de la Facultad de Ciencias Ambientales. Trabajo de grado para obtener título de Ingeniero Mecánico, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia, 110 pp.
- Beraldo A.L. & Azzini A. (1998) – Characteristics of three giant bamboo species in Brazil. Bamboo for Sustainable Development. Proceedings of the V International Bamboo Congress and VI International Bamboo Workshop, INBAR Proceedings N°7, Costa Rica-San José. pp 287-297.
- Brunner R. (1987): Die Schnittholztrocknung. Brunner-Hildebrand, 5. Auflage, Verlag Brunner-Hildebrand, Hannover. 322 pp.
- Corvalan R., Horn M., Román R., Saravia L. (1992): Ingeniería del secado solar. Sub programa VI: Nuevas Fuentes y Conservación de Energía, CYTED-D Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo V Centenario. Madrid. 180 pp.
- Cruz-Rios H. (1994): La guadua-nuestro bambu. Quindio, Colombia: Corporacion autonoma regional del Quindio. 293pp.
- De Flander K. (2005): The role of Bamboo in Global Modernity: from Tradicional to Innovative Construction Material. Thesis MSc, Wageningen University, Netherlands, 75 pp.
- Ding Y. (1998): Systematic studies on Phyllostachys. Dissertation, Forestry University Nanjing, China. 120 pp.
- DIN 50 008:1977- Konstantklimate über wässrigen Lösungen. Beuth Verlag: Berlin, 4 s.
- DIN 52 182:1977- Bestimmung der Rohdichte. Beuth Verlag: Berlin, 2 s.
- DIN 52 183:1977- Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes. Beuth Verlag: Berlin, 2 s.
- DIN 52 184:1979- Bestimmung der Quellung und Schwindung. Beuth Verlag: Berlin, 4 s.
- Doering E. (1968): Technische Wärmelehre. Verlag B.G. Teubner, Stuttgart. 296 pp.

- Duffie A. J., Beckman W.(1980): Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley and Sons, New York. 919 pp.
- Espiloy Z. B. (1991): Effect of the Age on the Physico-Mechanical Properties of Philippine Bamboo. Bamboo in the Asia pacific, proceeding 4th international Bamboo Workshop, FORSPA Publication N° 6, Chiangmai Thailand. pp. 180 – 182.
- Espiloy Z. B. (1985): Physico-Mechanical Properties and Anatomical Relationships of Some Philippine Bamboos. Recent Research on Bamboos. Proceedings of the International Bamboo Workshop, Hangzhou China, pp. 257 – 263.
- Fangchun Z., (1981): Studies on Physical and Mechanical Properties of Bamboo Woods. Journal of Nanjing technological College of Forest products, N° 2, Nanjing-China. 31 pp.
- Fernandez-Golfin Seco, J. I. (1998): Manual de secado de maderas. Ministerio de Industria y Energía, Editorial: Gráficas Palermo, Madrid. 169 pp.
- Gandhi Y. (1998): Preliminary study on the drying of Bamboo (*Bambusa blumeana*) in a wood waste-fired Kiln. Proceedings of the V International Bamboo Congress and VI International Bamboo Workshop, INBAR Proceedings N°7, Costa Rica San José. pp. 495-510.
- Giraldo E. & Sabogal A. (1999): Una alternativa sostenible: la Guadua, técnicas de cultivo y manejo. Corporacion Autonoma Regional del Quindío CRQ, Armenia. 192 pp.
- Gnanaharan R. (1991): Physical and Strength Properties of *Dendrocalamus strictus* Grown in Kerela India. Bamboo in the Asia pacific, proceeding 4th international Bamboo Workshop, FORSPA Publication N° 6, Chiangmai Thailand, November. pp 188-192.
- Grigull U., Gröber, Erk (1957): Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Dritte Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg. 428 pp.
- Grosser, D. (1971): Beitrag zur Histologie und Klassifikation asiatischer Bambusarten - Dissertation. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Hamburg, Germany: Max Wiedebusch. No. 85, 321 pp.
- Grosser D. & Liese W. (1971): On the Anatomy of Asian Bamboos, with special reference to their Vascular Bundles. Wood Science and Technology, Springer Verlag:Hamburg, Vol. 5, 290-312 pp.

- Gonzalez-Beltrán G. E. (2003): Plybamboo Wall-Panels for Housing, Structural Design. Thesis to obtain the degree of Doctor of Technical Sciences at the Eindhoven University, Eindhoven Netherlands. 235 pp.
- González-T. G., Cambroner C., Gutiérrez G. (1991): Secado al aire libre de trozas de Guadua del Atlántico. Proyecto Nacional de Bambú, San José de Costa Rica, 27 pp.
- Gutierrez J.A. (2000): Structural adequacy of traditional bamboo housing in Latin America. INBAR Technical Report No.19. Beijing, China. 112 pp.
- Haque M. N. (2002): Modelling of solar kilns and the development of an optimised schedule for drying hardwood timber. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. University of Sydney, Sydney. 354 pp.
- Haque M. N. & Langrish T.A.G. (2004): Modelling of solar kilns and the development of an optimised schedule for drying timber: III Model Validation, Journal of the Institute of Wood Science, Vol 16 N° 6. pp 347-362.
- Held C. (2005): Promotion of innovations in forest based small and medium size enterprises of developing countries. – an actor oriented analysis of the Colombian bamboo sector. Freiburger Schriftenreihe zur Forst-und Umweltüpolitik, Band 8, Verlag Dr. Kwessel, Remagen-Oberwinter, 222 p, and appendices.
- Held C. & Manzano I. D. (2003): El sector productivo y el Mercado regional de la Guadua en el eje cafetero colombiano. Informe del proyecto Guadua-Bambú de la Unión Europea, Freiburg-Germany, 61 pp.
- Hidalgo-López, O. (1978): Nuevas tecnicas de construccion con bambú. Universidad Nacional de Colombia, Bogota-Colombia. 137 pp.
- Hidalgo-López O. (1981): Manual de construccion con bambu. Universidad Nacional de Colombia, Bogota-Colombia. 71 pp.
- Hidalgo-López O. (2003): Bamboo -The gift of the goods. Oscar Hidalgo Editores. Bogota-Colombia. 553 pp.
- Hoheisel H. (1989): Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas. Junta de acuerdo de Cartagena, Editorial: Carvajal S. A., Lima-Perú, 418 pp.

- Hsieh J. S. & Wu S. C. (1991): The Ultrastructure of Taiwan Giant Bamboo and Moso Bamboo. Proceedings of the Fourth International Bamboo Workshop, held in Chiangmai, Thailand. pp. 199-212.
- ISO 22 157-1: 2004 (E) – Bamboo – Determination of physical and mechanical properties- Part 1: Requirements, ISO copyright office. 19 pp.
- ISO 22 157-2: 2004 (E) – Bamboo – Determination of physical and mechanical properties- Part 1: Laboratory manual, ISO copyright office. 21 pp.
- Janssen J.J.A. (1981): Bamboo in Building Structures. Thesis to obtain the degree of Doctor of Technical Sciences at the Eindhoven University, Nijmegen Netherlands. 235 pp.
- Janssen J.J.A. & González G. (1998): Plybamboo sheets as housing construction material. Proceedings of the V International Bamboo Congress and VI International Bamboo Workshop, INBAR Proceedings N°7, Costa Rica San José. pp. 535-539.
- Janssen J.J.A. (2000): Designing and Building with Bamboo. INBAR Technical Report No 20, Beijing China, 207 pp.
- Jayanetti D. L. & Follett P. R. (1998): Bamboo in construction *An Introduction*. INBAR Technical Report N° 15, Published joint by Trada Technology Limited and INBAR, Bucks UK, 120 pp.
- Jiménez Arías R. E. (2004): Estudio técnico-económico sobre el sistema de secado al aire libre de la Guadua. Univerisidad Tecnológica de Pereira, Tesis MSc., Pereira-Colombia 132 pp.
- Key R. B., Langrish T.A.G., Walker J. C. F. (2000): Kiln-Drying of lumber. Springer-Verlag:Springer-Verlag series in Wood Science. Berlin, Heidelberg, New York. 326 pp.
- Keylwerth R. (1949): Einfache Kontrollmessung bei der Holztrocknung. Holz-Zentralblatt, N° 26, Stuttgar-Germany. pp. 307.
- Keylwerth R. & Noack D.(1964) Die Kammertrocknung von Schnittholz, Sonderdruck aus Holz als Roh- und Werkstoff, Bd 22, Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heilderberg, Reinbek-Germany pp 29-36.

- Kishen J., Ghosh D. P., Rehman M. A. (1956): Studies in Moisture Content, Shrinkage, Swelling and Intersection Point of Mature *Dendrocalamus strictus* (Male Bamboo). Indian Forest Records, vol. 1, N°2, Dehra Dun-India pp. 11-30.
- Kneule F. (1959): Das Trocknen. Grundlagen der chemischen Technik, Verlag: Sauerländer Aarau und Frankfurt am Main-Germany. 358 pp.
- Kneule F. (1975) Das Trocknen. Grundlagen der chemischen Technik, Verlag: Sauerländer Aarau und Frankfurt am Main-Germany. 720 pp.
- Kollmann F. & Keylwerth R. (1950): Beiträge zur Kraft- und Wärmewirtschaft in der Holzindustrie, Holz-Zentralblatt-Verlags-GmbH, Stuttgart-Germany. 95 pp.
- Kollmann F. (1959): Tecnología de la Madera y sus aplicaciones. Tomo I – Editorial : Gráficas Reunidas, S. A. Madrid, 675 pp.
- Kollmann F. & Côté W. (1968): Principles of Wood Science and Technology, I Solid Wood. Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York. 592 pp.
- Kollmann F., Kuenzi E., Stamm A. (1975): Principles of Wood Science and Technology I (Solid Wood) y II (Wood Based Materials). Springer- Verlag Berlin Heidelberg New York, 703 pp.
- Krischer O. (1963): Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg-Germany. 1963.
- Krischer O. & Kast W. (1978): Trocknungstechnik. Erster Band Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York-Germany. 489 pp.
- Kröll K. (1977): Trockner und Trocknungsverfahren. Zweiter Band, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York. 654 pp.
- Krupiczka R. (1967): Analysis of thermal conductivity in granular materials, Int. Chem. Engng. 7, 122 – 44.
- Laxamana M. G. (1985): Drying of some Commercial Philippine Bamboos. FPRDI Journal Volume XIV, Nos. 1 & 2. Philippine. pp. 8 -19.
- Lienhard (IV) J. H. & Lienhard (V) J. H. (2005): A Heat Transfer Textbook. Third Edition, Phlogiston Press, Cambridge-Massachusetts. 762 pp.

- Liese W. (1985a): Bamboos-biology, silvics, properties, utilization. Schriftenreihe der GTZ No 180. Eschborn, Germany. 132 pp.
- Liese W. (1985b): The Anatomy and Properties of Bamboo. Recent Research on Bamboo. Proceedings of the International Bamboo Workshop, Hangzhou Republic of China, pp. 196-209.
- Liese W. & Ding Y. (1991): Structure and Functions of the Nodes in Bamboo. Proceedings of the Fourth International Bamboo Workshop, held in Chiangmai, Thailand. pp. 213-217.
- Liese W. (1992): Bamboo Preservation in Costa Rica. Progress Report No.4. San José-Costa Rica. 12 pp.
- Liese W. (1992a): Anatomia. Memorias I Congreso Mundial de Bambú – Guadua, Pereira-Colombia. pp 25-29.
- Liese W. (1998): The anatomy of bamboo culms. INBAR Techn. Rep. No 18. Beijing, China. 208 pp.
- Liese W., Gutierrez, J. A. & Gonzalez, G. (1998): Preservation of Bamboo for the construction of houses for low-income people. Proceedings of the V International Bamboo Congress and VI International Bamboo Workshop, INBAR Proceedings N°7, Costa Rica San José. pp. 481-494.
- Liese W., Kumar S. (2003): Bamboo preservation compendium. INBAR - CIBART, ABS-Technical Report No 22, New Delhi India. 231 pp.
- Limaye V. D. (1952): Strength of Bamboo (*Dendrocalamus strictus*). Indian Forest Records, Vol. 1 N° 1, Forest Research Institute, Dehra Dun India. 17 pp.
- Lipangile T. N. (1985): The use of Bamboo as Waterpipes. Proceedings of the International Bamboo Workshop, Hangzhou Republic of China, pp. 315-320.
- Lohmann, U. (1986): Holz Handbuch. 3., völlig überarbeitete Auflage, DRW Verlag: Rosenheim-Germany. 320 pp.
- Londoño X., Camayo G. C., Riaño N. M., and López Y. (2002): Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. Bamboo Science and Culture: The journal of the American Bamboo Society, American Bamboo Society, 16(1), NY. pp 18 – 31.
- Londoño X. (2000): Guadua un gigante dormido. Seminario Guadua en la Construcción, memorias seminario, Armenia Quindío Colombia. 3-5 pp.

- Manzur-Macías D. (1988): Propagación vegetativa de la *Guadua angustifolia* Kunth. III Simposio Nacional de Bambú Guadua, Octubre 26-29, pp 1-11.
- McAdams W. H. (1942): Heat Transmission. Committee on Heat Transmission National Research Council, Second Edition, McGraw Hill Book Company, Inc. New York and London. 459 pp.
- McClure, F.A. (1963): Bamboo as a Building Material, U.S. Department of Agriculture Foreign Agriculture, Washington DC., pp 41-42.
- Marulanda M. L., Márquez P. and Londoño X. (2002): AFLP analysis of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) in Colombia with emphasis on the coffee Region. Bamboo Science and Culture: The journal of the American Bamboo Society, American Bamboo Society, 16(1), NY. pp 32 – 42.
- Morales D. & Kleinn C. (2004a): Inventario de las existencias de *Guadua angustifolia* en el Eje Cafetero de Colombia. Proceedings International Symposium Guadua 2004. Pereira-Colombia, 11 pp.
- Morales D. & Kleinn C. (2004b): A resources assessment study of Guadua Bamboo (*Guadua angustifolia*) in the coffee Region of Colombia. Proceedings Conference on International Agricultural Research for Development, Berlin-Germany, 4 pp.
- Morán Ubidia J.A. (2001): Usos tradicionales y actuales del Bambú en Colombia y Ecuador. International Network for Bamboo and Rattan, Universidad de Guayaquil-Ecuador, pp. 6-30.
- Morán Ubidia J.A. (2002): Traditional bamboo preservation methods in Latinamerica. INBAR Technical Report No. 25. Beijing, China: 70 pp.
- Montoya J. A., (2002a): Investigación tecnológica en métodos para la preservación de la Guadua. Universidad Nacional de Colombia, Tesis MSc., Manizales-Colombia. 180 pp.
- Montoya J. A. & Morales, T. (2002b): Investigación tecnológica en métodos para la preservación de la Guadua, Memorias Seminario –taller Avances en la investigación sobre Guadua, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia. 15 pp.
- Montoya J. A. & Orozco C. A. (2005): Secado Solar y Convencional de la *Guadua angustifolia* Kunth, Scientia et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira, Vol. N° 27 año XI, pp 133-137.

- Montoya J. A. & Jiménez-Arias E. C. (2006): Determinación de la curva de secado al aire libre, mediante modelación matemática y experimental de la *Guadua angustifolia* Kunth, Scientia et Técnica, Universidad Tecnológica de Pereira, Vol. N° 30 año XII, pp. 415-419.
- Niemz P. (1993): Holz Anatomie – Chemie – Physik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe – Verlag: Leinfelden-Echterdingen DRW Weinbrenner GMBH. 227 pp.
- Orozco H., C. A. (1996): Elementos de Ingeniería solar. Primera edición, Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia. 269 pp.
- Osorio D. (2005): Evaluacion de los contenidos de humedad de la Guadua, según lugar de aprovechamiento. Trabajo de grado para obtener título de administrador del medio ambiente, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia, 60 pp.
- Ota M. (1950): Studies on the Properties of Bamboo Stem (Part 7). The influence of the percentage of structural elements on the specific gravity and compressive Strength of Bamboo Splint. Bulletin N° 19 Kyushu University, Japan. 25-47 pp.
- Ota M. (1955 a): Studies on the Properties of Bamboo Stem (Part 8). The Variation of the Specific Gravity and the compressive Strength of Bamboo Splint in Node-interval. Bulletin N° 21 Kyushu University, Japan. 121 – 131 pp.
- Ota M. (1955b): Studies on the Properties of Bamboo Stem (Part 13). On the Relation between Shearing Strength Parallel to Grain and Moisture Content of Bamboo Splint. Bulletin N° 25 Kyushu University, Japan. 121 – 131 pp.
- Parsons J. J. (1991): Giant American Bamboo in the Vernacular Architecture of Colombia and Ecuador. American Society Geographical of New York, Geographical Review Vol. 81, N° 2, New York. Pp 131-152.
- Plumptre R. A. and Jayanetti D. L. (1996): Solar Heated Timber Drying Kilns “A Manual on their design and operation”, Trada Technology Ltd, Edited Overseas Development Administration, Beaconsfield. 100 pp.
- Qisheng Z., Shenxue, J., and Yongyu T. (2002): Industrial utilization on Bamboo. INBAR, Technical Report N° 26, Beijing China. 207 pp.
- Rehman M. A., Ishaq S. M. (1947): Seasoning and Shrinkage of Bamboo. Indian Forest Records, Vol. 4 N°2, Forest Research Institute, Dehra Dun-India. 20 pp.

- Robledo J. E. (1993): Un siglo de Bahareque en el viejo Caldas. El áncora editores, Bogotá-Colombia. 235 pp.
- Rodriguez M, H. & Gonzalez B., F.(1992): Manual de radiación solar en Colombia. Editores Rodríguez H. y Gonzalez F., Bogotá-Colombia. 21 pp.
- Sanchis Gritsch C. & Murphy R. (2004): Anatomical culm analysis of *Guadua angustifolia* in relation age, site, and physico-mechanical properties. Simposio International Guadua UTP, Pereira-Colombia. pp 188-197.
- Sharma S. N. (1988): Seasoning Behaviour and Related Properties of Some Indian Species of Bamboo. The Indian Forester, Bamboo Special – II, Forest Research Institute. Vol. 114 (10), Dehra Dun-India. 613-621 pp.
- Shen Z. R. (1992): On Development of Bamboo Industry in Continental China. Bamboo and its use, International Symposium on Industrial use of Bamboo, Bijing-China. pp 18-28.
- Sattar M.A., Kabir M. F. and Bhattacharjee D. K. (1991): Effect of the Age and Height Position of Muli (*Melocanna baccifera*) and Borak (*Bambusa balcooa*) Bamboo on the Physical and Mechanical Properties. Bamboo in the Asia pacific, proceeding 4th international Bamboo Workshop, FORSPA Publication N° 6, Chiangmai-Thailand. pp. 183-187.
- Sattar M.A., Kabir M.F. and Bhattacharjee D.K. (1992): Physical and Mechanical Properties of the *Bambusa arundinacea*, *Bambusa Longispiculata*, *Bambusa vulgaris* and *Dendrocalamus giganteus* Bangladesh. Bamboo and Its Use – International Symposium on Industrial use of Bamboo, Beijing-China. pp 112-117.
- Sattar M.A., Kabir M.F. and Bhattacharjee D.K. (1994): Physical and Mechanical Properties of the *Bambusa arundinacea*, *Bambusa Longispiculata*, *Bambusa vulgaris* and *Dendrocalamus giganteus*. Bangladesh Journal of Forest Science, Vol. 23(2), Bangladesh. pp 20-25.
- Sekhar A.C. and Bhartari R. K., (1960): Studies on Strenght of Bamboos: A Note on its Mechanical Behaviour. Indian Forest. Dehra Dun. pp 296 – 301.
- Schlünder E. U. (1966): Wärme- und Stoffübertragung zwischen durchströmten Schüttungen und darin eingebetteten Einzelkörpern. Chemi- Ing.-Techn. 38, 9, 933-41.

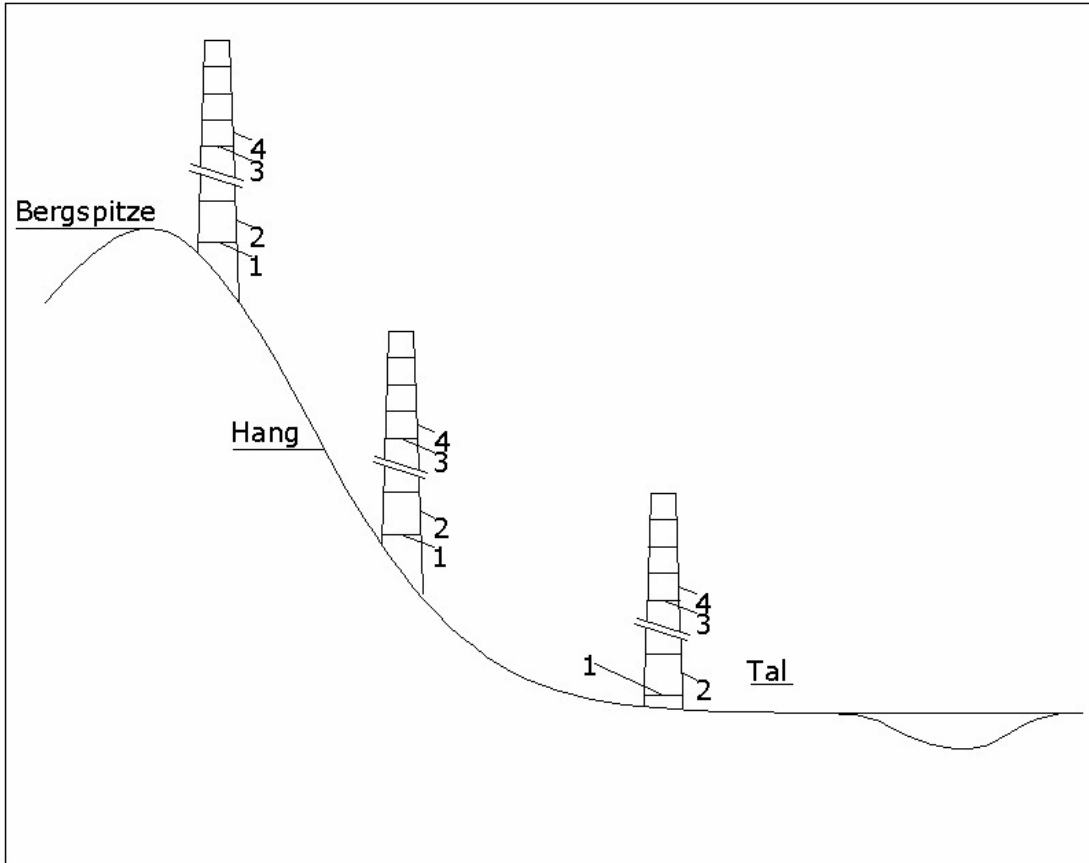
- Siau J. F. (1984): Transport Processes in Wood. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 245 pp.
- Siau J. F. (1995): Wood: Influence of Moisture on Physical Properties. Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, New York. 227 pp.
- Simpson W. T. (1991): Dry Kiln Operators Manual. United States Department of Agriculture, Research forest Products Technologist, Madison Wisconsin. 250 pp.
- Sotela Motero, J. (1990): Determinacion de las propiedades físicas y mecánicas del Bambú de la especie *Guadua* de dos zonas de Costa Rica. Proyecto PNUD-COS 87/001, San José de Costa Rica. 65 pp.
- Suzuki Y. (1950a): Studies on the Bamboo (V), Individual Differences and Variations due to the locality found in Physical Properties of *Phyllostachys pubescens*. Tokio University Forests, Bulletin N° 28, Tokio-Japan pp 167- 175.
- Stamm J. (2001): Guía para la construcción de puentes en *Guadua* en *Guadua*. Proyecto UTP-GTZ, Pereira-Colombia. 22 pp.
- Strasburger E., Noll F., Schenck H. (1991): Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. 33. Auflage, Verlag Guatv Fischer, Stuttgart. 1033 pp.
- Suzuki Y. (1950b): Studies on the Bamboo (VI), Dependence of the Mechanical Properties of *Phyllostachys pubescens* upon the Moisture Content. Tokio University Forests, Bulletin N° 28, Tokio-Japan. pp 181-186.
- Ueda K. (1980): Mechanical Properties of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*), Distribution of Modulus of Elasticity across the Culm Wall. Research Bulletins of the College Experiment Forests, Hokkaido University, Vol. 37 N°3, Sapporo Japan, pp 818-827.
- Visupapakha K. (1985): the role of Bamboo as a potencial food source in Thailand. Proceedings of the International Bamboo Workshop, Hangzou Republic of China. pp 301-303.
- Wang Y. C., Hsieh J.S. and Wu S. C. (1991): Structural Variability of Vascular Bundles of Some Exotic Bamboo Species. Bamboo in the Asia Pacific, Proceeding 4th International Bamboo Workshop, Thailand. pp 221-226.

-
- Wieslav O. & Ressel J. B. (2004): Psychometrics, University of Hamburg, Hamburg. 11 pp / pers. Mitt. /COST E15.
- Yosias G. (2002): Preliminary study on the drying of Bamboo (*Bambusa blumeana*) in a wood waste-fired kiln. Bamboo for Sustainable Development, San José -Costa Rica, 495-510 pp.
- Youdi C., Wenlong Q., Xiuling L., Jianping G. and Nimanna (1985): The Chemical Composition of Ten bamboo Species. Proceedings of the International Bamboo Workshop, Hangzou Republic of China, pp 110-113.
- Zhang Q. (1995): Industrial utilization of bamboo in China. Nanjing/China: China Forestry Publishing House, 255 pp.

10 Anhang

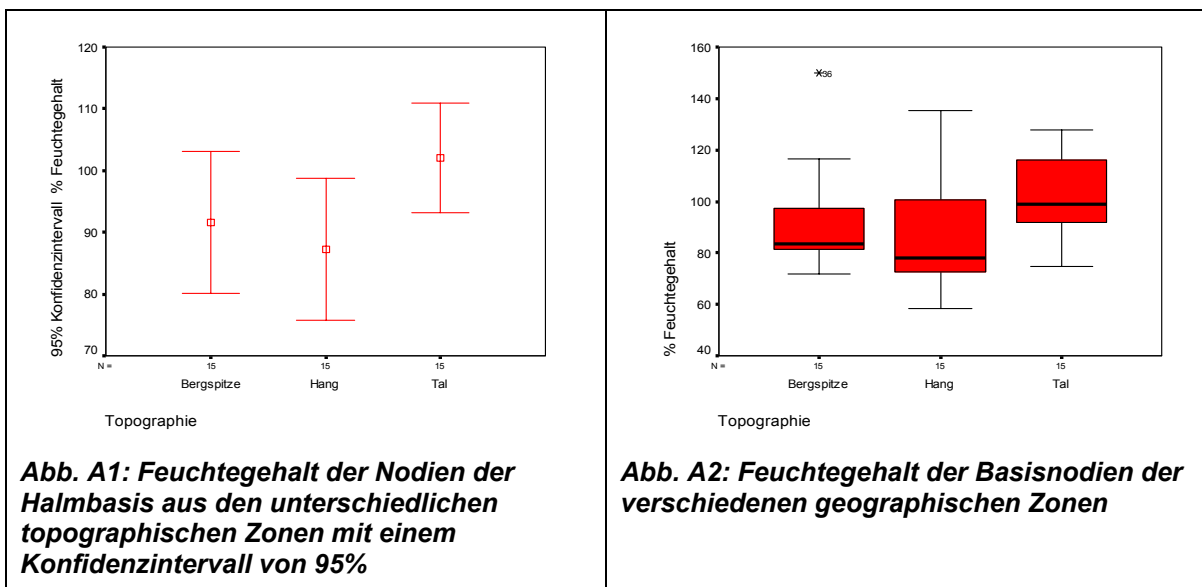
Anhang A

Analyse der Ergebnisse aus den unterschiedlichen topographischen Zonen



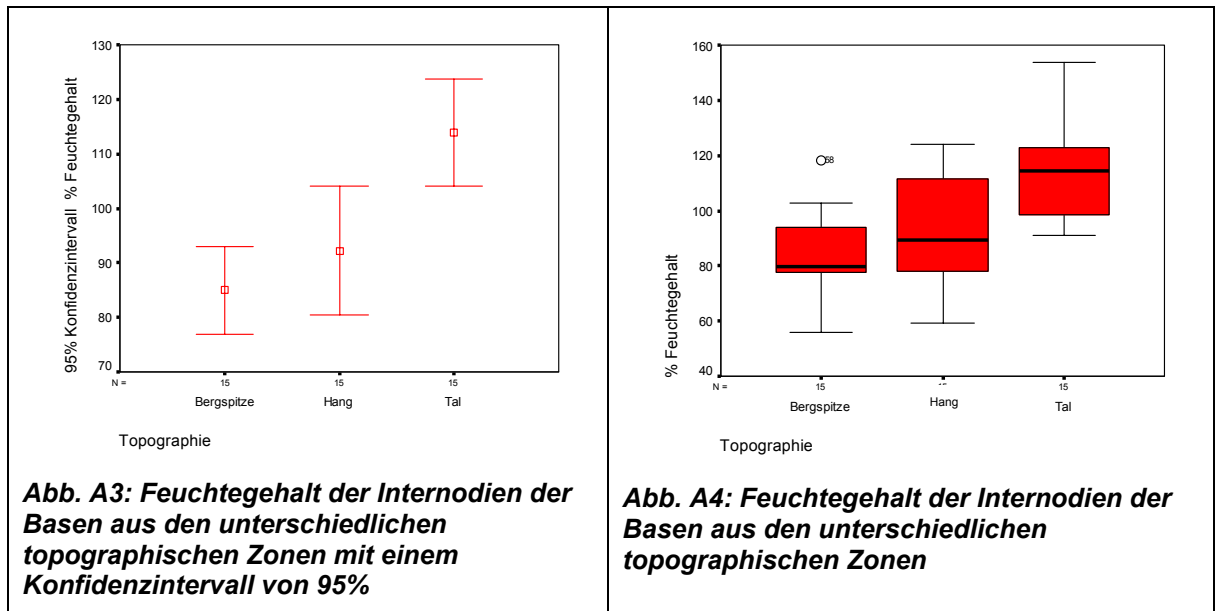
Basis				Halmmitte				
Bergspitze	Hang	Tal	Bergspitze	Hang	Tal			
1	=	1	=	1		3	≠	3
2	=	2	≠	2		4	=	4

Varianzanalyse für Basisnodien



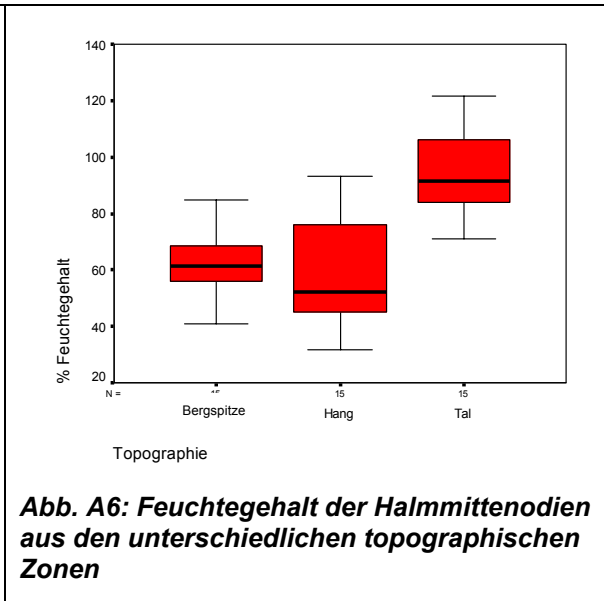
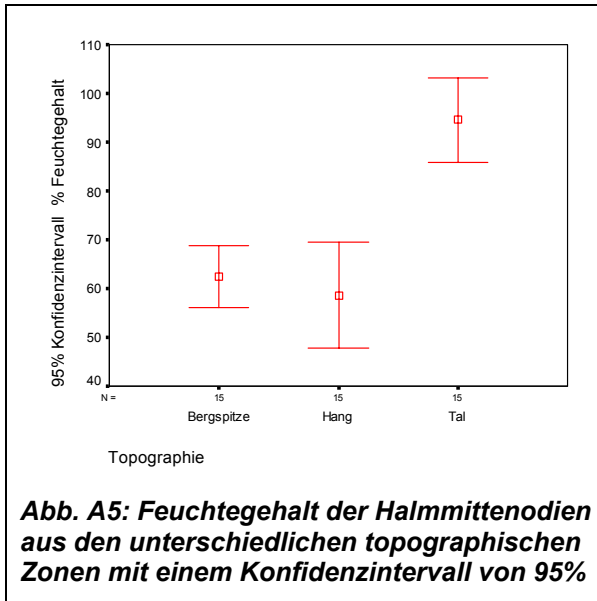
Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigen, dass es keine bedeutsamen Differenzen zwischen dem Feuchtegehalt in den *Basisnodien aus den drei untersuchten topographischen Zonen* gibt, da die *Signifikanz* größer als 0,05 ist. Dies wird in den *Abb. A1* und *Abb. A2* dargestellt. Die Hypothese 5.3 wird akzeptiert.

Varianzanalyse für die Basisinternodien.



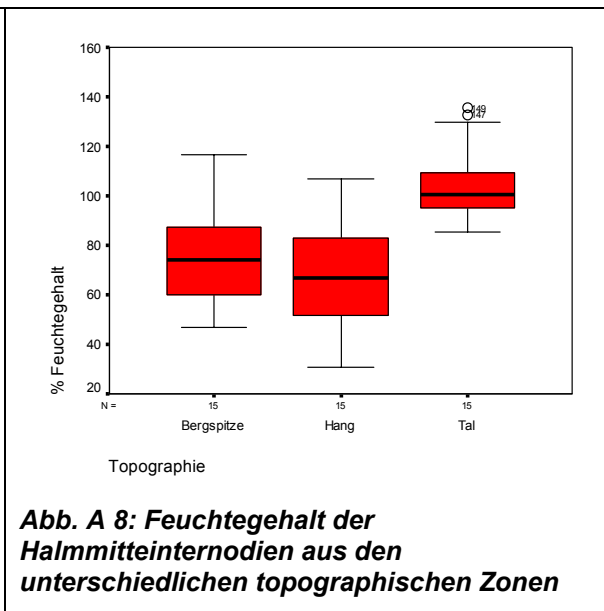
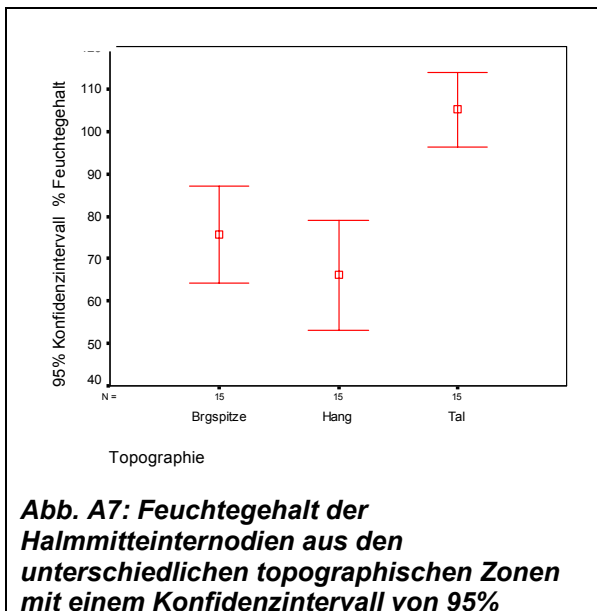
Die Ergebnisse aus der Varianzanalyse weisen dagegen bedeutende Unterschiede in den Feuchtegehalten der Basisinternodien aus den drei untersuchten topographischen Zonen auf. Die *Signifikanz* ist hier $< 0,05$ (*Abb. A3*) und (*Abb. A4*). Es treten statistische Unterschiede zwischen Tal-, Hang- und Spitzenlage auf. Daher wurden viele Vergleiche mit dem Tukey Test durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Vergleiche zeigen keine statistischen Unterschiede zwischen der Hang- und der Spitzenlage, aber in der Verbindung von der Hang- und Spitzenlage mit der Tallage. Deshalb wird hier die Hypothese 5.3 nicht akzeptiert.

Varianzanalyse der Halmmittenodien



Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigen bedeutende Unterschiede zwischen den Feuchtegehalten der Halmmittenodien aus den drei untersuchten Höhenlagen auf. Die *Signifikanz* ist hier $< 0,05$ (Abb. A5). Auch hier wurde der Tukey Test durchgeführt. Die Hypothese 5.3 wird nicht akzeptiert.

Varianzanalyse der Halmmitteinternodien



Die Ergebnisse der Varianzanalyse zeigen, dass es bedeutende Unterschiede zwischen dem Feuchtegehalt der Halmmitteinternodien aus den drei untersuchten Höhenlagen gibt, da die *Signifikanz* kleiner als 0,05 ist (Abb. A7). Hier wurde der gleiche Tukey-Test angewandt. Dieser Test ergab, dass es eigentlich keine bedeutenden Unterschiede zwischen der Hang- und Spitzenlage gibt. Es treten aber

zwischen der Hang-Spitzenlage und der Talzone Unterschiede auf. Die Hypothese 5.3 wird nicht akzeptiert.

Ergebnisanalyse über die gesamte Halmlänge

Feuchtegehaltsanalyse für die Bergspitzenzone

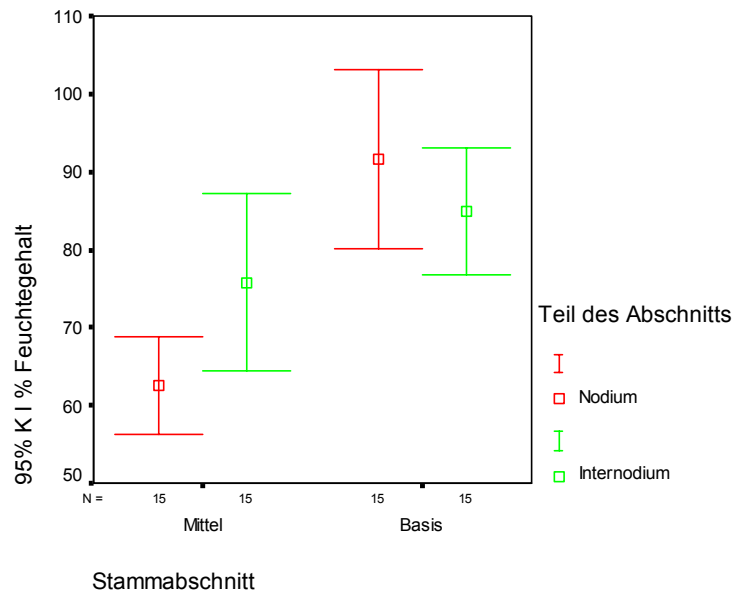


Abb. A 9: Feuchtegehalt über die Länge eines Halmes aus der Spitzenzone mit einem Konfidenzintervall von 95%.

Die Abb. A9 zeigt keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den Halmmittennodien- und Halmmitteinternodienpaaren, zwischen den Basisnodien und den Basisinternodienpaaren und zwischen den Halmmitteinternodien- und den Basisinternodienpaaren an. Daher wird hier der t-Test eingeführt. Zuerst wird das 1. Paar, Halmmittenodium und Basisnodium, und darauf das 2. Paar mit den Halmmitteinternodium und den Basisinternodium wie folgt bestimmt:

Aus dem t-Test konnte entnommen werden, dass die *Signifikanz p* der Halmmittennodien und die Basisnodien aus der topographischen *Spitzenlage* $< 0,05$ ist. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.1, die Feuchtegehalte seien gleich, nicht akzeptiert wird, weil es bedeutende Unterschiede gibt. Im Falle der Halmmitteinternodien und der Basisinternodien aus der topographischen *Spitzenzone* ist die *Signifikanz p* $> 0,05$. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.1, die Feuchtegehalte seien gleich, akzeptiert wird.

Der mit den Probenpaaren durchgeführte t-Test ergab für die Halmmittennodien und die Halmmitteinternodien aus der topographischen *Spitzenlage* eine *Signifikanz von p* $<$

0,05. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.2, die Feuchtegehalte seien gleich, nicht akzeptiert wird, weil es bedeutende statistische Unterschiede gibt. Im Falle der Basisinternodien und der Basisnodien aus der topographischen *Spitzenzone* ist die *Signifikanz* $p > 0,05$. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.2, die Feuchtegehalte seien gleich, akzeptiert wird.

Untersuchung des Feuchtegehaltes der Hangzone

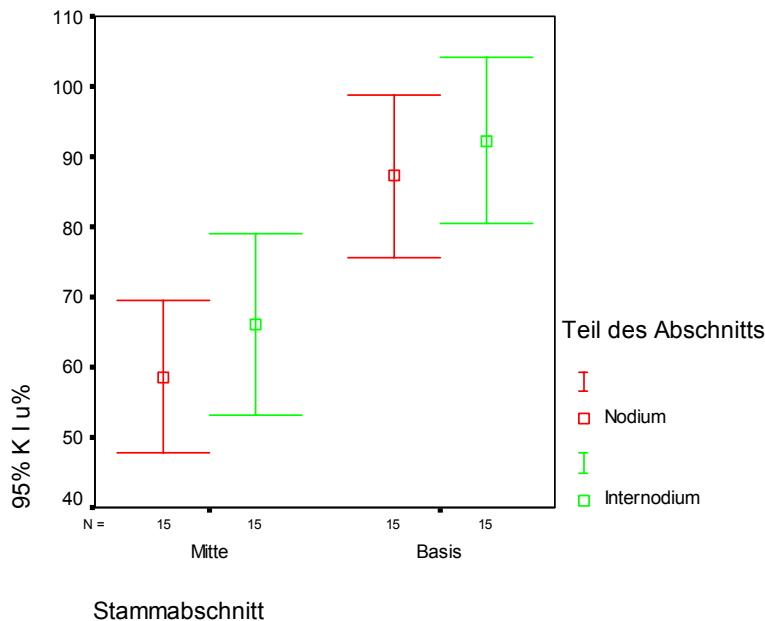


Abb. A 10: Feuchtegehalt über die Länge eines Halmes aus der Hangzone mit einem Konfidenzintervall von 95%.

Der mit den Probenpaaren durchgeführte t-Test ergab, dass sowohl die Ergebnisse des 1. Paares als auch des 2. Paares, beziehungsweise die Halmmittenodien und die Basisnodien aus der topographischen *Hanglage* und das Paar der Halmmittelnodien und den Basisinternodien, eine *Signifikanz* von $p < 0,05$ aufweisen. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.1, die Feuchtegehalte seien gleich, nicht akzeptiert wird, weil es bedeutende statistische Unterschiede in der *Hanglage* gibt.

Der mit den Probenpaaren durchgeführte t-Test ergab, dass die Halmmittenodien und die Halmmittelnodien aus der topographischen *Hanglage* eine *Signifikanz* von $p < 0,05$ haben. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.2, die Feuchtegehalte seien gleich, nicht akzeptiert wird, weil es bedeutende statistische Unterschiede gibt. Im Falle der Basisnodien und der Basisinternodien ist die *Signifikanz* $p > 0,05$. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.2, die Feuchtegehalte seien gleich, akzeptiert wird.

Analyse des Feuchtegehaltes für die Talzone

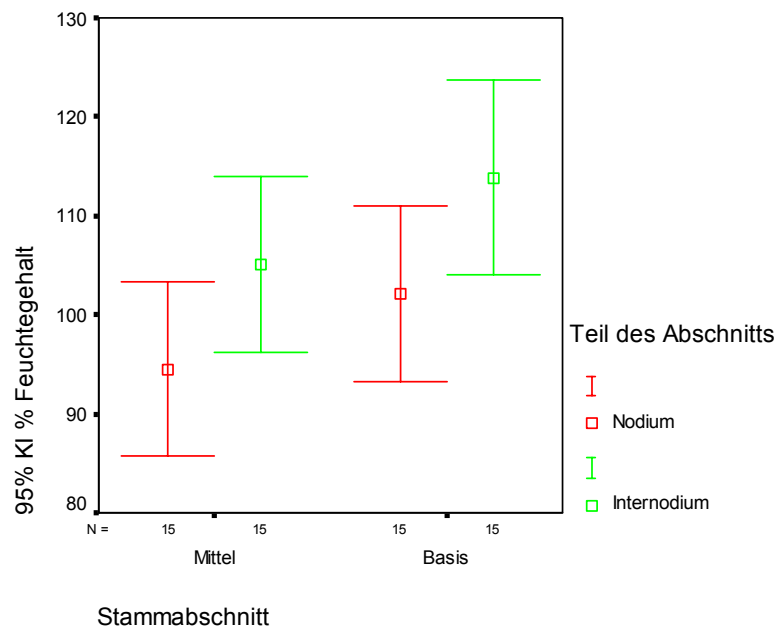
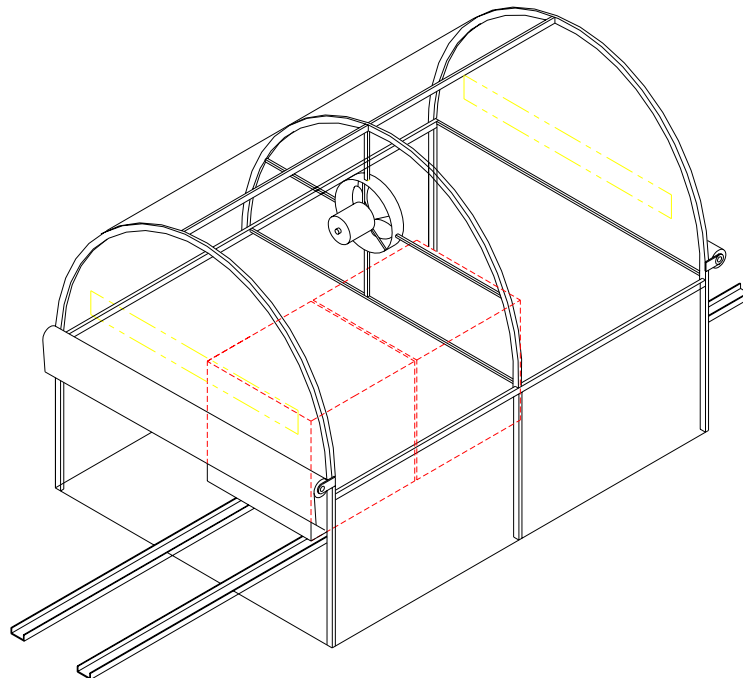
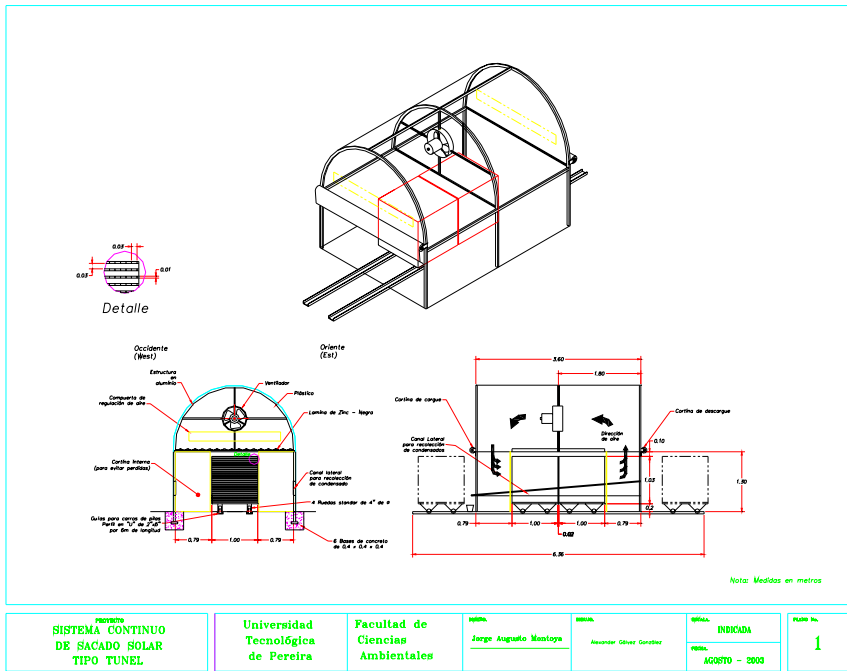


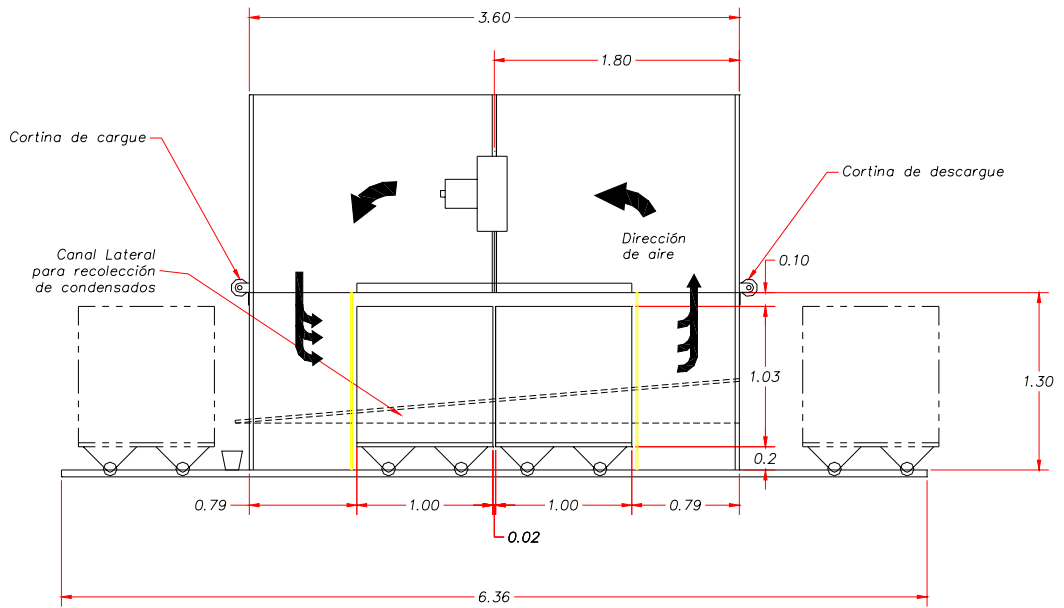
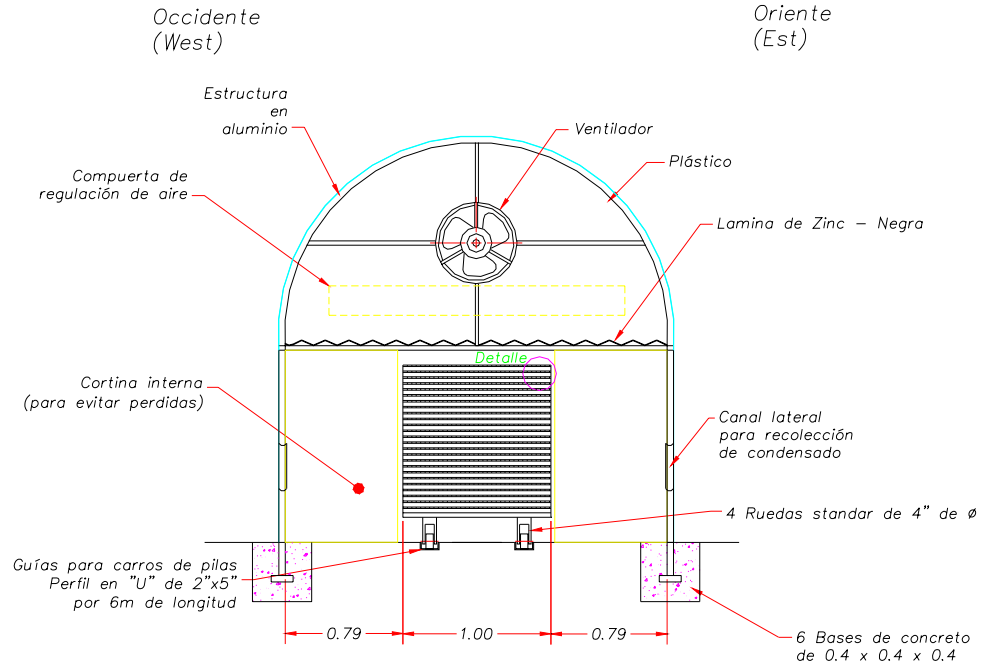
Abb. A 11: Feuchtegehalt über die Länge eines Halmes aus der Hangzone mit einem Konfidenzintervall von 95%.

Der mit den Probenpaaren durchgeführte t-Test ergab, dass die Halmmittennodien und die Basisnodien aus der topographischen *Tallage* eine *Signifikanz* von $p > 0,05$ besitzen. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.1, die Feuchtegehalte seien gleich, akzeptiert wird, weil es keine bedeutenden statistischen Unterschiede gibt. Für das 2. Paar, der Halmmitteinternodien und der Basisinternodien, ist die *Signifikanz* $p > 0,05$. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.1, die Feuchtegehalte seien gleich, akzeptiert wird.

Der mit den Probenpaaren durchgeführte t-Test ergab, dass die Halmmittennodien und die Halmmitteinternodien aus der topographischen *Tallage* eine *Signifikanz* von $p < 0,05$ besitzen. Das bedeutet, dass die Nullhypothese 5.2, die Feuchtegehalte seien gleich, nicht akzeptiert wird, weil es bedeutende statistische Unterschiede gibt. Für das 2. Paar, der Basisnodien und der Basisinternodien, ist die *Signifikanz* $p < 0,05$. Das bedeutet, dass auch hier die Nullhypothese 5.2, die Feuchtegehalte seien gleich, nicht akzeptiert wird. In der *Abb. A11* werden die Unterschiede verdeutlicht.

Anhang B





Anhang C

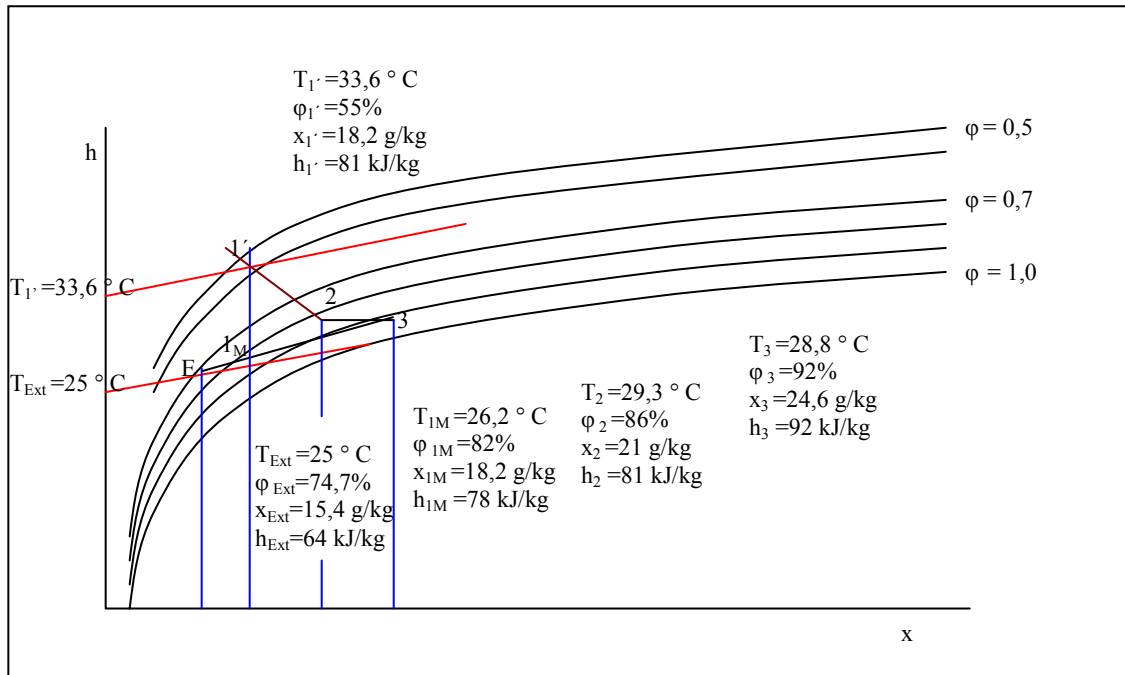
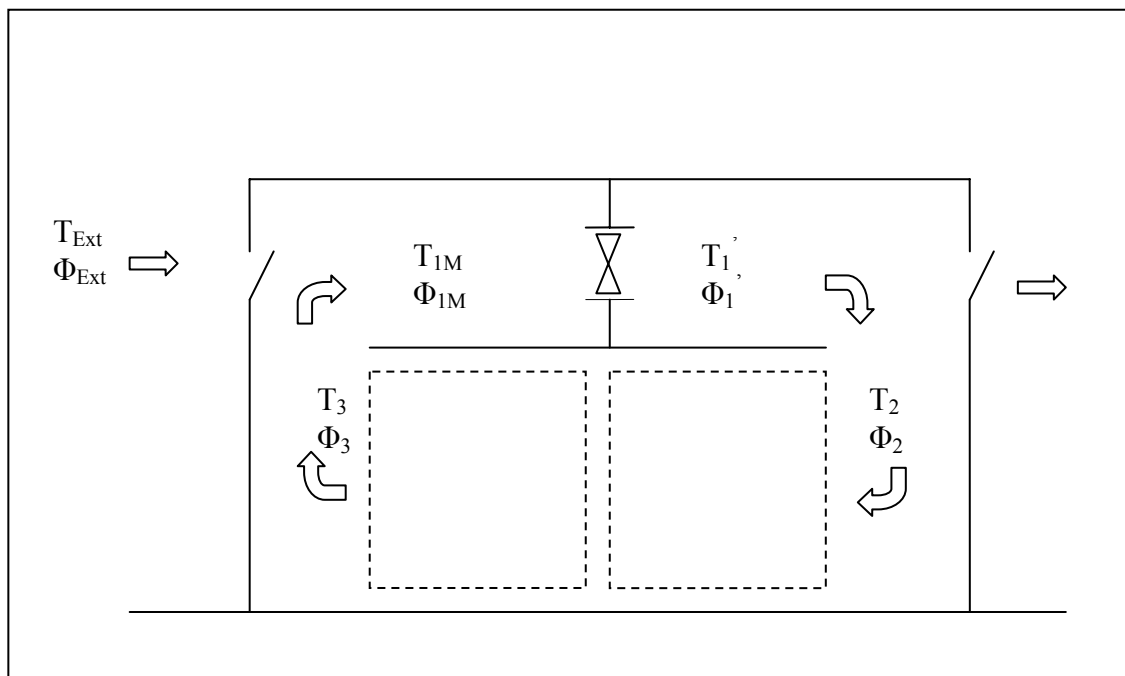
Luftzustände im Solartrockner bei der Trocknung von *Guadua angustifolia*

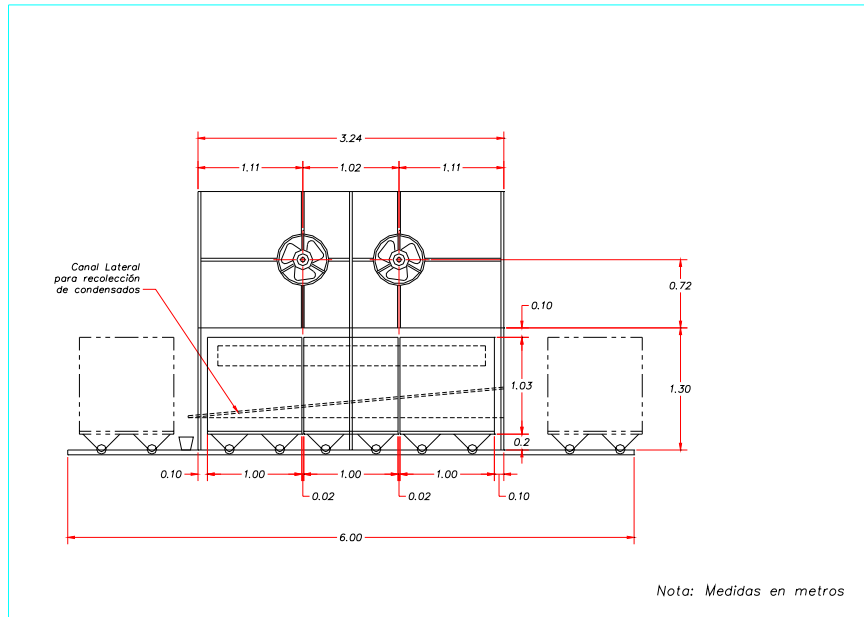
Abb. Luftzustände im Solartrockner bei der Trocknung von *Guadua angustifolia* dargestellt im Molliert-h,x Diagramm (schematisch)



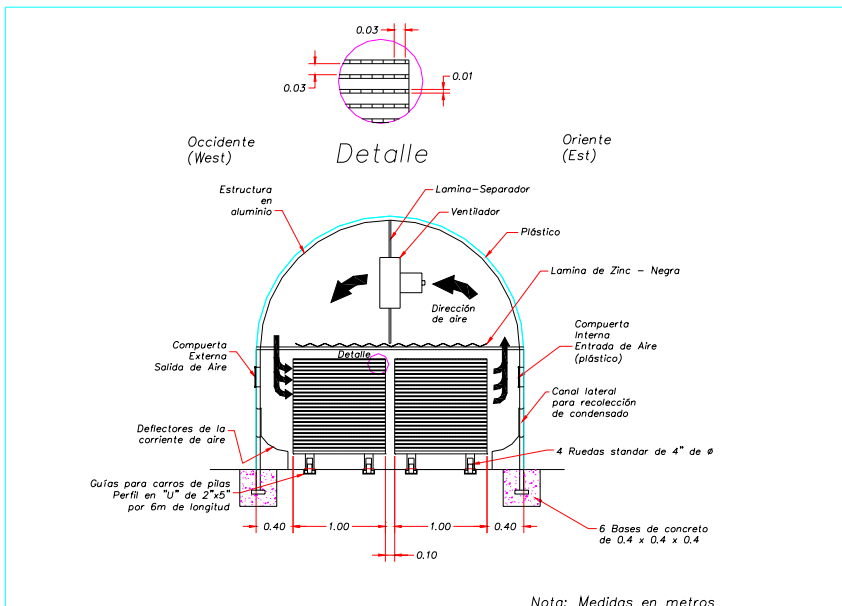
Meßorte:

- 1M** Mischluftzustand aus Mollier-h,x-Diagramm
1' unmittelbar auf Kollektor-Oberfläche
2 unmittelbar Lufteintritt in Stapel
3 unmittelbar Luftaustritt aus Stapel
Ext Umgebung Trockner

Anhang D

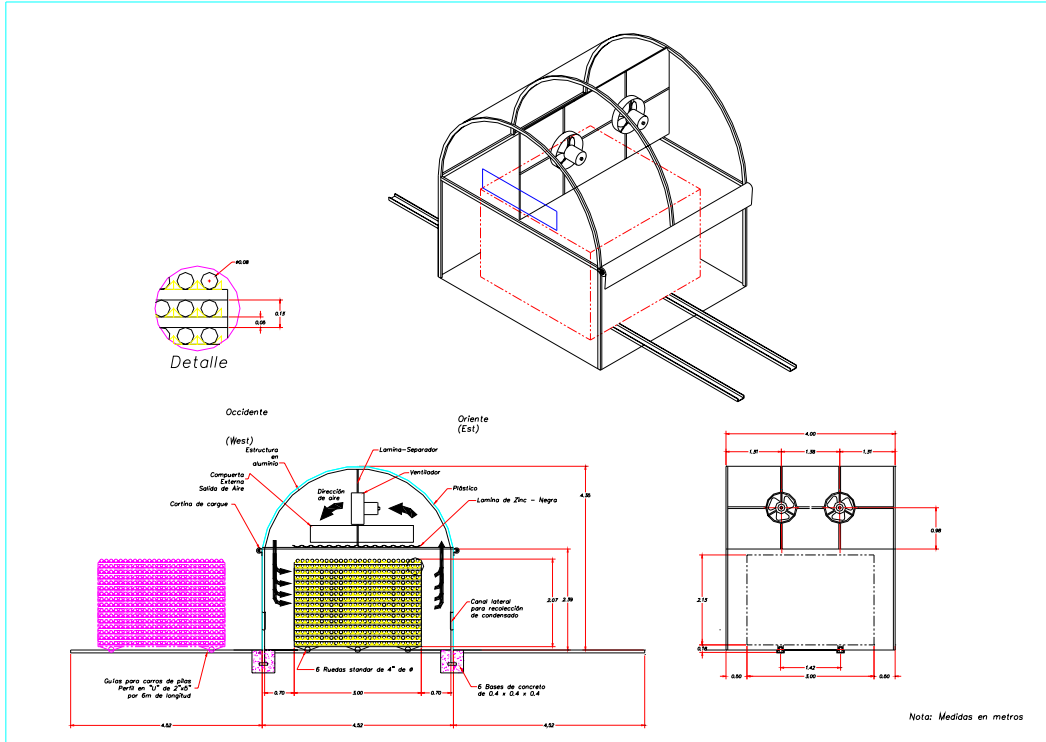


PROYECTO SISTEMA CONTINUO DE SACADO SOLAR	Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de Ciencias Ambientales	ALUMNO Jorge Augusto Montoya	ASesor Alexander Gómez González	FECHA INDICADA AGOSTO - 2003	PLANO No. 3
---	--	---------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	-----------------------

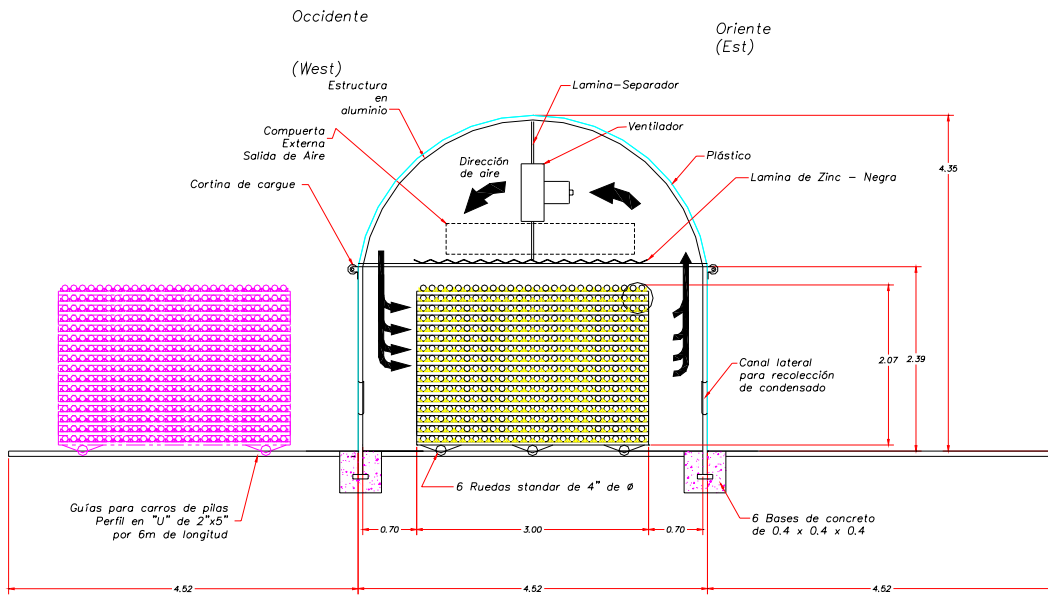


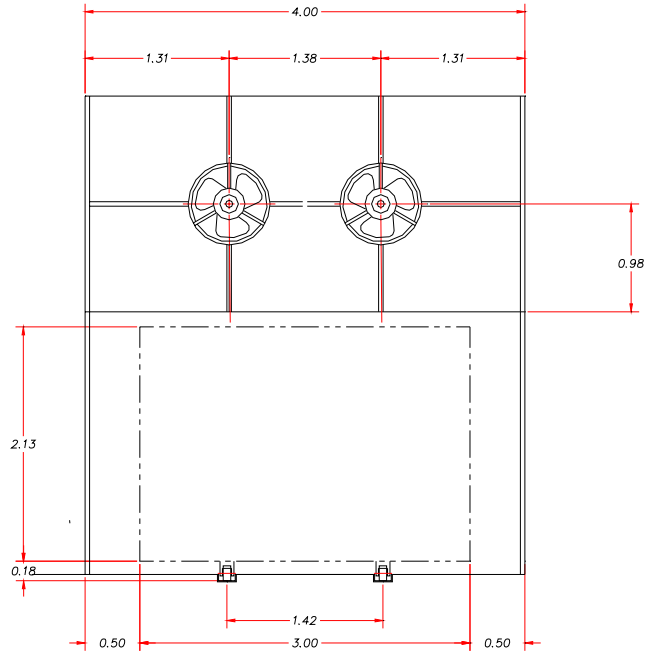
PROYECTO SISTEMA CONTINUO DE SACADO SOLAR	Universidad Tecnológica de Pereira Facultad de Ciencias Ambientales	ALUMNO Jorge Augusto Montoya	ASesor Alexander Gómez González	FECHA INDICADA AGOSTO - 2003	PLANO No. 2
---	--	---------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	-----------------------

Anhang E

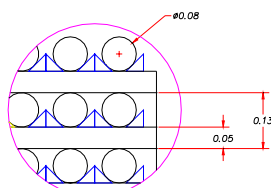
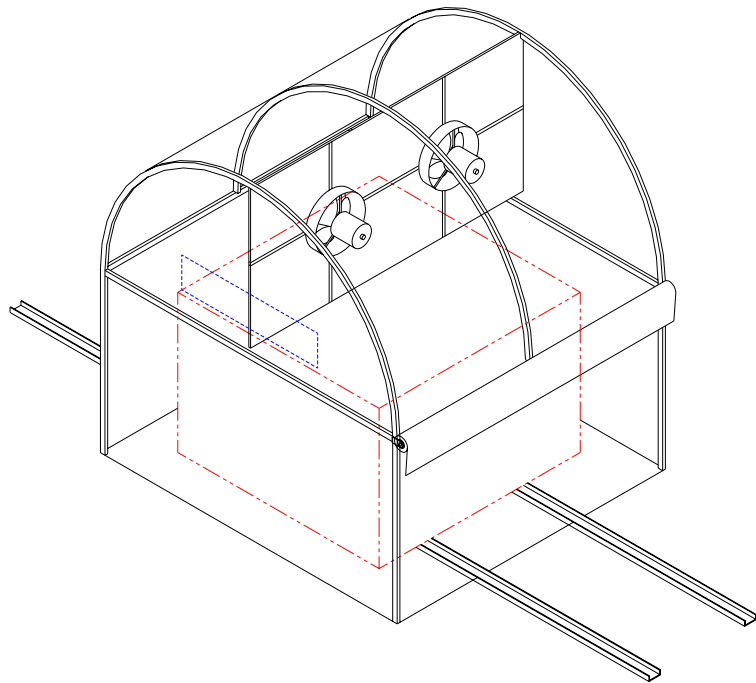


<p>PROYECTO SISTEMA TRANSVERSAL DE SACADO SOLAR PARA GUADUA ROLLIZA</p>	<p>Universidad Tecnológica de Pereira</p>	<p>Facultad de Ciencias Ambientales</p>	<p>DESIGN. Jorge Augusto Montoya</p>	<p>REVISOR. Alexander Gómez González</p>	<p>ESCALA. INDICADA</p> <p>FECHA. AGOSTO - 2003</p>	<p>PLANO No. 1</p>
--	--	--	---	---	---	-------------------------------



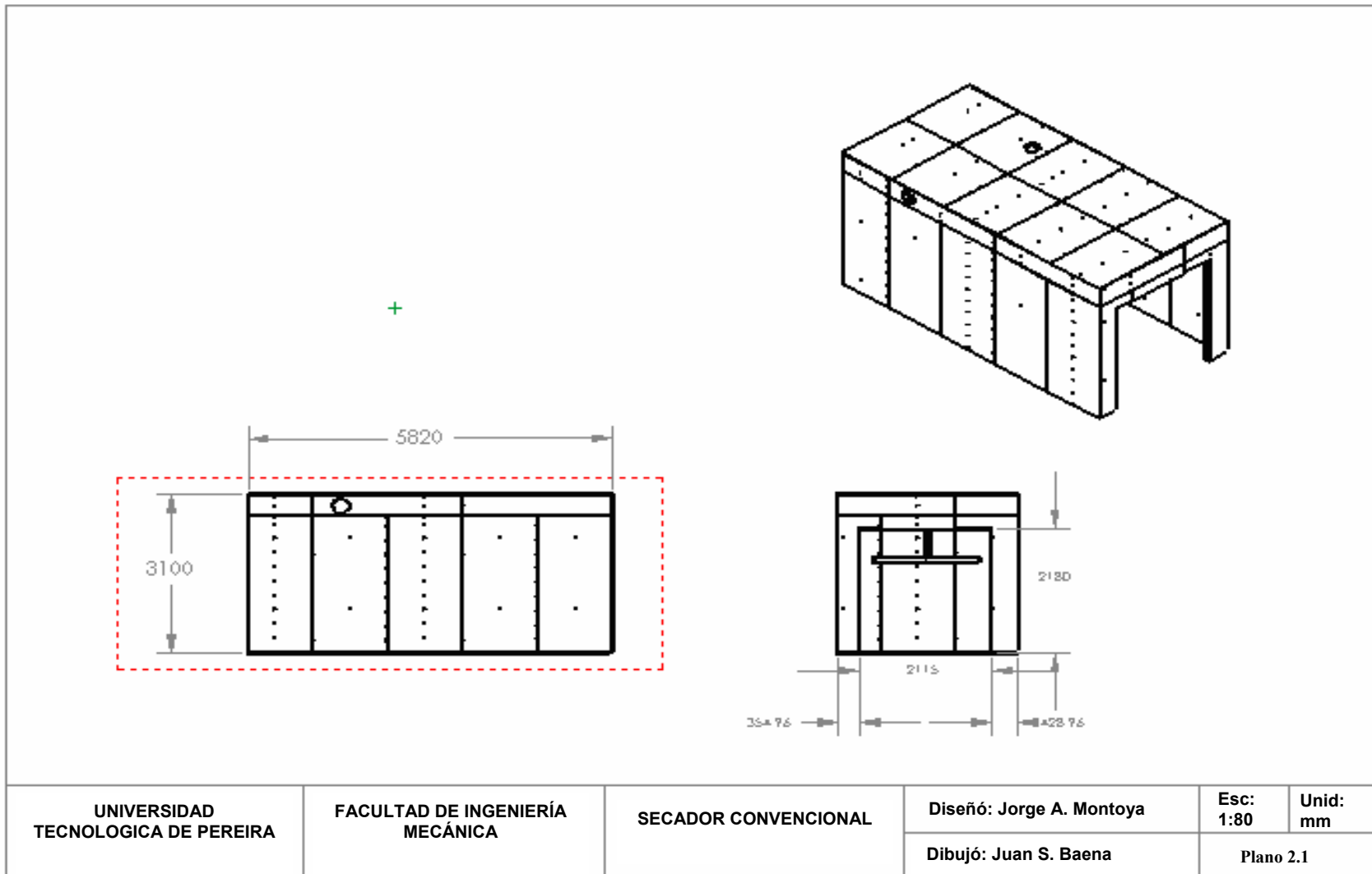


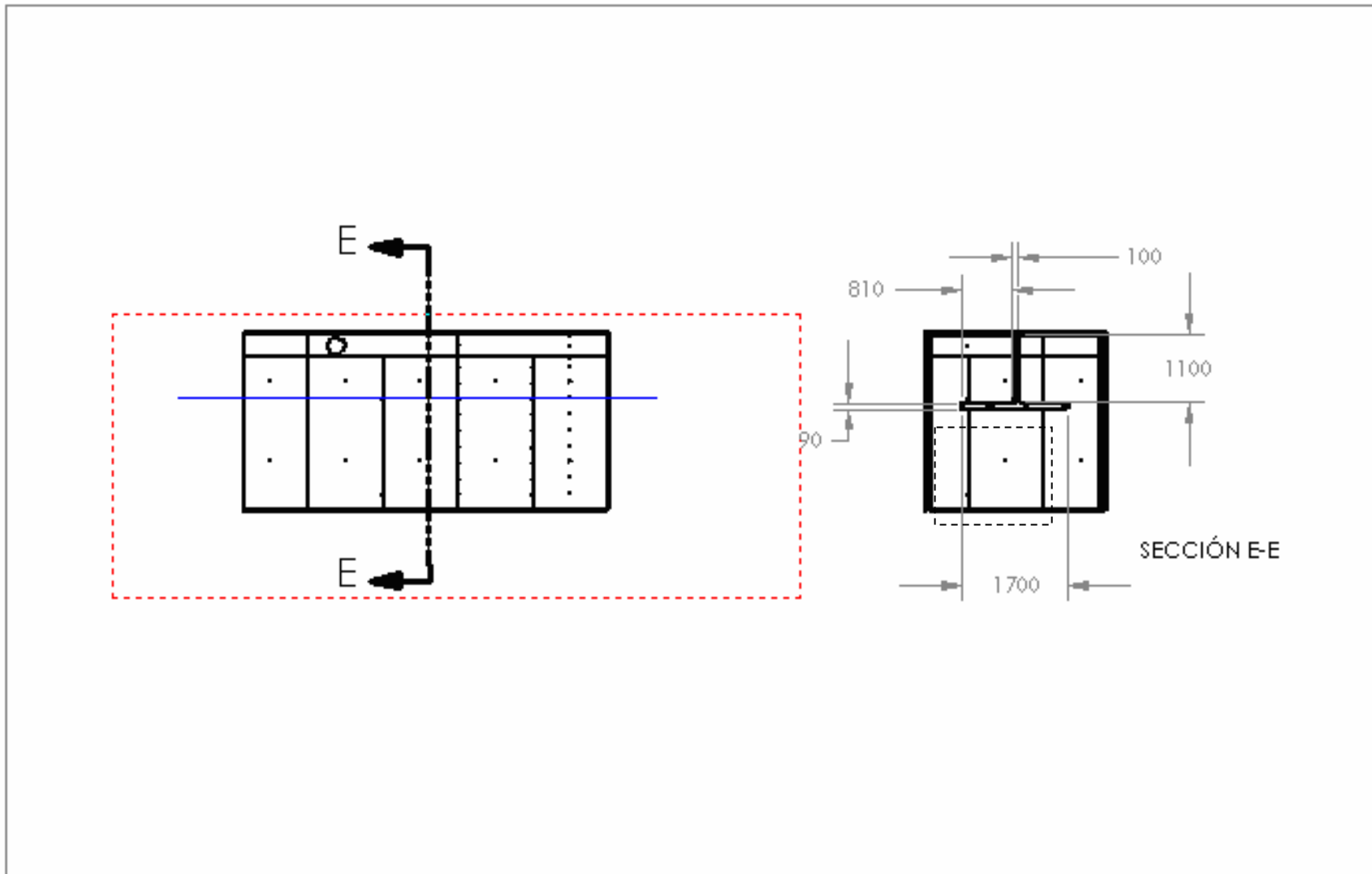
Nota: Medidas en metros



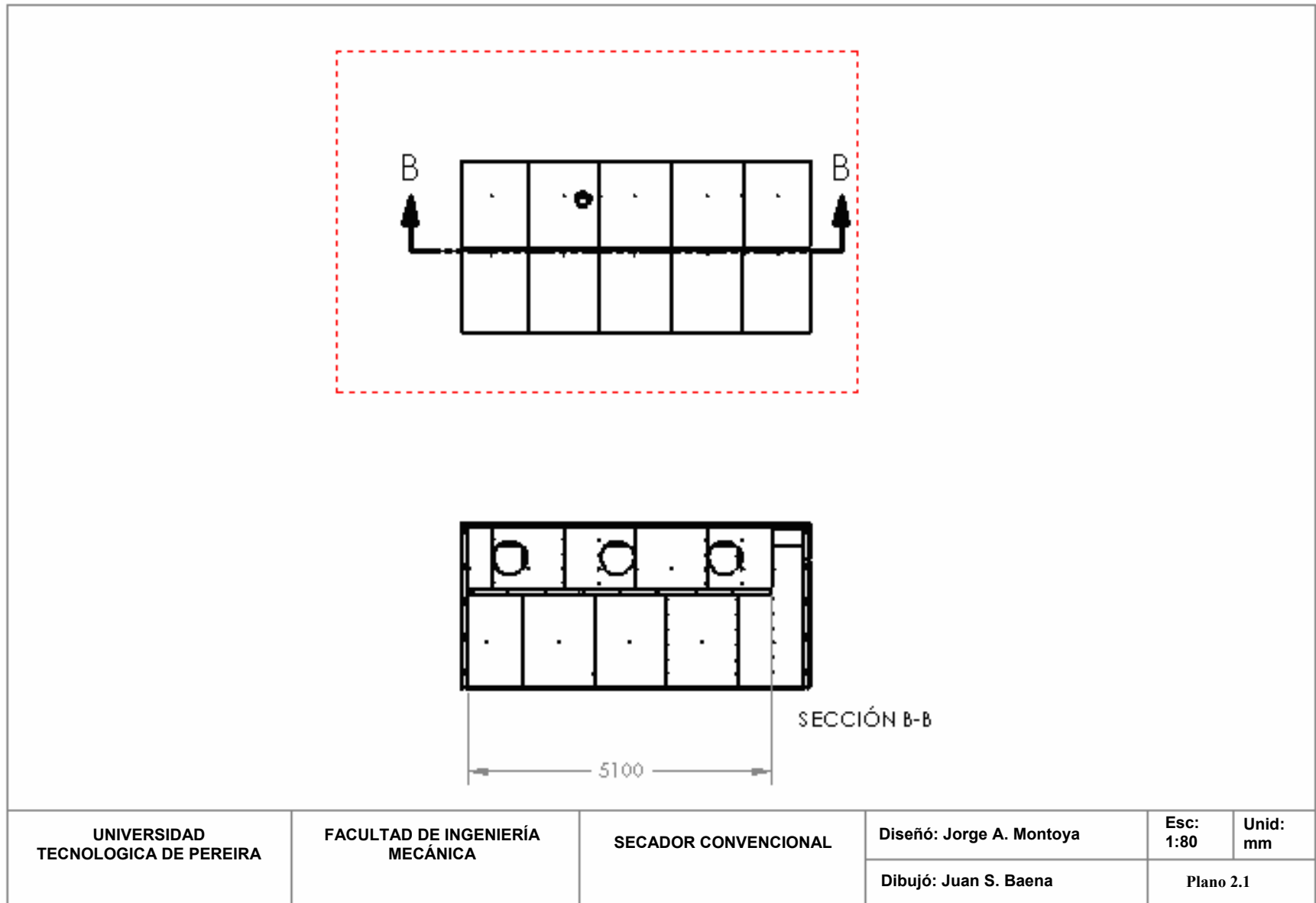
Detalle

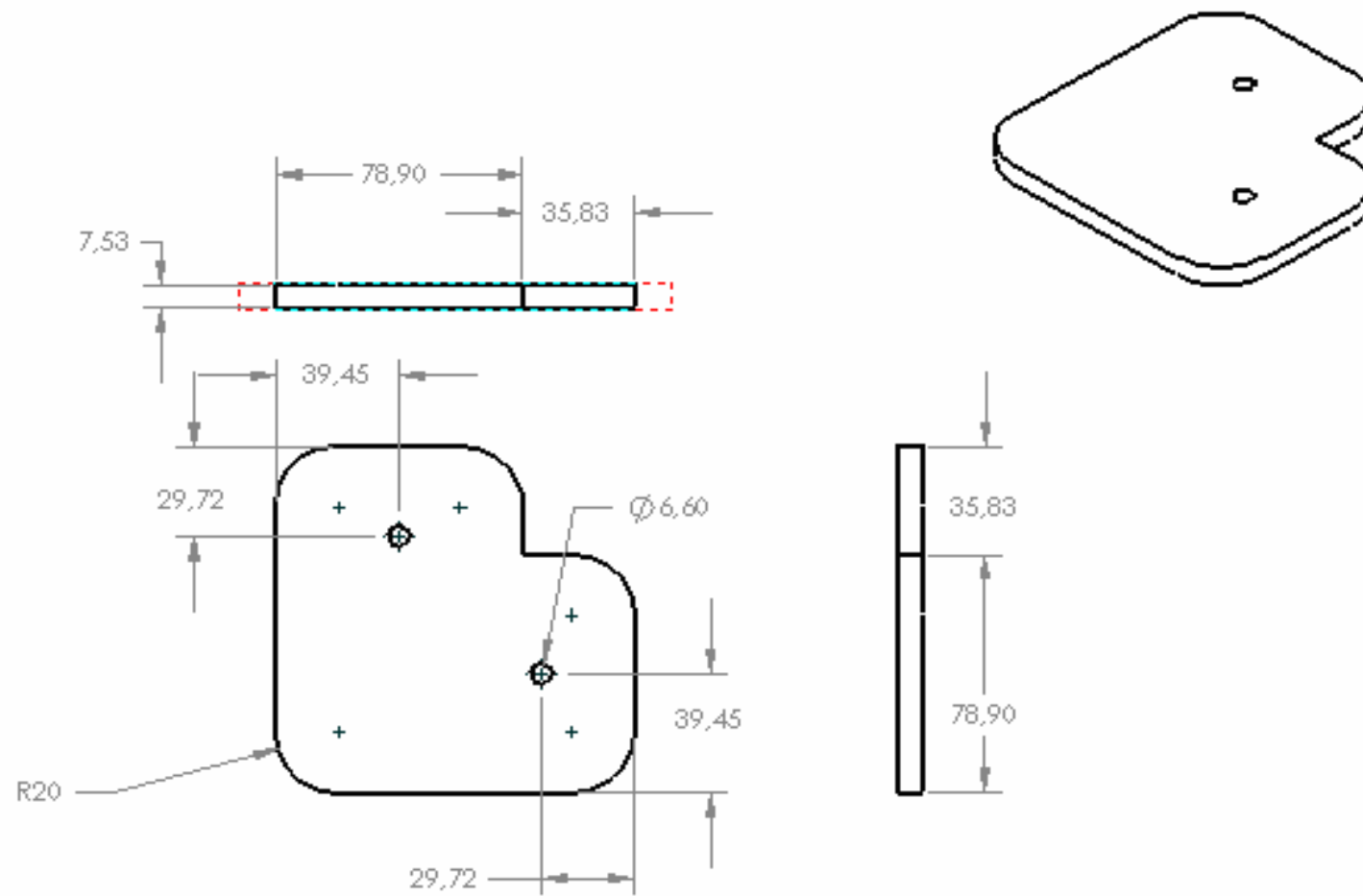
Anhang F



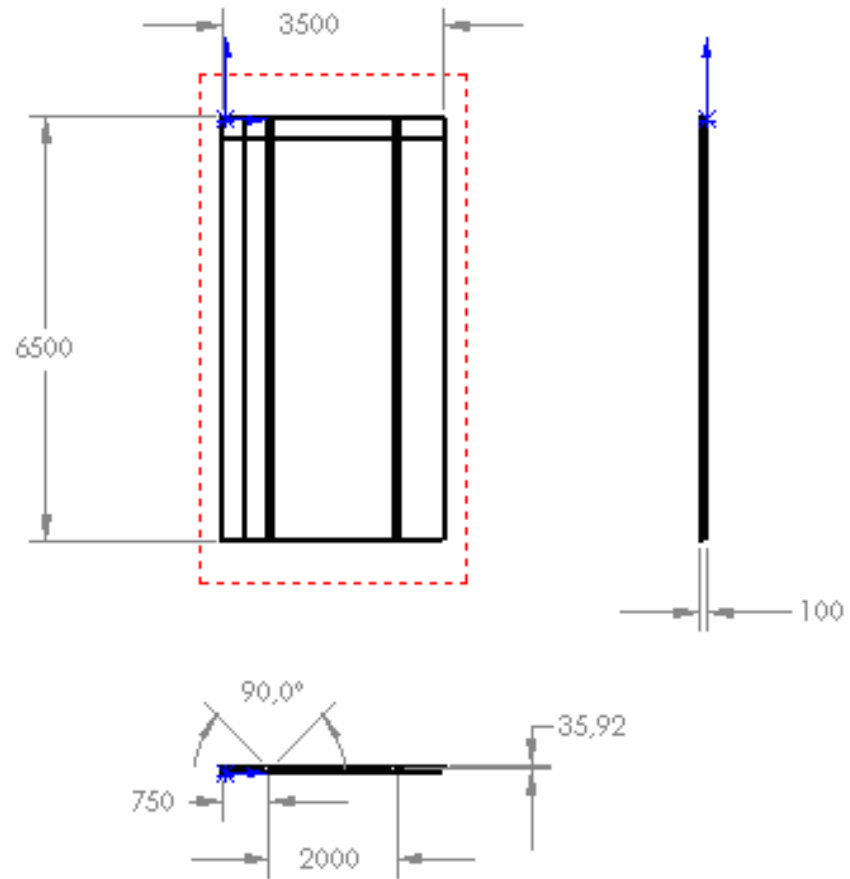


UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	SECADOR CONVENCIONAL	Diseño: Jorge A. Montoya	Esc: 1:80	Unid: mm
			Dibujó: Juan S. Baena	Plano 2.1	

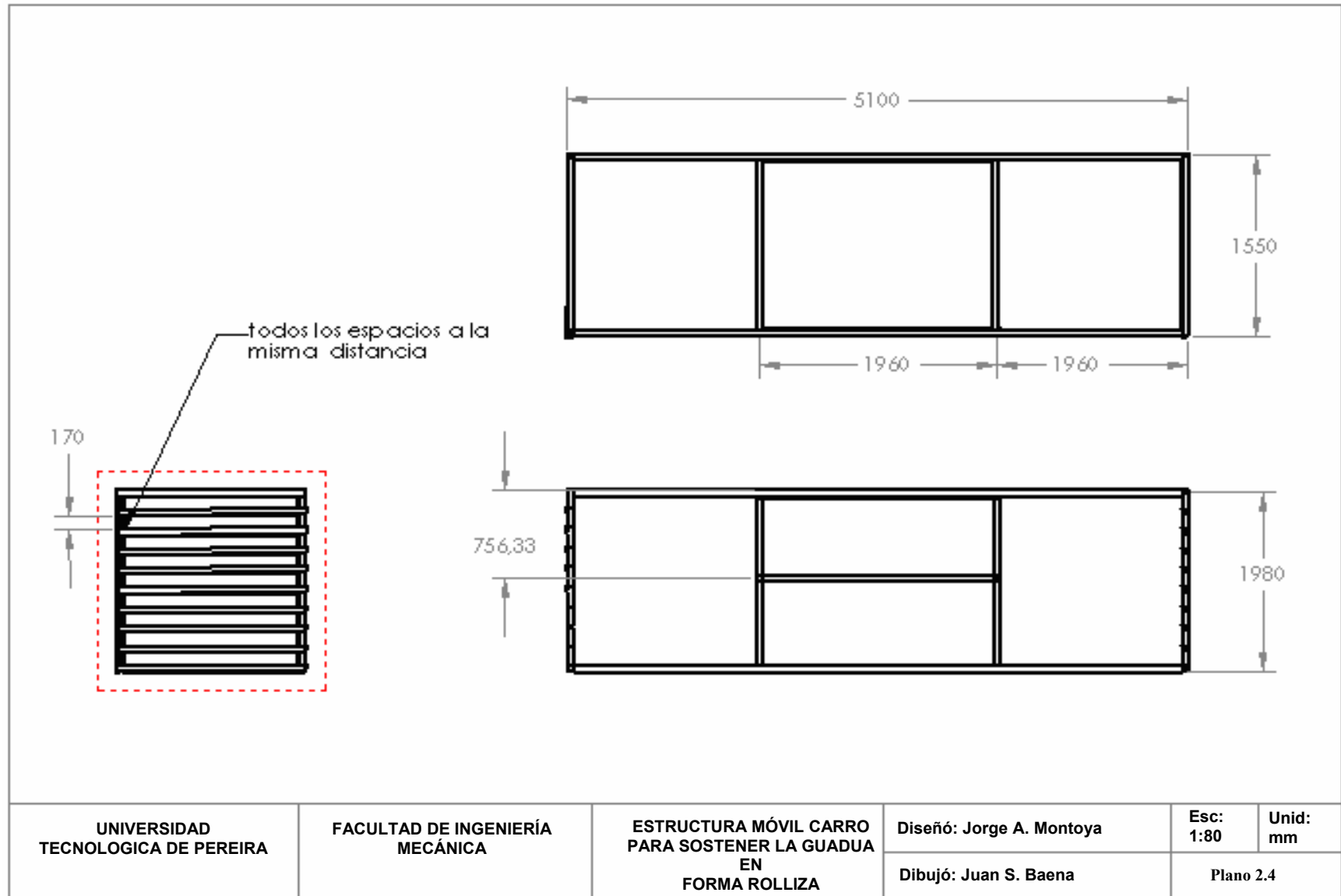


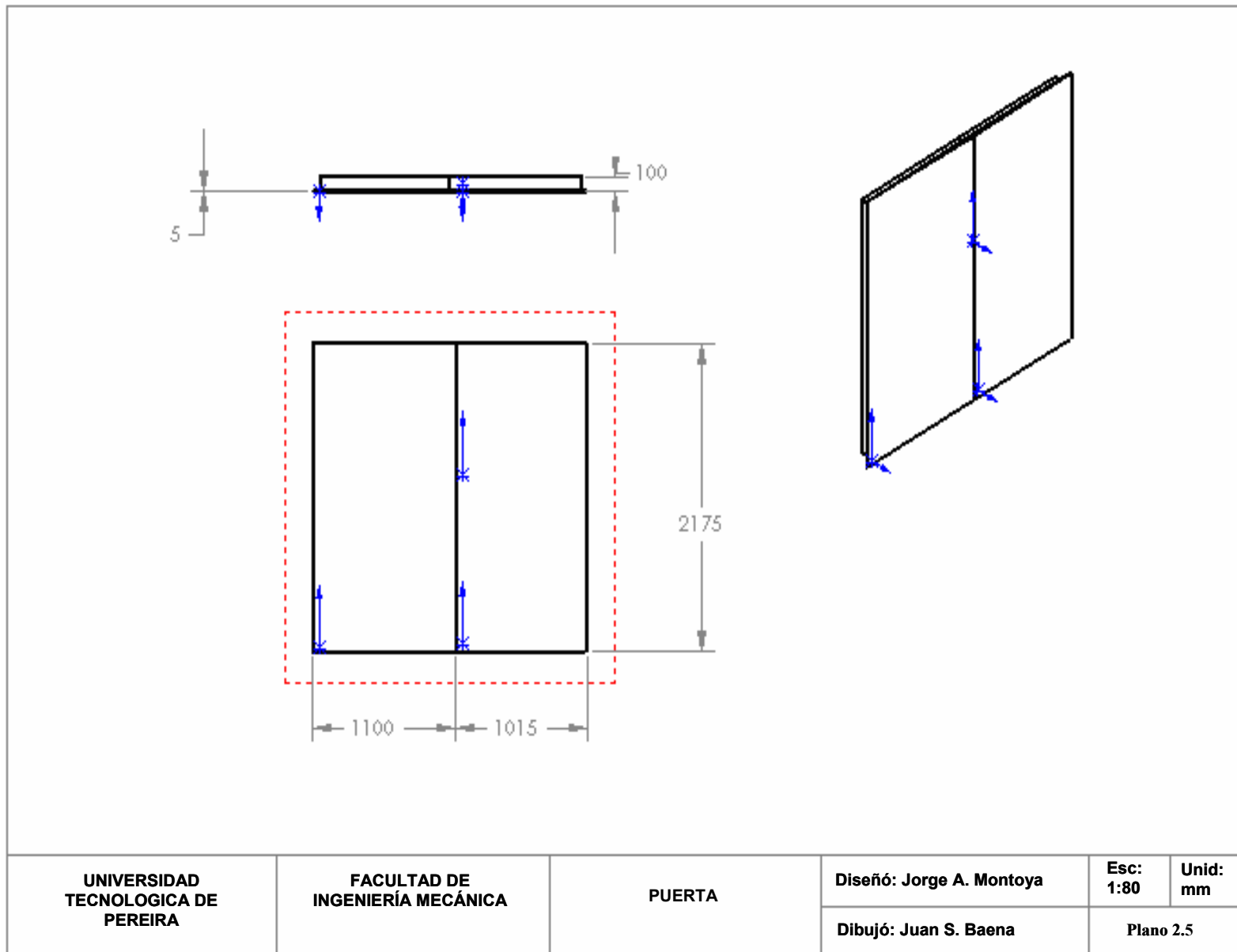


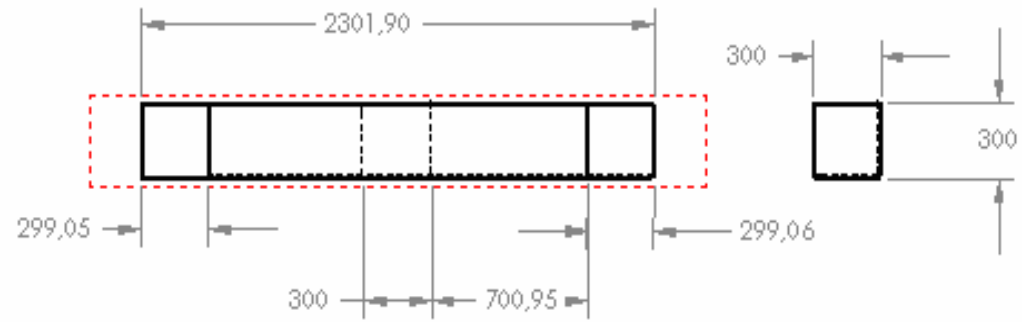
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	UNIÓN RÍGIDA	Diseño: Jorge A. Montoya	Esc: 1:80	Unid: mm
			Dibujó: Juan S. Baena	Plano 2.2	



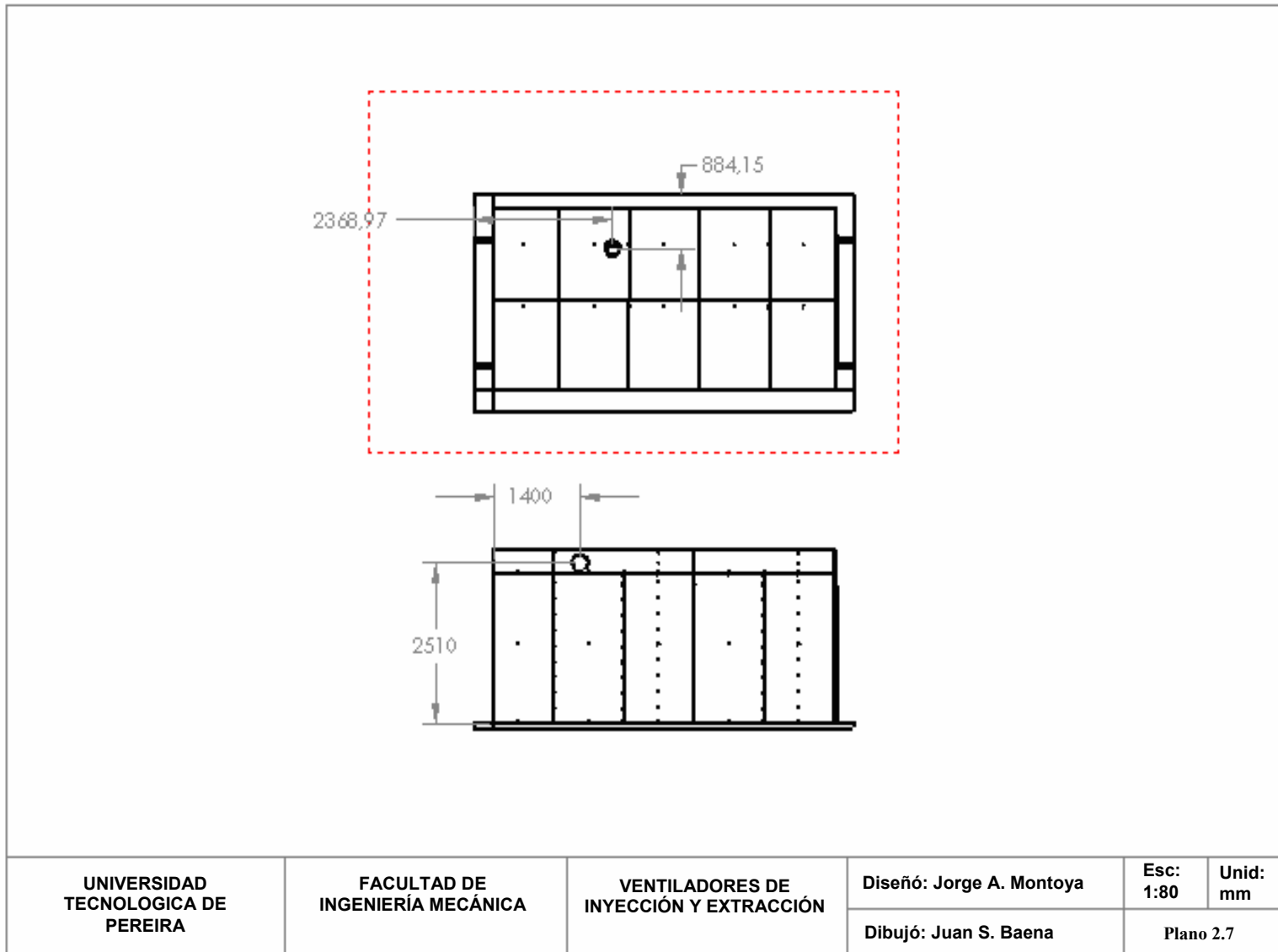
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	RIELES DEL PISO SECADOR PARA CARRO DE CARGA	Diseño: Jorge A. Montoya	Esc: 1:80	Unid: mm
			Dibujó: Juan S. Baena	Plano 2.3	

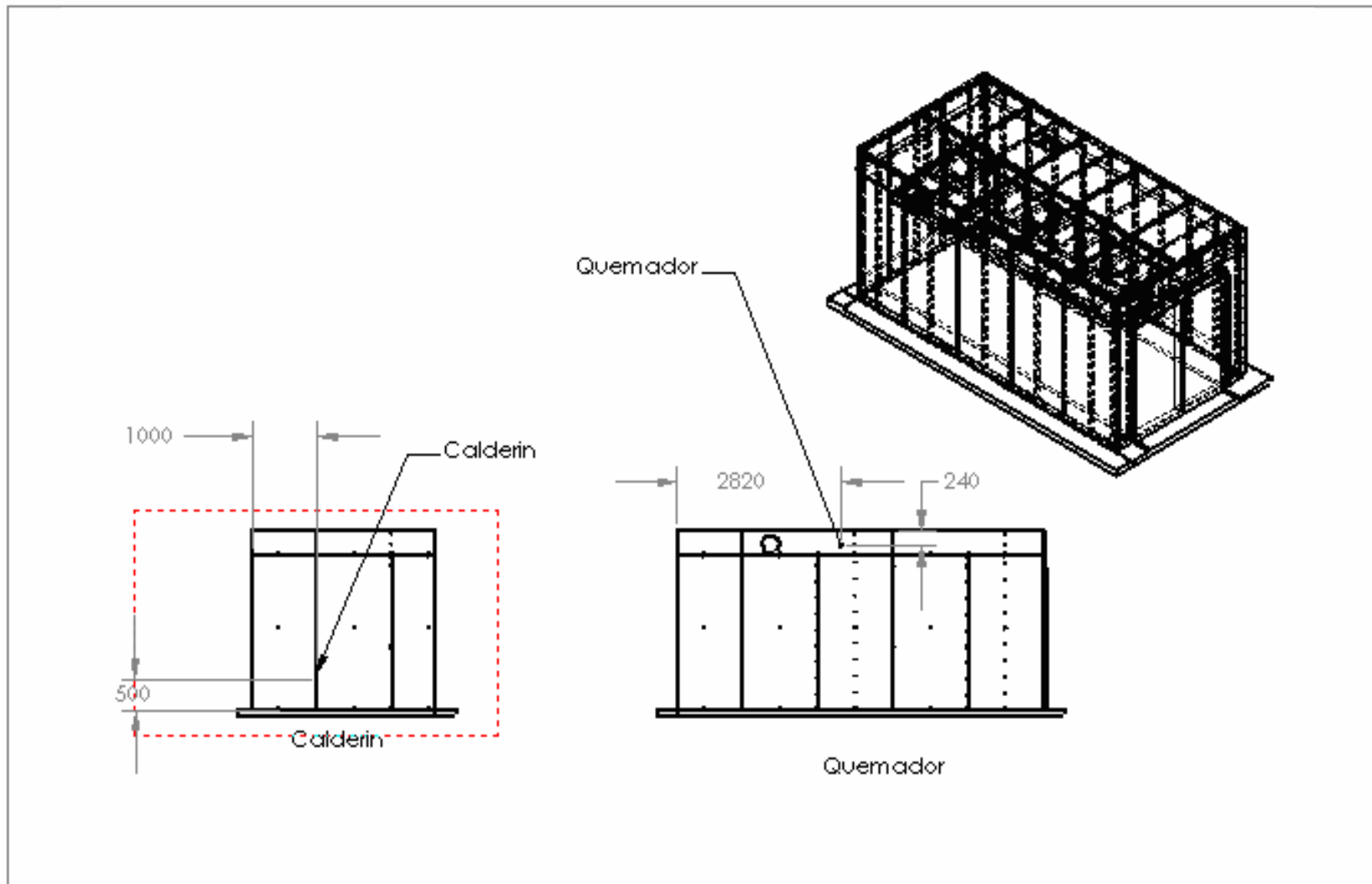




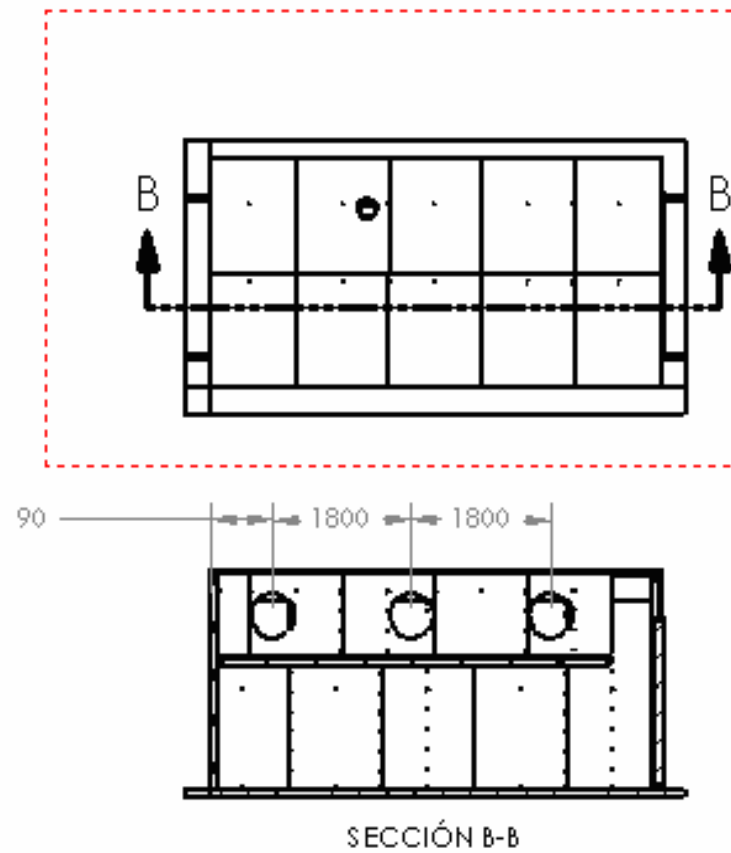


UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	DUCTO QUEMADOR	Diseño: Jorge A. Montoya	Esc: 1:80	Unid: mm
			Dibujó: Juan S. Baena	Plano 2.6	





UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	QUEMADOR CALDERÍN	Diseño: Jorge A. Montoya	Esc: 1:80	Unid: mm
			Dibujó: Juan S. Baena	Plano 2.8	



UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	VENTILADORES DE RECIRCULACIÓN	Diseño: Jorge A. Montoya	Esc: 1:80	Unid: mm
			Dibujó: Juan S. Baena	Plano 2.9	

