

Campus Klein-Altendorf
Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe

Prototypenentwicklung eines solaren Trockners für holzartige Biomasse

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

Mit Genehmigung der
Landwirtschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von
Jan Schalk, MSc.
aus
Bielefeld

Bonn, 2017

Referent: Prof. Dr. agr. Ralf Pude

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Tag der mündlichen Prüfung: 04.01.2017

Erscheinungsjahr: 2017

Prototypenentwicklung eines solaren Trockners für holzartige Biomasse

Eine energieeffiziente Verbrennung von Holz ist grundsätzlich nur möglich, wenn die Biomasse einen adäquat niedrigen Wassergehalt aufweist. Zur Aufbereitung der standorteigenen Biomasse aus Obstbauplantagen wurde an der Universität Bonn ein indirekter solarer Satzrockner mit einem Fassungsvermögen von 50 m³ und elektrischer Luftförderung entwickelt. Ziel der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit ist es, die durchgeführten Versuche, die praktische Konstruktionsarbeit am Trockner, dessen Test und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu dokumentieren und auszuwerten.

Die Grundkonstruktion besteht aus einem zylindrischen Trockengutbehälter mit einer Höhe von 5,13 m und einem Durchmesser von 3,58 m, dessen äußere Oberfläche zu einem Solarkollektor umfunktioniert wurde.

Der Trockner wurde über einen Zeitraum von acht Wochen getestet, in denen die Trocknungsluft kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von 0,06 m s⁻¹ durch die Hackgutschüttung gefördert wurde. Die Nennleistung des Ventilators von 4 kW wurde dabei lediglich zu etwa einem Achtel genutzt.

In der Versuchszeit wurden Hackschnitzel der Größenklasse P16 (DIN EN 14961-4:2011-9) mit einem Anfangswassergehalt von 40,25% auf 11,73% getrocknet. Obwohl die Schütthöhe 5 m betrug, konnten zum Zeitpunkt des Gutaustrags keine nassen Zonen bzw. Schimmelbildung festgestellt werden.

Durch die Aufzeichnung von Temperaturwerten in der Schüttung und im Solarkollektor konnte zudem dessen Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden. Der maximale Temperaturhub lag hier bei 6,8 K und im Durchschnitt bei 1,18 K.

Während des Trocknungsvorgangs kam es zu keinerlei technischen Ausfällen des Systems, jedoch versagte die Entnahmeeinrichtung zum Zeitpunkt der Hackgutausfuhr. Der Grund hierfür liegt in einem zu leistungsschwachen Elektromotor, der nicht fähig ist, das Rührwerk im Innern des Trockengutbehälters zu rotieren.

Nach der Testphase am Campus Klein-Altendorf wurde ein Feldversuch in Nepal durchgeführt, für den ein weiterer Trockner nach dem gleichen Funktionsprinzip konstruiert und getestet wurde. Das Aufgabegut bestand hierbei aus kleineren Hartholzästen und -zweigen, deren Wassergehalt innerhalb von fünf Betriebswochen von 59,12% auf 16,23% gesenkt werden konnte. Die Trocknung des Bambus im zweiten Versuch erstreckte sich über einen Zeitraum von vier Wochen. Der Wassergehalt wurde von 50,43% auf 18,30% reduziert. Auch dieser Prototyp erwies sich als verlässlich und robust. So kam es zu keinerlei Ausfällen, jedoch musste die Kollektorfolie in regelmäßigen Abständen kontrolliert und gegebenenfalls ausgebessert werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden zur Weiterentwicklung des Solartrockners genutzt. Ferner ist dessen Einsatz im Rahmen der Entwicklungszusammenarbeit mit Fokus auf der Trocknung höherwertiger Güter wie Kaffeebohnen, Reis, Mais, usw. angestrebt.

Prototype Development of a Solar Dryer for Wooden Biomass

In general, an energy efficient combustion of wood can only be achieved if the biomass' water content is adequately low. At the University of Bonn an indirect packed-bed solar dryer with a holding capacity of 50 m³ and electric air ventilation was developed for processing the biomass produced in its own fruit plantations. This thesis aims to document and evaluate the preliminary research, practical construction work on the solar dryer, its testing procedure and the test results.

The basic construction consists of a cylindrical container for the drying material with a height of 5.13 m and 3.58 m in diameter. Its surface was modified into a solar collector.

The dryer was tested over a period of eight weeks in which the drying air was continually transported through the wood chips with a velocity of 0.06 m s⁻¹. In the process, only one eighth of the fan's actual power output of 4 kW was utilised.

The drying material consisted of P16 wood chips (DIN EN 14961-4:2011-9) with an initial water content (wet basis) of 40.25%. The water content was reduced to a final value of 11.73 ± 0.30% whereas no wet patches or mould formations were identified.

Temperature recordings inside the bulk and the solar collector proved its functionality. The average temperature inside the collector was 1.18 K higher than the ambience. The maximum temperature rise was recorded as 6.8 K.

During the test run no technical failures occurred. Though, at the time of unloading the charging material the hauling system failed due to underpowered electric motor and transmission.

Following the project at the University of Bonn, a field test was conducted in Nepal where another solar dryer was constructed after the same principle of operation and tested subsequently. In the first test run, the charging material consisted of smaller hardwood branches and twigs whose water content was reduced from 59.12% to 16.23% within five weeks. During the second test run the water content of bamboo was reduced from 50.43% to 18.30% in four weeks. Likewise, this prototype proved to be a reliable and robust system. Although no failures occurred the collector cover had to be maintained and repaired during the drying process.

The results and findings gained from this research project will be utilised to improve and enhance the solar dryer. Furthermore, its application in the field of development cooperations with a focus on goods of a superior value such as coffee beans, rice, maize, etc. is pursued.

„Der Mann, der den Wind der Veränderung spürt, sollte keinen Windschutz, sondern eine Windmühle bauen.“

Chinesische Weisheit

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xvi
Abbildungsverzeichnis	xxii
1. Einleitung	1
2. Stand des Wissens und der Technik	7
2.1. Biomasse	7
2.1.1. Begriffsdefinition	7
2.1.2. Qualitative Eigenschaften holzartiger Biomasse aus OBP	9
2.1.3. Schnittholzertrag am Campus Klein-Altendorf	11
2.1.4. Rodungsholzertrag am Campus Klein-Altendorf	16
2.2. Notwendigkeit der Feuchtereduzierung	19
2.2.1. Schimmelbildung	20
2.2.2. Selbstentzündung	24
2.2.3. Energieinhalt	26
2.3. Trocknung	27
2.3.1. Begriffserklärung	28
2.3.2. Grundlagen	28
2.3.3. Natürliche Trocknung	32
2.3.4. Technische Trocknung	35
2.3.5. Konventionelle Trocknersysteme	36
2.3.6. Solare Trocknungssysteme	37
3. Arbeitshypothesen	43
4. Material und Methoden	45
4.1. Standortbeschreibung des Campus Klein-Altendorf	45
4.2. Holzhackschnitzel	49
4.2.1. Größenklassennormen	49
4.2.2. Verwendete Holzhackschnitzel und Herstellungsverfahren	51
4.3. Messmethoden und -instrumente	54
4.3.1. Masse	55
4.3.2. Wassergehalt	55

4.3.3.	Schüttdichte	56
4.3.4.	Temperatur	56
4.3.5.	Relative Luftfeuchte	58
4.3.6.	Luftgeschwindigkeit	58
4.4.	Datenauswertung	59
I.	Theoretische und praktische Vorversuche	61
5.	Empirische Untersuchung des Druckverlustes	63
5.1.	Versuchsaufbau und -durchführung	64
5.2.	Darstellung der Ergebnisse	66
6.	Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung	73
6.1.	Versuchsaufbau und -durchführung	73
6.2.	Auswertung der Messdaten	77
6.2.1.	Versuchsdurchgang 1	77
6.2.2.	Versuchsdurchgang 2	86
7.	Berechnung des Trocknungspotentials	99
7.1.	Vorstellung der mathematischen Gleichungen zur iterativen Bestimmung der absoluten Feuchte der Abluft	100
7.2.	Rohdatenaufnahme und -aufbereitung	103
7.3.	Darstellung der Berechnungsergebnisse	105
7.3.1.	Temperatur- und Feuchteentwicklung	105
7.3.2.	Feuchtegradifferenz	108
7.3.3.	Nutzungsgrad des Trocknungspotentials	111
II.	Prototypenentwicklung eines solaren Holzrockners	115
8.	Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf	117
8.1.	Konstruktionsbeschreibung	118
8.1.1.	Unterkonstruktion und Entnahmeeinrichtung	119
8.1.2.	Trockengutbehälter	122
8.1.3.	Solarkollektor	125
8.1.4.	Abluftsystem und Luftförderung	127
8.1.5.	Befüllvorrichtung	128
8.1.6.	Materialkosten	128
8.2.	Funktionsbeschreibung	130
8.3.	Versuchsvorbereitung und Datenaufnahme	131
8.4.	Darstellung und Auswertung der Messergebnisse	134

8.5. Erforderliche Ventilatorleistung	140
8.6. Sonstige Erkenntnisse	140
9. Feldversuch in Nepal	143
9.1. Beschreibung der Position als Entwicklungshelfer und des Arbeit- sumfeldes	143
9.1.1. Energieversorgung im ländlichen Raum	144
9.1.2. Das Projektgebiet	146
9.2. Aufbau und Inbetriebnahme des solaren Holzrockners in Nepal .	154
9.2.1. Anforderungen an den solaren Trockner	154
9.2.2. Material und Arbeitsschritte	156
9.3. Versuchsvorbereitung und Datenaufnahme	163
9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse	166
9.4.1. Test 1 - 25.11.2014 bis 20.03.2015	166
9.4.2. Test 2 - 27.03.2015 bis 16.04.2015	179
10. Diskussion und Ausblick	185
10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse	185
10.1.1. Empirische Untersuchung des Druckverlustes in Holzhack- schnittelschüttungen	185
10.1.2. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung	187
10.1.3. Berechnung des Trocknungspotentials	191
10.1.4. Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf . .	194
10.1.5. Feldversuch in Nepal	198
10.2. Beurteilung des konstruktionstechnischen Aufbaus	200
10.3. Ausblick	202
11. Zusammenfassung	205
Literaturverzeichnis	209
Anhang	217
A. Druck- und Druckverlustkurven zu Kapitel 5	219
A.1. Druckkurven	219
B. Temperatur- und relative Feuchteentwicklung zu Kapitel 6	224
B.1. Versuchsdurchgang 1 - 07.09.2011-11.10.2011	224
B.2. Versuchsdurchgang 2 - 18.01.2012-21.02.2012	230
B.3. Technische Daten und Kennlinie des Ventilators <i>AXC100B</i>	236

C. Anhang zu Kapitel 8	237
C.1. Technische Daten Kollektorfolie	237
C.2. Konstruktionskosten	237
C.3. Technische Daten und Kennlinie des Ventilators <i>NV 35</i>	239
D. Anhang zu Kapitel 9	240
D.1. Konstruktionskosten	240
D.2. Temperatur und relative Feuchte der Umgebungsluft	242
E. Technische Daten der verwendeten Messinstrumente	246
E.1. Holzfeuchtemessung	246
E.2. Temperatur- und Feuchtedatenlogger	247
E.3. Anemometer	249
E.4. Sonnenstundensensor	250

Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Buchstaben klein

<i>a</i>		Faktor
<i>b</i>	m	Breite
<i>c</i>	J g ⁻¹	spez. Wärmekapazität
<i>d</i>	m	Durchmesser
<i>h</i>	m	Höhe
	J g ⁻¹	spez. Enthalpie
<i>i</i>		Laufindex
<i>l</i>	m	Länge
<i>m</i>	g	Masse
<i>n</i>		Anzahl Stichproben
<i>p</i>	bar; Pa	Druck
<i>r</i>	J g ⁻¹	Verdampfungswärme
<i>t</i>	s, h	Zeit
<i>v</i>	m s ⁻¹	Geschwindigkeit
<i>x</i>	g g ⁻¹	Feuchtegrad

Lateinische Buchstaben groß

<i>A</i>	m ²	Grundfläche
AIZ		Akademie für Internationale Zusammenar- beit
ATB		Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
BUND		Bund für Umwelt und Naturschutz Deutsch- land e.V.
CSV		Comma Seperated Value (Dateiformat)
EH		Entwicklungshelfer
FECOFUN		Federation of Comunity Forest User Groups
FGD	g _w g _L ⁻¹	Feuchtegraddifferenz
FM	g	Frischmasse
GIZ		Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH
<i>H</i>	MJ kg ⁻¹	Heizwert
	J	Enthalpie
KbE		koloniebildende Einheiten

KUP		Kurzumtriebsplantage
KW		Kalenderwoche
NA		Not Available (dt. nicht verfügbar)
NEEP		Nepal Energy Efficiency Program
NPR		nepalesische Rupie
OBP		Obstbaumplantage
P	Pa	Druck, Luftwiderstand
	W	Leistung
P		Messstelle
PE		Polyethylen
PHAST		Photovoltaik-Abwärme basierende Schüttgut-Trocknung
PP		Polypropylen
PS		Pferdestärke
PV		Photovoltaik
Q	$m^3 s^{-1}$	Volumenstrom
	Ah	elektrische Ladung
	J	Wärmeenergie
T	K	Temperatur
TGB		Trockengutbehälter
TM	g	Trockenmasse
TS		Trockenschrank
U	J	innere Energie
	V	elektrische Spannung
		Holzfeuchte
V	m^3	Volumen
\dot{V}	$m^3 s^{-1}$	Volumenstrom
VS		Versuchsstände
W	%	Wassergehalt der Holzhackschnitzel
WS		Wassersäule
XLS		Dateiformat Microsoft Excel

Griechische Buchstaben

Δ		Differenz
η		Wirkungsgrad
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Celsius-Temperatur
ρ	g m^{-3}	Dichte
φ	%	relative Feuchte

Mathematische Formelzeichen

Δ	Differenz
Σ	Summe

Indizes

<i>a</i>	alternativer Zustand; Zustandsänderung
<i>B</i>	Betriebs(zeit)
<i>ber</i>	berechnet
<i>D</i>	Dampf
<i>H</i>	Holz
<i>I</i>	Intervall
<i>K</i>	Solarkollektor
<i>leer</i>	Leer(gewicht)
<i>L</i>	Luft
	Lauf(zeit)
<i>max</i>	Maximum
<i>mittel</i>	Mittelwert
<i>p</i>	Druck
<i>Rohr</i>	Abluftrohr
<i>S</i>	Sättigung
	Schüttung
<i>SE</i>	Selbstentzündung
<i>t</i>	trocken
<i>TGB</i>	Trockengutbehälter
<i>TM</i>	Trockenmasse
<i>TP</i>	Trocknungspotential
<i>TS</i>	Trockenschrank
<i>u</i>	unterer (Heizwert)
<i>v</i>	Verdampfungs(wärme)
<i>VS</i>	Versuchsstand
<i>W</i>	Wasser
0	fortlaufende Nummer
	Zustand bei 0°C
1	fortlaufende Nummerierung
	Anfang
	Zustand der Trocknungsluft
2	fortlaufende Nummerierung
	Ende
	Zustand der Abluft
3	fortlaufende Nummerierung

Tabellenverzeichnis

2.1.	Brennwerte holzartiger Biomassen	10
2.2.	Technische Daten des <i>TRP 120 RT</i>	12
2.3.	Schnittholzertrag vom 18.03.2010 und 15.03.2011	14
2.4.	Trockenmasseerträge aus den Versuchen zur Schnittholzsammlung 2010 und 2011	16
4.1.	Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17225-4	50
4.2.	Korngrößenverteilung nach DIN EN 14961-4:2011-09	50
6.1.	Zusammenfassung der rechnerisch und empirisch ermittelten End- wassergehalte im ersten Durchgang des Versuchs zur Kaltlufttrock- nung	79
6.2.	Zusammenfassung der rechnerisch und empirisch ermittelten End- wassergehalte im zweiten Durchgang des Versuchs zur Kaltluft- trocknung	89
7.1.	Anzahl der Fehlwerte und prozentuale Vollständigkeit der Wetter- daten der Jahre 2008 bis 2011	105
7.2.	Zusammenfassung der Höchst- und Durchschnittswerte der FGD aller Zulufttemperaturen der ausgewerteten Jahre 2008 bis 2011 .	111
10.1.	Druckmultiplikatoren zwischen den Messpunkten P_2 und P_1 sowie P_3 und P_2 im Versuch zur Druckverlustbestimmung	186
B.1.	Technische Daten des AXC100B	236
C.1.	Technische Daten der Kollektorfolie	237
C.2.	Materialkosten für den solaren Satzrockner	237
C.3.	Technische Daten des <i>NV 35</i>	239
D.1.	Material- und Arbeitskosten für den solaren Satzrockner im Netz- betrieb	240
D.2.	Material- und Arbeitskosten für den solaren Satzrockner im PV- Betrieb	241
E.1.	Technische Daten des <i>Voltcraft FM-300</i>	246
E.2.	Technische Daten des <i>Extech SDL200</i>	247

E.3.	Technische Daten des Thermoelement Typ K des <i>Extech SDL200</i>	248
E.4.	Technische Daten des <i>Voltcraft DL-121TH</i>	248
E.5.	Technische Daten des Sensors <i>41382VC/VF</i>	249
E.6.	Technische Daten des <i>testo 425</i>	249
E.7.	Technische Daten des <i>CSD3</i> ; aus ANONYMUS28 [2016]	250

Abbildungsverzeichnis

1.1. Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2015	3
2.1. Fendt Schlepper mit Reihenputzer und <i>TRP 120 RT</i>	13
2.2. Verteilung der Schnittholzerträge am Campus Klein-Altendorf . .	15
2.3. Masse Rodungsholz aus Obstbauplantagen	18
2.4. Typische Temperaturverläufe unterschiedlicher Holzhackschnitzel- formate während einer einjährigen Lagerung in 10 m ³ Schüttung .	21
2.5. Entwicklung von thermophilen Schimmelpilzen in 10 m ³ -Schüttungen aus Pappelhackgut unterschiedlicher Hacklänge	22
2.6. Von Schimmel befallene Holzhackschnitzel	23
2.7. Heizwert von Laub- und Nadelholz in Abhängigkeit vom Wasser- gehalt	27
2.8. Zustandsänderungen unkonditionierter und konditionierter Trock- nungsluft bis zum Erreichen der Sättigungspunkte	31
2.9. Prinzip des Dombelüftungsverfahrens	34
2.10. Direkter Solartrockner ohne künstliche Belüftung nutzt Venturief- fekt für Luftwechsel	38
2.11. Indirekter Solartrockner ohne künstliche Belüftung zur Trocknung von Bananenscheiben	39
2.12. Schematischer und in China realisierter Aufbau eines solaren Tun- nelrockners	41
2.13. Schematischer Aufbau des hybriden Solar- und Biomassetrockners	41
2.14. Schematischer Aufbau der PHAST-Anlage	42
4.1. Übersicht des Campus Klein-Altendorf mit Obstanbauflächen . . .	47
4.2. Standort des Solartrockners am Campus Klein-Altendorf Nord . .	48
4.3. Mobiler Trommelhacker im Zapfwellenbetrieb sowie gemischte, un- gesiebte Holzhackschnitzel der Größenklasse P16B	51
4.4. Holzhackschnitzel der Größenklassen P31,5, P45 und nicht klassi- fiziert sowie ein mobiler Schneckenhacker mit Dieselaggregat . . .	53
4.5. Mobiler Scheibenradhacker angetrieben durch Dieselaggregat sowie Holzhackschnitzel aus Rodungsholz ohne Wurzelanteil	54
4.6. Verwendete Handmessgeräte zur Messung und Speicherung von Temperatur-, Luftfeuchte- und Luftgeschwindigkeitswerten	57

5.1. Schematischer und realisierter Versuchsstand zur Druckverlustmessung	65
5.2. Ergebnisse der Druckmessung in der Holzhackschnitzelschüttung P16-GU an den Punkten P_0 bis P_3	67
5.3. Differenzdruck zwischen P_3 und P_0 aller untersuchter Hackschnitzelvarianten	69
5.4. Ausschnittsvergrößerung der Differenzdruckmessung zwischen P_3 und P_0 aller untersuchter Hackschnitzelvarianten	70
6.1. Auf Europoolpaletten gelagerter Versuchsstand (VS) zur Kaltlufttrocknung	74
6.2. Aufsummierte Gewichtsveränderung der TGB im ersten Versuchsdurchgang	78
6.3. Temperaturentwicklung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 1	81
6.4. Entwicklung der relativen Feuchte im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 1	82
6.5. Temperaturentwicklung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 17	83
6.6. Entwicklung der relativen Feuchte im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 17	84
6.7. Temperaturentwicklung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 28	85
6.8. Entwicklung der relativen Feuchte im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 28	86
6.9. Aufsummierte Gewichtsveränderung der TGB im zweiten Versuchsdurchgang	87
6.10. Temperaturentwicklung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 1	90
6.11. Entwicklung der relativen Feuchte im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 1	91
6.12. Temperaturentwicklung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 15	92
6.13. Entwicklung der relativen Feuchte im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 15	93
6.14. Temperaturentwicklung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 21	94
6.15. Entwicklung der relativen Feuchte im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 21	95
6.16. Temperaturentwicklung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 34	96

6.17. Entwicklung der relativen Feuchte im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 34	97
7.1. Aufsummierte 10-Minuten-Fehlwerte pro Monat der Wetterstation am Campus Klein-Altendorf	104
7.2. Temperaturverlauf der Jahre 2008 bis 2011 als Monatsmittelwerte sowie Minimum und Maximum für unkonditionierte Umgebungsluft	106
7.3. Verlauf der relativen Feuchte der Jahre 2008 bis 2011 als Monatsmittelwerte sowie Minimum und Maximum für unkonditionierte Umgebungsluft	107
7.4. Verlauf der relativen Feuchte der Jahre 2008 bis 2011 als Monatsmittelwerte für unkonditionierte sowie +2,5°C und +5,0°C vorgewärmte Umgebungsluft	108
7.5. Aufsummierte Jahresstunden mit $\vartheta_2 < 0^\circ\text{C}$ der Jahre 2008 bis 2011	109
7.6. Aufsummierte Feuchtegraddifferenz unkonditionierter Umgebungsluft als Monatsmittelwerte der Jahre 2008 bis 2011	110
8.1. Unterkonstruktion des solaren Trockners mit Rührwerk und Vorrichtung zum Austrag als Skizze in der Draufsicht	119
8.2. Unterkonstruktion des solaren Trockners mit Rührwerk und Vorrichtung zum Austrag als Skizze und als Foto in der Seitenansicht	120
8.3. Darstellung der Klappbewegung der Rührwerksarme bei erhöhtem Widerstand während der Gutförderung	121
8.4. Lagersilo bzw. TGB während der Montagearbeiten, sowie Detaildarstellung der Verlängerung der Außenstützen und der Fixpunkte .	124
8.5. Befestigung der Kollektorfolie auf einem Stahlskelett und Gewindestangen zum Festlegen des Folienabstands	126
8.6. Anordnung der Folienhalterungen und Angelschnur auf dem Stahlskelett, sowie Fixierung der Folie	127
8.7. Darstellung des solaren Satzrockners nach Beendigung der Konstruktionsarbeiten	129
8.8. Schrittweise Darstellung der Funktion des solaren Satzrockners .	130
8.9. Messplan zur Erfassung der Temperatur-, Luftfeuchte- und Luftgeschwindigkeitswerte während des Testzeitraumes	132
8.10. Entwicklung des Wassergehaltes der Holzhackschnitzel im solaren Satzrockner	135
8.11. Anzahl der Sonnenstunden im Testzeitraum des solaren Satzrockners	136
8.12. Temperaturentwicklung am TGB Einlass, in der Schüttung sowie der Umgebung	137
8.13. Temperaturentwicklung am TGB Einlass, im Solarkollektor sowie der Umgebung am 06.07.2012 und 10.07.2012	139

9.1. Traditionelle Kochstelle und verbesserter Herd als Variante mit einem Verbrennungsraum für zwei Kochtöpfe und Kamin	145
9.2. Geographische Zonen, Regionen und Distrikte des Landes Nepal .	147
9.3. Mittlere monatliche Tages- und Nachttemperaturen sowie monatliches Maximum und Minimum in Nepalgunj, Nepal	149
9.4. Mittlere monatliche relative Luftfeuchte in Nepalgunj, Nepal . . .	151
9.5. Nepalesische Frauen transportieren Baris und ein Bari Frischholz als Aufgabegut für den Solartrockner	155
9.6. Der Deckel des Ölfasses wurde manuell entfernt und an den oberen Rand des schwarz lackierten Fasses wurde ein Flansch geschweißt.	157
9.7. Bohrungen als Lufteinlass an der Unterseite des TGB	157
9.8. Realistische Darstellung und technische Zeichnung der Ansicht des Solartrockners aus dem Feldversuch in Nepal	158
9.9. Darstellung des Deckelplatte mit Ansicht von unten und technische Zeichnung mit Ansicht von oben	159
9.10. Befestigung der DC-Ventilatoren an der Deckelplatte	161
9.11. Schaltbild der elektrischen Verbindung des Solartrockners im PV-Betrieb	162
9.12. Holzfeuchtemessgerät <i>Voltcraft FM-300</i> und Demonstration der Einstichtiefe zur Feuchtemessung mit dem Gerät	164
9.13. Messpunkte für Temperatur und relative Luftfeuchte innerhalb des TGB am Einlass und unterhalb des Ventilators sowie im Solarkollektor auf Höhe $h = 440$ mm	165
9.14. Entwicklung des Wassergehaltes des Holzes an den unterschiedlichen Lagerorten	167
9.15. Entwicklung des Wassergehaltes anhand der Holzstichproben aus den unterschiedlich gelagerten Bari durch Einteilung in Prozentfraktionen	168
9.16. Gesamte tägliche Betriebszeit und tatsächliche Laufzeit des Solartrockners im AC-Betrieb	170
9.17. Entsprechend den Intervallen der Wassergehaltsbestimmung aufsummierter Stromverbrauch in Abhängigkeit von den ermittelten Wassergehaltsdifferenzen	171
9.18. Temperaturentwicklung der Kollektoroberfläche in 0° , 90° , 180° und 270° Azimuth sowie am TGB Ein- und Auslass und der Umgebung	172
9.19. Entwicklung des Kollektorwirkungsgrades während der Betriebszeit am 29.11.2014 (Tag 4), 11.03.2015 (Tag 106) und 19.03.2015 (Tag 114)	174
9.20. Entwicklung der relativen Feuchte der Umgebung und am TGB Einlass; Tag 4	175

9.21. Temperaturentwicklung der Kollektoroberfläche in 0°, 90°, 180° und 270°Azimuth sowie am TGB Ein- und Auslass und der Umgebung; Tag 106	176
9.22. Temperaturentwicklung der Kollektoroberfläche in 0°, 90°, 180° und 270°Azimuth sowie am TGB Ein- und Auslass und der Umgebung; Tag 144	177
9.23. Das Aufgabegut im Trockner zeigt keine Schimmelspuren, während das im freien gelagerte Holz nach 14 Tagen Testzeit bereits grünliche Verfärbungen aufwies.	179
9.24. Darstellung der Entwicklung des Wassergehaltes des im Solartrockner eingelagerten Bambus	180
9.25. Entwicklung des Wassergehaltes anhand der Bambusstichproben aus dem im Solartrockner eingelagerten Bari durch Einteilung in Prozentfraktionen	181
9.26. Temperaturentwicklung der Kollektoroberfläche in 0°, 90°, 180° und 270°Azimuth sowie am TGB Einlass und der Umgebung; Tag 7	182
9.27. Entwicklung des Kollektorwirkungsgrades während der Betriebszeit	183
9.28. Entwicklung der relativen Luftfeuchte in der Umgebung und am TGB Einlass	184
10.1. Ventilator Kennlinie des <i>AXC100B</i> , Kennlinien für P_1 und P_2 des Hackguts NK-AoW sowie der reale Betriebspunkt im ersten Versuch zur Kaltlufttrocknung	190
10.2. Ventilator Kennlinie des <i>AXC100B</i> , Kennlinien für P_1 und P_2 des Hackguts P16B-F sowie der reale Betriebspunkt im zweiten Versuch zur Kaltlufttrocknung	191
10.3. Ventilator Kennlinie des <i>NV 35</i> sowie der reale Betriebspunkt bei Prototypentest in Bonn	197
A.1. Druckkurve des Apfelbaumrodungsholzes ohne Wurzelanteil	219
A.2. Druckkurve der Buchenhackschnitzel der Größenklasse P100	220
A.3. Druckkurve der Fichtenhackschnitzel der Größenklasse P63	221
A.4. Druckkurve der Fichtenhackschnitzel der Größenklasse P45	222
A.5. Druckkurve der Fichtenhackschnitzel der Größenklasse P16	223
B.1. Temperaturentwicklung in TGB 1.1; 1. Versuch	224
B.2. Temperaturentwicklung in TGB 1.2; 1. Versuch	225
B.3. Temperaturentwicklung in TGB 1.3; 1. Versuch	226
B.4. Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 1.1; 1. Versuch	227
B.5. Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 1.2; 1. Versuch	228
B.6. Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 1.3; 1. Versuch	229
B.7. Temperaturentwicklung in TGB 2.1; 2. Versuch	230
B.8. Temperaturentwicklung in TGB 2.2; 2. Versuch	231

B.9. Temperaturentwicklung in TGB 2.3; 2. Versuch	232
B.10. Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 2.1; 2. Versuch	233
B.11. Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 2.2; 2. Versuch	234
B.12. Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 2.3; 2. Versuch	235
B.13. Ventilator Kennlinie des <i>AXC100B</i>	236
C.1. Ventilator Kennlinie des <i>NV 35</i>	239
D.1. Entwicklung der Umgebungstemperatur während des ersten Tests des Solartrockners in Nepal	242
D.2. Entwicklung der relativen Luftfeuchte der Umgebung während des ersten Tests des Solartrockners in Nepal	243
D.3. Entwicklung der Umgebungstemperatur während des ersten Tests des Solartrockners in Nepal	244
D.4. Entwicklung der relativen Luftfeuchte der Umgebung während des ersten Tests des Solartrockners in Nepal	245

1. Einleitung

Die Einstrahlung der Sonne ist die größte verfügbare regenerative Energiequelle auf der Erde. Dank technologischer Entwicklungen ist es heutzutage möglich, diese Energie photovoltaisch in elektrischen Strom umzuwandeln oder durch hocheffiziente Solarkollektoren thermisch nutzbar zu machen. Eine technische Herausforderung stellt jedoch immer noch die Energiespeicherung dar. Seit Jahrzehnten wird intensiv an der Entwicklung von elektrochemischen sowie thermischen Speichern geforscht, deren Effizienz kontinuierlich steigt und deren Anwendungsgebiete zahlreicher werden. Vor allem jedoch Batterien und Akkumulatoren sind aufgrund der häufig enthaltenen Schwermetalle (Blei, Cadmium, Quecksilber) aus ökologischer Sicht bedenklich [ANONYMUS01, 2012].

Ein ganz und gar ungefährlicher, 100% nachhaltiger und erneuerbarer Energiespeicher findet sich in der Natur selbst: Biomasse¹ ist Sonnenenergie, die durch Photosynthese fixiert wurde. Laut VAKKILAINEN ET AL. [2013] betrug ihr Anteil an der globalen Energieversorgung (ca. 509 EJ) im Jahr 2009 rund 10% bzw. 52 EJ. Etwa 65% davon verfallen auf Entwicklungsländer, in denen Holz, Kuhdung oder Biobrikettes vorwiegend zum heizen und kochen Verwendung finden. Die Industrieländer werden mit etwa 18 EJ an Energie aus Biomasse versorgt. Im privaten Sektor wird sie vornehmlich zur Wärmeerzeugung verwendet. Die industrielle Nutzung umfasst die Schwerpunkte Wärme- und Stromerzeugung z.B. durch Biogasanlagen oder Kraftwerke für feste Biomasse. Im Straßenverkehr kommt sie in Form von Biokraftstoffen und Biogas zum Einsatz.

Wie bereits angedeutet, ist die vielseitige Verwendbarkeit von Biomasse, die

¹Begriffsdefinitionen siehe Kapitel 2

1. Einleitung

sich aus land- und forstwirtschaftlichen Reststoffen, Tierdung oder speziell angebauten Energiepflanzen zusammensetzt, ein großer Vorteil. Des Weiteren sorgt ihre bedarfsabhängige Abrufbarkeit für weniger Versorgungsengpässe durch Angebotsschwankungen als beispielsweise die Windkraft oder die Nutzung der direkten Sonneneinstrahlung durch Photovoltaik oder thermische Kollektoren. Durch die Verwendung heimischer Energieträger verringert sich zudem die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Diese und weitere Vorteile führten dazu, dass im Jahr 2015 in Deutschland rund 57% der erneuerbaren Energie durch biogene Brennstoffe, Gase und Biokraftstoffe bereit gestellt wurde, wie Abbildung 1.1 zeigt.

Trotz der zahlreichen Gründe, die für eine Nutzung von Biomasse und deren Ausbau sprechen, dürfen die weniger vorteilhaften Aspekte nicht außer Acht gelassen werden. Aufgrund begrenzt vorhandener Anbauflächen stehen Pflanzen, die ausschließlich zur Energieproduktion angebaut werden (z.B. in Kurzumtriebsplantagen (KUP)), in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. In einem Positionspapier des Bundes für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) heißt es relativierend: „Die zunehmende Flächenkonkurrenz ergibt sich aus der Notwendigkeit, die Bevölkerung regional mit den erforderlichen Ressourcen zu versorgen. Eine Stärkung regionaler Wirtschaftskreisläufe - vor allem für Güter des täglichen Bedarfs - erlaubt, Transporte zu reduzieren (Verkehr, Energie) und den Zugriff auf Flächen in anderen Ländern zu begrenzen (internationale Gerechtigkeit). Der zunehmende Druck auf vorhandene landwirtschaftlich produktive Flächen einschließlich der Grenzertragsstandorte ist deshalb eher grundsätzlicher Art und nicht allein spezifisch für die Kurzumtriebsplantagen“ [ANONYMUS02, 2010].

Zudem stehen KUP in der Kritik, da sie zu einer Verbreitung des monokulturellen Anbaus beitragen. Auch hierzu nimmt der BUND Stellung: „Unter der Voraussetzung, dass keine schutzwürdigen Arten und Biotop durch die Anlage einer Kurzumtriebsanlage zer- oder gestört werden, gehen hinsichtlich der Flora

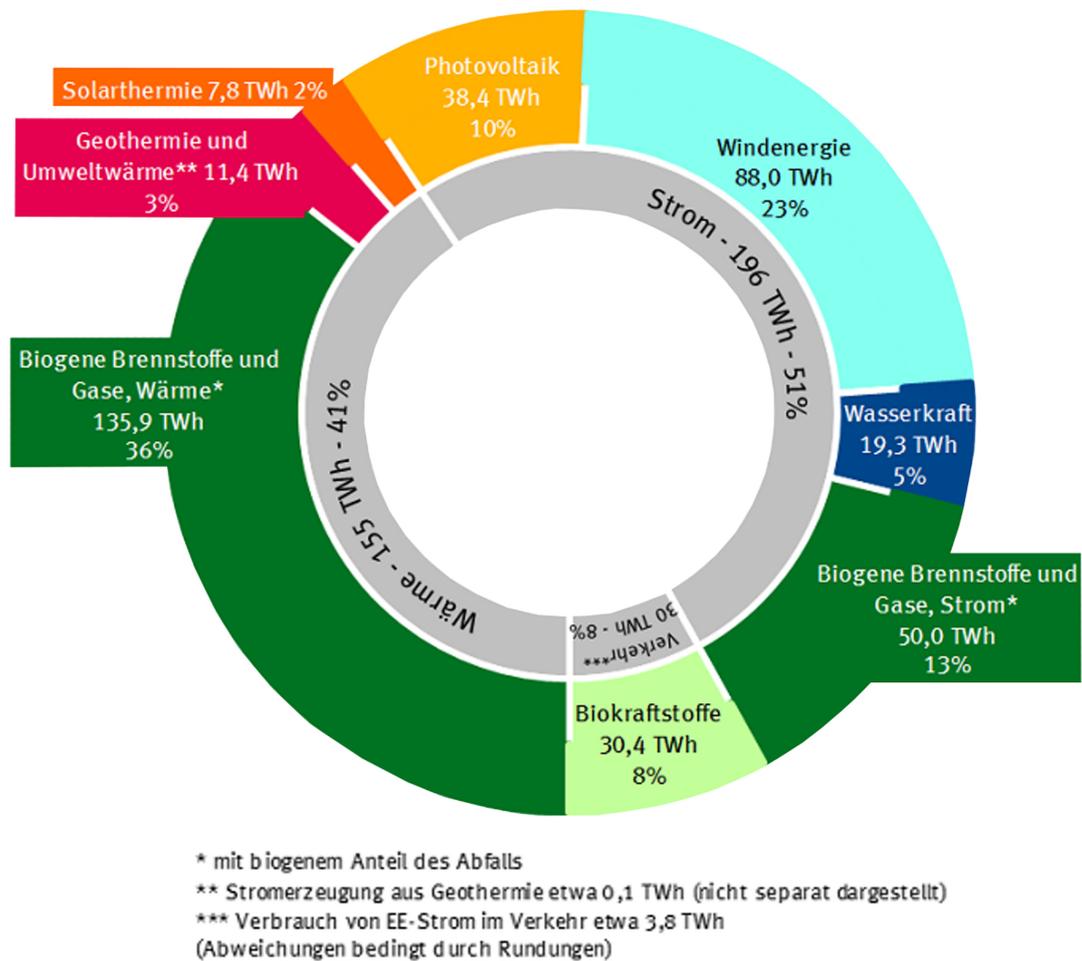


Abbildung 1.1.: Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2015; abgeändert aus ANONYMUS03 [2016]

und Fauna keine negativen Wirkungen von Kurzumtriebsplantagen aus. Der Vergleichsmaßstab für die Einschätzung der Kurzumtriebsplantagen sind genutzte Ackerflächen (wie z.B. Energiemais).

Der Verzicht auf Pestizide und die langjährige Bodenruhe (im Vergleich zu herkömmlichen Ackerflächen) begünstigen die Entwicklung des Bodenlebens“ [ANONYMUS02, 2010].

Ohne Zweifel ist jedoch die Verwendung bereits vorhandener, lokal verfügbarer

1. Einleitung

nachwachsender Rohstoffe aus ökologischer Sicht eine zu erwägende Alternative. Diese Erkenntnis wurde an der Lehr- und Forschungsstation Campus Klein-Altendorf der Universität Bonn in die Praxis umgesetzt. Wie in der Beschreibung des Standorts (Kapitel 4) dargestellt, wird hier auf einer Fläche von etwa 21 ha Obstbau betrieben. Das jährlich anfallende Schnitt- und Rodungsholz wird als Hack- oder Schreddergut in Biomasseheizanlagen verwertet, um die standorteigenen Bürogebäude und Gewächshäuser mit Wärmeenergie zu versorgen. Zusätzliches Brennmaterial fällt in der ebenfalls am Standort befindlichen KUP (ca. 1,5 ha) an.

Für eine bestmögliche energetische Ausnutzung des Holzes ist der aufbereitende Prozess der Feuchtereduzierung unumgänglich. Während waldfrisches Holz mit einem Wassergehalt von 55% lediglich einen Heizwert von etwa 7 MJ kg^{-1} aufweist, verdoppelt sich letzterer, wenn der Wassergehalt auf 20% gesenkt wird (siehe Kapitel 2). Neben der Steigerung des Heizwertes bietet die Trocknung weitere Vorteile, wie z.B. die Vermeidung von Biomasse abbauenden Schimmelpilzen. Diese können sowohl gesundheitsschädliche Wirkungen als auch finanzielle Einbußen nach sich ziehen.

Aus Mangel an wirtschaftlich sinnvollen und für den Campus Klein-Altendorf praktikablen Technologien zur Trocknung holzartiger Biomasse (siehe Kapitel 2), wurde im Rahmen des EU-finanzierten Projektes „Science to Business Center AgroHort“, Teilprojekt „AgroHort_{solar}“, ein solarer Satz Trockner geplant, konstruiert, in Betrieb genommen und getestet. Ziel der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit ist es, die zwischen Februar 2010 und Juni 2012 durchgeführten Versuche, die praktische Konstruktionsarbeit am Trockner, dessen Test und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu dokumentieren.

Im Folgenden werden in Kapitel 2 zunächst die notwendigen Begriffsdefinitionen gegeben und anhand einer Literaturübersicht der aktuelle Stand des Wissens

und der Technik aufgezeigt. Die sich daraus für diese Dissertation ergebenden Arbeitshypothesen sind in Kapitel 3 beschrieben. Das verwendete Hackgut sowie die Messinstrumente und angewendeten -verfahren sind im vierten Kapitel aufgeführt.

Im Anschluss daran gliedert sich die Thesis in zwei Hauptteile, wobei sich der erste mit den durchgeführten theoretischen und praktischen Vorversuchen und Potentialabschätzungen befasst. So wird in Kapitel 5 der Belüftungswiderstand von Hackgut empirisch untersucht, um Aufschluss über die notwendige Ventilatorleistung zu bekommen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in einem Versuch zur Trocknung von Holzhackschnitzeln mittels Kaltluft, der in Kapitel 6 beschrieben wird, angewendet worden. Es wurde untersucht, ob eine Trocknung von Hackgut mittels unkonditionierter Frischluft unter den klimatischen Bedingungen am Campus Klein-Altendorf möglich ist. In Kapitel 7 wird dieses Trocknungspotential theoretisch mit Hilfe eines mathematischen Modells untersucht.

Im zweiten Teil wird zunächst die Prototypentwicklung und der Test des solaren Satzrockners am Campus Klein-Altendorf beschrieben. Im darauf folgenden Kapitel 9 wird ein Feldversuch geschildert, der im Rahmen einer Entsendung als Entwicklungshelfer (EH) für die *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)* durchgeführt wurde. Hierfür wurde ein weiterer solarer Satzrockner nach dem Funktionsprinzip des Bonner Prototypen entwickelt, der im EH-Einsatzgebiet, dem westlichen Flachland der Bundesrepublik Nepal, getestet wurde. Das Aufgabegut bestand in diesem Fall jedoch nicht aus Holzhackschnitzeln sondern aus kleineren Ästen und Zweigen, um den Ansprüchen der lokalen Bevölkerung zu entsprechen.

Die Projektarbeit am Campus Klein-Altendorf fand im Zeitraum von Februar 2010 bis Juni 2012 statt. Die Entwicklung und der Test des Trockners in Nepal wurde zwischen Oktober 2014 und April 2015 realisiert.

2. Stand des Wissens und der Technik

In der Einleitung wurde bereits darauf hingewiesen, dass der Anreiz für die Entwicklung des solaren Trockners auf die am Campus Klein-Altendorf verfügbaren Holzressourcen und fehlende adäquate Trocknungstechnologien zurückzuführen ist. Mittels Literaturrecherche und unter Verwendung weiterer Medien wurde nach Erfahrungswerten gesucht, die Aufschluss über die Trocknung bzw. solare Trocknung holzartiger Biomasse aus Obstbaumplantagen (OBP) geben. Im Folgenden wird der aktuelle Stand des Wissens und der Technik vorgestellt, wie er sich nach der Recherchearbeit darstellt.

2.1. Biomasse

Nach der Definition des Begriffs „Biomasse“ wird auf die qualitativen und quantitativen Eigenschaften des anfallenden Schnitt- und Rodungsholzes aus den OBP am Campus Klein-Altendorf eingegangen.

2.1.1. Begriffsdefinition

Laut der europäischen Richtlinie 2009/28/EG „bezeichnet der Ausdruck „Biomasse“ den biologisch abbaubaren Teil von Erzeugnissen, Abfällen und Reststoffen der Landwirtschaft mit biologischem Ursprung (einschließlich pflanzlicher und tierischer Stoffe), der Forstwirtschaft und damit verbundener Wirtschaftszweige

2. *Stand des Wissens und der Technik*

einschließlich der Fischerei und der Aquakulturen sowie den biologisch abbaubaren Teil von Abfällen aus Industrie und Haushalten“ [ANONYMUS04, 2009].

KALTSCHMITT ET AL. [2016] erläutert zusätzlich: „Die Abgrenzung der Biomasse gegenüber fossilen Energieträgern beginnt beim Torf, dem fossilen Sekundärprodukt der Verrottung. Damit zählt Torf im strengeren Sinn dieser Begriffsabgrenzung nicht mehr zur Biomasse; dies widerspricht der in einigen Ländern (u.a. Schweden, Finnland) üblichen Praxis, wo Torf durchaus zur Biomasse gezählt wird.

Biomasse kann zusätzlich in sogenannte primäre, sekundäre und tertiäre Biomasse unterteilt werden.

- Primäre Biomasse entsteht durch die direkte photosynthetische Ausnutzung der Sonnenenergie; dazu zählen im Wesentlichen die gesamte Pflanzenmasse wie z.B. land- und forstwirtschaftlichen Produkten aus einem Energiepflanzenanbau (u.a. schnell wachsende Bäume, Energiegräser) oder pflanzliche Rückstände und Nebenprodukte aus der Land- und Forstwirtschaft sowie der weiterverarbeitenden Industrie (u.a. Stroh, Wald- und Industrierestholz).
- Sekundäre Biomasse bezieht dagegen ihre Energie nur indirekt von der Sonne; sie wird durch den Ab- oder Umbau organischer Substanz in höheren Organismen (z.B. Tiere) gebildet. Zu ihnen zählt z.B. die gesamte Zoomasse und deren Exkremete (z.B. Gülle und Festmist).
- Tertiäre Biomasse entsteht durch einen oder mehrere technische Weiterverarbeitungsschritte der primären und z.T. der sekundären Biomasse. Damit gehören zu dieser Kategorie u.a. Papier und Zellstoff, Holzstühle, Schokolade und Baumwollkleidung.“

2.1.2. Qualitative Eigenschaften holzartiger Biomasse aus OBP

Schnittholz. Baumschnitt aus OBP findet derzeit für die energetische Nutzung nur wenig Verwendung. „Meist verbleibt die Biomasse - z.B. der bei der jährlichen Beschneidung von Rebflächen oder Obstplantagen anfallende Baumschnitt - auf der Anbaufläche - und das oft in gehäckselter Form. Dort dient dieses Material als Mulch, welcher z.B. unerwünschten Unkrautwuchs vermindern und als Bodenverbesserer wirken soll“ [KALTSCHMITT ET AL., 2016].

Vornehmlich die qualitativen Eigenschaften sind dafür verantwortlich, dass diese Biomasse bisher wenig Beachtung findet. So weist das Schnittgut, in Abhängigkeit vom Alter der Äste, stark schwankende Durchmesser auf. Während beim jährlichen Rückschnitt meist ein- bis zweijährige Triebe entfernt werden, zielt der Ableitungsschnitt eher auf ältere Äste mit größerem Durchmesser ab. „Es kann mit einem Anteil von fast 90% des Schnittholzdurchmessers kleiner als 24 mm gerechnet werden. [...] Beim Ableitungsschnitt kann mit zunehmendem Alter der Obstbäume der Anteil der Triebe über 20 mm Durchmesser nahezu 50% ausmachen“ [KROMER ET AL., 1982].

Durch den geringen Durchmesser der Zweige, ist der Rindenanteil bei Kronenholz sehr hoch, wodurch sich dessen Aschegehalt erhöht. SCHMID [2013] hat in einem Versuch am Campus Klein-Altendorf für Kronenholz einen Aschegehalt von 6,9% festgestellt (siehe Tabelle 2.1). Im Vergleich dazu weist „naturbelassenes Holz ohne Rinde [...] in der Regel nur einen Aschegehalt von 0,5% bis 1% auf“ [ANONYMUS05, 2009]. Dass dies stark vereinheitlichte Werte sind, geht aus KALTSCHMITT ET AL. [2016] hervor, wie Tabelle 2.1 zu entnehmen ist. Grundsätzlich ist eine hohe Ascheproduktion wenig erstrebenswert, da hierdurch während des Verbrennungsprozesses die Feinstaubbelastung steigt und eventuell leistungsfähigere Abgasfilter verwendet werden müssen. Des Weiteren ist unter Umständen die Fördereinrichtung des Ascheaustrags größer zu dimensionieren.

2. Stand des Wissens und der Technik

Beide Punkte würden einen Mehrkostenaufwand nach sich ziehen.

Der geringe Durchmesser des Schnittholzes birgt einen weiteren Nachteil. Die Äste können aufgrund ihres geringen Durchmessers von Zerkleinerungsmaschinen nicht optimal aufbereitet werden. Dies kann zu Verstopfungen und somit zu Störungen in der Brennstoffzufuhr des Heizkessels führen.

Tabelle 2.1.: Brennwerte holzartiger Biomassen

Biomasseart	Brennwert H_o [10^6 J kg^{-1}]	Aschegehalt [%]
Fichtenholz (mit Rinde)	20,2 ²	1,2 ²
Buchenholz (mit Rinde)	19,5 ²	0,5 ²
Pappelholz (Kurzumtrieb)	19,8 ²	1,8 ²
Weidenholz (Kurzumtrieb)	19,7 ²	2,0 ²
Apfelholz		
Kronenholz	17,6 ³	6,9 ³
Stammholz	18,3 ³	4,1 ³
Wurzelholz	17,3 ³	9,8 ³

Rodungsholz. Das Rodungsholz aus Obstplantagen lässt sich grundsätzlich in drei Fraktionen unterschiedlicher Qualität einstufen. Den qualitativ wertvollsten Teil von Apfelbäumen bildet das Stammholz, welches einen Brennwert von 18,3 MJ kg^{-1} und einen Aschegehalt von 4,1% aufweist. Der Brennwert von Apfelkronenholz liegt bei 17,6 MJ kg^{-1} (Aschegehalt: 6,9%). Das Wurzelwerk bildet die qualitativ minderwertigste Fraktion mit einem Energiegehalt von lediglich 17,3 MJ kg^{-1} und einem Aschegehalt von 9,8% [SCHMID, 2013]. Dies ist auf starke Erdanhaftungen zurückzuführen, die zu einer hohen Ascheproduktion führen. Die in der anhaftenden Erde enthaltenen Mineralien führen im Zusammenwirken mit Silizium zu massiven Verschlackungen in der Verbrennung. „Im Wurzelwerk können sich [darüber hinaus] je nach Bodenverhältnissen auch mehr oder weniger

²Wert nach KALTSCHMITT ET AL. [2016]

³Wert nach SCHMID [2013]

große Steine befinden, die sowohl zu [starkem Verschleiß und] Schäden an den Zerkleinerungs- als auch an den Zuführungsvorrichtungen der Verbrennungsanlage führen können“ [DIESENBACHER U. OLBRISCH, 2009].

Grundsätzlich ist das Rodungsholz aus Apfelplantagen annähernd energetisch vergleichbar mit Rapsstroh, welches einen Brennwert von $18,1 \text{ MJ kg}^{-1}$ und einen Aschegehalt von 6,2% aufweist [KALTSCHMITT ET AL., 2016].

2.1.3. Schnittholzertrag am Campus Klein-Altendorf

Die am Campus Klein-Altendorf zur Verfügung stehende holzartige Biomasse fällt nahezu vollständig als Schnitt- und Rodungsholz aus OBP an, wobei der überwiegende Teil von Apfelbäumen stammt. KROMER ET AL. [1982] haben durch eigene Messungen herausgefunden, dass sich „in Vollertragsanlagen der Sorte Golden Delicious [...] bei der mittelstark wachsenden Unterlage MM 106 und einem Pflanzabstand von 4,5 m x 3 m eine jährliche Schnittholz[frisch]masse von durchschnittlich etwa 35 dt/ha“ ergaben. Da die Literaturrecherche keine aktuelleren Daten zum Schnittholzertrag aus OBP hervorbrachte, wurden am Campus Klein-Altendorf Versuche zur Sammlung und Zerkleinerung von Apfelschnittholz durchgeführt, welches beim routinemäßigen, jährlichen Rückschnitt anfällt.

Versuchsbeschreibung. Das Schnittholz wurde im März der Jahre 2010 und 2011 gesammelt, im gleichen Arbeitsschritt zerkleinert und in Holzgroßkisten eingelagert (Abmessungen $l \times b \times h$: 1.000 mm x 800 mm x 800 mm). Pro Baumreihe wurde eine Großkiste verwendet, deren Leergewicht vorher festgehalten wurde (ca. 50 kg pro Kiste). Nach Einlagerung des Holzes wurde das Leergewicht vom Gesamtgewicht der Kisten abgezogen, um den Biomassenertrag zu ermitteln.

In beiden Jahren wurden jeweils sechs Baumreihen durchfahren, die eine Länge von 200 m und einen Reihenabstand von 3,5 m zueinander aufweisen. Die

2. Stand des Wissens und der Technik

gewählten Baumreihen waren in beiden Jahren gleich. Der Abstand der Bäume innerhalb der Reihen beträgt 1,5 m, wodurch sich eine Baumanzahl von 137 ergibt. Dementsprechend sind 1.918 Bäume pro ha gepflanzt. Es handelt sich bei dem gesammelten Material um Holz von Apfelbäumen der Sorte Jonagold im 12. bzw. 13. Standjahr.

Vor der eigentlichen Schnittholzbergung musste das Material innerhalb der Baumreihen mittels eines sogenannten Reihenputzers so angeordnet werden, dass es für den Häcksler aufnehmbar war (siehe Abbildung 2.1 (a)). Dies zählt zu den im Heckenbau üblichen Verfahrensweisen. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass Reihenputzer zur Standardausrüstung auf Obstbetrieben zählen und somit nicht extra angeschafft werden müssen.

Zum Häckseln und Zerkleinern des Holzes wurde ein Schnittholzmulchgerät (*Kuhn Maschinen-Vertrieb GmbH; TRP 120 RT; Genthin*) angeschafft (siehe Abbildungen 2.1 (b)). Das Gerät ist für die Bergung und den Abtransport von Schnittgut aus dem Wein- und Obstbau konzipiert, weshalb es für den Einsatz mit Schmalspurtraktoren geeignet ist und lediglich über eine Gesamtbreite von 1,65 m verfügt. Weitere technische Daten sind in unten stehender Tabelle 2.2 aufgelistet.

Tabelle 2.2.: Technische Daten des *TRP 120 RT*; gekürzt aus ANONYMUS06 [2011]

Technische Daten <i>TRP 120 RT</i>		
Arbeitsbreite	[m]	1,20
Gesamtbreite mit seitlichen Rädern	[m]	1,65
Zapfwellendrehzahl	[min ⁻¹]	540
Min. Leistungsbedarf	[kW]	59
Max. zulässige Traktorleistung	[kW]	66
Rotordrehzahl	[min ⁻¹]	2.600
Rotordurchmesser	[mm]	465
Anzahl Schlegel		16
Gewicht inkl. Zubehör	[kg]	1.070



(a) Frontanbau

(b) Heckanbau

Abbildung 2.1.: Fendt Schlepper mit Reihenputzer im Front- und Schnittholzmulchgerät *TRP 120 RT* im Heckanbau

Der Häcksler wird vom Hersteller mit einer Haltevorrichtung für Nylonsäcke ausgeliefert, in die das Häckselgut eingelagert wird. Aus logistischer und praktischer Sicht war dies jedoch für den Einsatz am Campus Klein-Altendorf unvorteilhaft. In der Regel wird hier die Ernte in bereits erwähnten Holzgroßkisten transportiert, die sich mit Gabelstaplern oder Hubwagen einfacher bewegen und im befüllten Zustand platzsparend stapeln lassen. Aus diesem Grund wurde der Häcksler so modifiziert, dass die Großkisten am Heck des Gerätes Platz finden (siehe Abbildung 2.1 (b)).

Ergebnisse. Grundsätzlich ist anzunehmen, dass der Schnittholzertrag von Faktoren wie „der Obstart, der Standraumzumessung, vom Erziehungssystem, von der Wuchsstärke der Anlage, von den Klima- und Bodenverhältnissen sowie den jeweiligen Dünge- und Pflegemaßnahmen“ abhängt [DIESENBACHER U. OLBRISCH, 2009].

Die Tabelle 2.3 zeigt die Frischmassenerträge der sechs Wiederholungen beider Jahre sowie die jeweiligen Durchschnittswerte. In Abbildung 2.2 ist die Verteilung

2. Stand des Wissens und der Technik

der Ertragswerte dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Ertragswerte der Frischmasse (FM) zwar zwischen 90 kg und 194 kg je Fahrgasse schwanken, allerdings zeigt ein Zweistichproben t-Test, dass die Ertragsunterschiede zwischen den Erntejahren nicht signifikant sind. Die Durchschnittswerte liegen bei ca. 136 kg FM je Fahrgasse, bzw. ca. 1.900 kg FM pro ha. Die Wassergehalte der Frischmasse wurden mit $40,37 \pm 0,97\%$ (2010) und $35,47 \pm 0,60\%$ (2011) ermittelt.

Tabelle 2.3.: Schnittholzertrag vom 18.03.2010 und 15.03.2011 pro Fahrgasse und Hektar am Campus Klein-Altendorf; Sorte: Jona-Gold; eigene Erhebungen

	2010		2011	
	Ertrag FM		Ertrag FM	
	pro Reihe [kg]	pro ha [kg]	pro Reihe [kg]	pro ha [kg]
Fahrgasse 1	116,0	1.657,1	126,0	1.800,0
Fahrgasse 2	90,0	1.285,7	131,5	1.878,6
Fahrgasse 3	194,0	2.771,4	115,5	1.650,0
Fahrgasse 4	150,0	2.142,9	103,5	1.478,6
Fahrgasse 5	121,0	1.728,6	173,0	2.471,4
Fahrgasse 6	145,0	2.071,4	163,0	2.328,6
Mittelwert	136,00 ^{n.s.} $\pm 35,73$	1.942,85 $\pm 510,38$	135,42 ^{n.s.} $\pm 27,18$	1.934,53 $\pm 388,22$
Zweistichproben t-test; ^{n.s.} p-Wert > 0,05 (nicht signifikant); n = 6				

Anmerkend ist hinzuzufügen, dass Bergungsverluste nicht festgehalten wurden. Gemeint ist hiermit Material, welches der Aufnahmevorrichtung des Häckslers entging oder beim Transport aus den Großkisten fiel.

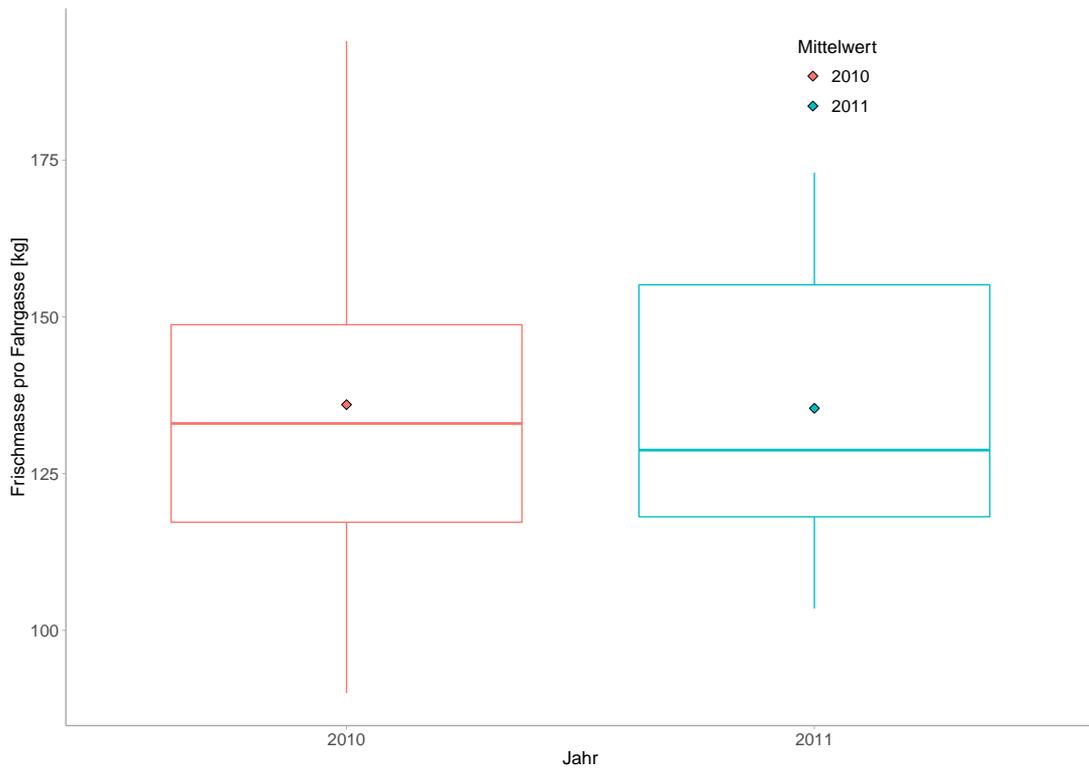


Abbildung 2.2.: Verteilung der Schnittholzerträge der Sammelversuche am Campus Klein-Altendorf; März 2010 und 2011

SCHMID [2013] beschreibt in seiner Dissertation zwei weitere Schnittholzversuche, die im Jahr 2012 durchgeführt wurden. Hierbei handelt es sich um die Sorte Jonagored (14. Standjahr) und einen Sortenmix im fünften Standjahr. Die Ertragswerte der Frischmasse lagen bei $1.970 \pm 300 \text{ kg ha}^{-1}$ und $1.850 \pm 139 \text{ kg ha}^{-1}$ und sind somit mit den Werten in Tabelle 2.3 vergleichbar. Es wird deutlich, dass die von KROMER ET AL. [1982] erhobenen Werte von 35 dt ha^{-1} bzw. 3.500 kg ha^{-1} nicht mit den Frischmasseerträgen am Campus Klein-Altendorf vergleichbar sind.

Tabelle 2.4 zeigt die Erträge der Trockenmasse (TM) aller Sammelversuche am Campus Klein-Altendorf.

⁴Wert nach SCHMID [2013]

2. Stand des Wissens und der Technik

Tabelle 2.4.: Trockenmasseerträge aus den Versuchen zur Schnittholzsammlung der Jahre 2010 bis 2012 je Hektar am Campus Klein-Altendorf

Sorte	Standjahr	Ertrag TM [kg ha ⁻¹]
Jonagold 2010	12	1.154,59 ± 284,04
Jonagold 2011	13	1.247,87 ± 247,39
Jonagored 2012 ⁴	14	1.238 ± 181
Sortenmix 2012 ⁴	5	1.104 ± 60

Die Lehr- und Forschungsstation verfügt über ca. 8 ha Apfelbaumplantagen (siehe Kapitel 4.1). Ausgehend vom Mittelwert der ermittelten Schnittholzmasse von 1.185,75 kg TM pro ha, beträgt der jährliche Gesamtertrag etwa 9.500 kg TM.

Für die energetische Betrachtung wird der Brennwert des Kronenholzes von 17,6 MJ kg⁻¹ angenommen, wodurch sich aus dem Trockenmassenertrag am Campus Klein-Altendorf eine Energiemenge von etwa 167 GJ jährlich ergibt. Somit können unter genannten Bedingungen etwa 3.700 l Heizöl (Brennwert: 45,4 MJ kg⁻¹; Dichte: 0,85 kg l⁻¹) ersetzt werden.

2.1.4. Rodungsholzertrag am Campus Klein-Altendorf

„Aus Gründen der schnelleren und besseren Anpassung an die Anforderungen der Verbraucher bezüglich der Sorten hat sich die Lebensdauer einer Obstbaumgeneration immer weiter verkürzt. Die Umtriebszeit heutiger [1982] Intensivpflanzungen liegt zwischen 15 und 25 Jahren“ [KROMER ET AL., 1982]. In den letzten 30 Jahren hat sich die Umtriebszeit weiter verkürzt und beträgt gegenwärtig (2016) acht bis zwölf Jahre.

Wie auch im Fall des Schnittholzes ist der Rodungsholzertrag von unterschiedlichen Faktoren abhängig. DIENER ET AL. [1965] haben die folgende Formel zur Berechnung der oberirdischen Holzmasse (in kg) von Obstgehölzen entwickelt:

$$m_{Rodung} = \frac{a_K \cdot h \cdot d^2 \cdot \pi \cdot \rho}{40.000} \quad (2.1)$$

Hierin sind

a_K = Korrekturfaktor,

h = Baumhöhe [m],

d = Stammdurchmesser [cm],

ρ_H = Holzdichte bei einem Wassergehalt von 50% [kg m⁻³].

„Der Korrekturfaktor a_K gibt an, inwieweit das tatsächliche Holzvolumen von Stamm und Kronengerüst mit dem Volumen eines geraden Kreiszyinders übereinstimmt, dessen Grundflächendurchmesser gleich dem Stammdurchmesser und dessen Höhe gleich der Baumhöhe ist. Je nach Fruchtart nimmt dieser Korrekturfaktor einen anderen Wert an. Für Baumhöhen ab 2,5 m kann aber unabhängig von der Obstart mit einem Faktor von 1,0 gerechnet werden“ [KROMER ET AL., 1982].

Im Rahmen der Dissertation von SCHMID [2013] wurde am Campus Klein-Altendorf unter dem Thema „Analyse und Optimierung innovativer Verfahrensketten zur Kaskadennutzung von Schnitt- und Rodungsholz aus Obstplantagen als biogener Festbrennstoff“ intensiv an Berge- und Aufbereitungsmöglichkeiten von Rodungsholz geforscht. Ein erster Rodungsversuch eines 13 jährigen Bestandes (Unterlage M9) ergab einen Frischmassenertrag von ca. 28,2 t ha⁻¹ a⁻¹) bei einem Wassergehalt von ca. 32,0%. Es wurden hierbei mehrere Sorten zu fast gleichen Teilen gerodet (Elstar, Boskoop, Gala, Golden Delicious und Jonagored), wobei keine sortenspezifischen Massenunterschiede festgehalten wurden. Zur Überprüfung dieses Ergebnisses werden im Folgenden Angaben aus der Literatur hinzugezogen.

Nach KROMER ET AL. [1982] betrug die durchschnittliche Masse eines gero-

2. Stand des Wissens und der Technik

deten Baumes der Sorte Gravensteiner mit stark wachsender Unterlage M11 und einem Alter von 18 Jahren ca. 120 kg. Die Pflanzdichte liegt in diesem Fall bei 571 Bäumen pro ha. Hierbei entfallen jeweils 40 kg auf Stamm, Kronengerüst und Wurzelstrunk. Die Masse der Sorten Golden Delicious und Cox Orange beträgt ca. 20% weniger. Das Kronengerüst wiegt etwa 40 kg, Stamm und Wurzelstrunk jeweils 30 kg.

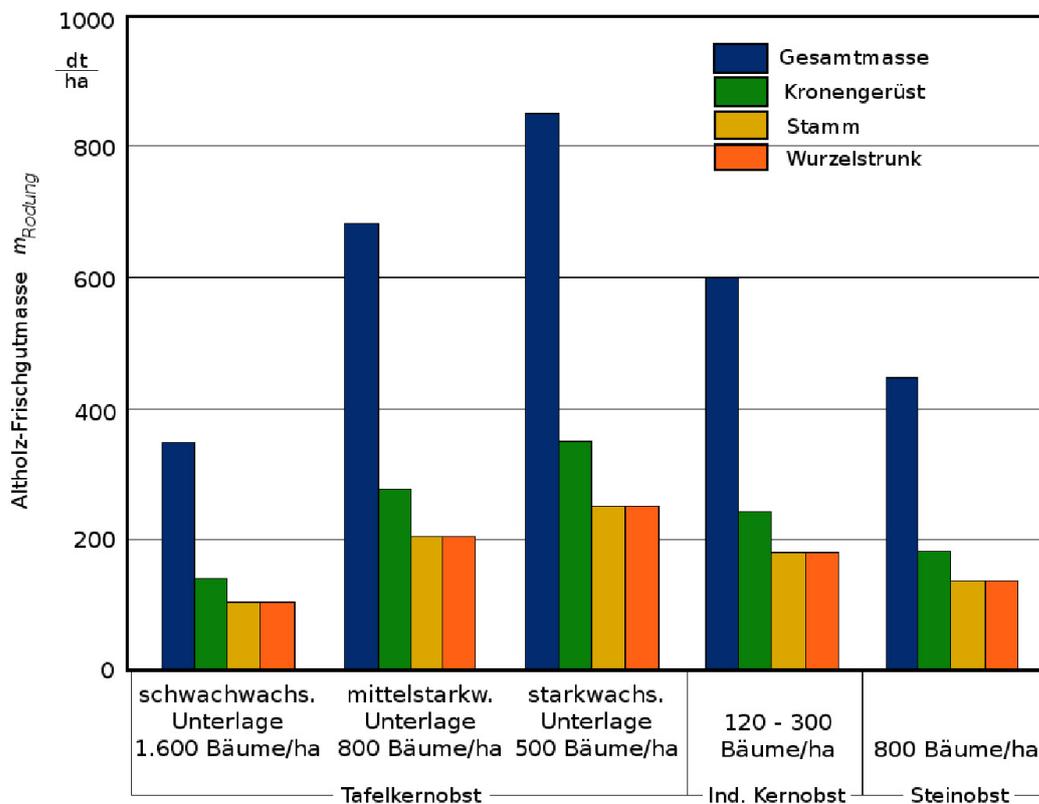


Abbildung 2.3.: Masse Rodungsholz aus Obstbaumplantagen nach KROMER ET AL. [1982]

Abbildung 2.3 zeigt, dass der jährliche Ertrag, berechnet nach Formel 2.1, je nach Unterlage und Baumanzahl zwischen 35 t ha^{-1} und 85 t ha^{-1} schwankt. Diese Werte wurden von DIESENBACHER U. OLBRISCH [2009] durch eigene Untersuchungen bestätigt. Der Wassergehalt wurde mit 50% veranschlagt. Nach

2.2. Notwendigkeit der Feuchtereduzierung

Berechnung der Trockenmasse ist der durch SCHMID [2013] erhobene Wert von jährlich ca. 20 t TM pro ha durchaus mit denen aus der angegebenen Literatur vergleichbar (ca. 25 t TM ha⁻¹ a⁻¹). Ausgehend von einer mittleren Trockenmasseproduktion von 20 t ha⁻¹ a⁻¹, ergibt sich für den Campus Klein-Altendorf ein Gesamtertrag von etwa 160 t TM pro Jahr. Die jährlich anfallende Biomasse aus den übrigen 13 ha wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da keine Angaben bezüglich der jährlichen Massenerträge bekannt sind.

Für die energetische Abschätzung des Rodungsholzes wird ein Heizwert von 18 MJ kg⁻¹ angenommen, der sich an den Werten von Kronen-, Stamm- und Wurzelholz aus Tabelle 2.1 orientiert. Eine exaktere Angabe ist nicht möglich, da die Anteile der einzelnen Fraktionen für die verschiedenen Baumarten variieren. Bei einem gesamten Ertrag von 160 t TM stehen dem Campus Klein-Altendorf jährlich 2.880 GJ an Energie aus Rodungsholz zur Verfügung. Somit ließen sich ca. 63.400 l Heizöl (Brennwert: 45,4 MJ kg⁻¹; Dichte: 0,85 kg l⁻¹) substituieren.

2.2. Notwendigkeit der Feuchtereduzierung

Wie vorhergehend beschrieben, ist an der Lehr- und Forschungsstation Campus Klein-Altendorf mit einem jährlich anfallenden Schnitt- und Rodungsholzertrag von insgesamt ca. 170 t TM aus OBP zu rechnen. Die optimale Lagerung dieses Materials ohne Biomasseverluste und unter hygienischen Bedingungen ist daher ein wichtiger logistischer Zwischenschritt. Um dies zu erreichen ist eine Reduzierung der Holzfeuchte unabdingbar, wie in den folgenden Kapiteln dargelegt wird.

2. Stand des Wissens und der Technik

2.2.1. Schimmelbildung

Als eine sehr populäre Methode zur Lagerung von Holzhackschnitzeln gilt die Aufschüttung zu Mieten. Diese werden aus praktischen Gründen und zur Kosteneinsparung häufig direkt auf dem Erdboden oder Beton angelegt, da der Lagerort so mit schwerem Gerät zum Abtransport oder zur Umlagerung befahren werden kann. Wie im Folgenden dargelegt wird, hat das Aufschütten erntefrischen Materials zu unbelüfteten Haufen jedoch wirtschaftliche, energetische und hygienische Nachteile, da diese Art der Lagerung gute Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze bietet.

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts wies FALCK [1907] nach, dass die Entwicklung von Schimmelpilzen in Wechselwirkung mit der Holzfeuchtigkeit steht: Einerseits wird die Holzfeuchtigkeit von der Abbautätigkeit der Pilze beeinflusst, da diese während des Zersetzungsprozesses Wasser freisetzen. Zum Anderen hängt das Abbauvermögen der Pilze stark von der Holzfeuchtigkeit ab.

AMMER [1964] wies nach, „daß eine über längere Zeit anhaltende Holzzerstörung erst dann erfolgen kann, wenn eine Mindestfeuchtigkeit von 30% bis 31% überschritten wird. Gesundes Holz, das unter diese Feuchtigkeitsgrenze herabgetrocknet ist, kann daher gegenüber den geprüften Pilzarten als geschützt gelten.“

Mit dem Thema der Holzzerstörung durch Mikroorganismen hat sich das *Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)* eingehend beschäftigt: In unbelüfteten Frischholzmietten kommt es zunächst zu einer Temperaturerhöhung bis 40°C durch die Atmung noch nicht abgestorbener Splintholzzellen. Eine weitere Erhöhung der Temperatur bis 70°C ist auf das Wachstum von Mikroorganismen bzw. deren Enzymen und die durch sie verursachte Degradation der Biomasse zurück zu führen. Allerdings wird das Wachstum von Pilzen ab 60°C gehemmt, so dass fast ausschließlich Bakterien für die weitere Temperaturerhöhung verantwortlich sind. Es wird allerdings vermutet, dass Bakterien nur einen geringen Anteil an der Zersetzung haben. Ihr begrenzender Faktor ist das im Holz ent-

2.2. Notwendigkeit der Feuchtereduzierung

haltene Lignin. Abbildung 2.4 zeigt typische Temperaturverläufe in Schüttungen unterschiedlicher Hacklänge. Es wird deutlich, dass die Temperaturen ein Maximum von knapp unter 60°C erreichen und somit ein verstärktes Auftreten von Bakterien ausgeschlossen werden kann [IDLER ET AL., 2008].

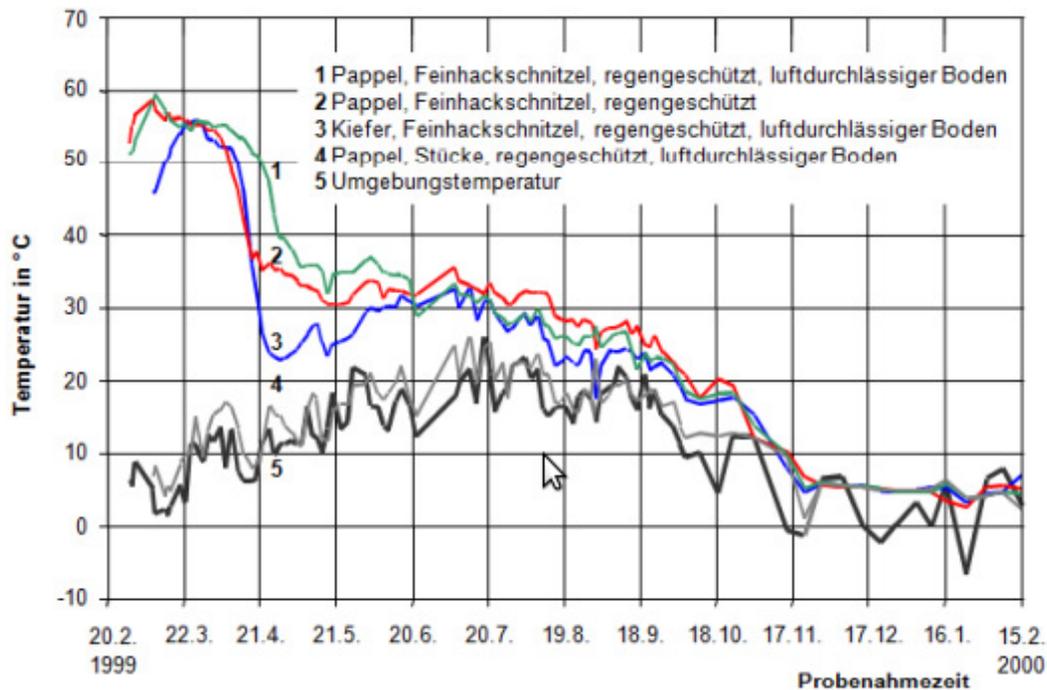


Abbildung 2.4.: Typische Temperaturverläufe unterschiedlicher Holz hackschnitzelformate während einer einjährigen Lagerung in 10 m³ Schüttung; aus IDLER ET AL. [2008]

Pilze hingegen können sowohl Lignin als auch Cellulose umsetzen. „Am Holzabbau sind sowohl holzerstörende Pilze (Braunfäule-, Weißfäule- und Moderfäulepilze) als auch Schimmelpilze beteiligt“ [IDLER ET AL., 2008]. Die Verbreitung und Vermehrung der Pilze hängt von der Feuchtigkeit des Schüttgutes, der Milieutemperatur und dem pH-Wert ab, wobei das frei verfügbare Wasser an der Oberfläche der Hackschnitzel für deren Bildung ausschlaggebend ist. Die Temperatur frisch aufgeschütteter Mieten und somit die Intensität der Pilzentwicklung wird hauptsächlich durch die Hacklänge beeinflusst [HORVÁTH ET AL., 2012].

2. Stand des Wissens und der Technik

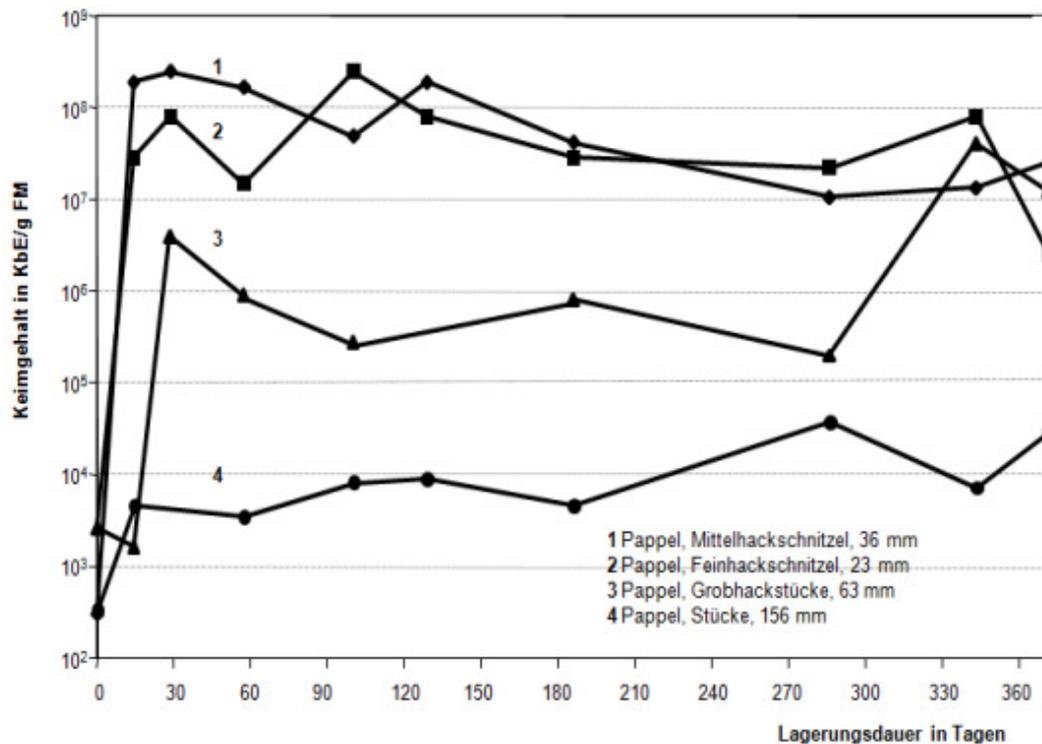


Abbildung 2.5.: Entwicklung von thermophilen Schimmelpilzen in 10 m³-Schüttungen aus Pappelhackgut unterschiedlicher Hacklänge; aus IDLER ET AL. [2008]

Während mesophile Pilze einen Temperaturbereich zwischen 20°C und 40°C bevorzugen, sind thermophile Arten in einem Temperaturniveau zwischen 50°C und 65°C anzutreffen [BALMER, 2004]. Nach Untersuchungen des ATB sind letztere potentiell humanpathogen und können „eine arbeitshygienisch bedenkliche Größenordnung erreichen“ [IDLER ET AL., 2008].

Die Normalbelastung mit Pilzsporen liegt bei $5 \cdot 10^1$ bis $5 \cdot 10^2$ koloniebildenden Einheiten (KbE) je Kubikmeter Luft für mesophile Pilze und 0 KbE m^{-3} für thermophile Spezies. In Abhängig von der Entfernung zur Hackschnitzelmiere steigt die Luftkontamination um ein bis zwei Zehnerpotenzen auf 10^1 bis 10^4 KbE m^{-3} an, wobei die thermophilen, also gesundheitsschädlichen, Sporen überwiegen. Das ATB fand zudem heraus, dass die Sporenkonzentration stark mit der Hacklän-

2.2. Notwendigkeit der Feuchtereduzierung

ge korreliert und sich mit zunehmender Hackschnitzelgröße verringert [IDLER ET AL., 2008]. Abbildung 2.5 verdeutlicht diesen Sachverhalt.



Abbildung 2.6.: Von Schimmel befallene Holzhackschnitzel

Der Trocknungsverlauf von Holzhackschnitzelmieten „ist wesentlich vom Anfangswassergehalt, der Temperaturentwicklung und der Hackschnitzelgröße abhängig. Sowohl bei Fein- als auch bei Grobhackschnitzeln und sogar ganzen Bäumen ($\varnothing < 80$ mm) ist die Trocknung nach 100 bis 150 Tagen, also mit dem Ende der Hochtemperaturphase in den Schüttungen, im Wesentlichen abgeschlossen. In Folge des hohen Strömungswiderstandes, der hohen Temperatur und der dadurch verursachten Kondensation unter der Haufenoberfläche trocknen Feinhackschnitzel innerhalb eines Jahres kaum unter 30% ab [...]. Selbst Mittelhackschnitzel unterschreiten nur selten diesen Wert. Erst ab Hackschnitzellängen über 60 mm

2. *Stand des Wissens und der Technik*

werden Wassergehalte unter 30% erreicht“ [IDLER ET AL., 2008].

Die jährlichen Masseverluste liegen in Abhängigkeit von der Hacklänge bei bis zu 30%. Durch eine Regulierung der Temperatur im Inneren der Miete auf 20°C bis 35°C können thermophile Pilze vermieden und die hygienischen Bedingungen drastisch verbessert werden. Zudem wird so der Biomassedegradation entgegen gewirkt, was insbesondere für speziell zur energetischen Verwertung angebautes Holz (z.B. aus KUP) wirtschaftliche Vorteile bietet [IDLER ET AL., 2008].

2.2.2. **Selbstentzündung**

Es wurde vorhergehend erläutert, dass die Höhe des Temperaturanstiegs in Hackgutschüttungen unter anderem von der Korngröße und dem Wassergehalt des Holzes abhängt. Die Folge extremer Temperaturentwicklung kann zum Abbrand der Miete führen, wie es beispielsweise am 10.05.2016 in Niedersachsen geschah: „Auf dem Gelände eines Entsorgungsunternehmens in Norden (Kreis Aurich) haben [...] über 2.000 Kubikmeter geschredderte Sträucher Feuer gefangen. [...] Für die langwierigen Löscharbeiten schichteten zwei Bagger die Lagerstätte [...] um. [...] Das Schreddergut lagerte auf einer Fläche von zirka 15 mal 25 Metern als haushoher Haufen im Freien. [...] Durch den natürlichen Verrottungsprozess ist die Kerntemperatur eines solchen Lagers ohnehin schon sehr hoch. Da die Außentemperaturen in den Tagen vor dem Brandausbruch deutlich in die Höhe kletterten und die Holzhäcksel auch noch Sonne und starkem Wind ausgesetzt waren, gilt eine Selbstentzündung als wahrscheinlich“ [WEEGE, 2016].

FERRERO ET AL. [2009] beschreiben den Prozess der Selbstentzündung wie folgt: „Die Ursachen für die Selbstentzündung liegen in exothermen Prozessen, die selbst bei niedrigen Temperaturen ablaufen. Die Temperatur bestimmt aber die Geschwindigkeit der Reaktionen in der Weise, dass die Reaktionsrate mit steigender Temperatur zunimmt [...].

2.2. Notwendigkeit der Feuchtereduzierung

Feststoffschüttungen sind schlechte Wärmeleiter, wodurch die Wärmeabgabe nach außen begrenzt wird. In Abhängigkeit von Umgebungstemperatur, Größe der Schüttung und Stoffeigenschaften kann daher die zeitliche Rate der Wärmeproduktion im Inneren der Schüttung größer als der über die Schüttungsoberfläche abgeführte Wärmestrom sein. Der auf diese Weise entstehende Überschuss an Wärmeenergie führt zum sogenannten Wärmestau und in dessen Folge zur Beschleunigung der Oxidationsreaktion, da die Reaktionsrate mit wachsender Systemtemperatur näherungsweise exponentiell ansteigt. Schließlich tritt „Selbstentzündung“ der Schüttung ein, das heißt, die Temperatur im Inneren der Schüttung steigt so stark an, dass das Schüttgut zur Entzündung gelangt und in der Folge abbrennt. Dabei hängt es von der Verfügbarkeit des Sauerstoffs ab, ob der Brand als Schwel- oder Glimmbrand oder mit offener Flamme verläuft.

Neben den chemischen Oxidationsprozessen, die den größten exothermen Anteil zum Gesamtprozess beisteuern, spielen auch physikalische und mikrobiologische Prozesse eine Rolle für den Wärmehaushalt einer Biomasseschüttung. So führt z. B. die Absorption von Wasser an der verhältnismäßig trockenen Feststoffoberfläche ebenfalls zur Temperaturerhöhung, da Adsorptionswärme freigesetzt wird [...]. Mikrobiologische Prozesse können besonders im Temperaturbereich bis ca. 80°C prozessbeschleunigend wirken und je nach Umweltbedingungen sehr vielfältig ablaufen.“

In dem Forschungsbericht von FERRERO ET AL. [2009] wird ferner beschrieben, dass „die größte Abhängigkeit der [Selbstentzündungstemperatur] T_{SE} [...] zu dem [Volumen/Grundfläche-] V/A-Verhältnis der Schüttung“ besteht. Somit lässt sich für T_{SE} kein allgemein gültiger Wert angeben, sondern er ist für jeden Miete individuell zu bestimmen. Grundsätzlich kann durch die getätigten Untersuchungen abgeleitet werden, dass sich „bis zu einer Lagerhöhe von 4 m [...] eine Holzhalde nicht selbst entzünden kann. Die Begrenzung der Haldenhöhe auf 4 m für fein zerkleinertes Material (wie z.B. Kiefernspäne) sollte daher beachtet wer-

2. Stand des Wissens und der Technik

den. Für Material mittlerer Größe (Feinhackschnitzel, Hackschnitzel, usw.) kann das Material höher gelagert werden. Als Grenze wird hier eine Höhe von 5 m vorgeschlagen“ [FERRERO ET AL., 2009].

2.2.3. Energieinhalt

Neben den zu vermeidenden Risiken der Schimmelpilzbildung und Brandgefahr ist die Steigerung des Energieinhaltes der wohl wichtigste Grund für eine Trocknung von Brennholz. Dieser wird für Brennstoffe im Allgemeinen als unterer Heizwert H_u angegeben.

„Der Energieinhalt von einem Liter Heizöl liegt bei etwa 10 Kilowattstunden (kWh) oder 36 Megajoule (MJ). Ein Liter Heizöl kann energetisch etwa von 2,5 Kilogramm Holz mit einem Wassergehalt von 20% [...] ersetzt werden. [...] Der untere Heizwert H_u von Holz und Agrarbrennstoffen nimmt pro Masseneinheit mit steigendem Wassergehalt linear ab. Der Heizwert von absolut trockenem Holz (Darrgewicht) liegt bei etwa 18,8 MJ kg⁻¹. Bei einem Wassergehalt von rund 88% (theoretischer Wert) ist er gleich null [...]. Waldfrisches Holz [...] hat einen Wassergehalt, der je nach Baumart, Alter und Jahreszeit zwischen 45% und 60% liegt. Bei lufttrockenem Holz [...] kann man von Wassergehalten zwischen 12% und 20% ausgehen“ [BRUHN U. REISINGER, 2015].

Abbildung 2.7 zeigt das lineare Verhältnis zwischen dem Heizwert von Laub- und Nadelholz und dem enthaltenen Wassergehalt. Das Diagramm wurde aus Werten des Energieinhaltes nach HAHN ET AL. [2014] und nach folgender Gleichung entwickelt:

$$H_u = H_{u, TM} \cdot \left(1 - \frac{W}{100}\right) - \frac{W}{100} \cdot Q_v \quad (2.2)$$

Hierin sind

$H_{u, TM}$ = unterer Heizwert der Trockenmasse [MJ kg⁻¹],

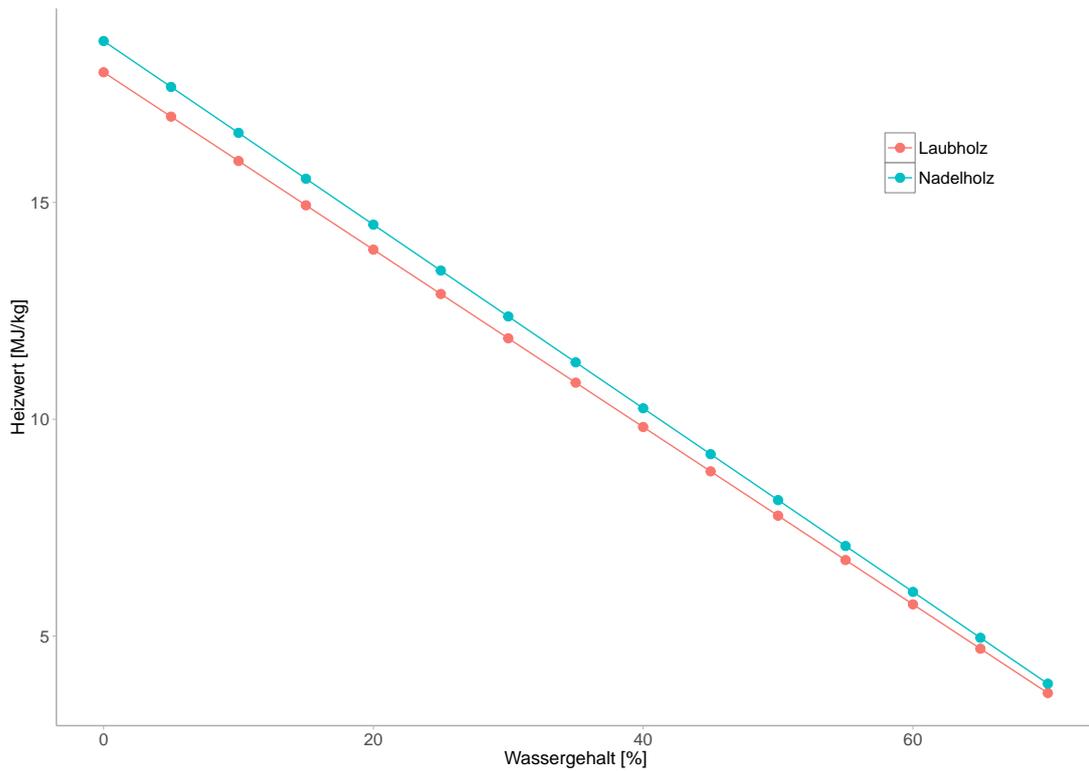


Abbildung 2.7.: Heizwert von Laub- und Nadelholz in Abhängigkeit vom Wassergehalt

W = Wassergehalt des Holzes [%],

Q_v = Verdampfungswärme von Wasser [2,448 MJ kg⁻¹].

2.3. Trocknung

Der Verfahrensschritt der Trocknung ist, wie gezeigt wurde, aus mehreren Perspektiven notwendig. Da der Biomasseanfall (z.B. Rodung von Plantagen, Ernte von Früchten) in zeitlicher sowie räumlicher Distanz zur Verwertung steht, ist eine Lagerung der Materialien unumgänglich. In seiner Dissertation beschreibt SCHMID [2013] einen Versuch zur Lagerung grob gehäckselter Frischmasse in

2. Stand des Wissens und der Technik

zwei unbelüfteten Mieten. Während sich eine Schüttung unter einem Dach befand, wurde die anderen lediglich mit einem Vlies abgedeckt. Im ersten Fall reduzierte sich der Wassergehalt von 34% auf 29% in 15 Monaten. Das mit Vlies abgedeckte Material zeigte nach sieben Monaten eine Verringerung um ca. 6% auf 27%.

Wie bereits aufgezeigt wurde, ist eine sichere, verlustarme Aufbewahrung jedoch nur durch die Reduzierung des Wassergehaltes möglich. Dies führt gerade in Bezug auf biogene Festbrennstoffe zu einer Steigerung der Qualität und des Heizwertes. Zudem reduziert eine Trocknung das Gewicht, was sich vor allem beim Transport kostensparend auswirkt.

Im Folgenden werden die Grundlagen der natürlichen und technischen Trocknung erläutert und der Stand des Wissens und der Technik bezüglich konventioneller und solarer Trocknungssysteme dargestellt.

2.3.1. Begriffserklärung

Neben dem Eindampfen, Sublimieren, Extrahieren und der Kristallisation gehört das Trocknen bzw. die Trocknung zu den thermischen Verfahren der Feststoffabtrennung. Nach HEMMING [1999] ist die Trocknung „die Abtrennung der Flüssigkeit aus einem Feststoff-Flüssigkeits-System, dem Feuchtgut, durch Verdunsten oder Ausdampfen der Flüssigkeit. Endprodukt ist das Trockengut.“

2.3.2. Grundlagen

Holzfeuchtigkeit. Nach KOLLMANN [1951] wird die Holzfeuchtigkeit bzw. Holzfeuchte in den kapillaren und den hygroscopischen Bereich unterteilt. Der Übergang wird als Fasersättigung bezeichnet. In zuerst genanntem befindet sich freies, tropfbares Wasser in den Zellhohlräumen. Die Holzfeuchte liegt hier bei etwa $U >$

30% ($W > 23\%$). „Oberhalb der Fasersättigung verändern sich die mechanischen Holzeigenschaften nicht mehr oder nur noch sehr wenig. Die Schwindung des Holzes setzt daher im Wesentlichen erst mit Unterschreiten der Fasersättigung ein und damit mit Beginn der Austrocknung der Zellwände durch die Entfernung des gebundenen Wassers“ [KALTSCHMITT ET AL., 2016].

„Im hygroscopischen Bereich [...] befindet sich das Wasser gebunden in den Zellwänden und als Dampf in den größeren Zellhohlräumen; in den Zellhohlräumen ist kein frei tropfbares Wasser. Die Holzfasern sind nicht gesättigt, sie unterliegen einer Volumenänderung, wenn sich die Holzfeuchte ändert“ [NEUHAUS, 2009]. In diesem Bereich ist das Holz in der Lage, Feuchtigkeit aus der Luft aufzunehmen (Adsorption) und auch wieder abzugeben (Desorption).

Trocknungspotential. Das Trocknungspotential bezeichnet die Masse an Wasser, die durch die Trocknungsluft bis zum Erreichen einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 100\%$ bzw. bis zur maximalen Sättigung aufgenommen werden kann. Durch eine Erwärmung der Trocknungsluft wird die relative Luftfeuchte reduziert, wodurch sich ihr Aufnahmepotential erhöht. Das Trocknungsvermögen errechnet sich demnach aus der Differenz zwischen dem Feuchtegrad der Zu- und Abluft. „In der Praxis kommt jedoch eine 100%-ige Beladung der Trocknungsluft kaum vor. Um die Trocknungsdauer zu verkürzen, wird meist eine niedrigere relative Luftfeuchte der Abluft von ca. 80% akzeptiert“ [KALTSCHMITT ET AL., 2016].

Mit Hilfe des h-x-Diagramms nach Richard Mollier (1863 - 1935) lassen sich Zustandsänderungen feuchter Luft bei Umgebungsdruck (1.013 mbar), also unter isobaren Bedingungen, nachvollziehen und ermitteln. Es handelt sich um ein schiefwinkliges Koordinatensystem, aus dem Temperatur, spezifische Enthalpie, relative Feuchte, absoluter Wassergehalt und Partialdruck des Wasserdampfes abgelesen werden können.

Um den Trocknungsprozess und die dabei ablaufenden Zustandsänderungen

2. Stand des Wissens und der Technik

der Trocknungsluft zu veranschaulichen, wird nachfolgend ein Fallbeispiel anhand des Diagramms nach Mollier erklärt (Abbildung 2.8). Die Eingangsdaten stammen aus den tatsächlichen Aufzeichnungen der Wetterstation am Campus Klein-Altendorf.

Rein willkürlich wurden die Stundenwerte für Temperatur und relative Feuchte des 16.10.2009 um 14 Uhr ausgewählt, die durch die Wetterstation am Campus Klein-Altendorf registriert wurden (Beschreibung der Wetterstation siehe Kapitel 4). Die Umgebungstemperatur lag zu diesem Zeitpunkt bei $\vartheta_1 = 10,16^\circ\text{C}$, während die relative Feuchte 75,15% (φ_1) betrug. Dieser Zustand der Umgebungsluft ist in Abbildung 2.8 mit Z_1 benannt, und es wird ersichtlich, dass der absolute Wassergehalt bzw. Feuchtegrad x_1 etwa $0,0058 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$ beträgt. Im Falle eines Betriebs mit unkonditionierter Frischluft sinkt die Lufttemperatur auf $\vartheta_2 \approx 7,96^\circ\text{C}$, während der Feuchtegrad auf $x_2 \approx 0,0066 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$ ($\varphi_2 = 100\%$) steigt (Zustand Z_2). Die Feuchtegraddifferenz Δx beträgt somit $0,0008 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$. In dem Prozess hat die spezifische Enthalpie h einen gleichbleibenden Wert von ca. $22,5 \text{ kJ kg}^{-1}$.

Unter Verwendung einer Luftvorwärmung, die einen Temperaturhub von $+5 \text{ K}$ ermöglicht, steigt die Temperatur von ϑ_1 auf $\vartheta_{1a} = 15,16^\circ\text{C}$. Während sich der Feuchtegrad x_1 nicht ändert, sinkt die relative Feuchte auf $\varphi_{1a} = 53,91\%$. Da der Frischluft bei der Temperaturkonditionierung von außen Wärme zugeführt wird, verläuft dieser Schritt nicht isenthalp, wodurch die Enthalpie auf $h_a \approx 30 \text{ kJ kg}^{-1}$ steigt. In der anschließenden, wieder isenthalp ablaufenden Trocknung, sinkt die Lufttemperatur auf $\vartheta_{2a} = 10,19^\circ\text{C}$. Der absolute Wassergehalt der Abluft x_{2a} beträgt $0,0077 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$ (Feuchtegraddifferenz $\Delta x = 0,0019 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$).

2.3. Trocknung

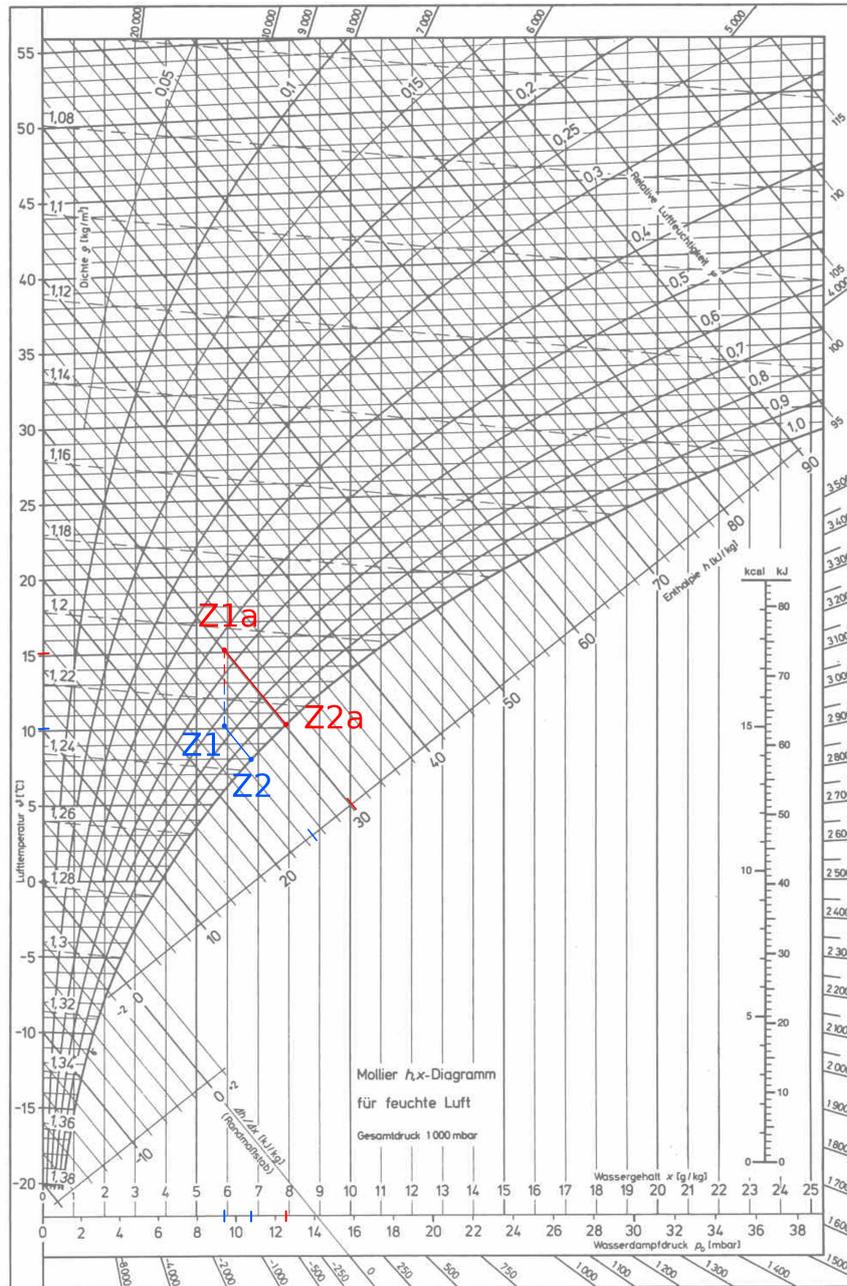


Abbildung 2.8.: Zustandsänderungen unconditionierter (Z_1) und +5 K konditionierter (Z_{1a}) Trocknungsluft bis zum Erreichen der Sättigungspunkte (Z_2 ; Z_{2a}); Ausgangswerte für Zustand Z_1 (Temperatur und relative Luftfeuchte) wurden am 16.10.2009 um 14:00 Uhr durch die Wetterstation des Campus Klein-Altendorf aufgezeichnet; Diagramm abgeändert aus ANONYMUS07 [2016]

2. Stand des Wissens und der Technik

Belüftungswiderstand. Bei der Durchströmung von Schüttungen ist der Strömungswiderstand Δp des jeweiligen Materials zu überwinden. Dieser ist abhängig von der Höhe der Schüttung, der Luftgeschwindigkeit und den Materialeigenschaften, von denen vornehmlich die Form und Größe der einzelnen Partikel Ausschlag gebend sind [WAGNER, 2012]. Nach KUPTZ ET AL. [2015] besteht bei Schütthöhen von bis zu 2 m ein linearer Zusammenhang zwischen dem Belüftungswiderstand und der Durchströmlänge. „In der Praxis werden dazu meist Sicherheitszuschläge hinzuaddiert, da - je nach Schichthöhe - im Trockner eine mehr oder weniger starke Verdichtung des gelagerten Materials stattfinden kann; beispielsweise wird bei Hackgut i. Allg. von einem etwa 20%-igen Zuschlag ausgegangen“ [KALTSCHMITT ET AL., 2016].

Die Berechnung des Strömungswiderstands von Holzhackgut ist schwierig, da die einzelnen Partikel über keine einheitliche Form und Größe verfügen. KUPTZ ET AL. [2015] legte dar, dass eine enorme Spannweite beim Belüftungswiderstand besteht, der u.a. vom Material (z.B. Waldrestholz, Energierundholz, KUP) sowie vom Herstellungsverfahren abhängt. So fällt der Strömungswiderstand umso geringer aus, je schärfer die Zerkleinerungswerkzeuge sind. Scharfkantiges Hackgut weist ein geringes Δp auf als zersplittertes.

GUSTAFSSON [1981] gibt für den Belüftungswiderstand in Abhängigkeit von der Partikelgröße bei einer Luftgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ Werte von ca. 300 Pa m^{-1} (Teilchengröße 5 mm), 100 Pa m^{-1} (Teilchengröße 15 mm) und ca. 50 Pa m^{-1} (Teilchengröße 25 mm) an.

2.3.3. Natürliche Trocknung

Grundsätzlich werden drei Verfahren der natürlichen Trocknung unterschieden.

Bodentrocknung. Ein aus zeitlicher und finanzieller Sicht wenig aufwendiges Verfahren ist die Bodentrocknung bzw. die Trocknung durch Sonnenenergie. Hierbei wird das Gut dünn-schichtig auf einem festen Untergrund ausgelegt und durch die direkte Sonneneinstrahlung und den darüber streichenden Wind getrocknet. Die Trocknung von Holzhackgut kann je nach Wetterbedingung innerhalb eines Tages abgeschlossen sein. Nachteilig ist jedoch die zur Ausbreitung notwendige große Grundfläche sowie der hohe manuelle Arbeitsaufwand [FELLER ET AL., 1999].

Trocknung durch Selbsterwärmung. Bei dieser Art der Trocknung wird der bereits beschriebene Temperaturanstieg genutzt, der in Holz-mieten durch biochemische Prozesse entsteht. Die Miete wird hierbei auf einem luftdurchlässigen Boden gelagert. Durch die Aufwärtsbewegung der warmen, feuchten Luft im Innern der Miete entsteht ein Sog, der Frischluft im unteren Teil der Schüttung nachzieht. Nach PRANKL U. WEINGARTMANN [1994] bringt dieses Verfahren jedoch erhebliche Nachteile mit sich. Zum einen eignet es sich nur für grobe Holzhackschnitzel mit geringem Feinanteil, da ansonsten die Durchströmung behindert wird und es zur Ausbildung nasser Zonen und folglich zu Schimmelbildung kommen kann. Zudem muss grundsätzlich mit einem relativ hohem Maß an Trockenmasseverlusten gerechnet werden, da die biochemische Umsetzung des Materials, wie bereits erwähnt, für den Antrieb des Prozesses verantwortlich ist. Darüber hinaus ist eine Abdeckung des Materials bzw. eine Lagerung unter Dach unabdingbar, um die Wiederbefeuchtung durch Niederschlag zu vermeiden.

Die Trocknung von Holzhackgut mittels Selbsterwärmung wurde an der Technischen Universität Dresden durch BRUMMACK [2008] näher untersucht. In dem Verfahren der Dombelüftung wird das Hackgut unter einer isolierten Abdeckung platziert. Die Belüftung findet über seitlich angeordnete horizontale Zuluftkanäle statt. Die Abluft wird über vertikale Kanäle, die in der Schüttung platziert wer-

2. Stand des Wissens und der Technik

den, abgeführt (Abbildung 2.9). Neben den genannten Nachteilen der Trocknung durch Selbsterwärmung ist der Aufbau dieses Verfahrens zudem recht aufwendig. Darüber hinaus müssen die Abstände zwischen Zu- und Abluftkanälen für jede Charge neu ausgelegt werden, wenn sich die Beschaffenheit des Aufgabegutes (z.B. Korngröße) ändert.

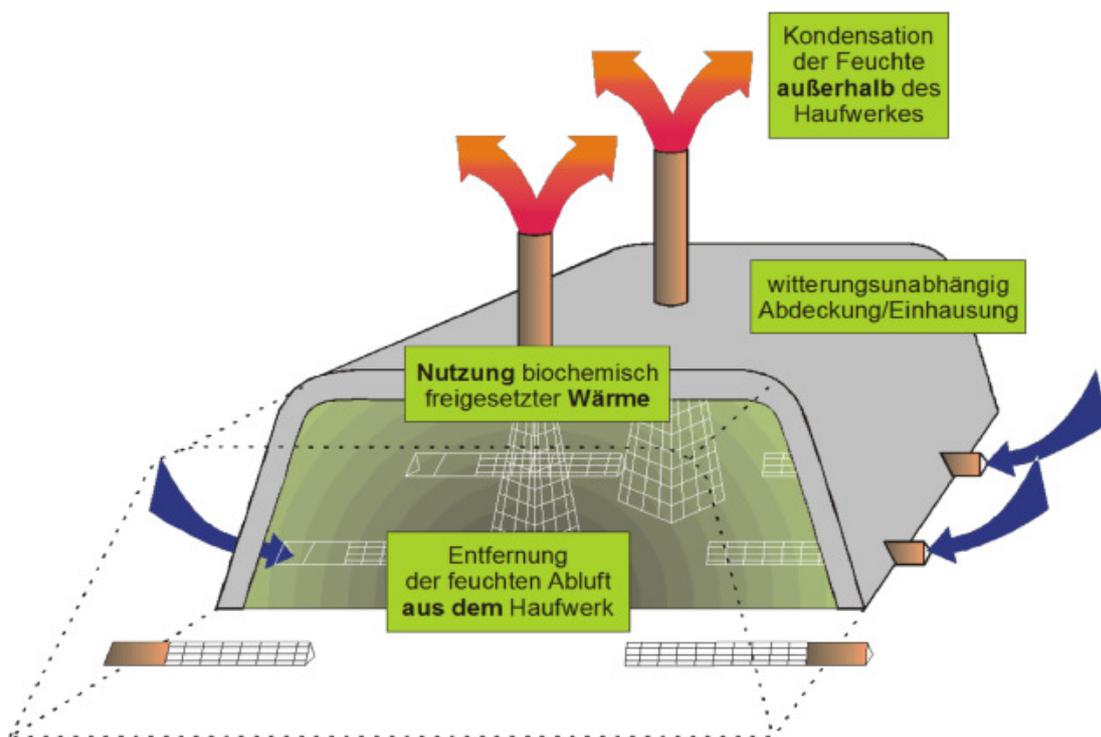


Abbildung 2.9.: Prinzip des Dombelüftungsverfahrens nach MOLLEKOPF U. BRUMMACK [2011]

Konvektionstrocknung. „Bei Stapelgut erfolgt die Trocknung hauptsächlich über die natürliche Luftströmung durch das Material. Diese Trocknung ist vor allem für geschichtetes Scheitholz von Bedeutung“ [KALTSCHMITT ET AL., 2016]. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf der Bereitstellung von Holzhackschnitzeln liegt, wird auf dieses Verfahren nicht näher eingegangen.

2.3.4. Technische Trocknung

Die technische Trocknung lässt sich in drei Varianten einteilen.

Kaltlufttrocknung. Bei der Kaltlufttrocknung, auch Belüftungstrocknung genannt, wird entweder unconditionierte oder bis 5 K vorgewärmte Umgebungsluft mittels Ventilatoren durch das Aufgabegut gefördert [MÜHLBAUER, 2009]. Die Verwendung nicht vorgewärmter Zuluft eignet sich in erster Linie zum Abtransport der Feuchtigkeit und Wärme im Innern von Schüttungen. Allerdings sollte speziell im Winter ein intermittierender Betrieb vorgezogen werden, da die relative Luftfeuchte hoch ist und mit einer Rückbefeuchtung des Hackgutes durch die Trocknungsluft zu rechnen ist. Nach KALTSCHMITT ET AL. [2016] sollte im Fall von Hackgut eine maximale Mietenhöhe von 1 m nicht überschritten werden, um eine gleichmäßige Durchströmung zu gewährleisten und nasse Zonen zu vermeiden.

Warm-/Heißlufttrocknung. Wie der Name schon sagt, findet bei diesem Verfahren hoch temperierte Zuluft Verwendung. Die Temperaturerhöhung liegt hier im Bereich zwischen 20 K und 600 K. Zur Konditionierung der Trocknungsluft werden entweder fossile Brenner im Öl- bzw. Gasbetrieb oder Abwärme aus Biogas- und Heizanlagen oder betriebliche Abluft verwendet. „Die Wärmeübertragung erfolgt in diesen Anlagen sowohl konvektiv über die Luft als Energieträger und Transportmittel als auch konduktiv durch die häufigen Kontakte des Trockengutes mit den eingebauten Fördereinrichtungen im Trockner“ [KALTSCHMITT ET AL., 2016]. Durch die hohen Lufttemperaturen verläuft der Trocknungsprozess ungleich schneller als bei der Kaltlufttrocknung.

Heißdampftrocknung. In diesem Verfahren wird das Aufgabegut mit Heißdampf in Kontakt gebracht, der über Temperaturen von mehr als 120°C verfügt.

2. Stand des Wissens und der Technik

„Der Dampf überträgt die Wärme konvektiv an das Gut. Dieser Vorgang der Wärmeübertragung ist besonders effektiv, da Wasserdampf einen sehr guten Wärmeübergangskoeffizienten besitzt, andererseits auf Grund seiner niedrigen Viskosität das Gut sehr rasch penetriert. Hierdurch wird das Verfahren insbesondere bei porösen Schüttgütern sehr effektiv und führt zu einer nur kurzen Verweildauer im Trocknungsprozess. Der Heißdampf nimmt die aus dem Gut verdampfte Feuchte auf und kühlt sich durch Abgabe der Verdampfungsenergie ab. Die aus dem Gut aufgenommene Feuchte wird zu überschüssigem Dampf, welcher aus dem Trocknungsraum abgeleitet wird. Die abgegebene Verdampfungswärme wird der Dampf-atmosphäre wieder zugeführt. Hierdurch wird die Temperatur der Dampf-atmosphäre konstant gehalten und der Dampf bleibt überhitzt“ [ANONYMUS08, 2016].

Zu den Vorteilen gehört, dass sich das Verfahren speziell auf sensible Lebensmittel gut anwenden lässt, da die kurze Trocknungsphase lediglich zu einem geringen Abbau enzymatischer Inhaltsstoffe kommt. Zudem weist das Verfahren einen um 50% geringeren Energiebedarf und eine um 80% reduzierte Trocknungszeit auf als die herkömmliche Heißlufttrocknung [ANONYMUS08, 2016].

2.3.5. Konventionelle Trocknersysteme

Zu den technisch einfachen konventionellen Systemen gehören Satztrockner, die in Form von Container-, Silo- oder Kastentrocknern verfügbar sind. Das Aufgabegut wird hierbei nicht gefördert, sondern liegt im Trockner als Schüttung vor. Der Chargenbetrieb erfordert zwar einen hohen manuellen Arbeitsaufwand, jedoch weisen die Systeme dadurch einen technisch unkomplizierten Aufbau auf, wodurch die Anschaffungskosten relativ gering sind. Der Massendurchsatz liegt in der Größenordnung von etwa 20 m^3 in ein bis zwei Tagen.

Ein wesentlich höherer Massendurchsatz von bis zu 50 t h^{-1} kann mit konti-

nuerlich arbeitenden Systemen, die über eine automatische Gutförderung verfügen, erzielt werden. Zu den Geräten mit mechanischem Transport gehören Schubwende-, Band- und Trommeltrockner, deren Anschaffungskosten aufgrund der hohen Technisierung im fünf- bis sechsstelligen Bereich liegen.

Bei konventionellen Trocknungssystemen erfolgt die Luftvorwärmung mit fossilen Brennern, durch die Nutzung von Abwärme (aus Blockheizkraftwerken, Biogasanlagen, usw.) bzw. durch die Kombination aus beidem.

2.3.6. Solare Trocknungssysteme

Im Gegensatz zu den konventionellen Trocknern weisen Solartrockner einen wesentlich geringeren Massendurchsatz auf. Allerdings sind die Investitionskosten zumeist ebenfalls geringer, was der relativ simplen Bauweise und wenig aufwendigen Technik geschuldet ist. Nach KUMAR ET AL. [2015] wird grundsätzlich zwischen direkten, indirekten sowie Hybridsystemen unterschieden.

Direkte Solartrockner. Bei diesen Geräten trifft die solare Einstrahlung direkt auf das Produkt, welches sich in einem transparent abgedeckten Behälter befindet. Die Abdeckung kann im günstigsten Fall aus einer einfachen Folie bestehen und bei einem hochwertigeren Aufbau aus Hartkunststoff (z.B. Plexiglas, Makrolon) oder Glas. Die Trockner sind sowohl mit als auch ohne künstliche Belüftung verfügbar.

Abbildung 2.10 zeigt einen direkten Solartrockner, bei dem Lufteinlässe an den äußeren Seiten des Bodens angebracht sind. Der Boden ist mit einer schwarzen Kunststoffolie ausgelegt, die sich durch die auftreffende Solarstrahlung erhitzt und Wärme an die eintretende Frischluft abgibt. Ein natürlicher Luftzug, Venturieffekt genannt, wird durch weitere Öffnungen in den Giebelseiten erzeugt. Die dadurch unter dem Foliendach entstehende Luftströmung erzeugt einen Sog,

2. Stand des Wissens und der Technik



Abbildung 2.10.: Direkter Solartrockner ohne künstliche Belüftung nutzt Venturieffekt für Luftwechsel; Standort: Revelation Life, Kampala, Uganda; Januar 2016

durch den Frischluft durch die Bodeneinlässe mit dem Trockengut in Kontakt kommt.

Indirekte Solartrockner. Der typische Aufbau eines indirekten Solartrockners wird beispielsweise durch HEGDE ET AL. [2015] beschrieben: Diese Trocknertypen weisen eine räumliche Trennung zwischen Solarkollektor und Trockengutbehälter (TGB) auf. Die solare Einstrahlung trifft somit nicht direkt auf das Trockengut auf, sondern erwärmt die Trocknungsluft in einem räumlich getrennten Kollektor. In diesem steigt die erwärmte Luft auf und tritt in den TGB ein. Dies kann sowohl ausschließlich durch die natürliche Thermik als auch durch eine technische Luftförderung geschehen. Nach KUMAR ET AL. [2015] stellen sich indirekte Solartrockner mit Gebläseunterstützung gegenüber anderen Modellen als überlegen dar. Sie weisen die höchste Trocknungsgeschwindigkeit auf und führen zu den qualitativ besten Ergebnissen.

Die TGB sind zumeist für die Aufnahme von Horden ausgelegt und verfügen

2.3. Trocknung

über eine recht kompakte Bauweise. Dadurch eignen sie sich in erster Linie für die Trocknung von Früchten, Gemüse und Kräutern. So beschreibt HEGDE ET AL. [2015] die Trocknung von Bananen (Abbildung 2.11), während der Fokus bei EL-SEBAII U. SHALABY [2013] auf der Bereitstellung von Thymian und Minze liegt. Jedoch gibt es auch Untersuchungen, alternative Brennstoffe aufzubereiten. MONTERO ET AL. [2015] beschreibt beispielsweise die Trocknung von Rückständen aus der Olivenölherstellung.

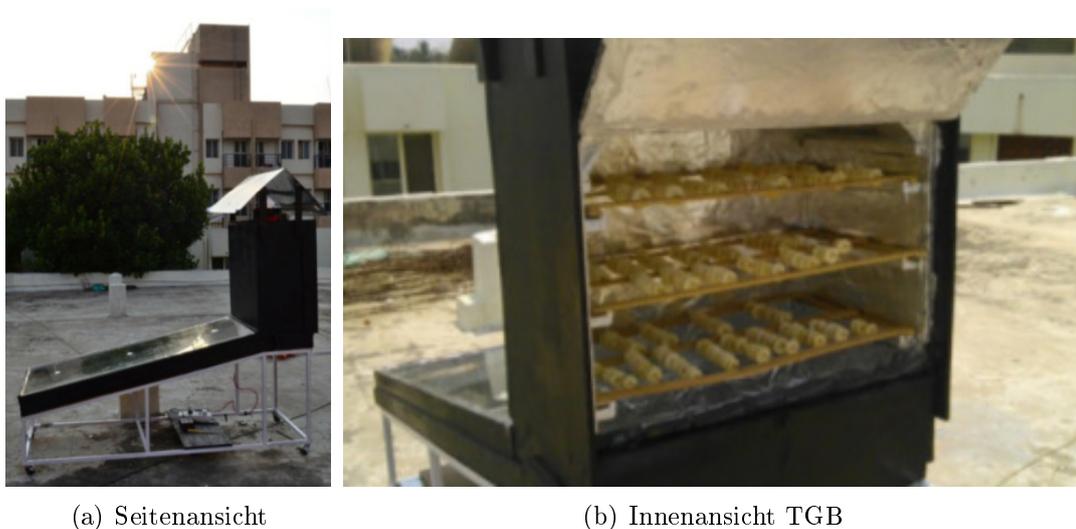


Abbildung 2.11.: Indirekter Solartrockner ohne künstliche Belüftung zur Trocknung von Bananenscheiben; aus HEGDE ET AL. [2015]

Hybride Solartrockner. MÜHLBAUER U. ESPER [2001] beschreiben einen solaren Tunneltrockner mit künstlicher Luftführung, der in einer Kooperation zwischen dem *Institut für Agrartechnik in den Tropen und Subtropen* der *Universität Hohenheim* und der *Innotech Ingenieurgesellschaft mbH* entwickelt wurde: „Der solare Tunneltrockner besteht im Wesentlichen aus einem Luftkollektor, einem dahinter angeordneten Tunneltrockner, in dem das zu trocknende Gut in dünner Schicht ausgebreitet und von der Trocknungsluft umströmt wird, sowie mehreren Axialventilatoren [Abbildung 2.12]. Luftkollektor und Trockner sind jeweils 2

2. *Stand des Wissens und der Technik*

Meter breit bei einer Länge von jeweils 10 Meter. Kollektor und Trockner werden auf einer Unterkonstruktion in Arbeitshöhe installiert, um das Be- und Entladen des Trockners zu erleichtern.

Der Trockner ist modular aufgebaut, wodurch der Transport und der Aufbau wesentlich vereinfacht werden. Der Boden des Tunnelrockners besteht aus Wärmedämmpaneelen, die mit einem Nut und Federsystem sowie einem verzinkten Metallrahmen verbunden sind. Luftkollektor und Trockner werden mit einer 0,2 mm starken UV-stabilisierten PE-Folie überspannt, die mit einem Klemmprofil am Rahmen befestigt wird. Zur effizienten Umwandlung der Solarstrahlung in Wärme ist der Boden des Kollektors und Trockners mit schwarzem Solarlack gestrichen. Aufgrund der in tropischen Ländern häufigen und heftigen Niederschläge wird die Trocknungsanlage mit der Abdeckfolie dachförmig überspannt, wodurch Überfluten oder Eindringen von Wasser verhindert wird. Zur Erleichterung des Befüllens und Entleerens des Trockners lässt sich die Abdeckfolie mit Hilfe einer Wickelwelle aufrollen.“

Durch die räumliche Trennung zwischen dem Solarkollektor und der Trockengutaufnahme, ergibt sich ein indirektes Trocknungssystem. Allerdings ist das Trockengut zusätzlich der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt, wodurch zugleich eine Komponente vorhanden ist, die die direkte Einstrahlung ausnutzt. Bei dem Tunnelrockner handelt es sich somit um ein Hybridsystem.

Einen hybriden Trockner, der zwei unterschiedliche Wärmequellen nutzt, wird durch PRASAD ET AL. [2006] beschrieben. Es handelt sich hierbei um die Kombination aus einem direkten Solartrockner, in dem das Gut unter einer transparenten Abdeckung in Horden gelagert wird und einer darunter angeordneten Brennkammer für Biomasse. Die bei der Verbrennung entstehende Hitze wird an die Trocknungsluft abgegeben, die anschließend dem Trockengut zugeführt wird (Abbildung 2.13).

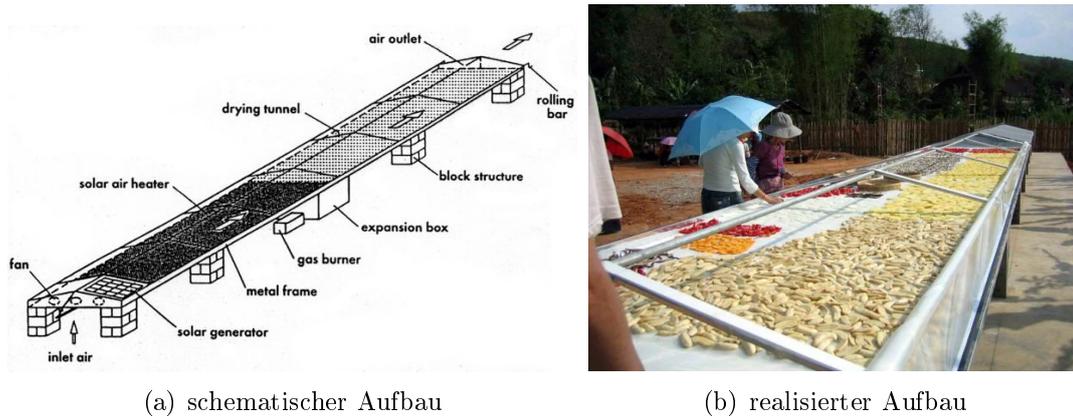


Abbildung 2.12.: Schematischer (a) und in China realisierter Aufbau (b) eines solaren Tunneltrockners; aus ANONYMUS09 [2014]

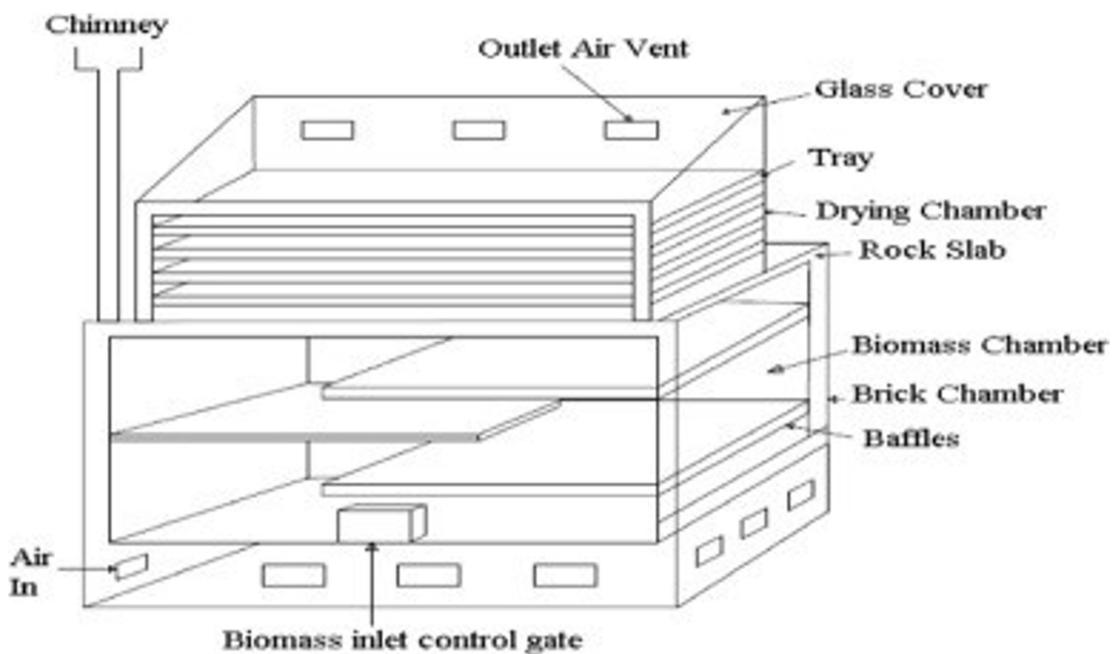


Abbildung 2.13.: Schematischer Aufbau des hybriden Solar- und Biomassetrockners nach PRASAD ET AL. [2006]

Eine Sonderstellung nimmt die konstruktionstechnisch relativ aufwendige *PHotovoltaik-Abwärme basierende Schüttgut-Trocknung (PHAST)* ein. Das Grundprinzip wurde von der *CONA Entwicklungs- und Handelsgesellschaft mbH* entwickelt

3. Arbeitshypothesen

Es wurde dargestellt, dass am Campus Klein-Altendorf etwa 170 t holzartige TM jährlich anfallen, deren Trocknung aus hygienischen, energetischen und sicherheitstechnischen Gründen unabdingbar ist. Die natürliche Trocknung wird als Verfahren ausgeschlossen, da sie zu arbeits- und platzintensiv ist. Herkömmliche Trocknungssysteme stellen zu hohe Anschaffungskosten dar und sind nur dann rentabel, wenn der Massendurchsatz entsprechend hoch ist und sie mit Abwärme versorgt werden können. Die verfügbaren Solartrockner weisen entweder einen zu niedrigen Massendurchsatz auf oder sind im Aufbau zu arbeits-, zeit- und kostenaufwendig.

Wie aus der Darstellung des aktuellen Standes des Wissens und der Technik zu entnehmen ist, existiert folglich derzeit keine für den Campus Klein-Altendorf praktikable und wirtschaftlich akzeptable Methode der solaren Holz Trocknung. Zudem werden durch die Literatur begrenzende Faktoren aufgezeigt. So sollte die Lagerhöhe von Holzhackschnitzeln mit erhöhtem Feinanteil nicht in unbelüfteten Mieten mit einer Höhe von über 4 m erfolgen. Die Belüftung derartiger Schüttungen gestaltet sich jedoch als energieaufwendig, da der hohe Belüftungswiderstand zum Einsatz großer Ventilatoren zwingt. Allerdings gibt die Literatur keinen Aufschluss darüber, ob eine gleichmäßige Belüftungstrocknung von Mieten dieser Höhe mit Luftgeschwindigkeiten von unter $0,1 \text{ m s}^{-1}$ möglich ist und wie hoch der Belüftungswiderstand von Holzhackschnitzeln ist. Durch GUSTAFSSON [1981] ist lediglich bekannt, dass er bei einer Teilchengröße von 15 mm und einer Luftgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ etwa 100 Pa m^{-1} beträgt. Daraus ergibt sich folgende Arbeitshypothese:

3. *Arbeitshypothesen*

1. Durch die Regulierung der Trocknungsluftgeschwindigkeit auf unter $0,1 \text{ m s}^{-1}$ lässt sich der Belüftungswiderstand einer Schüttung der Größenklasse P16 mit einer Höhe von 3 m auf maximal 300 Pa begrenzen.

Einen wesentlichen Unsicherheitsfaktor stellen die klimatischen Bedingungen am Standort Klein-Altendorf dar. Für eine zeitsparende und energieeffiziente Trocknung ist ein hohes Maß an direkter solarer Einstrahlung unverzichtbar und eine niedrige relative Luftfeuchte förderlich. Zudem sollte die Trocknung schneller ablaufen, als in der von SCHMID [2013] beschriebenen unbelüfteten Lagerung. Die zweite Arbeitshypothese lautet:

2. Unter den am Campus Klein-Altendorf herrschenden klimatischen Bedingungen ist eine Trocknung von Holzhackschnitzeln mittels Kaltluft auf einen Wassergehalt von 20% in einem Zeitraum von zwölf Wochen zu erzielen.

Die vorhergehend beschriebenen Solartrockner weisen zumeist eine relativ simple Technik und Konstruktion auf. Allerdings konnte kein System identifiziert werden, das zugleich in der Lage ist, große Materialmengen aufzunehmen und aufzubereiten. Ferner ist aus der Literatur bekannt, dass von einer Lagerung feiner Hackschnitzel in unbelüfteten Mieten, die höher sind als 4 m, abgeraten wird. Zugleich soll eine gleichmäßige Belüftung nur bis zu einer Schütthöhe von 1 m möglich sein. Damit gilt es, die grundsätzliche Frage der Machbarkeit eines energieeffizienten Solartrockners für den Campus Klein-Altendorf zu beantworten. Es ergibt sich die dritte Arbeitshypothese:

3. Es ist möglich, Holzhackgut mit einer Schütthöhe von über 4 m in einem solaren Satzrockner mit technischer Luftförderung und einer Luftgeschwindigkeit von unter $0,1 \text{ m s}^{-1}$ innerhalb von zwölf Wochen auf einen Wassergehalt von unter 20% zu trocknen.

4. Material und Methoden

In diesem Kapitel wird zunächst der Standort des Campus Klein-Altendorf, an dem die meisten Vorversuche und die Konstruktion des ersten Prototypen durchgeführt wurden, beschrieben. Anschließend erfolgt die Beschreibung der relevanten Größenklassennormen von Holzhackschnitzeln und die Beschreibung der angewandten Methoden der Herstellung. Es werden zudem die verwendeten Handmessgeräte und die Wetterstation näher erläutert.

4.1. Standortbeschreibung des Campus Klein-Altendorf

Der Campus Klein-Altendorf befindet sich im gleichnamigen Ortsteil der Stadt Rheinbach, zwischen den Städten Meckenheim und Rheinbach. Er liegt somit in einer der wichtigsten Obstanbauregionen Deutschlands, im Süden des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen. Der Boden besteht aus einer „basen- und nährstoffreichen Parabraunerde und ist besonders geeignet für den Anbau von Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste sowie für Kern- und Steinobst“ [KUNZ U. VÖLKERING, 2015].

Der bereits im 10. Jahrhundert als Besitz eines Pfalzgrafen erwähnte Gutshof „Klein-Altendorf“ dient heute als Lehr- und Forschungsstation der Universität Bonn. Zu den Arbeitsschwerpunkten gehören unter anderem Gemüsebau, Pflanzenbau und -züchtung sowie verschiedene Versuchsfeldaktivitäten.

„Im Rahmen des EU-finanzierten Projektes ‘Science to Business Center AgroHort’ wurden am Standort Campus Klein-Altendorf [sechs] Teilprojekte mit dem Ziel

4. Material und Methoden

gefördert, modernste Infrastruktur für innovative Forschung auf den Gebieten ‘Klimawandel’, ‘Nachhaltige Energieproduktion’ und ‘Sensortechnologie’ zu errichten. [...] Zwei [der] AgroHort-Projekte beschäftigen sich mit der nachhaltigen Energieversorgung durch nachwachsende Rohstoffe. Im AgroHort_{energy}-Projekt wurde die notwendige Ernte-, Nachernte- und Prozesstechnologie errichtet. Die meist notwendige Trocknung von Biomassepflanzen wird im AgroHort_{solar}“ untersucht und in dieser Dissertation beschrieben [KUNZ U. VÖLKERING, 2015].

Die Forschungsstation ist in zwei Standorte untergliedert, die nachfolgend mit „Nord“ und „Süd“ bezeichnet werden. Der Campus Süd hat die geographische Lage 50,613° nördlicher Länge und 6,994° östlicher Breite. An diesem Standort befindet sich das Hauptgebäude, in dem Betriebsleitung, Verwaltung, sowie technische, landwirtschaftliche und wissenschaftliche Mitarbeiter untergebracht sind. In weiteren Gebäuden sind u.a. die Landmaschinenwerkstatt, Lagerräume und das Technikum für wissenschaftliche Versuche zu finden.

Der Campus Nord hat die geographische Lage 50,625° nördlicher Länge und 6,989° östlicher Breite. Dieser Teil der Lehr- und Forschungsstation dient hauptsächlich dem praktischen Anbau von und der Forschung an Obst-, Gemüse- und Arzneipflanzen innerhalb weiterer AgroHort-Projekte. Aus diesem Grund befinden sich hier mehrere Gewächshäuser, Lager- und Kühlhallen, sowie eine Obstsortierhalle und ein dem Campus Süd untergeordnetes Verwaltungsgebäude.

Die Gesamtfläche, inklusive aller Anbauflächen, der Lehr- und Forschungsstation Klein-Altendorf beträgt ca. 181 ha. Davon wird auf ca. 21 ha Obstbau betrieben, wobei Apfelbäume neben Birnen und Süßkirschen den größten Anteil darstellen. Ungefähr 12 ha werden für den Anbau nachwachsender Rohstoffe (schnell wachsender Gräser und KUP) verwendet. Abbildung 4.1 zeigt das Areal des Forschungsguts mit kenntlich gemachten OBP und KUP.

4.1. Standortbeschreibung des Campus Klein-Altendorf

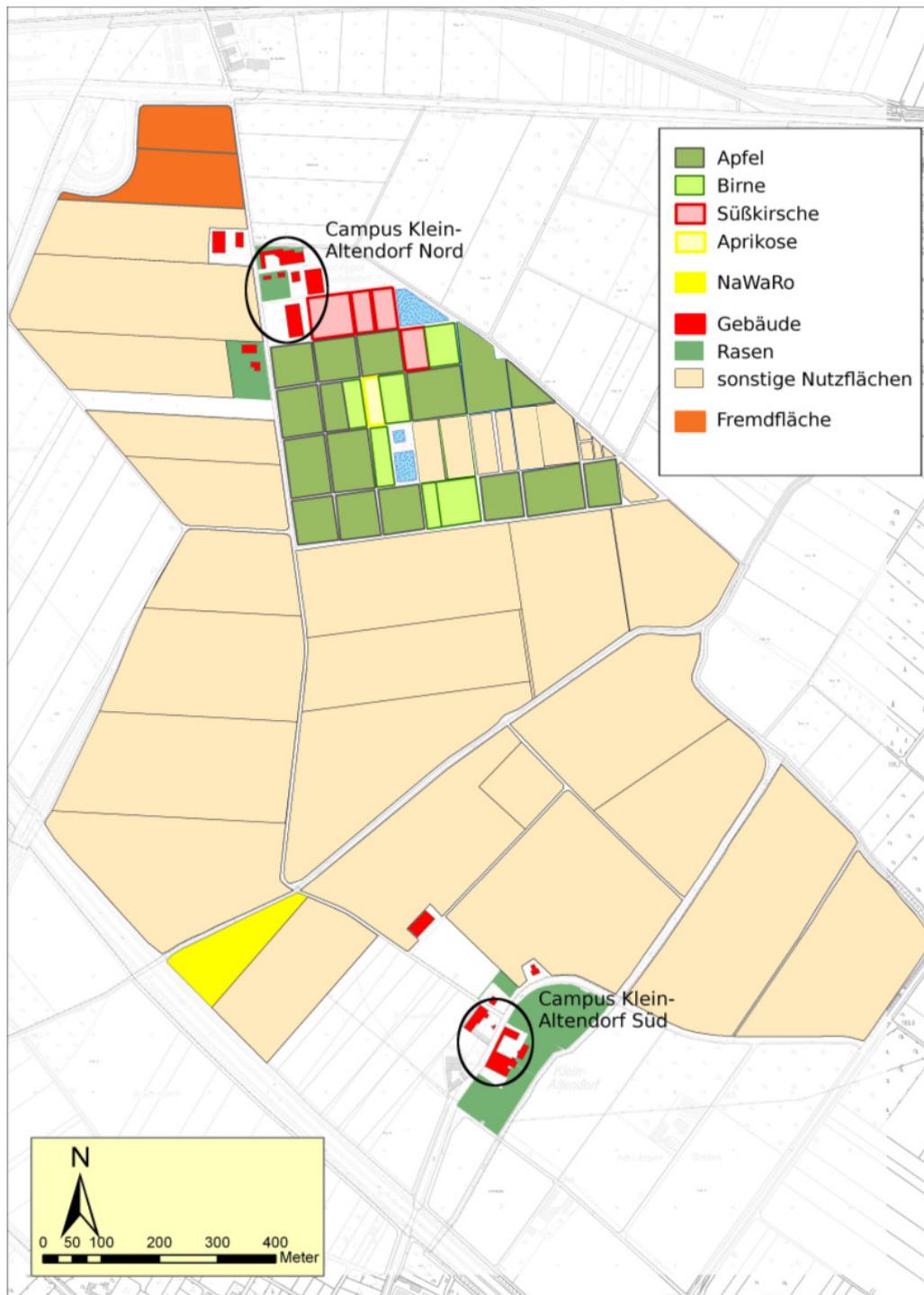


Abbildung 4.1.: Übersicht des Campus Klein-Altendorf mit Obstanbauflächen, abgeändert aus KUNZ U. VÖLKERING [2015]

4. Material und Methoden



Abbildung 4.2.: Standort des Solartrockners am Campus Klein-Altendorf Nord;
[KRASKA, 2016]

Wie Abbildung 4.2 zeigt, wurde der solare Trockner im nordwestlichen Teil des Campus Nord aufgebaut, da dort eine freie, nahezu unverschattete Fläche zur Verfügung stand. Lediglich an einigen Wintertagen, bei niedrigstem Sonnenstand, kann es zu einer Teilverschattung des solaren Trockners durch das südlich angrenzende Gewächshaus kommen. Des Weiteren fiel die Wahl auf diesen Standort, da ausreichend Platz zum Be- und Entladen des Trockners mit Hilfe von Schleppern und Anhängern vorhanden ist. Die elektrische Versorgung des solaren Satz Trockners mittels Starkstrom sowie aller verwendeten Werkzeuge, die für

die Konstruktionsarbeiten notwendig waren, konnte ebenfalls ohne Schwierigkeiten gelöst werden, da Anschlüsse in der angrenzenden Gerätehalle zur Verfügung standen.

Nach Auswertung langjähriger Aufzeichnungen der standorteigenen Wetterstation „beträgt der mittlere Jahresniederschlag 603,4 mm und die Jahresmitteltemperatur 9,4°C“ [KUNZ U. VÖLKERING, 2015].

4.2. Holzhackschnitzel

Nachfolgend werden zunächst die relevanten Normen zur Korngrößenverteilung vorgestellt, in die Holzhackschnitzel eingeteilt werden. Danach folgt die Beschreibung des verwendeten Hackguts und ein Überblick über dessen Herstellungsverfahren.

4.2.1. Größenklassennormen

„Kleinf Feuerungsanlagen benötigen für einen reibungslosen Betrieb eine möglichst gleichbleibende, definierte Brennstoffqualität. Internationale Brennstoffnormen geben dabei eine Orientierung. Set 2014 gilt für Hackschnitzel zur Verwendung in kleinen Hackschnitzelfeuerungen die DIN EN ISO 17225, Teil 4. Bisher gängige Brennstoffnormen (DIN EN 14961, ÖNorm M7133) werden durch sie ersetzt. In der DIN EN ISO 17225-4 werden drei Korngrößenklassen definiert (P16S, P31S, P45S). Der Klassenname beschreibt die jeweilige Hauptfraktion. Außerdem wurden auch Anforderungen für den maximalen Feinanteil, den zulässigen Grobanteil, die maximale Partikellänge und die maximale Querschnittsfläche der Teilchen festgelegt.“ [ANONYMUS11, 2014]. Die Korngrößenverteilung ist zusammengefasst in Tabelle 4.1 dargestellt.

4. Material und Methoden

Tabelle 4.1.: Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17225, Teil 4; abgeändert aus ANONYMUS11 [2014].

Größen- klasse	Hauptfraktion (≥ 60 Ma.-%)	Feinanteil ($\leq 3,15$ mm)	Grobanteil
P16S	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 16 \text{ mm}$	$\leq 15 \text{ Ma.-%}$	$\leq 6 \text{ Ma.-%} > 31,5 \text{ mm}$
P31S	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 31,5 \text{ mm}$	$\leq 10 \text{ Ma.-%}$	$\leq 6 \text{ Ma.-%} > 45 \text{ mm}$
P45S	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 45 \text{ mm}$	$\leq 10 \text{ Ma.-%}$	$\leq 10 \text{ Ma.-%} > 63 \text{ mm}$
	Max. Länge	Max. Quer- schnittsfläche	
P16S	$\leq 45 \text{ mm}$	$\leq 2 \text{ cm}^2$	
P31S	$\leq 150 \text{ mm}$	$\leq 4 \text{ cm}^2$	
P45S	$\leq 200 \text{ mm}$	$\leq 6 \text{ cm}^2$	

Die in dieser Thesis beschriebenen praktischen Arbeiten und Versuche wurden zumeist im Zeitraum zwischen 2010 und 2012 durchgeführt. Aus diesem Grund fand die DIN EN ISO 17225-4 in dieser Arbeit keine Anwendung, sondern wird nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Die verwendeten Holzhackschnitzel sind durch die Hersteller bzw. Zulieferer nach der DIN EN 14961-4:2011-09 klassifiziert worden. Deren Korngrößenverteilung ist in Tabelle 4.2 zu sehen.

Tabelle 4.2.: Korngrößenverteilung nach DIN EN 14961-4:2011-09; abgeändert aus ANONYMUS10 [2011].

Größen- klasse	Hauptfraktion (≥ 75 Ma.-%)	Feinanteil ($< 3,15$ mm)	Grobanteil
P16A	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 16 \text{ mm}$	$\leq 12 \text{ Ma.-%}$	$\leq 3 \text{ Ma.-%} > 16 \text{ mm}$
P16B	$3,15 \text{ mm} \leq P \leq 16 \text{ mm}$	$\leq 12 \text{ Ma.-%}$	$\leq 3 \text{ Ma.-%} > 45 \text{ mm}$
P31,5	$8 \text{ mm} \leq P \leq 31,5 \text{ mm}$	$\leq 8 \text{ Ma.-%}$	$\leq 6 \text{ Ma.-%} > 45 \text{ mm}$
P45	$8 \text{ mm} \leq P \leq 45 \text{ mm}$	$\leq 8 \text{ Ma.-%}$	$\leq 6 \text{ Ma.-%} > 63 \text{ mm}$ und max. $3,5 \text{ Ma.-%} > 100 \text{ mm}$
	Max. Länge	Max. Quer- schnittsfläche	
P16A	$< 31,5 \text{ mm}$	$< 1 \text{ cm}^2$	
P16B	$< 120 \text{ mm}$	$< 1 \text{ cm}^2$	
P31,5	$< 120 \text{ mm}$	$< 2 \text{ cm}^2$	
P45	$< 120 \text{ mm}$	$< 5 \text{ cm}^2$	

4.2.2. Verwendete Holzhackschnitzel und Herstellungsverfahren

Die kleinsten verwendeten Holzhackschnitzel entsprechen nach Tabelle 4.2 der Klassifizierung P16B. Sie wurden von der *WEB - Wärme, Energie und Biomasse GmbH* aus Hückelhoven bereit gestellt. Die Aufbereitung des Holzes geschah durch einen Trommelhacker, dessen genaue Typenbezeichnung unbekannt ist. Diese Maschinen verfügen über eine Stahltrommel, auf deren Mantelfläche Messer angeordnet sind. Das Material wird der rotierenden Trommel im 90°-Winkel zugeführt und kann sowohl Schlagabraum als auch Reisig umfassen. Das hier verwendete Material bestand aus gemischtem Waldholz mit Stamm- und Kronenanteil und war nicht nachträglich gesiebt, so dass es sich um eine relativ inhomogene Mischung handelte, wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist. Die Schüttdichte wurde nach der in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Methode für die Frischmasse bestimmt. Anschließend erfolgte die Bestimmung des Wassergehaltes nach Abschnitt 7.7. Daraus ergibt sich eine Schüttdichte der Trockenmasse von $185,24 \pm 7,43 \text{ kg m}^{-3}$. In nachfolgenden Kapiteln sind diese Hackschnitzel mit der Kennung P16B-GU versehen.



(a) Komptech Chippo 510 C

(b) Kennung: P16B-GU

Abbildung 4.3.: Mobiler Trommelhacker im Zapfwellenbetrieb (a) [ANONYMUS12, 2016] sowie gemischte, ungesiebte Holzhackschnitzel der Größenklasse P16B (b)

4. Material und Methoden

Des Weiteren wurden Hackschnitzel aus Fichtenstammholz der Größenklassen P31,5 und P45 verwendet (Abbildung 4.4 (b) und (c)). Diese verfügten über einen sehr geringen Feinanteil, was auf die Produktion mittels Schneckenhacker (*LAIMET; HP-21; Laitila, Finnland*) zurückzuführen ist. Die Schüttdichte der Trockenmasse liegt bei $170,31 \pm 9,95 \text{ kg m}^{-3}$ (P31,5) und $128,44 \pm 4,54 \text{ kg m}^{-3}$ (P45). Eine Besonderheit des *HP-21* ist die konische Schnecke, der das Material axial zugeführt wird und die aufgrund ihrer Form für einen selbstständigen Einzug des Holzes sorgt. Dadurch ist keine separate Zuführvorrichtung notwendig und durch einen Schneckenwechsel lässt sich Hackgut unterschiedlicher Größe herstellen. Die Hackschnitzel wurden von der Firma *EUSÄKO Sägewerksmaschinen* in Norath bezogen. Die Kennung dieser Hackschnitzel lautet P31,5-F bzw. P45-F.

Die Holzhackschnitzel mit der größten Korngröße wurden ebenfalls mit einem Schneckenhacker (*STP Strahltechnik Plietzhausen GmbH & Co. KG; ZSH 30; Plietzhausen, Deutschland*) hergestellt (Schüttdichte: $151,32 \pm 9,34 \text{ kg m}^{-3}$). Bei diesem Zerkleinerer weist die Schnecke eine zylindrische Form auf. Durch die Zuführung des Materials im spitzen Winkel, erfolgt die Nachführung des Aufgabegutes auch bei dieser Maschine ohne weitere Vorrichtungen. Die Buchenhackschnitzel aus Stammholz wiesen ebenfalls einen sehr geringen Feinanteil auf, lassen sich jedoch aufgrund ihrer Größe nicht in die Korngrößenklassen der DIN EN 14961-4:2011-09 einordnen. Die verwendete Schnecke ist in der Lage Holzhackschnitzel bis zu einer Länge von 100 mm zu produzieren (Abbildung 4.4 (c)). Sie sind als „nicht klassifiziert (NK-B)“ kenntlich gemacht.

Eine weitere Hackschnitzelvariante mit nicht klassifizierter Korngröße wurde aus Apfelrodungsholz hergestellt, welches sowohl aus Kronen- und Stammholz bestand, jedoch keinen Wurzelanteil aufwies. Die Schüttdichte des trockenen Materials betrug $166,91 \pm 13,58 \text{ kg m}^{-3}$. Zur Zerkleinerung wurde ein Scheibenradhacker (*Schliesing Machinery GmbH; 350 MX; Kempen, Deutschland*) verwendet

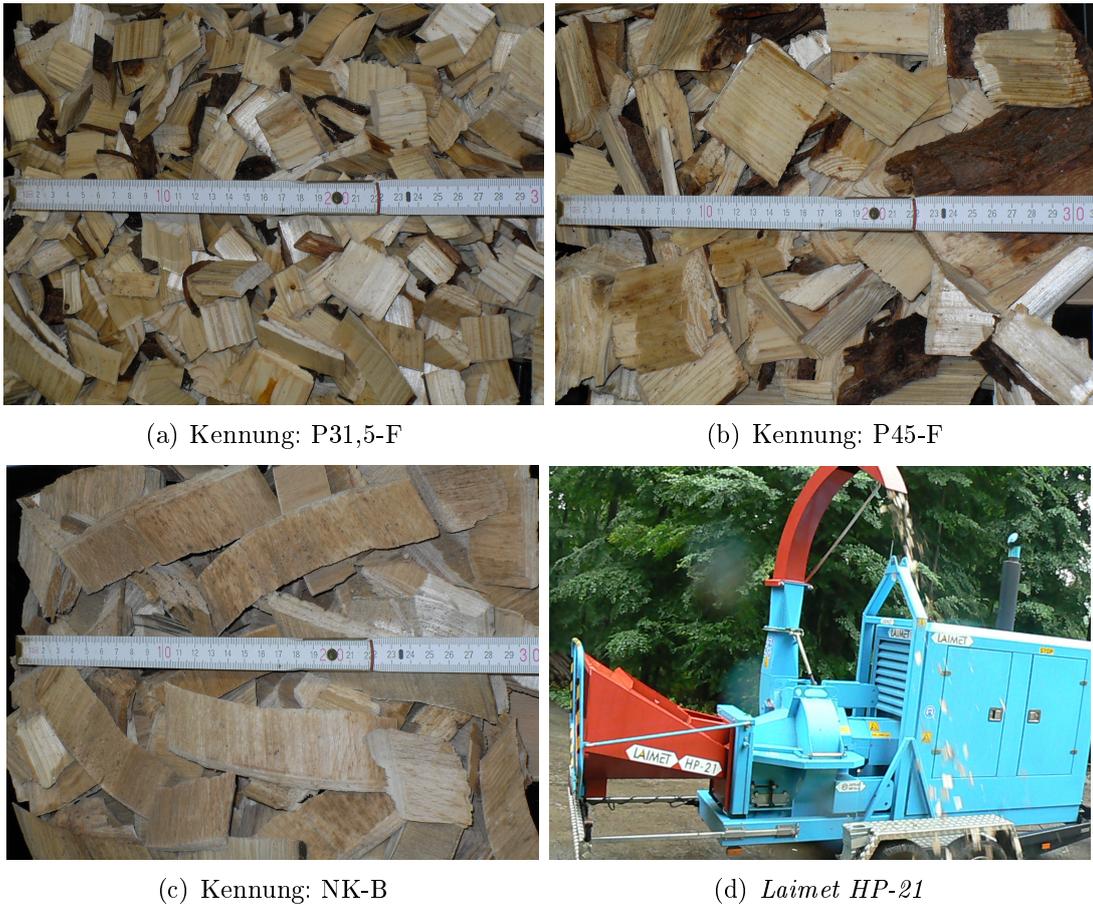


Abbildung 4.4.: Holzhackschnitzel der Größenklassen P31,5 (a), P45 (b) und nicht klassifiziert (c) sowie ein mobiler Schneckenhacker mit Dieselagregat (d); Holzart: Fichte

(Abbildung 4.5). Diese Hacker werden so bezeichnet, da sie über eine rotierende, mit Messern ausgestatteten Scheibe verfügen. Vor den Schneidwerkzeugen befinden sich Öffnungen, durch die das Hackgut abfließen kann. Da die Schnittgeschwindigkeit von der Umlaufgeschwindigkeit abhängt, variiert erstere über den Durchmesser der Scheibe, wodurch das Hackgut weniger homogen ist. Auch kleinere Zweige, die der Messerscheibe entgangen sind, sorgen für ein schlecht zu klassifizierendes Material. Die Kennung in nachfolgenden Kapiteln lautet NK-AoW.

4. Material und Methoden



Abbildung 4.5.: Mobiler Scheibenradhacker angetrieben durch Dieselaggregat (a) sowie Holzhackschnittel aus Rodungsholz ohne Wurzelanteil; Holzart: Apfel; Korngrößenklasse: nicht klassifiziert (b)

4.3. Messmethoden und -instrumente

Im Folgenden werden die in allen Vorversuchen und für den Test der Prototypen verwendeten Messgeräte und -methoden dargestellt. Dies schließt auch die Instrumente der Wetterstation des Campus Klein-Altendorf ein. Da die in der vorliegenden Dissertation beschriebenen Versuche ein breites Spektrum umfassen und in diesen eine Vielzahl von Datentypen erhoben wurden, waren ebenso viele unterschiedliche Messgeräte notwendig. In diesem Kapitel wird lediglich auf die Instrumente und Methoden eingegangen, die wiederholt für mehrere Datenerhebungen benutzt wurden. Die Beschreibung der Messgeräte, die lediglich einmalige Anwendung fanden, erfolgt in den jeweiligen Versuchsbeschreibungen.

Die technischen Daten der hier beschriebenen Instrumente sind in Anhang E aufgelistet.

4.3.1. Masse

Zur Wiegung von Holzhackschnitzeln, die sich in Holzgroßkisten (Kapitel 4) oder in Versuchsaufbauten (Kapitel 6) befanden, wurde eine Schwerlastwaage am Campus Klein-Altendorf Nord benutzt. Diese hat einen Messbereich von 25 kg bis 600 kg und verfügt über eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ kg.

Für Proben im Grammbereich, wie sie zur Feststellung des Wassergehaltes genommen wurden, fand eine Laborwaage (*Kern & Sohn GmbH, Kern ds, Balingen-Frommern*) mit einer Messbereich von 0 g bis 16.100 g und einer Genauigkeit von $\pm 0,02$ g Verwendung.

4.3.2. Wassergehalt

Der Wassergehalt wurde in allen an der Universität Bonn durchgeführten Versuchen und Tests nach DIN EN 14 774-2:2010-03-01 bestimmt. In dem darin beschriebenen vereinfachten Verfahren, werden die Holzproben⁵ bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C getrocknet. Per Definition entspricht der Wassergehalt der Differenz zwischen Frisch- und Trockenmasse bezogen auf die Frischmasse.

Die Proben der Anzahl n wurden im Trockenofen platziert und über einen Zeitraum von mindestens 24 Stunden bei genannter Temperatur getrocknet. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz wurde der Wassergehalt W [%] für jede Probe durch folgende Beziehung bestimmt:

$$W = \frac{FM - TM}{FM} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Der Vollständigkeit halber wird ferner darauf hingewiesen, dass vor allem im forstwirtschaftlichen Bereich zumeist der Begriff der Brennstofffeuchte bzw. Holzfeuchte U verwendet wird. Sie stellt die Differenz zwischen Frisch- und Trockenmasse

⁵Probenahme erfolgte nach DIN CEN/TS 14778-1:2005

4. Material und Methoden

bezogen auf die Trockenmasse dar und berechnet sich nach der Formel:

$$U = \frac{FM - TM}{TM} \cdot 100 \quad (4.2)$$

4.3.3. Schüttdichte

Die Schüttdichte der Holzhackschnitzel wurde lediglich in Anlehnung an die DIN EN 15103:2009 bestimmt. Als Behälter dienten die bereits erwähnten Holzgroßkisten (ungefähre Dimensionierung $l \times b \times h$: 1.000 mm \times 800 mm \times 800 mm), deren exakte Füllvolumina mit einem Millimetermaß bestimmt wurden. In der genannten Norm wird ein davon abweichendes Verfahren beschrieben, in dem der Behälter mit Wasser befüllt und das Volumen über die Gewichts Differenz und die Dichte des Wassers errechnet wird.

Die Schüttdichte ergibt sich aus dem Differenzgewicht der gefüllten und der leeren Großkiste bezogen auf einen Kubikmeter Material.

4.3.4. Temperatur

Das Messgerät, welches in den meisten Versuchen und Tests zur Anwendung kam, war ein Datenlogger (*Conrad Electronic AG; Voltcraft DL-121TH; Wollerau, Schweiz*), der Temperatur- und Luftfeuchtwerte auf einem internen Chip speichert. Die Programmierung des Datenloggers erfolgte über die mitgelieferte Software. Seine Einstellungen wurden so angepasst, dass die Messdaten je nach Versuch in fünf- oder zehn-Minuten-Intervallen gespeichert wurden. Durch den integrierten USB-Anschluss konnten die gespeicherten Daten als .csv- oder .xls-Dateien mittels PC weiter verarbeitet werden.

Zur Registrierung von Temperaturwerten innerhalb der konstruierten Solar Kollektoren (Kapitel 8 und 9) wurde ein weiterer Datenlogger (*Extech Instru-*

4.3. Messmethoden und -instrumente

ments Corporation; *SDL 200*; Nashua, U.S.A.) angeschafft. Er speichert die Daten auf einer im Lieferumfang enthaltenen *Secure Digital Memory Card* (SD-Speicherkarte), worüber sie als .csv-Datei auf einen PC übertragen werden können. Das Gerät verfügt über vier Eingangskanäle, was für eine flexible Platzierung der Sensoren von Vorteil ist. Die vor der Inbetriebnahme notwendigen Einstellungen sind direkt über das Display und die Tasten des Gerätes vorzunehmen. Auch hier wurde das Zeitintervall der Datenaufnahme in Abhängigkeit vom Versuch auf fünf oder zehn Minuten festgelegt.



Abbildung 4.6.: Verwendete Handmessgeräte zur Messung und Speicherung von Temperatur-, Luftfeuchte- und Luftgeschwindigkeitswerten; Bildquellen: (a) [ANONYMUS13, 2016], (b) [ANONYMUS14, 2016], (c) [ANONYMUS15, 2016]

Zur Darstellung der klimatischen Bedingungen am Campus Klein-Altendorf wur-

4. Material und Methoden

den Temperatur- und Feuchtwerte verwendet, die mit der standorteigenen meteorologischen Station aufgezeichnet wurden (Sensor: *R. M. YOUNG COMPANY; Model 41382VC/VF; Traverse City, Michigan, U.S.A.*). Die zugehörigen Daten befinden sich in Anhang E.

4.3.5. Relative Luftfeuchte

Die Registrierung der Luftfeuchtwerte erfolgte ebenfalls mit dem bereits beschriebenen *Voltcraft DL-121TH* Datenlogger und mit gleichen Einstellungen.

Die relative Feuchte der Umgebungsluft wurde ebenfalls, wie vorhergehenden Abschnitt beschrieben, anhand von Daten der meteorologischen Station am Campus Klein-Altendorf ausgewertet.

In den nachfolgenden Kapiteln sind diejenigen Diagramme, die die Entwicklung der relativen Feuchte dokumentieren, mit einem hellgrauen Hintergrund versehen, um eine visuelle Abtrennung zu den Temperaturdiagrammen zu schaffen.

4.3.6. Luftgeschwindigkeit

In den in Kapitel 6 und 8 beschriebenen Versuchen wird die Luftgeschwindigkeit innerhalb der Versuchsaufbauten und Prototypen mit Hilfe eines Handgerätes ermittelt. Bei dem Instrument handelte es sich um ein thermisches Anemometer (*testo AG; 425; Lenzkirch, Deutschland*). Die Luftgeschwindigkeit wird hierbei über einen elektrisch aufgeheizten Draht ermittelt, dessen Widerstand sich in Abhängigkeit von der Temperatur und somit von der Strömungsgeschwindigkeit verändert. Das Gerät verfügt über keine Datenspeicherfunktion, wodurch es lediglich zur Überprüfung des aktuellen Ist-Zustandes verwendet wurde.

4.4. Datenauswertung

Zur Auswertung aller Daten, die in den folgenden Kapiteln dieser Thesis dargestellt sind, wurde die statistische Programmiersprache „R“ (Version: 3.2.3) benutzt. Für ein komfortableres Arbeiten erfolgte zusätzlich die Installation der graphischen Oberfläche *RStudio* in der Version 0.99.491, welche innerhalb des Betriebssystems *Linux Mint 17.3* betrieben wurde. Die Rohdaten sind stets als .csv-Dateien importiert und weiter verarbeitet worden.

Zum Vergleich von Stichproben wurden t-Tests angewendet. Dies ist jedoch nur erlaubt, wenn die Varianzen der zu vergleichenden Stichproben ungefähr gleich sind. Um Homogenität zu erreichen, wurde der in „R“ standardmäßig enthaltene t-Test nach Welch durchgeführt, der ungleiche Varianzen korrigiert. Das Konfidenzintervall wurde in jedem Fall mit 95% festgelegt. Zur Auswertung der Frischmasseerträge in Tabelle 2.3 wurde ein Zweistichproben t-Test durchgeführt, während die Endwassergehalte in den Tabellen 6.1 und 6.2 mittels Einstichproben t-Test verglichen wurden. Der p-Wert wird wie folgt angegeben:

* p-Wert $\leq 0,05$; ** p-Wert $\leq 0,01$; ^{n.s} p-Wert $> 0,05$ (nicht signifikant)

Teil I.

Theoretische und praktische Vorversuche zur Abschätzung der Realisierbarkeit der Konstruktion des Solartrockners

5. Empirische Untersuchung des Druckverlustes in Hackgutschüttungen

Ziel ist es, den Solartrockner so zu konzipieren, dass ein wärmeautarkes und energieeffizientes Verfahren zur Holz Trocknung ermöglicht wird. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, ist ein geringer Stromverbrauch der einzelnen elektrischen Bauteile anzustreben. Folglich ist es entscheidend, dass auch die Förderung der Trocknungsluft einen möglichst niedrigen Energieverbrauch aufweist. Dieser ist zum einen von den Strömungswiderständen der Einzelbauteile des Luftkanals und zum anderen in erheblicherem Maße vom Widerstand des Aufgabegutes abhängig. „Durch Reibungs- und Wirbelvorgänge wird beim Durchströmen hydraulischer Leitungen und Bauelemente Strömungsenergie irreversibel in Wärme umgewandelt, und es entsteht in Strömungsrichtung ein bleibender Druckabfall, der als Druckverlust bezeichnet wird. Durchströmte Leitungen und Bauelemente einer Hydraulikanlage können somit als Strömungswiderstände betrachtet werden. Wenn einem hydraulischen Widerstand ein Volumenstrom Q zugeführt wird [...], entsteht in Strömungsrichtung ein bleibender Druckabfall Δp , der als Druckverlust bezeichnet wird“ [NOLLAU U. HERSCHEL, 2008]. Je höher der Druckverlust ist, desto leistungsstärker und somit energieaufwendiger ist dementsprechend der Ventilator zu dimensionieren.

Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung waren mathematische Gleichungen zur Berechnung des Strömungswiderstandes im Fall von Holzhackschnittelschüttungen nicht anwendbar, da es sich unabhängig vom Herstellungsverfahren um

5. Empirische Untersuchung des Druckverlustes

ein vergleichsweise inhomogenes Schüttgut handelt. Aus diesem Grund war eine Vereinheitlichung der geometrischen Eigenschaften einzelner Hackschnitzel durch Konstanten und die Ermittlung des Widerstandsbeiwertes nicht möglich.

Die Bestimmung des Strömungswiderstandes erfolgte deshalb empirisch in einem Kooperationsprojekt zwischen dem Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe der Universität Bonn und dem Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, da an letztgenannter Hochschule eine geeignete Infrastruktur für die Versuchsdurchführung gegeben war.

5.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuch zielte darauf ab, den Druckverlust in Holzhackschnitzelschüttungen mit einer Höhe von drei Metern zu bestimmen. Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, wurde hierfür ein zylindrischer Luftkanal mit einem Innendurchmesser von 480 mm vertikal aufgestellt. Zwischen dem Belüftungsboden aus Lochblech, auf dem die Holzhackschnitzel lagerten, und dem unteren Rand des Zylinders lag ein Abstand von 700 mm, der als Ruhe- bzw. Auslaufzone für eine möglichst laminare Lufteinströmung sorgte. Dies war erforderlich, um starke Schwankungen der gemessenen Druckwerte zu verhindern.

Die Luftförderung wurde mit Hilfe eines Ventilators realisiert, der saugseitig der Holzschüttung montiert war und über eine maximale Leistung von 0,43 kW verfügte. Er wurde über einen Frequenzumrichter angesteuert, um die gewünschte Luftgeschwindigkeit bzw. den gewünschten Luftmassenstrom einstellen zu können. Bei dem Anemometer zur Feststellung der Luftgeschwindigkeit handelte es sich um eine Vortex Sonde (*Höntzsch GmbH; Vortex-Sonde VA40; Waiblingen*). Die Sonde war mittig des Luftausgangskanals angebracht. Dieser verfügte über eine Länge von 1,7 m, um für das Anemometer eine möglichst laminare Luftströmung zu erzeugen. Der Innendurchmesser des Kanals betrug 84 mm. Die

5.1. Versuchsaufbau und -durchführung

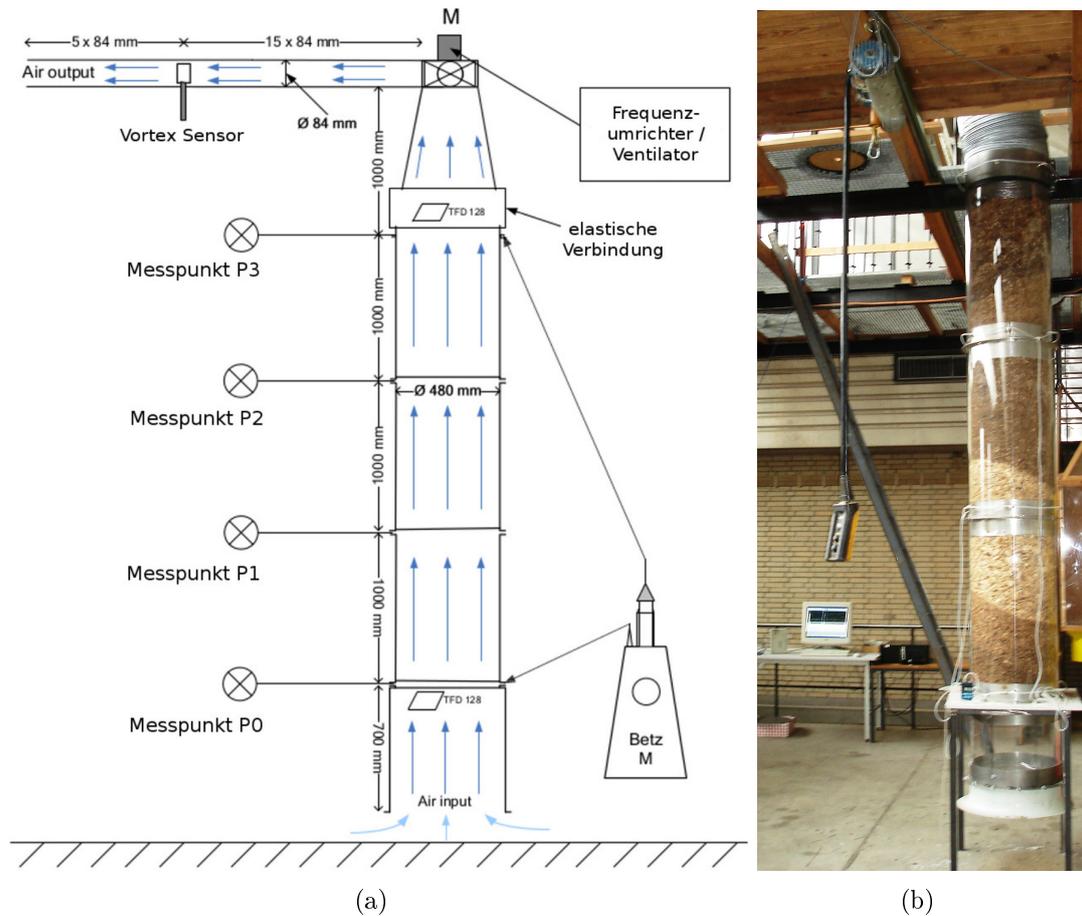


Abbildung 5.1.: Schematischer ((a) abgeändert aus KARAJ ET AL. [2011]) und realisierter Versuchsstand (b) zur Druckverlustmessung; Universität Hohenheim

registrierten Sensordaten wurden über einen Multiplexer (*Keysight Technologies Deutschland GmbH; HP-Agilent 34901A; Böblingen*) an einen PC weitergeleitet, wo sie in lesbare Daten umgewandelt und gespeichert wurden.

Im Bereich des Schüttgutes erfolgte die Druckmessung in einem Abstand von jeweils 1.000 mm an vier Punkten mit Digitalmanometern (*Greisinger Electronic GmbH; GMSD 2 BR; Regenstauf*). Die Messstelle P_0 befand sich am Lochboden und P_3 am höchsten Punkt der Schüttung. Auch diese Daten wurden über den bereits beschriebenen Multiplexer am PC gespeichert. Ein mechanisches Betz

5. Empirische Untersuchung des Druckverlustes

Manometer zeigte zusätzlich den Druckunterschied von P_0 nach P_3 in mm Wassersäule (mmWS), welches der Genauigkeitsüberprüfung der digitalen Messgeräte diente.

Nach der Befüllung des Luftkanals mit der ersten Hackschnitzelvariante wurde das Gesamtsystem auf Dichtheit untersucht, um ein Eindringen von Nebenluft zu vermeiden. Anschließend folgte die Inbetriebnahme des Ventilators und dessen Regelung auf minimale Förderleistung mittels Frequenzumformer. Nachdem sich eine konstante Luftgeschwindigkeit eingestellt hatte, wurden zunächst die zur Auswertung relevanten Daten (Zeitstempel, Luftgeschwindigkeit, Druck) über eine Verweilzeit von etwa 90 Sekunden registriert, bevor die Luftgeschwindigkeit schrittweise erhöht wurde. Dieser Ablauf wiederholte sich solange, bis das Leistungsmaximum des Ventilators erreicht war. Danach erfolgte eine weitere Datenaufnahme bei stufenweiser Verringerung der Geschwindigkeit bis die minimale Luftgeschwindigkeit erreicht war. Nachfolgend wird die Datenaufnahme bei ansteigender Luftgeschwindigkeit als „Durchgang 1“ und bei abnehmender als „Durchgang 2“ deklariert.

Der Versuch wurde mit allen in Kapitel 4 vorgestellten Materialien durchgeführt.

5.2. Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse gliedert sich in zwei Teile. Zuerst wird der Verlauf der Druckentwicklung an den einzelnen Messpunkten erläutert. Dies geschieht exemplarisch an der P16-GU-Schüttung, da die Kurvenverläufe bei allen Tests nahezu identisch sind und lediglich die Zahlenwerte variieren. Im Anschluss findet ein Vergleich der Druckverlustkurven aller getesteter Schüttungen statt. In Anhang A sind die Diagramme beider Durchgänge der einzelnen Testfraktionen vollständig abgebildet.

5.2. Darstellung der Ergebnisse

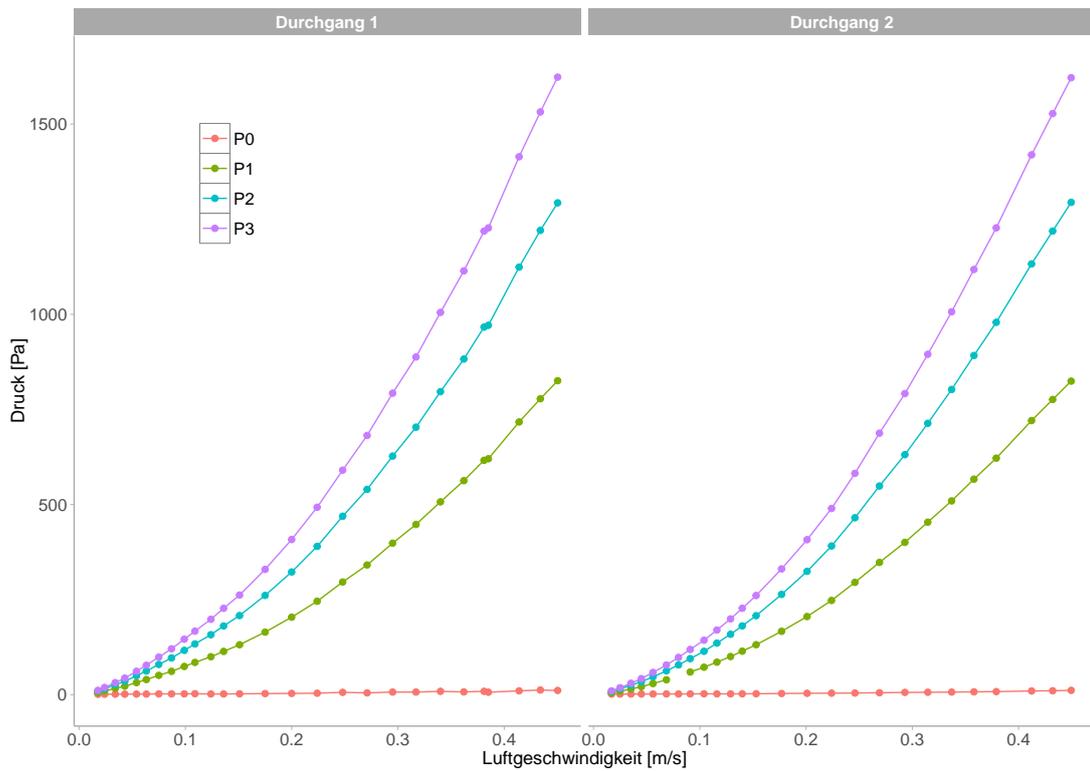


Abbildung 5.2.: Ergebnisse der Druckmessung in der Holzhackschnittzelschüttung P16-GU an den Punkten P_0 bis P_3 ; Universität Hohenheim; 2010

Abbildung 5.2 zeigt auf der Ordinatenachse den Druck in Pa, der sich an den Messpunkten P_0 , P_1 , P_2 und P_3 bei der jeweiligen Luftgeschwindigkeit (Abszissenachse) einstellt. Die minimale Luftgeschwindigkeit lag bei diesem Versuchsdurchgang bei $0,018 \text{ m s}^{-1}$ und als Maximum wurden $0,450 \text{ m s}^{-1}$ registriert.

Es ist zu erkennen, dass der Druck bei P_0 mit Werten zwischen $1,11 \text{ Pa}$ und $11,48 \text{ Pa}$ am geringsten ist, wohingegen P_3 mit Werten von $9,98 \text{ Pa}$ bis $1.623,60 \text{ Pa}$ die größte Veränderung und die höchsten Druckwerte aufweist. Auffällig ist, dass die Druckunterschiede zwischen P_0 und P_1 am größten und zwischen P_2 und P_3 am niedrigsten sind. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Schüttung in Richtung Boden immer stärker durch die darüber liegende Holzmasse verdichtet wird.

5. Empirische Untersuchung des Druckverlustes

Die exponentielle Druckzunahme bei steigender Luftgeschwindigkeit an den Messpunkten P_1 , P_2 und P_3 lässt darauf schließen, dass P_0 einen ähnlichen Kurvenverlauf aufweist, der jedoch erst bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten deutlich wird.

Aus den erhaltenen Druckdaten lässt sich der Druckverlust, bzw. der Differenzdruck zwischen dem Boden der Schüttung (P_0) und dem oberen Rand der Schüttung (P_3) errechnen. Abbildung 5.3 zeigt die Druckverlustkurven, die sich aus den registrierten Daten aller Fraktionen ergeben.

Es ist erkennbar, dass die Fraktion P16-GU mit 1.612,43 Pa den höchsten registrierten Druckverlust Δp aufweist. Die durch den Ventilator maximal erreichbare Luftgeschwindigkeit $v_{L,max}$ liegt bei $0,45 \text{ m s}^{-1}$. Den flachsten Kurvenverlauf zeigt die Variante AR-oW. Hierbei wird das Maximum der Luftgeschwindigkeit bei $0,76 \text{ m s}^{-1}$ und des Druckverlustes bei 1.027,69 Pa erreicht. Im Bereich dazwischen liegen die Varianten P31,5-F ($v_{L,max} = 0,54 \text{ m s}^{-1}$; $\Delta p = 1.457,13 \text{ Pa}$), P45-F ($v_{L,max} = 0,62 \text{ m s}^{-1}$; $\Delta p = 1.279,11 \text{ Pa}$) und P100-B ($v_{L,max} = 0,70 \text{ m s}^{-1}$; $\Delta p = 1.161,59 \text{ Pa}$).

Das Minimum der einstellbaren Luftgeschwindigkeit lag in allen Durchgängen zwischen $0,01 \text{ m s}^{-1}$ und $0,03 \text{ m s}^{-1}$. In diesem Bereich schwankt der Druckverlust zwischen 0,44 Pa (NK-AoW, Durchgang II) und 10,30 Pa (P16-GU, Durchgang I).

5.2. Darstellung der Ergebnisse

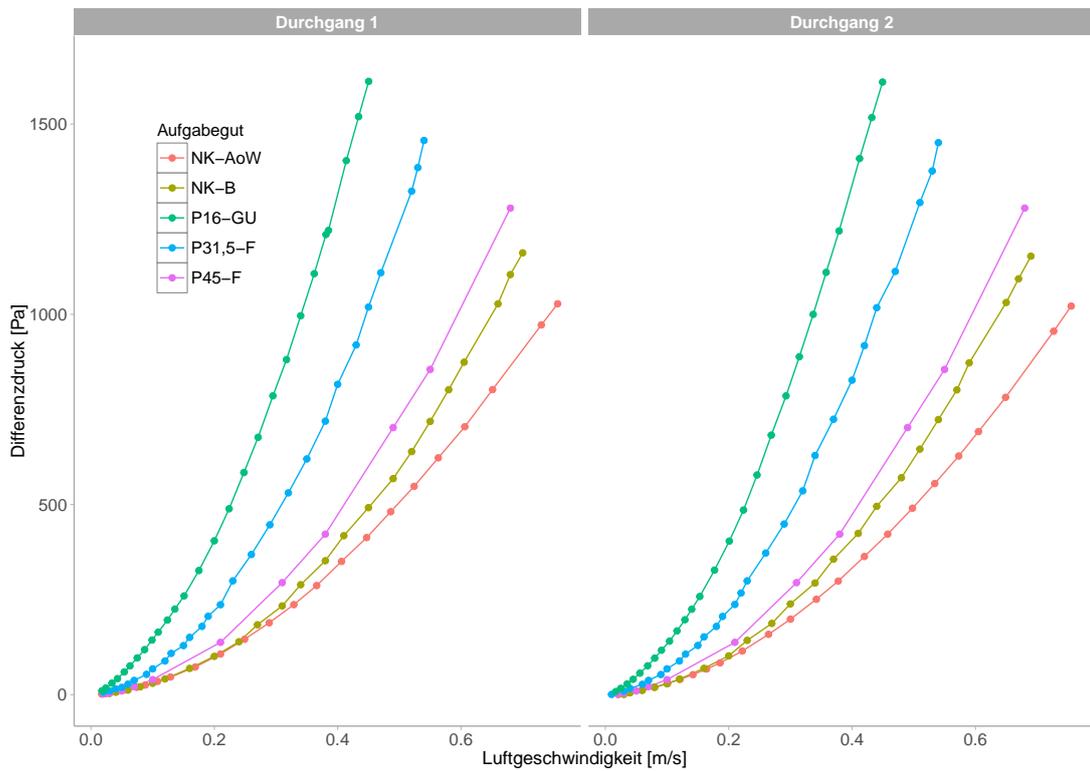


Abbildung 5.3.: Differenzdruck zwischen P_3 und P_0 aller untersuchter Hackschnitzelvarianten; Universität Hohenheim; 2010

Die Datenauswertung macht deutlich, dass mit steigender Hackschnitzelgröße der Druckverlust abnimmt, wodurch eine größere Luftgeschwindigkeit erzielt wird. Lediglich die Fraktion NK-AoW zeigt einen ungewöhnlichen Verlauf. Bis zu einer Geschwindigkeit von etwa $0,30 \text{ m s}^{-1}$ liegen die Druckwerte stark an denen der NK-B Fraktion. Erst im höheren Geschwindigkeitsbereich gehen die Druckwerte auseinander. Obwohl es sich bei NK-AoW um ein größtenteils feines Material handelt, sind, wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, viele dünne, lange Zweigstücke enthalten. Diese sorgen innerhalb der Schüttung für die Bildung von Hohlräumen, wodurch dem Luftstrom weniger Widerstand entgegengesetzt wird. Eine mögliche Erklärung für den niedrigeren Druckverlust ab $0,30 \text{ m s}^{-1}$ ist, dass sich die Luft in den Hohlräumen anstaut, dabei die Schüttung auflockert und so den

5. Empirische Untersuchung des Druckverlustes

Druckverlust verringert.

Im Anschluss an dieses Kooperationsprojekt zur empirischen Untersuchung des Druckverlustes wurde in einer Veröffentlichung der Universität Hohenheim ein mathematisches Modell beschrieben [KARAJ ET AL., 2012]. Die Ergebnisse zeigten ebenfalls, dass die sogenannte Haufwerksporigkeit in Holzhackschnitzelschüttungen den Druckverlust maßgeblich beeinflusst.

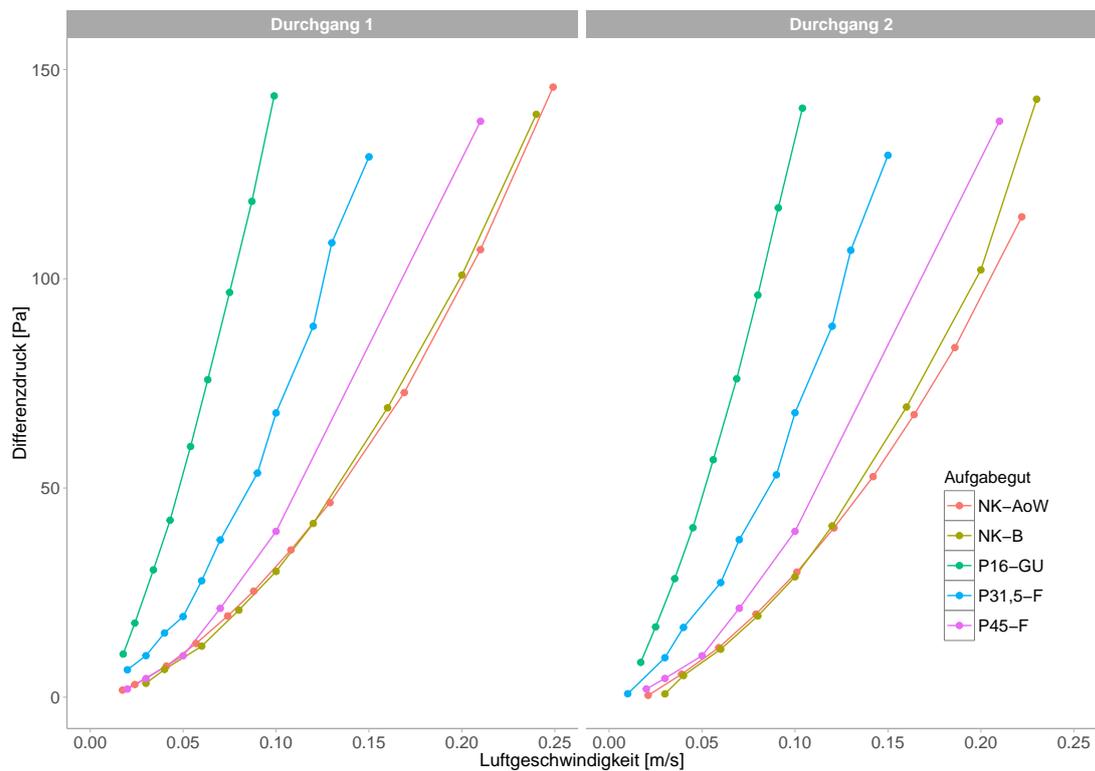


Abbildung 5.4.: Ausschnittsvergrößerung der Differenzdruckmessung (Abb. 5) zwischen P_3 und P_0 aller untersuchter Hackschnitzelvarianten; Universität Hohenheim; 2010

Ferner wird deutlich, dass alle Kurven im Bereich bis $v_L = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ relativ eng beieinander liegen (siehe Abbildung 5.4). Der höchste Druckverlust liegt in diesem Bereich bei 143,70 Pa (P16-GU).

In Kapitel 6 wird untersucht, ob in diesem Geschwindigkeitsbereich eine gleich-

5.2. *Darstellung der Ergebnisse*

mäßige Durchströmung des Aufgabegutes erreicht werden kann. Nur wenn diese Voraussetzung erfüllt ist, kann von einem adäquaten Abtransport der entstehenden Wärme und der Holzfeuchte ausgegangen und die Bildung von Schimmelpilzen verhindert werden.

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung von Holzhackschnitzeln

Nachdem in Kapitel 5 die strömungstechnischen Eigenschaften der Trocknungsluft hinsichtlich des Druckverlustes untersucht wurden, steht in diesem Kapitel ihr Trocknungspotential im Vordergrund. Im Folgenden wird ein praktischer Versuch geschildert, in dem Holzhackschnitzel von nicht vorgewärmter Frischluft durchströmt werden. Er dient dazu, herauszufinden, ob die klimatischen Bedingungen am Campus Klein-Altendorf für eine Trocknung mittels unconditionierter Umgebungsluft geeignet sind und in welchem zeitlichen Rahmen dies geschehen kann.

Zunächst erfolgt die Beschreibung von Versuchsaufbau und -durchführung, anschließend die Darstellung der Ergebnisse.

6.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuchsaufbau ähnelt dem in Kapitel 5. Auch für diesen Versuch wurden Behälter konstruiert, durch die mit Hilfe eines saugseitigen Ventilators Frischluft transportiert wird. Als Trockengutbehälter (TGB) wurden sechs Kisten mit einer Grundfläche A_G von $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ und einer Höhe von 1.600 mm hergestellt, deren Wände aus phenolbeschichteten Sperrholzplatten bestehen. Die Beschichtung ist notwendig, um einer Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Trocknungsluft vorzubeugen. Quadratlochbleche mit einer Maschenweite von $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ dienen als Kistenböden, um sowohl eine stabile Lagerung des Holzes als auch den

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

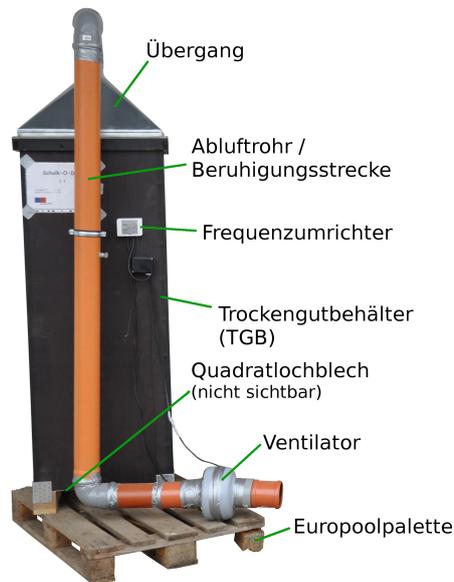


Abbildung 6.1.: Auf Europoolpaletten gelagerter Versuchsstand (VS) zur Kaltlufttrocknung; Campus Klein-Altendorf; 2011

Einlass der Trocknungsluft zu gewährleisten. An Stelle von Deckeln sind Übergänge montiert, die einen Anschluss an den kreisförmigen Querschnitt standardmäßiger Kanalrundrohre mit einem Durchmesser von 110 mm ermöglichen. Die Luft wird saugseitig über eine vertikale Beruhigungsstrecke von 2.000 mm durch 220 V Ventilatoren abgeführt. Letztere verfügen über eine Nennleistung von 70 W und fördern maximal $250 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (technische Daten siehe Anhang B). Zur Steuerung ihrer Drehzahlen finden handelsübliche Frequenzumrichter Verwendung. Abbildung 6.1 zeigt einen auf Palette gelagerten, betriebsbereiten Versuchsstand.

Für eine möglichst ungestörte Einströmung der Trocknungsluft wurden die TGB aufgebockt sowie zusätzlich auf Europoolpaletten platziert. Die somit transportierbaren Versuchsstände, wurden mittels Hubwagen zur standorteigenen Großkistenwaage gefahren, um die Gewichtsveränderung des Trockengutes zu überprüfen. Zur Vermeidung von Nebenluft wurden alle Übergänge und Spalte mit Silikon abgedichtet.

6.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Vor der ersten Befüllung wurden je TGB drei Proben der Holzhackschnitzel gezogen und der Wassergehalt anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Methode festgestellt. Im Anschluss erfolgte die Messung des Leergewichts aller sechs Versuchsstände (VS). Im Durchschnitt beträgt das Leergewicht 78,8 kg. Eine weitere Wiegung erfolgte nach der Befüllung, wodurch sich die Masse des eingelagerten Aufgabegutes errechnen ließ. Befüllt wurden die TGB bis zu einer maximalen Höhe h_S von 1.500 mm.

Als Stellplatz wurde eine zumeist verschattete Fläche am Campus Klein-Altendorf Nord ausgewählt, um eine direkte Sonneneinstrahlung möglichst zu vermeiden. Der Stellplatz sollte jedoch nicht überdacht sein, um Stauwärme oder Abweichungen von den natürlichen Konditionen zu vermeiden. Die Aufheizung der schwarzen Sperrholzflächen wurde als mögliche Fehlerquelle identifiziert, da Strahlungswärme eine Beschleunigung des Trocknungsvorganges herbeiführen könnte. Da in diesem Versuch jedoch ausschließlich die Absorptionseigenschaften unkonditionierter Umgebungsluft untersucht wurden, war das Einwirken weiterer Energiequellen auszuschließen.

Nach dem Anschluss der Ventilatoren an das öffentliche Stromnetz fand die Einstellung der gewünschten Luftgeschwindigkeit statt. Zu deren Feststellung wurde die Lanze des Hitzdrahtanemometers *testo 425* (technische Daten siehe Anhang E) mittig der Länge und des Durchmessers des Beruhigungsrohres eingeführt. Die Umrechnung der erfassten Luftgeschwindigkeit im Abluftrohr auf die Luftgeschwindigkeit im TGB erfolgte durch die Beziehung

$$\dot{V}_{L,Rohr} = \dot{V}_{L,TGB} = v_{L,Rohr} \cdot A_{Rohr} = v_{L,TGB} \cdot A_{TGB} \quad (6.1)$$

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

mit:

$\dot{V}_{L,Rohr}$	Luftvolumenstrom im Abluftrohr [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
$\dot{V}_{L,TGB}$	Luftvolumenstrom im TGB [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
$v_{L,Rohr}$	Luftgeschwindigkeit im Abluftrohr [m s^{-1}]
$v_{L,TGB}$	Luftgeschwindigkeit im TGB [m s^{-1}]
A_{Rohr}	Flächeninhalt des Abluftrohres [m^2]
A_{TGB}	Flächeninhalt des TGB [m^2].

Wie bereits aus Kapitel 5 bekannt, ist der Druckverlust in Hackschnitzelschüttungen bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ relativ gering. Aus diesem Grund wurde die Luftgeschwindigkeit auf einen Wert von $v_{L,TGB} = 0,07 \text{ m s}^{-1}$ im ersten und $v_{L,TGB} = 0,08 \text{ m s}^{-1}$ im zweiten Versuchsdurchgang eingestellt.

Über den Trocknungszeitraum wurden mehrere Wiegunen der einzelnen Versuchsaufbauten durchgeführt. Die Differenz der chronologisch aufeinander folgenden Messungen ergibt die Masse des entzogenen oder aufgenommenen Wassers.

Zur Erfassung der Frischlufteigenschaften wurde ein Temperatur- und Feuchtedatenlogger *DL-121TH* (siehe Kapitel 4) außerhalb der TGB angebracht. Um die Veränderung der Trocknungsluft im Inneren der Behälter auswerten zu können, ist zusätzlich jeweils ein Logger auf halber Höhe $h_S = 750 \text{ mm}$, mittig der Hackschnitzelschüttung platziert worden.

Am Ende der Versuchszeit wurde zunächst eine abschließende Wiegun durchgeführt. Während der Behälterentleerung wurden die Datenlogger gesichert, sowie Stichproben der Hackschnitzel entnommen und mittels Trockenschrank der Wassergehalt bestimmt. Nach dem ersten Versuch wurden drei Stichproben gezogen. Um ein noch genaueres Bild von der Feuchteverteilung in der Schüttung zu bekommen, wurden nach dem zweiten Versuch jeweils drei Stichproben aus dem oberen, mittleren und unteren Drittel der Schüttung gezogen.

Insgesamt wurden zwei Durchgänge mit jeweils drei befüllten TGB durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend dargelegt werden.

6.2. Auswertung der Messdaten

6.2.1. Versuchsdurchgang 1

Der erste Versuch zur Kaltlufttrocknung wurde über einen Zeitraum von 29 Tagen zwischen dem 07.09.2011 und dem 06.10.2011 durchgeführt, wobei es sich bei dem eingelagerten Material um Apfelrodungsholz ohne Wurzelanteile (NK-AoW) handelte. Mittels Trockenschrank wurde festgestellt, dass dieses Holz Wassergehalte zwischen 46,67% (TGB 1.3) und 47,57% (TGB 1.2) aufwies. Wie vorhergehend bereits beschrieben, sind wiederholt Wiegunen der gefüllten Versuchsaufbauten durchgeführt worden. Abbildung 6.2 zeigt die aufsummierten Gewichtsveränderungen (Ordinate) der drei TGB über den Versuchszeitraum (Abszisse).

Es ist zu erkennen, dass die Regressionslinien von TGB 1.1 und TGB 1.3 über den gesamten Zeitraum nahezu parallel verlaufen. Die Linie von TGB 1.2 zeigt hingegen eine stärkere Gewichtsabnahme während der ersten sechs Tage. Ab dem 17.09.2011 verlangsamt sich der Trocknungsverlauf, so dass TGB 1.2 sowohl den höchsten Eingangs- als auch Ausgangswassergehalt aufweist.

Der Wassergehalt sinkt in den ersten zwölf Tagen um durchschnittlich 42,33 kg in allen TGB. Danach zeigen die Trocknungskurven einen flacheren Verlauf, was darauf hindeutet, dass die Fasersättigung erreicht ist. Die Tiefstwerte werden in allen drei Wiederholungen am 04.10.2011 erreicht. Durchschnittlich wurden 64,67 kg Wasser entzogen. Da die letzte Gewichtsmessung am 06.10.2011 eine Zunahme in allen drei Wiederholungen zwischen 0,5 kg und 1,0 kg ergab, wurde der Versuch beendet.

Grundsätzlich weisen Trocknungskurven unter gleichbleibendem Druck und konstanter Temperatur der Trocknungsluft, also unter idealen Bedingungen, einen exponentiell abnehmenden Verlauf auf. In Kapitel 2 wurde bereits beschrieben, dass in der ersten Phase vor allem leicht zu entfernendes Oberflächenwasser verdunstet wird. Anschließend wird zunächst das im Inneren des Holzes gebundene

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

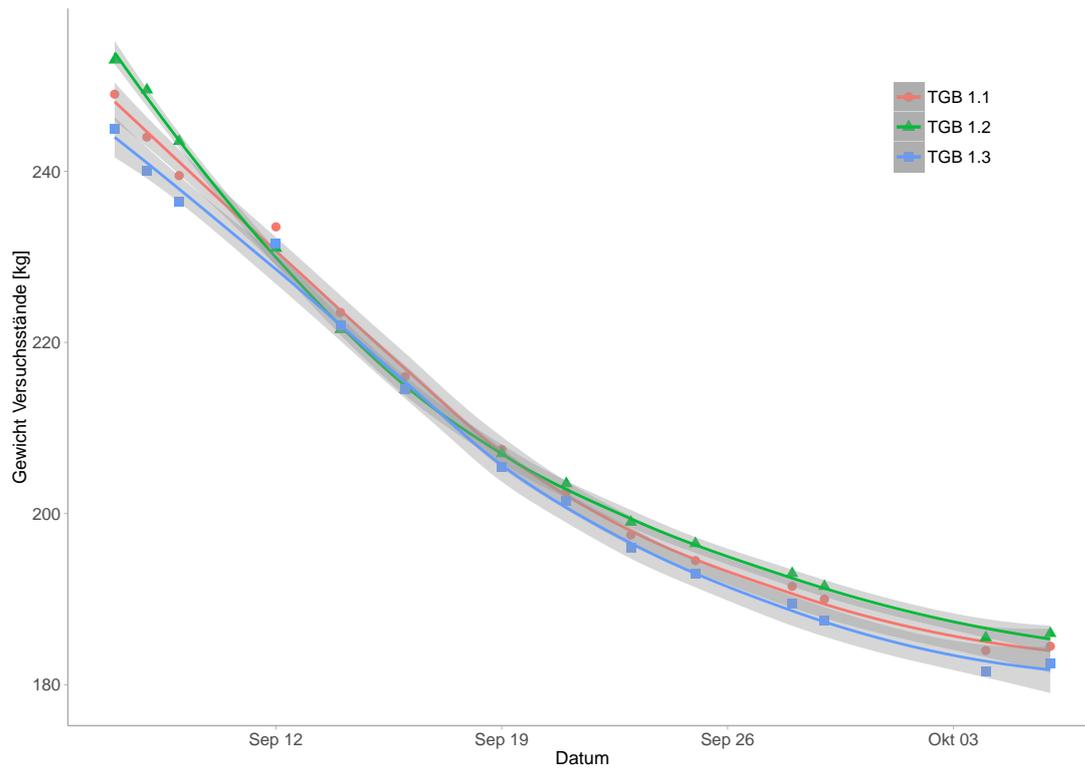


Abbildung 6.2.: Aufsummierte Gewichtsveränderung der TGB im ersten Versuchsdurchgang; mittlerer Anfangswassergehalt am 07.09.2011: $U_1 = 47,11\%$; Endwassergehalt am 06.10.2011: $U_2 = 15,50\%$; Campus Klein-Altendorf

Wasser an die Oberfläche transportiert, bevor auch dieses in die Trocknungsluft übergehen kann. Diese zweite Phase nimmt mehr Zeit in Anspruch, wodurch der Trocknungsprozess verlangsamt wird. Dies spiegelt sich in den in Abbildung 6.2 gezeigten Regressionslinien wieder.

Von dem eingelagerten Schüttgut wurden nach der Entleerung abermals Proben gezogen, deren Wassergehalte ebenfalls mit Hilfe des Trockenschrankes festgestellt wurden. Der mittlere Wassergehalt aller drei TGB betrug $15,50\%$, wobei wiederum jeweils drei Proben bestimmt wurden.

6.2. Auswertung der Messdaten

Tabelle 6.1.: Zusammenfassung der rechnerisch und empirisch ermittelten Endwassergehalte sowie Darlegung der Kalkulationsschritte im ersten Durchgang des Versuchs zur Kaltlufttrocknung; Campus Klein-Altendorf; September und Oktober 2011

Bezeichnung/ Einheit	Formel- zeichen	Feststellungs- methode	TGB 1.1	TGB 1.2	TGB 1.3
Leergewicht VS [kg]	m_{VS}	Wiegung	78,5	80,0	78,0
Anfangsgewicht VS [kg]	$m_{VS,1}$	Wiegung	249,0	253,0	245,0
Masse Frisch- holz [kg]	$m_{H,1}$	$m_{VS,1} - m_{VS}$	170,5	173,0	167,0
Anfangswasser- gehalt Holz [%]	$W_{H,1}$	Trockenschrank	47,1	47,6	46,7
Anfangsmasse Wasseranteil [kg]	$m_{W,1}$	$m_{H,1} \cdot W_1$	80,3	82,3	77,9
Trockenmasse Holz [kg]	$m_{H,t}$	$m_{H,1} - m_{W,1}$	90,2	90,7	89,1
Endgewicht VS [kg]	$m_{VS,2}$	Wiegung	184,5	186,0	182,5
entzogene Masse Wasser [kg]	Δm_W	$m_{VS,1} - m_{VS,2}$	64,5	67,0	62,5
Endmasse Wasser- anteil [kg]	$m_{W,2}$	$m_{W,1} - \Delta m_W$	15,8	15,3	15,4
Endmasse Holz [kg]	$m_{H,2}$	$m_{H,t} + m_{W,2}$	106,0	106,0	104,5
Endwassergehalt Holz, berechnet [%]	$W_{H,2,ber}$	$\frac{m_{H,2} - m_{H,t}}{m_{H,2}}$	14,93	14,43	14,77
Endwassergehalt Holz [%]	$W_{2,TS}$	Trockenschrank	15,45*	16,48**	14,57 ^{n.s.}
			$\pm 0,13$	$\pm 0,18$	$\pm 0,18$

Einstichproben t-test, Referenz = $W_{H,2,ber}$;

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; ^{n.s.} $p > 0,05$ (nicht signifikant); $n = 3$

In Tabelle 6.1 sind sowohl die mittels Trockenschrank bestimmten als auch die mit Hilfe der Wiegunen errechneten Endwassergehalte zu entnehmen. Die geringe Standardabweichung ersterer lässt auf eine gleichmäßige Trocknung des Auf-

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

gabegutes schließen. Da die Stichprobenanzahl von $n = 3$ keine Aussage über die Verteilung der Holzfeuchte innerhalb der Schüttung zulässt, wurde die Anzahl im nachfolgend beschriebenen zweiten Versuch auf $n = 9$ erhöht. Ein Einstichproben t-Test ergab signifikante Unterschiede zwischen den bestimmten und errechneten Endwassergehalten der TGB 1.1 und 1.2. Ohne Zweifel sind die nach DIN EN 14 774-2:2010-03-01 bestimmten Wassergehalte verlässlicher als die errechneten Werte. Dies ist schon durch die Messtoleranz der Schwerlastwaage von 0,5 kg begründet. Aus diesem Grund scheint der insignifikante Unterschied im Fall des TGB 1.3 eher zufälligen Charakters zu sein.

Die Abbildungen 6.3 bis 6.8 zeigen exemplarisch die Entwicklungen der Temperatur und relativen Feuchte als Mittelwerte der TGB 1.1, 1.2 und 1.3 sowie die Referenzmessungen (Umgebungsluft) an drei unterschiedlichen Tagen. Die Diagramme aller TGB sind in wöchentlicher Auflösung in Anhang B zu sehen. Im Versuchszeitraum schwankte die Referenztemperatur zwischen $6,9^{\circ}\text{C}$ am 16.09.2011 um 7.05 Uhr und $27,6^{\circ}\text{C}$ am 10.09.2011 um 16.25 Uhr.

Abbildung 6.3 zeigt die Temperaturentwicklung am Tag der Holzeinlagerung in den TGB. Es fällt auf, dass es innerhalb der ersten drei Stunden nach Platzierung des Datenloggers zu einer starken Temperaturabsenkung von etwa 26°C auf 14°C in der Holzschüttung kommt, während die Umgebungstemperatur bei etwa 18°C liegt. Die höhere Ausgangstemperatur in der Schüttung ist auf die Restatmung von Splintholzzellen in unbelüfteten Mieten zurückzuführen, wie sie bereits in Abschnitt 2.2 ausgeführt wurde. Das anschließende Absinken ist auf die Zufuhr von Frischluft durch den Ventilatorbetrieb und deren Aufnahme von Wasserdampf zurückzuführen. Es findet folglich ein Abtransport der Wärme und Holzfeuchte statt. Die relative Luftfeuchte in der Schüttung steigt in einem Zeitraum von 30 Minuten auf 98% an und verbleibt nahezu konstant auf diesem Niveau, wie in Abbildung 6.4 dargestellt.

6.2. Auswertung der Messdaten

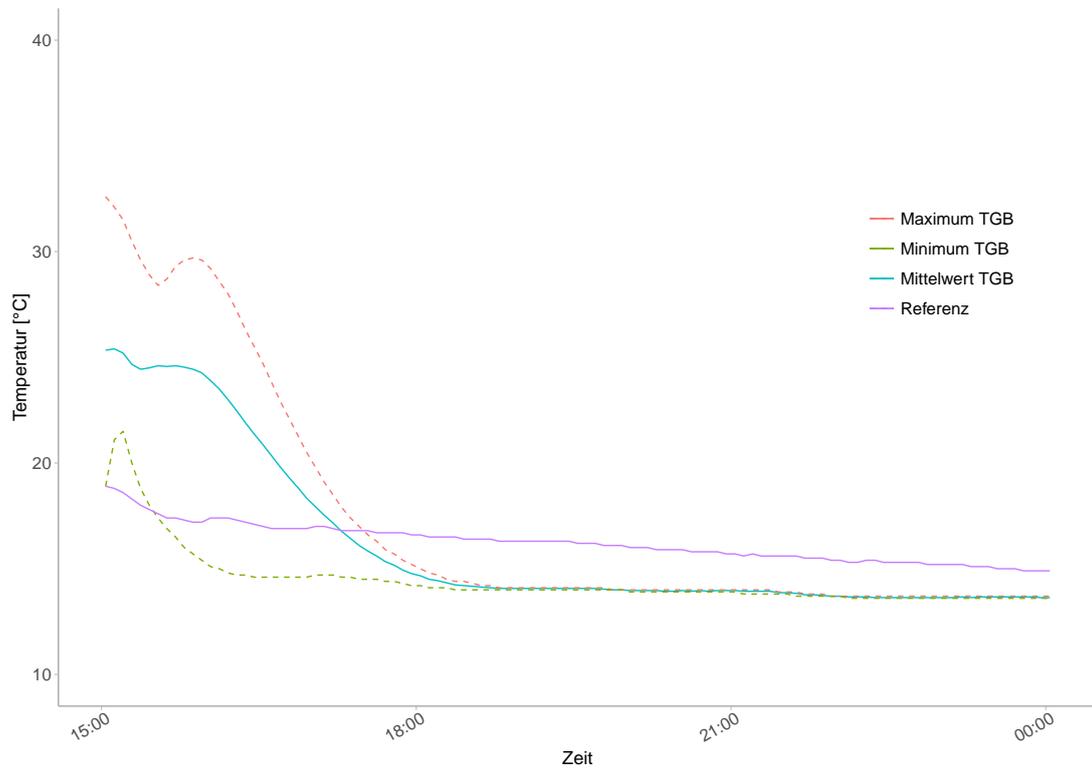


Abbildung 6.3.: Temperaturentwicklung innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 1: 07.09.2011; Campus Klein-Altendorf

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

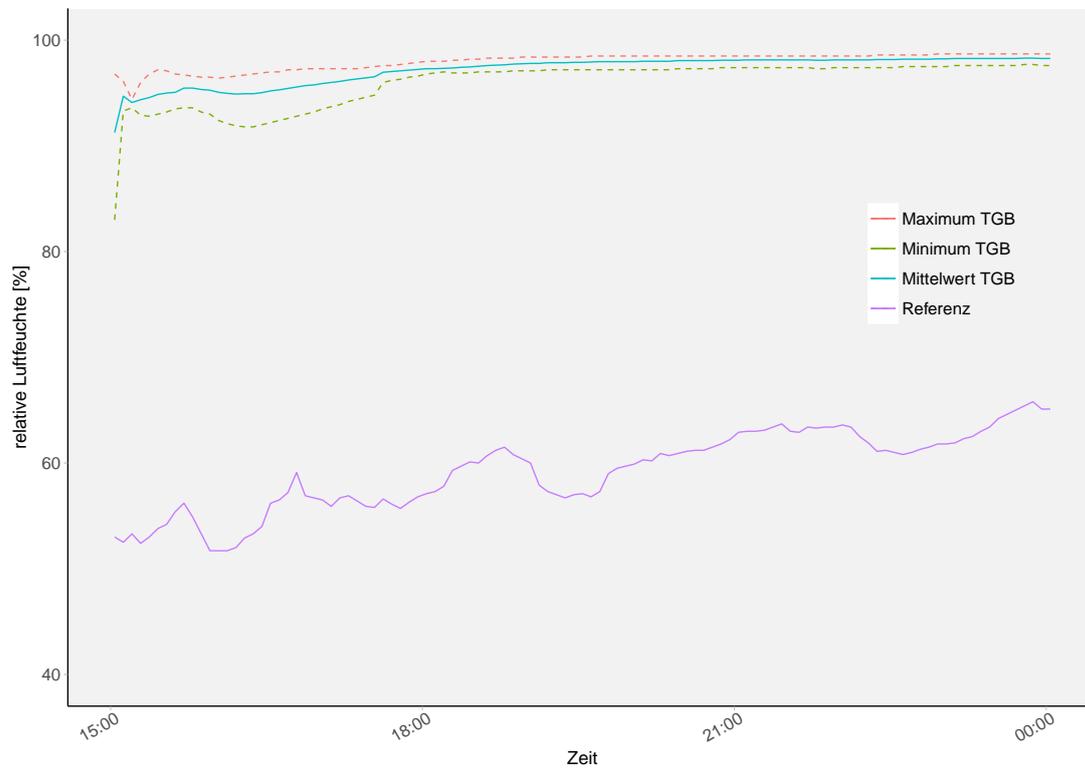


Abbildung 6.4.: Entwicklung der relativen Feuchte innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 1: 07.09.2011; Campus Klein-Altendorf

Die Abbildungen 6.5 und 6.6 zeigen die Entwicklung von Temperatur und relativer Feuchte am 17. Tag, also zur Halbzeit des ersten Versuchsdurchgangs. Die durch den in den Holzhackschnitzeln platzierten Logger aufgezeichneten Daten zeigen ein ähnliches Bild wie am Tag der Befüllung. Während die relative Feuchte durchgängig knapp unter 100% aufweist, liegt die Temperatur in der Schüttung nahezu konstant unter den Referenzwerten. Folglich weist das Holz noch einen erhöhten Feuchtigkeitswert auf, so dass die Trocknungsluft fast vollständig gesättigt und somit durch die Wasserdampfaufnahme abgekühlt wird.

6.2. Auswertung der Messdaten

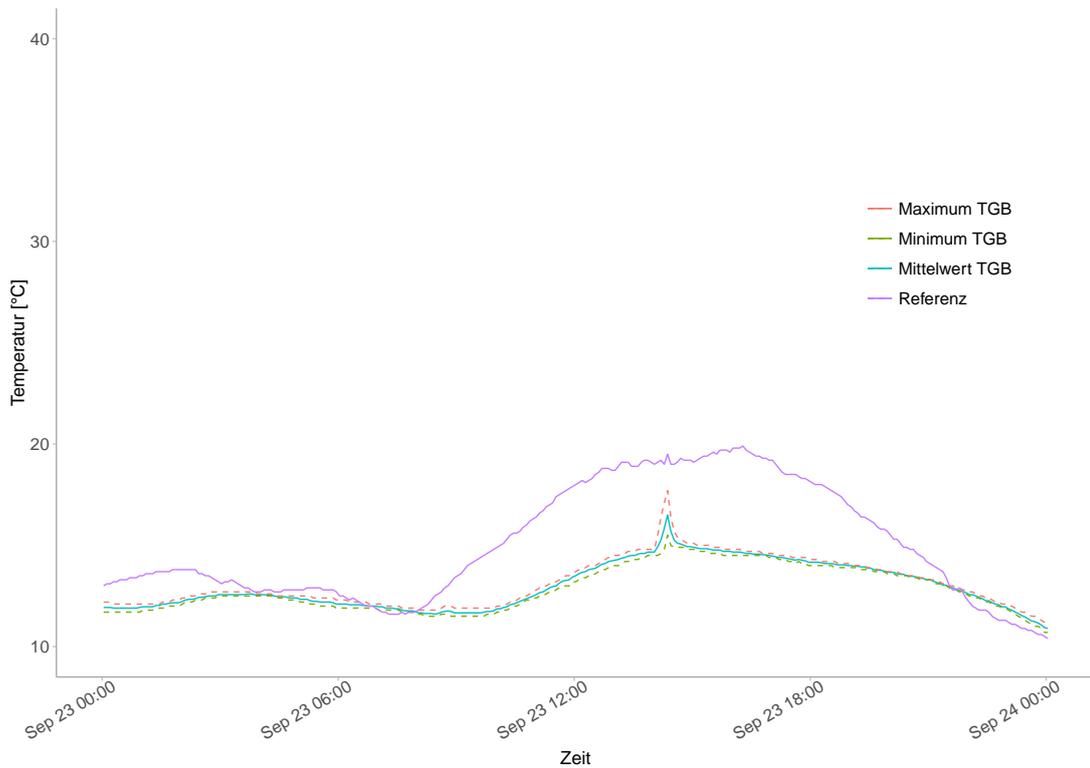


Abbildung 6.5.: Temperaturentwicklung innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 17: 23.09.2011; Campus Klein-Altendorf

Das gegen 14.00 Uhr registrierte Minimum der relativen Feuchte und das Maximum der Temperatur in den TGB ist auf deren Wiegungen zurückzuführen, die zu diesem Zeitpunkt stattfanden. Der Ventilatorbetrieb wurde hierfür kurzzeitig unterbrochen und die Versuchsaufbauten zur Waage transportiert, die sich in einer Halle befindet. Dies führte zu abweichenden Konditionen in den TGB.

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

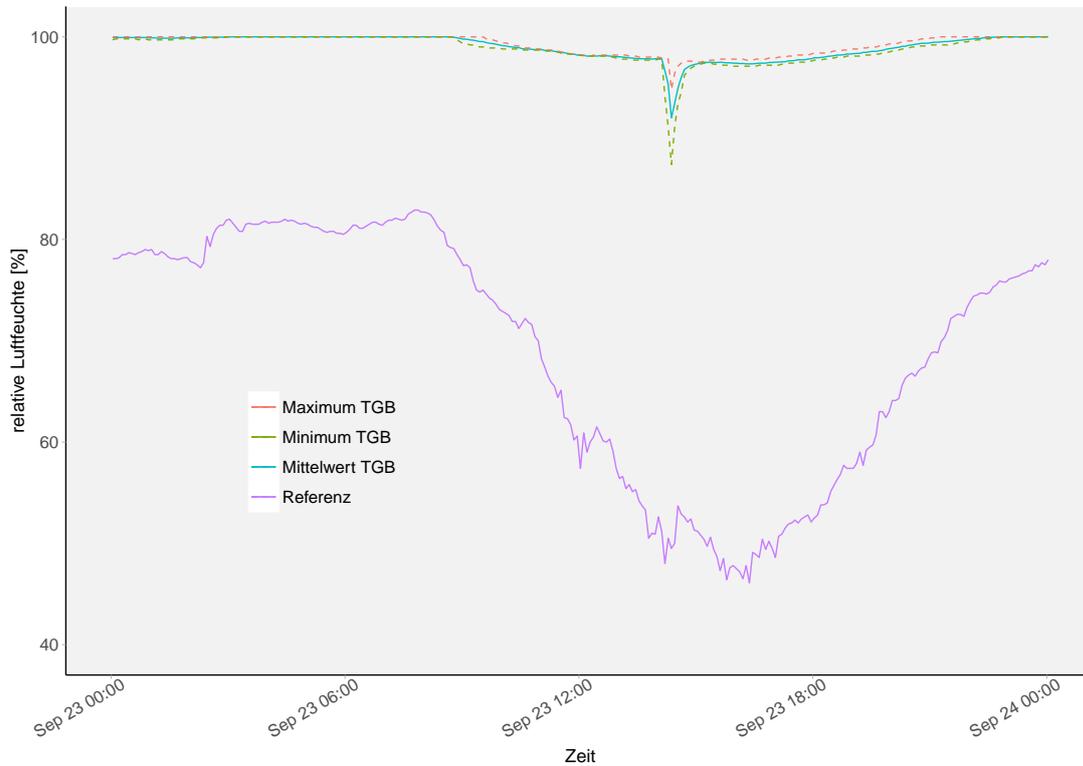


Abbildung 6.6.: Entwicklung der relativen Feuchte innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 17: 23.09.2011; Campus Klein-Altendorf

Am 04.10.2011 (Tag 28) registrierten die Datenlogger in den TGB zum ersten Mal seit Inbetriebnahme eine Verringerung der relativen Feuchte auf unter 90%, wie in Abbildung 6.8 zu sehen ist. An den folgenden Tagen nehmen die registrierten Werte weiterhin auf ca. 80% bis 85% ab und verbleiben in diesem Bereich bis zum Ende des Versuchs. Daraus lässt sich schließen, dass unter den gegebenen klimatischen Bedingungen eine weitere Trocknung mittels unconditionierter Frischluft nicht möglich war. Diese Annahme wird durch den ebenfalls für den 04.10.2011 mittels Wiegung festgestellten Tiefstwert unterstützt (siehe Abbildung 6.2). Die Tatsache, dass sich die relative Feuchte in den TGB nicht vollständig dem Niveau der Umgebungsluft angleicht, hängt mit den hygroskopischen Eigenschaften der

6.2. Auswertung der Messdaten

Holz hackschnitzel zusammen. Sie wirken wie ein ausgleichender Puffer, was durch die geringeren Kurvenschwankungen bestätigt wird.

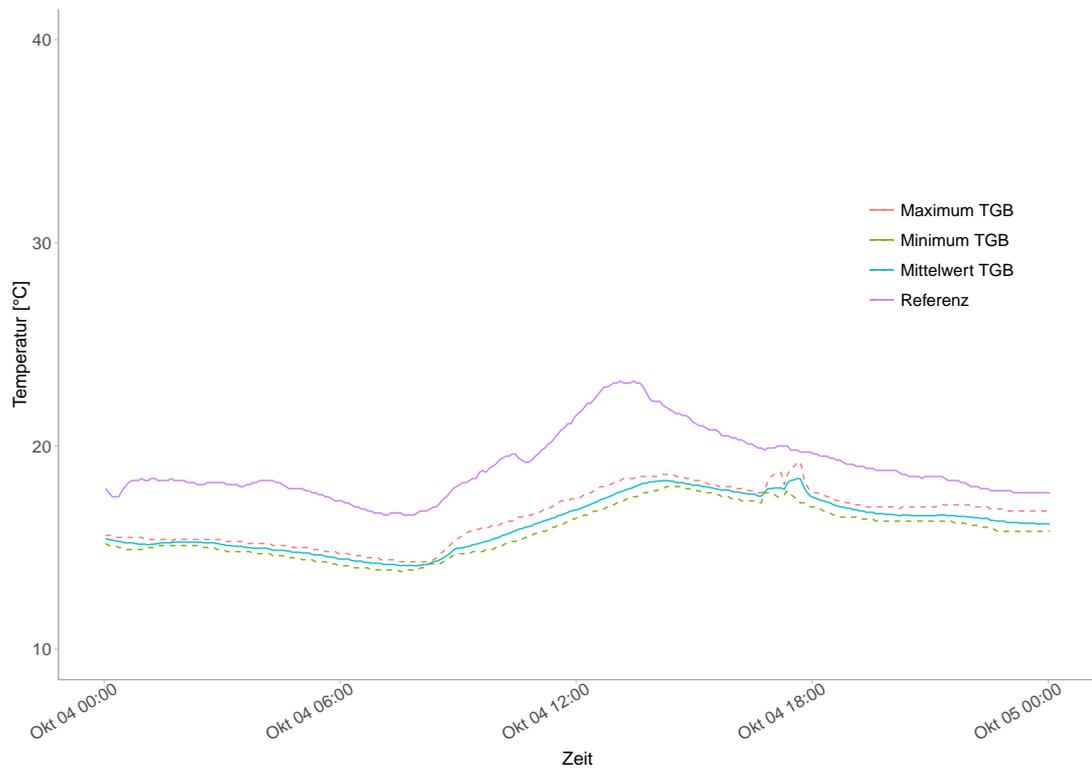


Abbildung 6.7.: Temperaturentwicklung innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 28: 04.10.2011; Campus Klein-Altendorf

In Abschnitt 2.2 wurde bereits der Einfluss von Schimmelpilzen auf die Degradation von Biomasse in Holzmielen erläutert. Eine visuelle Prüfung des Aufgabegutes nach Beendigung des Versuchsdurchgangs wies keinerlei Spuren von Pilzbildung auf. Ein Grund hierfür ist die kontinuierliche Belüftung der Hackschnitzel, durch die eine Wärmeentwicklung und das damit verbundene Pilzwachstum vermieden wird.

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

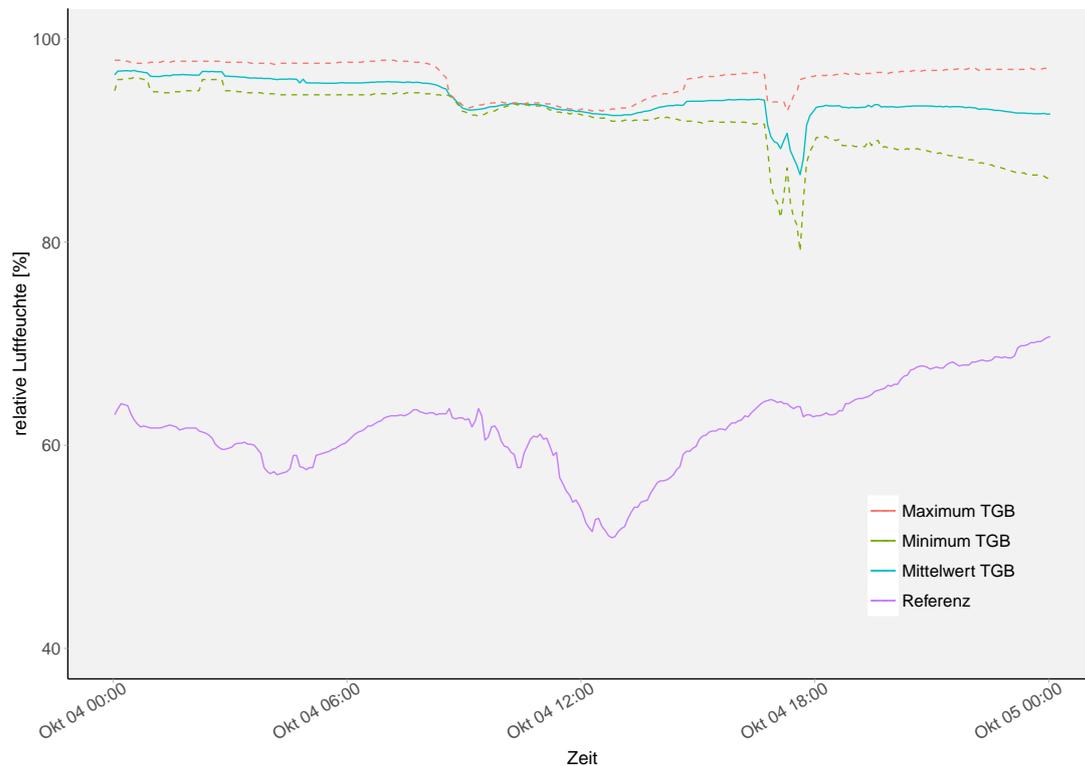


Abbildung 6.8.: Entwicklung der relativen Feuchte innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1, Tag 28: 04.10.2011; Campus Klein-Altendorf

6.2.2. Versuchsdurchgang 2

Im zweiten Versuch, der vom 18.01.2012 bis zum 27.02.2012 (41 Tage) statt fand, wurde gemischtes Holz der Größenklasse P16 (P16-GU) verwendet. Mittels Trockenschrank wurde ein mittlerer Anfangswassergehalt aller drei Wiederholungen von 38,49% festgestellt, wobei TGB 2.2 mit 35,21% den niedrigsten und TGB 2.3 mit 41,55% den höchsten Wert aufwies. Innerhalb des Versuchszeitraumes wurden die Wassergehalte auf einen mittleren Wert von 19,86% reduziert. Hierbei hatte das Aufgabegut in TGB 2.2 einen Wassergehalt von 17,33% und in TGB

2.3 von 23,89%.

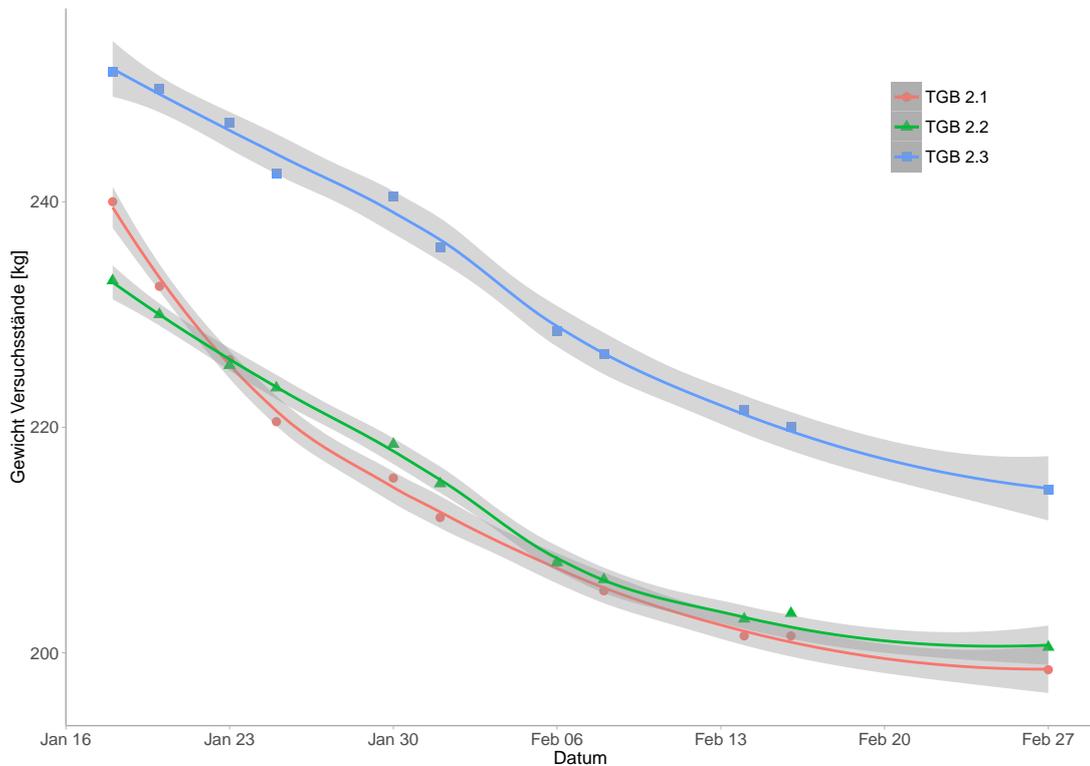


Abbildung 6.9.: Aufsummierte Gewichtsveränderung der TGB im zweiten Versuchsdurchgang; Anfangswassergehalt am 18.01.2012: $U_1 = 38,49\%$; Endwassergehalt am 27.02.2012: $U_2 = 19,86\%$; Campus Klein-Altendorf

Auch in diesem Durchgang ist eine exponentielle Abnahme der Trocknungskurven zu erkennen, wie aus Abbildung 6.9 zu entnehmen ist. Allerdings verlaufen die Kurven flacher als im ersten Durchgang, was auf die geringeren Anfangswassergehalte zurückzuführen ist. Darüber hinaus fand dieser Durchgang im Winter statt, wodurch die Temperatur der Frischluft geringer und ihre relative Feuchte höher war als im vorhergehenden Durchgang.

Als Besonderheiten der Trocknungskurven fällt auf, dass für TGB 2.1 anfänglich eine stärkere Gewichtsabnahme registriert wurde, während die Kurven der TGB 2.2 und 2.3 annähernd parallel verlaufen. Ein konkreter Grund kann hierfür

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

nicht genannt werden, aber es liegt im Bereich des Möglichen, dass eine geringere Verdichtung des Aufgabegutes in TGB 2.1 vorlag. Hierdurch wurde der Feuchte-transport vom Holz in die Trocknungsluft weniger behindert. Auch kann keine schlüssige Begründung dafür angegeben werden, dass für TGB 2.3 am 27.02. eine stärkere Gewichtsabnahme registriert wurde als für TGB 2.2. Wie auch im ersten Durchgang konnte jedoch eine Trocknung der eingelagerten Holzhackschnitzel mit Hilfe von unkonditionierter Frischluft erreicht werden.

Die in Tabelle 6.2 dargestellten ermittelten Werte der Endwassergehalte weisen für TGB 2.1 und 2.2 relativ niedrige Standardabweichungen auf. Wie bereits beschrieben, liegt diesen eine Stichprobenanzahl von $n = 9$ zugrunde, wobei jeweils drei Proben aus dem oberen, mittleren und unteren Drittel der Schüttung genommen wurden. Die Feuchteverteilung innerhalb der Schüttung kann hier folglich als gleichmäßig verteilt beschrieben werden.

Lediglich die Standardabweichung bei TGB 2.3 lässt auf eine inhomogene Feuchteverteilung schließen. Tatsächlich lag der mittlere Wassergehalt im oberen Drittel bei $37,09 \pm 1,10\%$, in der Mitte bei $18,80 \pm 0,58\%$ und unten bei $15,77 \pm 0,27\%$. Die hohe Standardabweichung hat Einfluss auf den Einstichproben t-Test, da sich der relativ große Unterschied zwischen errechnetem und bestimmtem Wert durch sie als nicht signifikant darstellt. Jedoch sorgen die Ungenauigkeiten bei der Wie-gung auch hier für eher zufällige Ergebnisse, sodass die Wassergehaltsbestimmung mittels Wie-gung lediglich als grobe Orientierung dienen kann.

6.2. Auswertung der Messdaten

Tabelle 6.2.: Zusammenfassung der rechnerisch und empirisch ermittelten Endwassergehalte sowie Darlegung der Kalkulationsschritte im zweiten Durchgang des Versuchs zur Kaltlufttrocknung; Campus Klein-Altendorf; Januar und Februar 2012

Bezeichnung/ Einheit	Formel- zeichen	Feststellungs- methode	TGB 2.1	TGB 2.2	TGB 2.3
Leergewicht VS [kg]	m_{VS}	Wiegung	78,5	80,0	78,0
Anfangsgewicht VS [kg]	$m_{VS,1}$	Wiegung	240,0	233,0	251,5
Masse Frisch- holz [kg]	$m_{H,1}$	$m_{TGB,1} - m_{TGB}$	161,5	153,0	173,5
Anfangswasser- gehalt Holz [%]	$W_{H,1}$	Trockenschrank	38,7	35,2	41,6
Anfangsmasse Wasseranteil [kg]	$m_{W,1}$	$m_{H,1} \cdot W_1$	62,5	53,9	72,1
Trockenmasse Holz [kg]	$m_{H,t}$	$m_{H,1} - m_{W,1}$	99,0	99,7	101,4
Endgewicht VS [kg]	$m_{VS,2}$	Wiegung	198,5	200,5	214,5
entzogene Masse Wasser [kg]	Δm_W	$m_{TGB,1} - m_{TGB,2}$	41,5	32,5	37,0
Endmasse Wasser- anteil [kg]	$m_{W,2}$	$m_{W,1} - \Delta m_W$	21,02	21,4	35,1
Endmasse Holz [kg]	$m_{H,2}$	$m_{H,t} + m_{W,2}$	120,0	120,5	136,5
Endwassergehalt Holz, berechnet [%]	$W_{H,2,ber}$	$\frac{m_{H,2} - m_{H,t}}{m_{H,2}}$	17,5	17,7	25,7
Endwassergehalt Holz [%]	$W_{2,TS}$	Trockenschrank	18,4* $\pm 0,82$	17,3 ^{n.s.} $\pm 0,84$	23,9 ^{n.s.} $\pm 10,01$

Einstichproben t-test, Referenz = $W_{H,2,ber}$;

* $p \leq 0,05$; ^{n.s.} $p > 0,05$ (nicht signifikant); $n = 9$

Der zweite Versuch wurde im Winter durchgeführt, wodurch die durchschnittliche Außentemperatur niedriger war als im ersten Durchgang. Ihr Minimum von $-15,0^\circ\text{C}$ wurde am 07.02.2012 um 08.00 Uhr registriert, während ihr Maximum

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

von 10,9°C am 19.01.2012 um 15.15 Uhr aufgezeichnet wurde. Die vollständige Dokumentation der gemessenen Werte erfolgt ebenfalls in Anhang B in wöchentlicher Auflösung.

An Tag 1 (18.01.2012) sinkt, ähnlich wie im ersten Versuchsdurchgang, die Temperatur in der Hackschnitzelschüttung ab (Abbildung 6.10), während die relative Feuchte auf ca. 98% ansteigt (Abbildung 6.11). Im Zeitraum von Tag 1 bis Tag 11 bleibt dieser Zustand fast unverändert, wobei die Referenztemperatur zwischen 0°C und 5°C variiert.

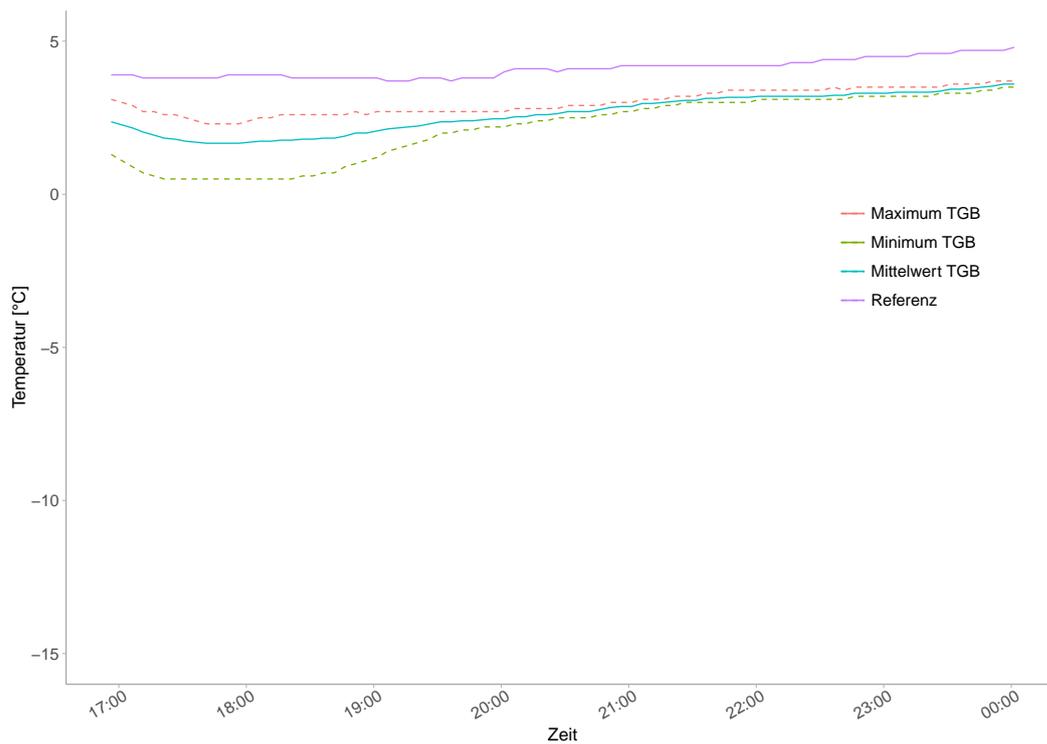


Abbildung 6.10.: Temperaturentwicklung innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 1: 18.01.2012; Campus Klein-Altendorf

6.2. Auswertung der Messdaten

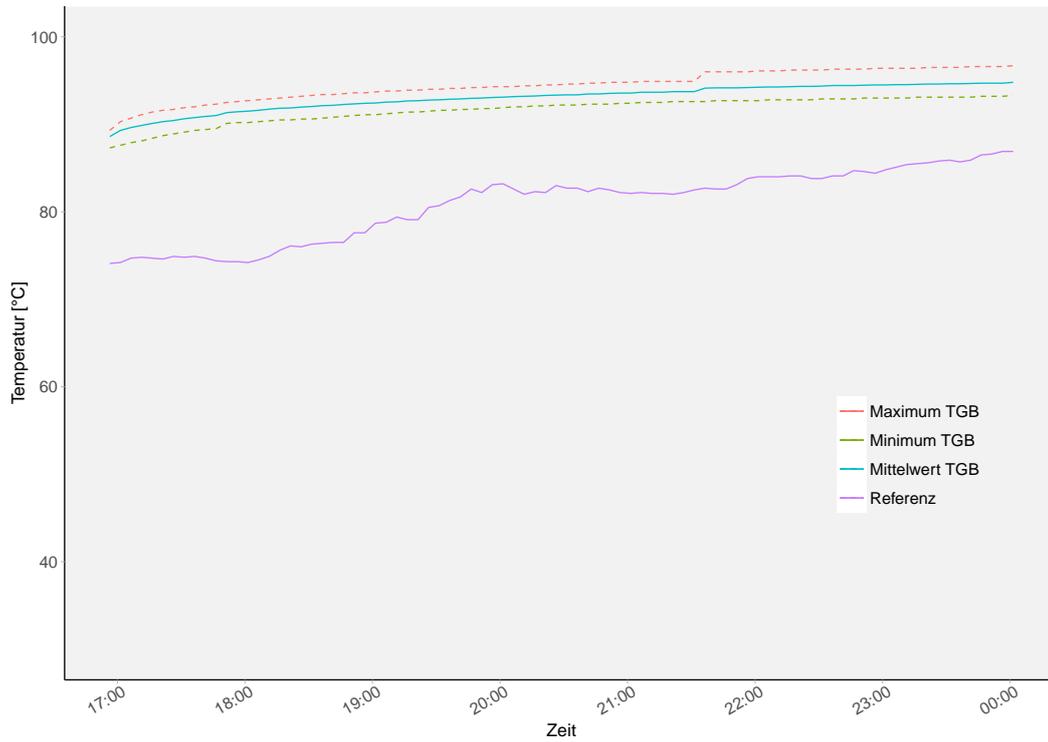


Abbildung 6.11.: Entwicklung der relativen Feuchte innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 1: 18.01.2012; Campus Klein-Altendorf

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

In den folgenden Tagen steigt die relative Feuchte auf einen Wert von 100% an und hält diesen bis Tag 14 nahezu unverändert. An Tag 12 fällt die Temperatur auf etwa 0°C ab, bis Tag 14 einen erneuten Kälteeinbruch brachte, der die Umgebungstemperatur ab 15.00 Uhr auf -5°C absinken ließ. Zur gleichen Zeit sinkt die relative Luftfeuchte auf unter 100%. Die Abbildungen 6.12 und 6.13 zeigen eine weitere Abkühlung auf bis zu -7°C und ein noch deutlicheres, temporäres Absinken der relativen Feuchte auf 90% an Tag 15.

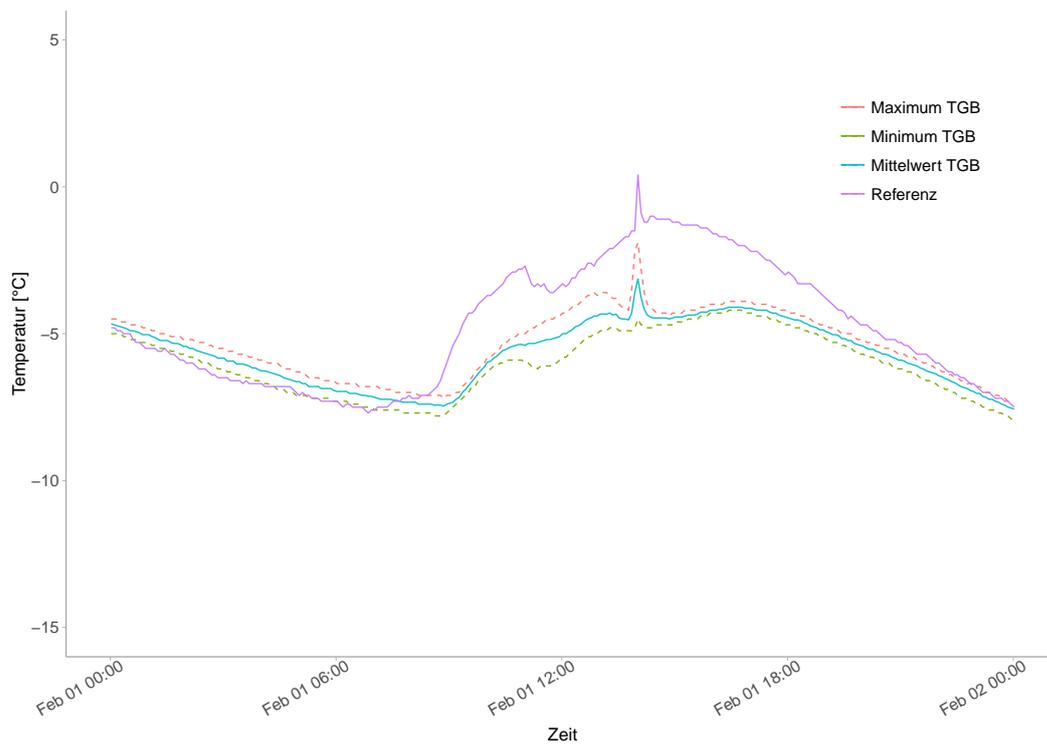


Abbildung 6.12.: Temperaturentwicklung innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 15: 01.02.2012; Campus Klein-Altendorf

6.2. Auswertung der Messdaten

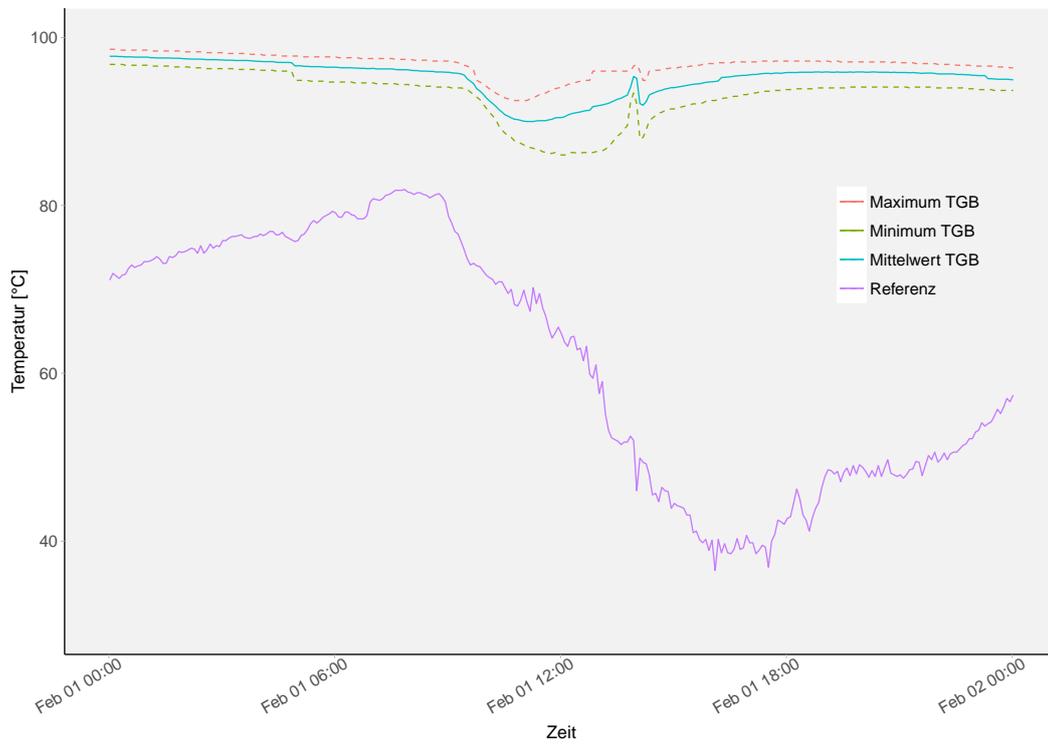


Abbildung 6.13.: Entwicklung der relativen Feuchte innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 15: 01.02.2012; Campus Klein-Altendorf

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

Die nächsten zehn Tage (Tag 16 bis 26) führten zu einem weiteren Temperatureinbruch. In dieser Zeit lagen die Temperaturen durchgängig unter 0°C . Es wurde der Tiefstwert von -15°C registriert (Abbildung 6.14). Die in den TGB gemessene relative Feuchte schwankt, wie in Abbildung 6.15 zu sehen, in diesem Zeitraum zwischen dem Minimum von 88% und 95%. Dies kann durch eine Vereisung der Holzhackschnitzel erklärt werden. Durch das Gefrieren war eine Verdunstung des gebundenen Wassers und ein Abtransport desselben durch die Trocknungsluft nicht mehr möglich.

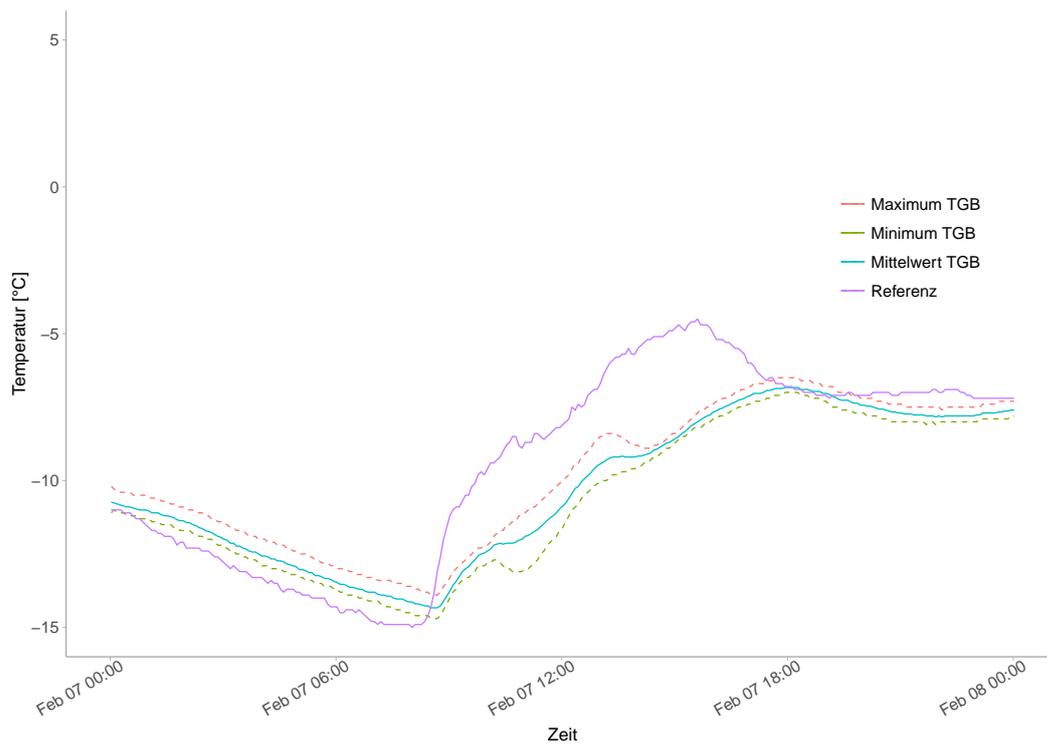


Abbildung 6.14.: Temperaturentwicklung innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 21: 07.02.2012; Campus Klein-Altendorf

6.2. Auswertung der Messdaten

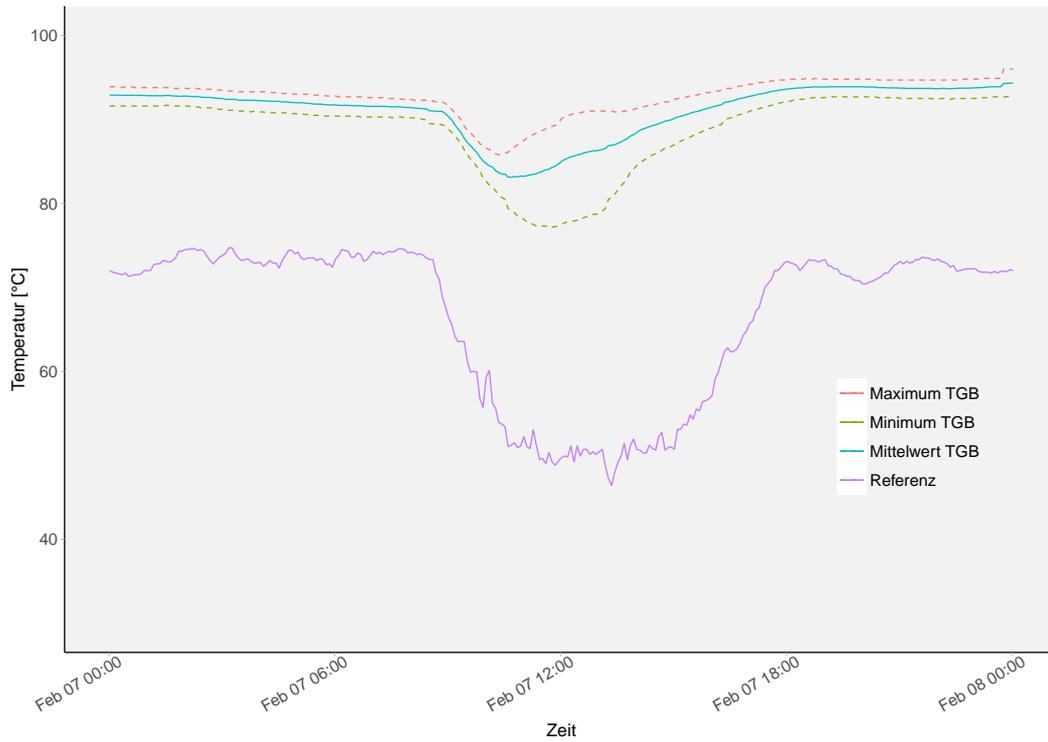


Abbildung 6.15.: Entwicklung der relativen Feuchte innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 21: 07.02.2012; Campus Klein-Altendorf

6. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

Erst der in den Tagen 27 bis 32 gemessene Außentemperaturanstieg auf bis zu 8°C ließ ein Auftauen der Schüttung zu. Hierdurch konnte der Trocknungsprozess fortgesetzt werden, wodurch die relative Feuchte in der Schüttung auf knapp unter 100% anstieg. Die Tage 33 bis 35 brachten einen erneuten Kälteeinbruch mit Temperaturen zwischen 5°C und 0°C . Zeitgleich sank auch die relative Feuchte in den TGB auf maximal 98% ab (vergleiche Tag 34 in Abbildung 6.16 und 6.17).

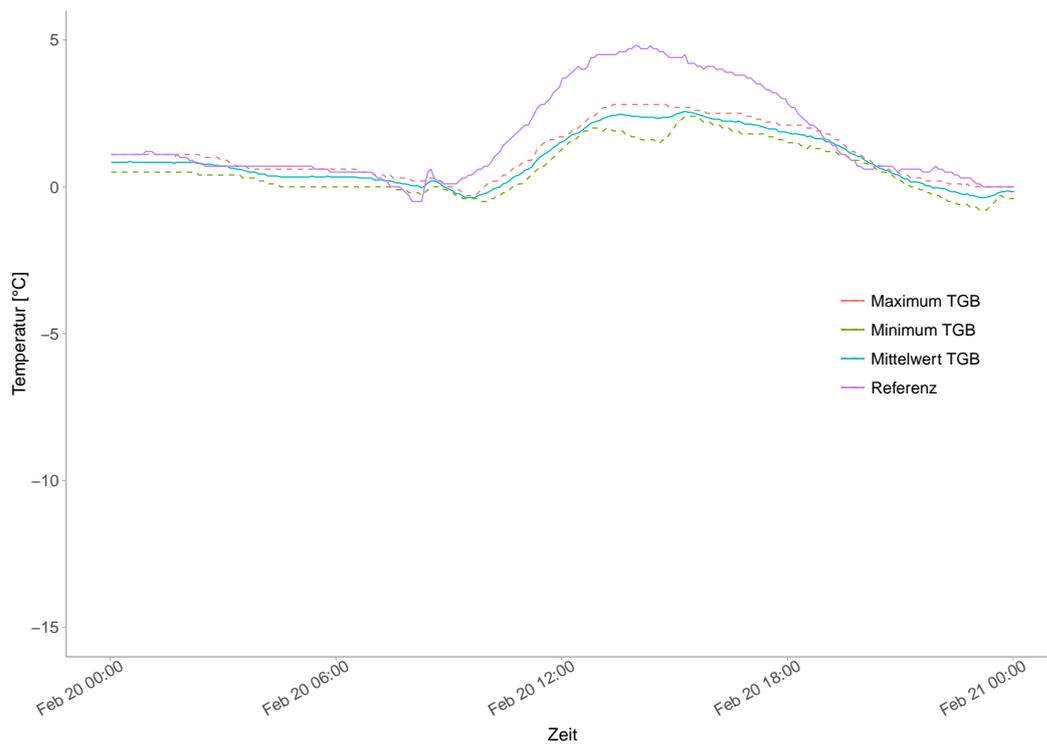


Abbildung 6.16.: Temperaturentwicklung innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 34: 20.02.2012; Campus Klein-Altendorf

6.2. Auswertung der Messdaten

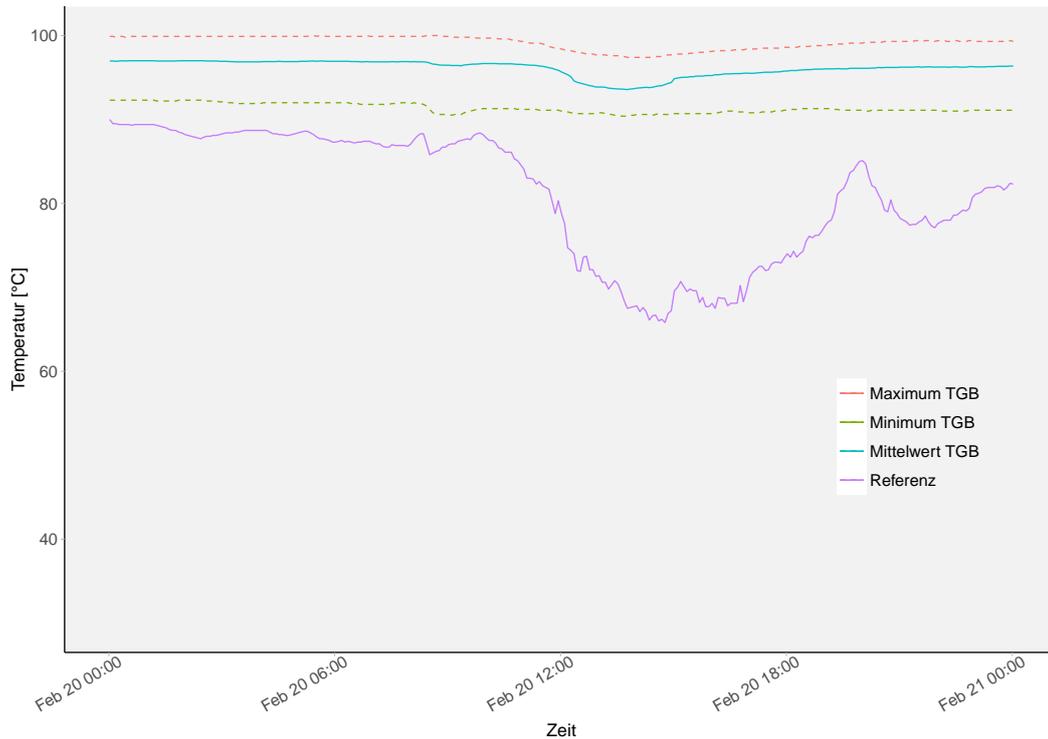


Abbildung 6.17.: Entwicklung der relativen Feuchte innerhalb der TGB als Mittelwert, Minimum und Maximum sowie der Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2, Tag 34: 20.02.2012; Campus Klein-Altendorf

Wie auch im ersten Versuchsdurchgang konnte durch visuelle Prüfung keine Schimmelbildung im Aufgabegut festgestellt werden.

In Abschnitt 7.3.3 erfolgt die Berechnung des Ausnutzungsgrades des Trocknungspotentials der Zuluft.

7. Berechnung des Trocknungspotentials

Mit Hilfe einer iterativen Bestimmung des Feuchtegrads der Abluft wurde analysiert, wie hoch das Potential der Trocknungsluft zur Aufnahme von Wasserdampf am Campus Klein-Altendorf ist. Hierbei beschränkt sich die Kalkulation auf das Kaltluftverfahren, d.h. „Umgebungsluft bzw. geringfügig vorgewärmte Umgebungsluft, wobei die Vorwärmung 3 bis 5°C beträgt“ [MÜHLBAUER, 2009]. Die Berechnung wurde zunächst mit nicht vorgewärmter Umgebungsluft durchgeführt, wofür die am Campus Klein-Altendorf aufgezeichneten Wetterdaten der Jahre 2008 bis 2011 aufbereitet und verwendet wurden. Zur Abschätzung des Trocknungspotentials geringfügig vorgewärmter Luft wurde die registrierte Temperatur der Umgebungsluft um 2,5 K bzw. 5,0 K erhöht, ihre relative Feuchte entsprechend angepasst und die Berechnungsprozedur mit diesen Werten wiederholt.

Es folgt zunächst eine Auflistung und Erläuterung der verwendeten Gleichungen. Im Anschluss wird die Aufbereitung der Wetterdaten geschildert und die Kurven der Temperatur und relativen Feuchte der einzelnen Temperaturniveaus dargestellt. Nach der Vorstellung und Evaluierung der Resultate erfolgt eine Berechnung des Ausnutzungsgrades des Trocknungspotentials der Versuchsdurchgänge aus dem vorhergehenden Kapitel 6.

7.1. Vorstellung der mathematischen Gleichungen zur iterativen Bestimmung der absoluten Feuchte der Abluft

Im Laufe eines Trocknungsprozesses ist die Trocknungsluft etlichen Zustandsänderungen ausgesetzt. So wird sie im Falle einer Vorwärmung zunächst aufgeheizt und anschließend durch die Aufnahme von Wasserdampf während der Trocknung befeuchtet und abgekühlt. Diese Vorgänge wurden bereits unter Verwendung des h-x-Diagramms nach Mollier in Kapitel 2 näher beleuchtet. Bei dem in dieser Arbeit verfolgten Trocknungsverfahren kann, im Gegensatz zur Vakuumtrocknung beispielsweise, angenommen werden, dass sämtliche Zustandsänderungen bei konstantem Druck, also isobar, ablaufen. Es handelt sich grundsätzlich um ein offenes System, bei dem ein Druckausgleich mit der Umgebung stattfindet. Aus diesem Grund muss die Volumenänderungsarbeit pV bei der Berechnung der Enthalpie H nicht berücksichtigt werden. Da sich auch die innere Energie U des Gesamtsystems nicht ändert, gilt:

$$H_1 = H_2 = U + pV \quad (7.1)$$

„Da bei Trocknungsvorgängen lediglich die Änderung der Enthalpie und nicht deren Absolutwert von Bedeutung ist, wird die Enthalpie der trockenen Luft bzw. des flüssigen Wassers oder Eises bei der Temperatur $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ gleich null gesetzt. Weiter wird die Enthalpie der feuchten Luft H auf die Masse der trockenen Luft bezogen, da diese während der Zustandsänderung konstant ist ($h = H/m_L$)“ [MÜHLBAUER, 2009]. Die spezifische Enthalpie h setzt sich aus der Summe der Enthalpien von trockener Luft und Wasserdampf zusammen:

$$h = c_{pL} \cdot \vartheta + x(r_D + c_{pD} \cdot \vartheta) \quad (7.2)$$

Die Verdampfungswärme r_D ist aufgrund des isobar verlaufenden Trocknungs-

7.1. Vorstellung der mathematischen Gleichungen zur iterativen Bestimmung der absoluten Feucht

prozesses mit der Verdampfungsenthalpie h_D gleichzusetzen. Sie wird nach der Gleichung

$$r_D = r_0 - (c_W - c_{pD})\vartheta \quad (7.3)$$

berechnet, wobei r_0 die Verdampfungswärme bei 0°C und somit einen konstanten Wert von $2.500,5 \text{ kJ kg}^{-1}$ darstellt. Vereinfacht ausgedrückt, ist diese Energie aufzubringen, um einen Liter Wasser von 0°C auf 100°C unter konstantem Druck zu erhitzen.

Die spezifischen Wärmekapazitäten von Luft c_{pL} , Wasserdampf c_{pD} und Wasser c_W werden bei konstantem Druck in Abhängigkeit von der Celsius-temperatur wie folgt berechnet:

$$c_{pL} = 1,006(1 + 5,0 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta^2) \quad (7.4)$$

$$c_{pD} = 1,88(1 + 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta) \quad (7.5)$$

$$c_W = 4,178 + 9 \cdot 10^{-6} \cdot (\vartheta - 35) \quad (7.6)$$

Der Wassergehalt x wird grundsätzlich mit Hilfe der Gleichung

$$x = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_{DS}(\vartheta)}{p - \varphi \cdot p_{DS}(\vartheta)} \quad (7.7)$$

berechnet, wobei p der Gesamtdruck von $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ und φ die relative Feuchte der Luft ist. p_{DS} stellt den Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur dar, also den Zustand, „bei dem der Wasserdampf in die flüssige oder feste Phase übergeht [...]“ [MÜHLBAUER, 2009]. Ermittelt wird er nach der Magnus-Formel:

$$p_{DS} = 611,2 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot \vartheta}{243,12 + \vartheta}} \quad (7.8)$$

7. Berechnung des Trocknungspotentials

Zur Berechnung des Feuchtegrades der Trocknungsluft x_{L1} durch

$$x_{L1} = x_S \cdot \frac{\varphi_{L1}}{100} \quad (7.9)$$

ist der Sättigungswassergehalt x_S zu bestimmen. In Gleichung 7.7 hat die relative Feuchte φ somit einen Wert von 100%, wodurch sich die Gleichung wie folgt verkürzt:

$$x_S = 0,622 \frac{p_{DS}(\vartheta)}{p - p_{DS}(\vartheta)} \quad (7.10)$$

Die Berechnung des Feuchtegrades der Abluft kann jedoch nicht so einfach berechnet werden wie der Feuchtegrad der Trocknungsluft, da die Temperatur der Abluft unbekannt ist. Aus diesem Grund ist eine iterative Berechnung der Ablufttemperatur notwendig. Durch den isenthalp verlaufenden Prozess der Wasserdampfaufnahme ($h_1 = h_2$) kann der Feuchtegrad x_{L2} aus der Isenthalpengleichung

$$h_2 = h_1 = c_{pL} \cdot \vartheta_2 + x_{L2}(r_D + c_{pD} \cdot \vartheta_2) \quad (7.11)$$

bestimmt werden:

$$x_{L2} = \frac{h_1/2 - c_{pL} \cdot \vartheta_2}{r_D + c_{pD} \cdot \vartheta_2} \quad (7.12)$$

Außerdem ergibt sich durch Auflösen der Gleichung für die Sättigungslinie nach x_{S2} :

$$x_{L2} = x_{S2} = 0,622 \frac{p_{DS}(\vartheta_2)}{p - p_{DS}(\vartheta_2)} \quad (7.13)$$

7.2. Rohdatenaufnahme und -aufbereitung

Durch Gleichsetzen der Terme 7.12 und 7.13 sowie durch Einsetzen der Beziehung für den Sättigungsdampfdruck (7.8) kann die Ablufttemperatur ϑ_2 und der Feuchtegrad x_2 iterativ bestimmt werden:

$$\frac{h_1 - c_{pL} \cdot \vartheta_2}{r_D - c_{pD} \cdot \vartheta_2} = 0,622 \cdot \frac{611,2 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot \vartheta_2}{243,12 + \vartheta_2}}}{p - 611,2 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot \vartheta_2}{243,12 + \vartheta_2}}} \quad (7.14)$$

7.2. Rohdatenaufnahme und -aufbereitung

Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, verfügt der Campus Klein-Altendorf über eine umfassende Wetterstation. Die dort registrierten Daten werden in einem Intervall von zehn Minuten via Datenlogger auf einem PC gespeichert. Für die Berechnung des Trocknungspotentials wurden die Temperatur- und Feuchtwerte der Jahre 2008 bis 2011 verwendet, wodurch sich theoretisch ein maximales Volumen von 210.384 Werten je Datensatz ergibt. Die im CSV-Format vorliegenden Rohdaten wurden mit Hilfe der statistischen Programmiersprache „R“ verarbeitet. Zunächst fand eine Untersuchung auf fehlende Werte statt, die durch kurzzeitige Ausfälle der Messtation verursacht wurden. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

Die Fehlwerte wurden mit Hilfe von „R“ durch die englische Abkürzung „NA“ („Not Available“) ersetzt, da dieser Ausdruck von der Programmiersprache entsprechend verstanden wird, sich aufsummieren und somit weiter auswerten lässt.

Aus Abbildung 7.1 wird ersichtlich, dass im Jahr 2008 nahezu monatlich Ausfälle der Messtechnik registriert wurden. Dies ist laut KUNZ [2016] auf eine Großbaustelle am Campus Klein-Altendorf zurückzuführen. Allerdings wurden die meisten Ausfälle mit einer Anzahl von 1.758 Datensätzen im September 2009 registriert. Der Grund hierfür liegt in einer Standortveränderung der Wetterstation, wodurch sie außer Betrieb gesetzt wurde. Die Vollständigkeit liegt in diesem

7. Berechnung des Trocknungspotentials

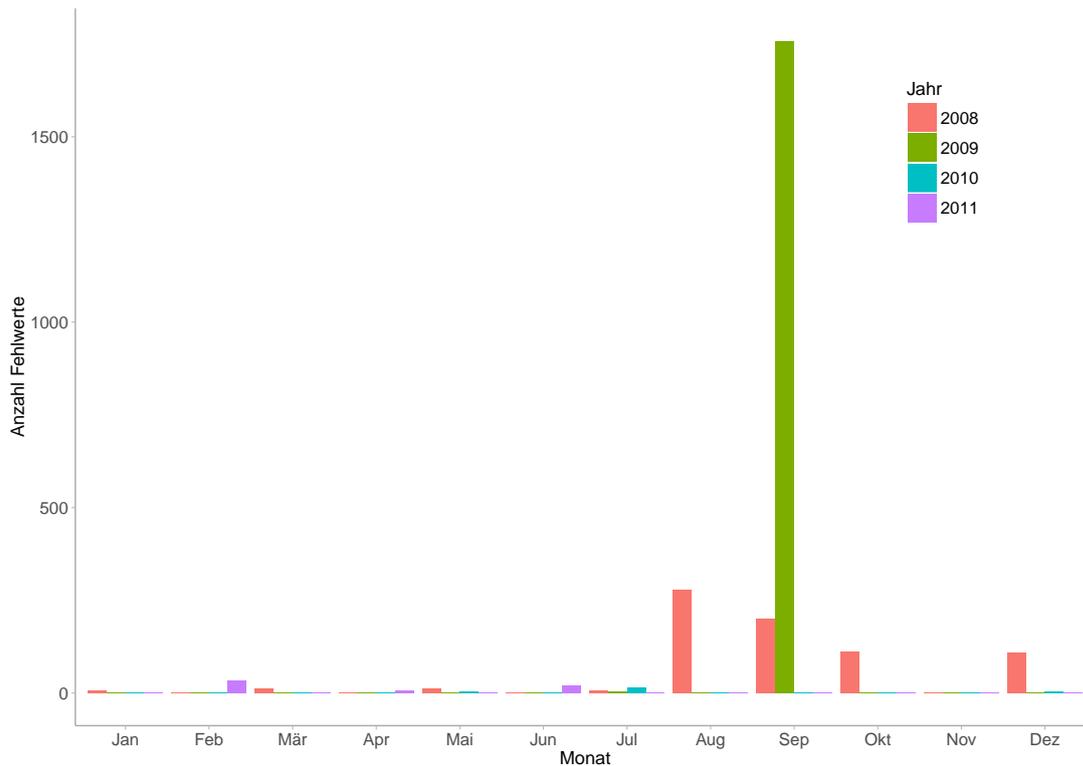


Abbildung 7.1.: Aufsummierte 10-Minuten-Fehlwerte pro Monat der Wetterstation am Campus Klein-Altendorf; 2008 bis 2011

Monat (max. Anzahl Datensätze im September: 4.320) bei 59,19%.

Tabelle 7.1 zeigt die Anzahl der fehlenden Werte sowie die Vollständigkeit der Daten der einzelnen Jahre als Prozentangabe.

Zur Reduzierung ihres Volumens wurden die Daten zu Stundenmittelwerten verdichtet, wodurch sich die Anzahl der Werte für Temperatur und relative Feuchte auf 35.064 verringerte. Auf ihre weitere Aufbereitung und Verwendung wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen.

Die Anwendung der vorhergehend erläuterten Rechenschritte erfolgte durch eine in „R“ programmierte Iterationsschleife, welche die Ablufttemperatur schrittweise für jeden Datensatz ermittelte.

7.3. Darstellung der Berechnungsergebnisse

Tabelle 7.1.: Anzahl der Fehlwerte und prozentuale Vollständigkeit der Wetterdaten der Jahre 2008 bis 2011

Jahr	2008	2009	2010	2011
Anzahl max. Datensätze	52.704	52.560	52.560	52.560
Anzahl Fehlwerte	737	1.763	24	55
Vollständigkeit [%]	98,60	96,65	99,95	99,90

7.3. Darstellung der Berechnungsergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die klimatischen Bedingungen anhand der registrierten Werte für Temperatur und relative Luftfeuchte dargestellt. Im Anschluss wird das Trocknungspotential bzw. die Feuchtegraddifferenz (FGD) Δx_{21} unconditionierter Frischluft sowie 2,5 K und 5,0 K vorgewärmter Trocknungsluft beschrieben.

7.3.1. Temperatur- und Feuchteentwicklung

Abbildung 7.2 zeigt die am Campus Klein-Altendorf Nord aufgezeichneten Temperaturdaten der Umgebungsluft auf der Ordinatenachse als Mittelwerte der entsprechenden Monate der Jahre 2008 bis 2011. Das Kurvenprofil ist typisch für Mitteleuropa, wobei die Jahresdurchschnittstemperatur am Campus Klein-Altendorf bei 9,93°C liegt. Ab Monat Januar, in dem der Tiefstwert von 1,40°C erreicht wird, steigt die Temperatur bis zum Höchstwert von 18,14°C im Juli stetig an. Danach fällt die Temperatur bis auf 1,79°C ab.

Die relative Feuchte hat im Fall der Frischluft im gesamten Jahresdurchschnitt einen Wert von 77,88%. Sie sinkt ab Januar (83,80%) kontinuierlich auf den Tiefstwert von 70,30% im Mai und steigt anschließend nahezu stetig auf den Höchstwert im Dezember (85,94%). Die Differenz zwischen Maximum und Minimum beträgt

7. Berechnung des Trocknungspotentials

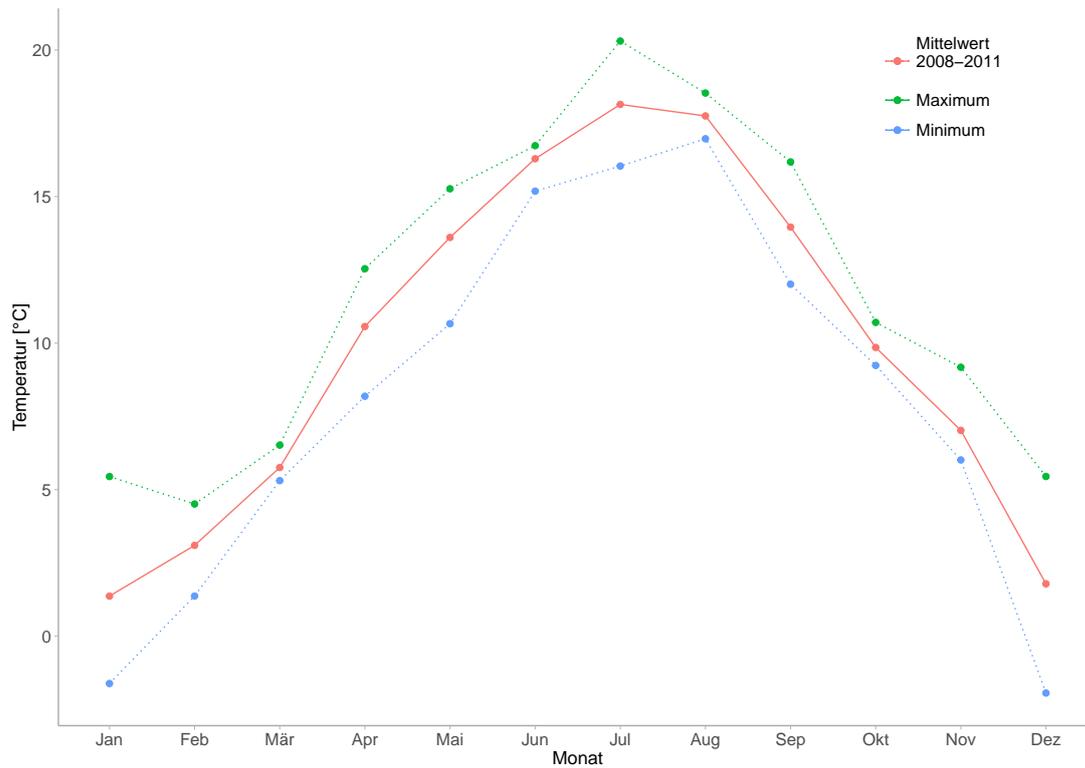


Abbildung 7.2.: Temperaturverlauf der Jahre 2008 bis 2011 als Monatsmittelwerte sowie Minimum und Maximum für unconditionierte Umgebungsluft; Campus Klein-Altendorf

15,64%.

In Kapitel 2 wurde anhand des h-x-Diagramms nach Mollier bereits verdeutlicht, dass eine Erhöhung des Temperaturniveaus der Trocknungsluft zu einem Absinken der relativen Feuchte führt. Zur Veranschaulichung der Auswirkungen einer Temperaturkonditionierung der Umgebungsluft sind in Abbildung 7.4 die Kurven der relativen Feuchte dargestellt. Im Falle einer Erhöhung der Lufttemperatur um +2,5 K sinkt die relative Feuchte auf jahresdurchschnittlich 65,75% (Maximum: 71,90%; Minimum: 59,61%) und durch eine Aufheizung um +5,0 K auf 55,68% (Maximum: 60,38%; Minimum: 50,51%) ab.

Die in Abbildung 7.4 dargestellten Kurven verlaufen nicht parallel, sondern wer-

7.3. Darstellung der Berechnungsergebnisse

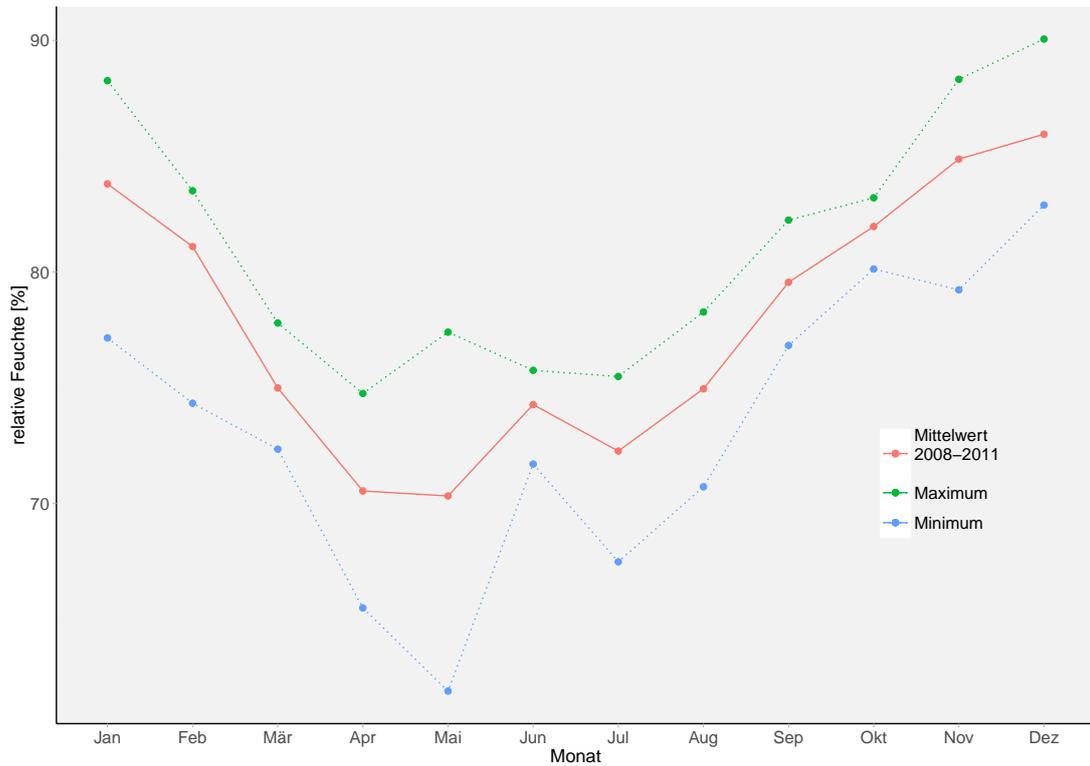


Abbildung 7.3.: Verlauf der relativen Feuchte der Jahre 2008 bis 2011 als Monatsmittelwerte sowie Minimum und Maximum für unconditionierte Umgebungsluft; Campus Klein-Altendorf

den mit steigendem Temperaturniveau flacher. So beträgt die Differenz zwischen Maximum und Minimum bei einer Temperaturerhöhung um $+2,5$ K 12,29% und bei $+5,0$ K 9,87%.

Eine Temperaturerhöhung von $+2,5$ K zieht dementsprechend eine Absenkung der relativen Feuchte um und somit eine Steigerung des Trocknungspotentials von 15,58% nach sich. Eine Erwärmung der Trocknungsluft um $+5,0$ K steigert ihr Potential der Wasserdampfaufnahme um jahresdurchschnittlich 28,51%.

7. Berechnung des Trocknungspotentials

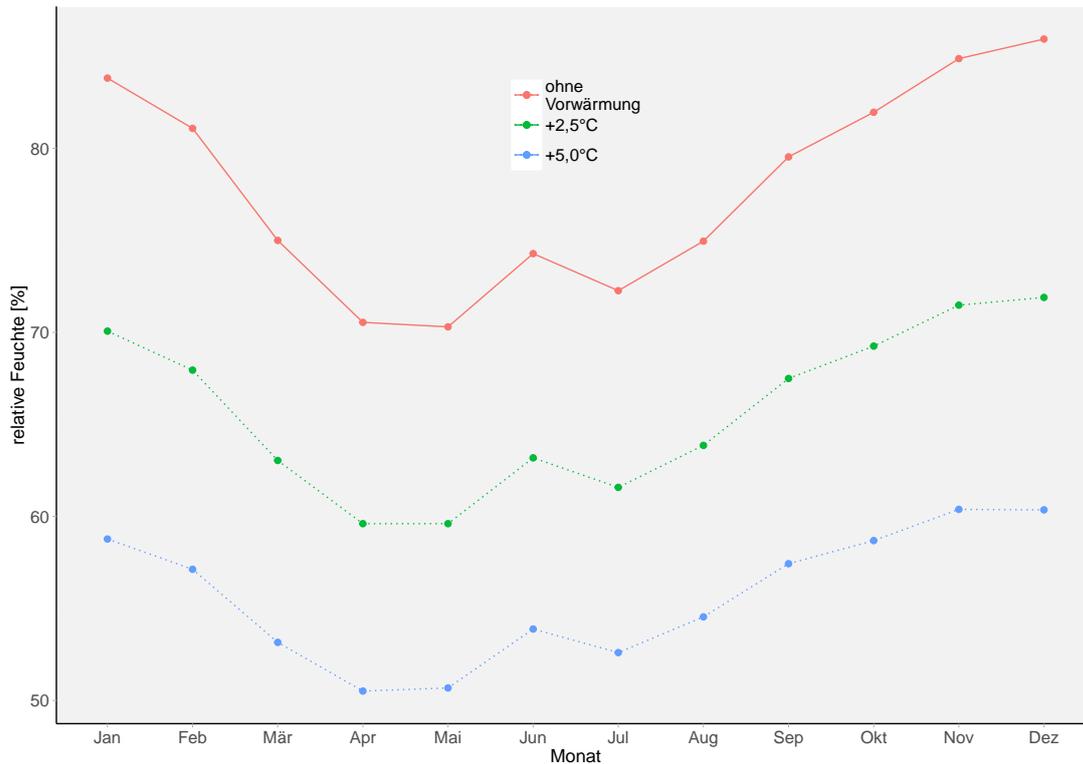


Abbildung 7.4.: Verlauf der relativen Feuchte der Jahre 2008 bis 2011 als Monatsmittelwerte für unconditionierte sowie +2,5°C und +5,0°C vorgewärmte Umgebungsluft; Campus Klein-Altendorf

7.3.2. Feuchtegraddifferenz

Die FGD Δx gibt an, wie viel Wasser durch die Trocknungsluft aufgenommen werden kann. Sie ist die Differenz zwischen dem Feuchtegrad der Abluft x_{L2} und der Zuluft x_{L1} . Durch die Aufnahme der Holzfeuchte sinkt die Lufttemperatur, wie in Abbildung 2.8 dargestellt.

In den nachfolgend dargestellten Ergebnisse fanden diejenigen Datensätze keine Berücksichtigung, bei denen die Luftaustrittstemperatur $\vartheta_{L2} < 0^\circ\text{C}$ beträgt, da eine Vereisung des Aufgabegutes den Trocknungsprozess unterbrechen würde, was aus trocknungstechnischer Sicht zu vermeiden ist. Abbildung 7.5 zeigt die aufsummierten Stunden eines jeden Jahres, an denen dieser Zustand eintrat. Oh-

7.3. Darstellung der Berechnungsergebnisse

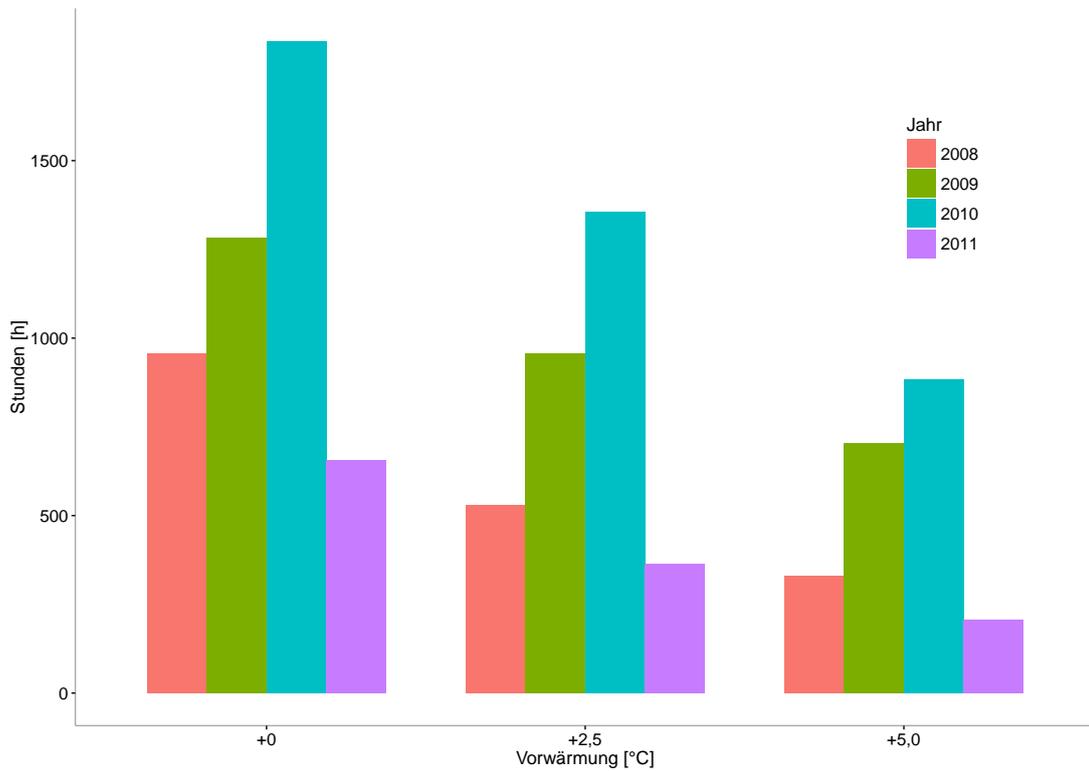


Abbildung 7.5.: Aufsummierte Jahresstunden mit $\vartheta_2 < 0^\circ\text{C}$ der Jahre 2008 bis 2011; maximale Jahresstunden: 8.784 (2008) und 8.760 (2009 - 2011); Campus Klein-Altendorf

ne Vorwärmung trifft dies auf durchschnittlich 1.184 Stunden zu. Im Fall einer Anhebung der Eintrittstemperatur um $+5,0$ K sinkt die Anzahl der Stunden auf 531.

Abbildung 7.6 zeigt die FGD als Mittelwerte eines jeden Monats der einzelnen Jahre und den monatlichen Gesamtmittelwert auf der Ordinatenachse. Es wird deutlich, dass sich die FGD zum Sommer hin steigert und zum Winter hin wieder abfällt. Im Fall einer Trocknung mittels unconditionierter Luft beträgt die durchschnittliche FGD in den Wintermonaten Januar, Februar, November und Dezember $0,2396 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$. Für die Sommermonate Mai bis August ergibt sich ein Durchschnitt von $0,8809 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$, während in den Übergangsmo-

7. Berechnung des Trocknungspotentials

März, April, September und Oktober lediglich $0,5806 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$ absorbiert werden. Im Gesamtdurchschnitt aller Jahre findet eine Wasserdampfaufnahme durch die Umgebungsluft von $0,5670 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$ statt.

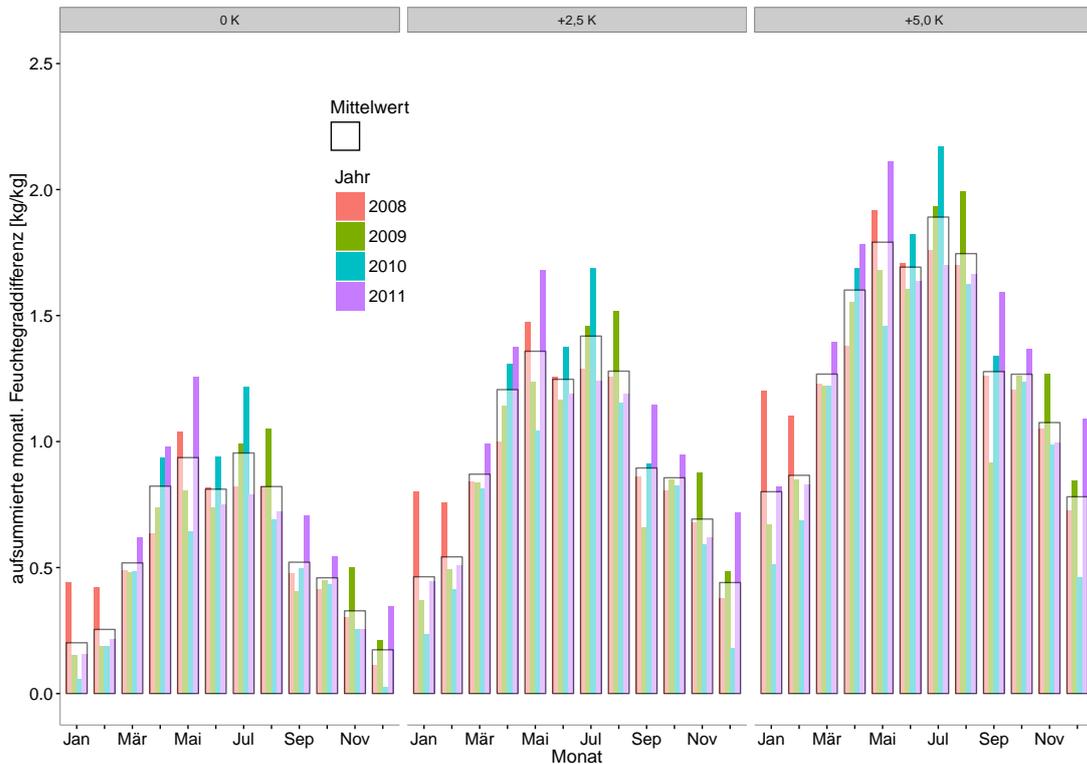


Abbildung 7.6.: Aufsummierte Feuchtegraddifferenz unconditionierter Umgebungsluft als Monatsmittelwerte der Jahre 2008 bis 2011; ohne $\vartheta_1 < 0^\circ\text{C}$; Campus Klein-Altendorf

Durch eine konstante Vorwärmung der Umgebungsluft um $+2,5 \text{ K}$ ergibt sich eine signifikante Steigerung der FGD um jahresdurchschnittlich $65,64\%$. In den Sommermonaten liegt der Durchschnitt bei $1,3254 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$, im Winter bei $0,5348 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$ und in den restlichen Monaten bei $0,9571 \text{ kg}_W \text{ kg}_L^{-1}$.

Eine Konditionierung der Trocknungsluft um $+5,0 \text{ K}$ steigert ihr Wasserdampfaufnahmepotential um $135,98\%$ gegenüber der Trocknung mit nicht vorgewärmter Luft. Hierbei beträgt die durchschnittliche FGD in den Monaten Mai bis August

7.3. Darstellung der Berechnungsergebnisse

1,7801 kg_W kg_L⁻¹, in der Übergangszeit 1,3535 kg_W kg_L⁻¹ und in den Wintermonaten 0,8809 kg_W kg_L⁻¹.

Zusammenfassend sind in Tabelle 7.2 die Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerte der ausgewerteten Jahre dargestellt. Es wird deutlich, dass eine Temperaturerhöhung das Trocknungspotential signifikant steigert.

Tabelle 7.2.: Zusammenfassung der Höchst- und Durchschnittswerte der FGD aller Zulufttemperaturen der ausgewerteten Jahre 2008 bis 2011 (Angaben in kg_W kg_L⁻¹); Campus Klein-Altendorf

	ohne Vorwärmung	$\vartheta_1+2,5^\circ\text{C}$	$\vartheta_1+5,0^\circ\text{C}$
Δx_{max}	1,26	1,69	2,17
Δx_{min}	0,02	0,18	0,46
Δx_{mittel}	0,57	0,94	1,34

7.3.3. Nutzungsgrad des Trocknungspotentials

Der Wirkungsgrad η_{TP} stellt ein Maß für die Ausnutzung des Trocknungspotentials der Trocknungsluft dar. Er kann durch folgende Gleichung berechnet werden:

$$\eta = \frac{\Delta m_W}{m_L \cdot \Delta x_L} \quad (7.15)$$

Die tatsächlich aufgenommene Masse Wasser Δm_W ergibt sich aus der Dimensionierung und Dichte der Hackschnitzelschüttung und der prozentualen Veränderung des Wassergehaltes.

$$\Delta m_W = A_S \cdot h_S \cdot \rho_S \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2} \quad (7.16)$$

Die aufgewendete Masse an Trocknungsluft m_L ergibt sich aus:

$$m_L = \dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot t \quad (7.17)$$

7. Berechnung des Trocknungspotentials

Die theoretisch von der Trocknungsluft mittlere aufnehmbare Feuchtemasse kann aus der Differenz des Feuchtegrades der Trocknungsluft x_1 und dem bei isenthalper Befeuchtung bis zur Sättigung ($\varphi_2 = 100\%$) sich ergebenden Feuchtegrad x_2 berechnet werden:

$$\overline{\Delta x_{21}} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^t (x_2 - x_1) \cdot \Delta t \quad (7.18)$$

Das Δt stellt hier die einzelnen Zeitschritte dar. Wie bereits erwähnt, wurde stets mit Stundenmittelwerten gerechnet, wodurch sich für Δt ein Wert von 1 ergibt.

Für die Kalkulation des Wirkungsgrades η_{TP} ergibt sich schließlich folgende Gleichung:

$$\eta_{TP} = \frac{A_S \cdot h_S \cdot \rho_S \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}}{\overline{\Delta x_{21}} \cdot \dot{V}_L \cdot \rho_L \cdot t} \quad (7.19)$$

Im ersten Durchgang des in Kapitel 6 geschilderten Versuchs zur Kaltlufttrocknung wurde dem Hackgut zwischen 62,5 kg und 67,0 kg Wasser entzogen (Tabelle 6.1). Durch die Aufsummierung der FGD Δx_{21} über den Testzeitraum ergibt sich im ersten Versuchsdurchgang eine theoretisch aufnehmbare Feuchtemasse von 0,694 kg_W kg_L. Dieser Wert wurde durch die bereits beschriebene Auswertung der Wetterdaten der Jahre 2008 bis 2011 ermittelt. Über den genannten Versuchszeitraum von 29 Tagen ergibt sich somit ein $\overline{\Delta x_{21}}$ von $9,968 \cdot 10^{-4}$ kg_W kg_L. Die gesamte theoretisch absorbierbare Wassermasse beträgt 75,78 kg. Durch einsetzen der in Tabelle 7.19 ermittelten tatsächlich entzogenen Masse Wasser ergeben sich Wirkungsgrade η_{TP} von 85,11% (TGB 1.1), 88,4% (TGB 1.2) und 82,5% (TGB 1.3).

Da der zweite Versuch erst im Januar und Februar 2012 stattfand, wurden für diesen Zeitraum nochmals Wetterdaten nach der vorher beschriebenen Methode ausgewertet. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Temperatur von $+0,40^\circ\text{C}$

7.3. Darstellung der Berechnungsergebnisse

und eine relative Luftfeuchte von 81,49%. Die theoretisch absorbierbare Wassermasse Δx_{21} betrug 0,389 kg_W kg_L und im Mittel ($\overline{\Delta x_{21}}$) $3,958 \cdot 10^{-4}$ kg_W kg_L. Aufgrund der stark schwankenden Werte der tatsächlich entzogenen Masse Wasser zwischen 32,5 kg (TGB 2.2) und 41,5 kg (TGB 2.1) ergeben sich auch unterschiedliche Wirkungsgrade. So liegt η_{TP} bei 66,85% (TGB 2.2), 76,10% (TGB 2.3) und 85,36% (TGB 2.1).

Teil II.

Prototypenentwicklung eines
solaren Holzrockners

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

Die in den Kapiteln 5 bis 6 beschriebenen Vorversuche dienten dem Zweck, die Machbarkeit der Konstruktion eines solaren Satzrockners am Campus Klein-Altendorf besser einschätzen zu können. So konnte durch den Kooperationsversuch mit der Universität Hohenheim gezeigt werden, dass sich der energetische Aufwand für den Transport der Trocknungsluft durch eine Hackschnitzelschüttung eingrenzen lässt, wenn die Luftgeschwindigkeit in der Schüttung $v_L = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ nicht überschreitet. Zudem wurde deutlich, dass eine Trocknung mit unkonditionierter Umgebungsluft sogar in Wintermonaten möglich ist und eine Bildung von Schimmelpilzen verhindert wird. Somit ist es nicht erforderlich, die Schütthöhe auf wenige Zentimeter zu beschränken, wodurch sich die Grundfläche des Trockners stark vergrößern würde. Statt dessen kann sie im Verhältnis zur Mantelfläche kleiner ausfallen.

In den Kapiteln 6 und 7 wurde gezeigt, dass eine Trocknung von Holzhackschnitzeln mit unkonditionierter Umgebungsluft möglich ist und dass sich das Absorptionspotential der Trocknungsluft stark erhöhen lässt, wenn sie um wenige Kelvin vorgewärmt wird. Diese Erkenntnis führte zu der Annahme, dass die notwendige Luftvorwärmung mit Hilfe eines technisch einfachen solaren Luftkollektors erreicht werden kann.

Als geeigneter TGB wurde für den solaren Trockner am Campus Klein-Altendorf ein herkömmlicher Getreidesilo identifiziert, dessen Umbau und Modifikation zu

8. *Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf*

einem Trockengutbehälter mit integriertem Solarkollektor in den folgenden Unterkapiteln beschrieben wird. Zudem werden die Anschaffungskosten und die erforderliche Ventilatorleistung dargelegt. Auf eine ausführliche Wirtschaftlichkeitsberechnung wird jedoch verzichtet, da es sich hier um ein Forschungsprojekt handelt und eine realistische Betrachtung nicht möglich ist. Anschließend erfolgt die Beschreibung und Auswertung des durchgeführten Tests und die dabei erhobenen Messdaten.

8.1. **Konstruktionsbeschreibung**

Der Aufbau des solaren Trockners erfolgte in Anlehnung an die in den Vorversuchen zur Kaltlufttrocknung verwendeten Holzkisten (Kapitel 6). Das im Solartrockner befindliche Aufgabegut sollte in vertikaler Richtung von der Trocknungsluft durchströmt werden, wobei diese von einem saugseitig angeschlossenen Ventilator gefördert wird. Die Entscheidung, einen Getreidesilo als TGB für den Solartrockner zu nutzen, wurde wegen seiner stabilen zylindrischen Form, der Vielzahl verfügbarer Volumina, der einfachen Montage und des relativ niedrigen Anschaffungspreises getroffen. Ein weiterer Vorteil liegt in dem Material der Silowand, die aus verzinktem Blech besteht und dementsprechend gute Wärmeleiteigenschaften besitzt. So konnte die Außenseite der Silowand durch einfache Änderungsarbeiten in einen Solarkollektor umgebaut werden, wie im weiteren Verlauf des Kapitels beschrieben.

Sämtliche elektrische Anschlussarbeiten wurden von Technikern der Universität Bonn durchgeführt und werden im Folgenden nicht weiter beschrieben.

8.1.1. Unterkonstruktion und Entnahmeeinrichtung

Zur Ermöglichung einer Luftzufuhr durch den Siloboden musste unter selbigem ein Freiraum geschaffen werden. Zu diesem Zweck wurde der Silo auf einer Unterkonstruktion befestigt, die ihn um 905 mm erhöht. Sie ist in den Abbildungen 8.1 und 8.2 als Skizze und Foto dargestellt.

Die Unterkonstruktion ist mit Schwerlastankern auf einem stahlbewehrten Betonfundament verschraubt und besteht aus verzinkten U-Stahlprofilen der Stärke 10 mm. Neben der Erhöhung des TGB für eine ungestörte Lufteinströmung dient die Stahlkonstruktion der Aufnahme der Entladeeinrichtung, die aus einem Rührwerk mit Stahlkegel und einer Förderschnecke besteht.

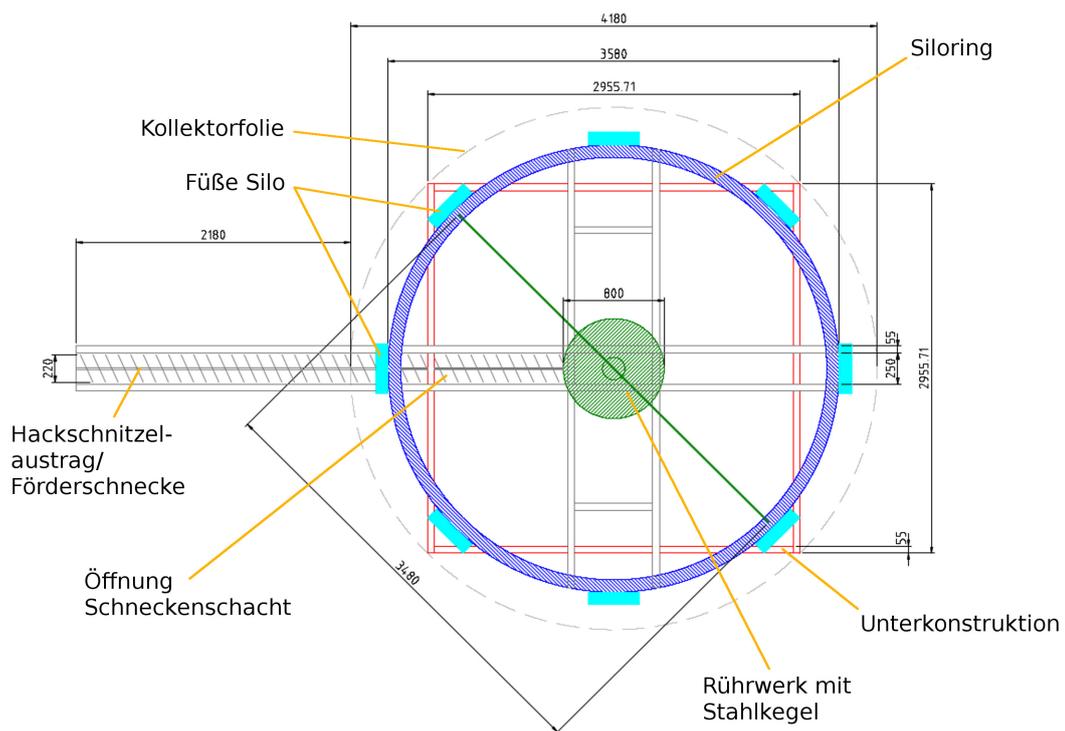


Abbildung 8.1.: Unterkonstruktion des solaren Trockners mit Rührwerk und Vorrichtung zum Austrag als Skizze in der Draufsicht; Bemaßung in mm

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

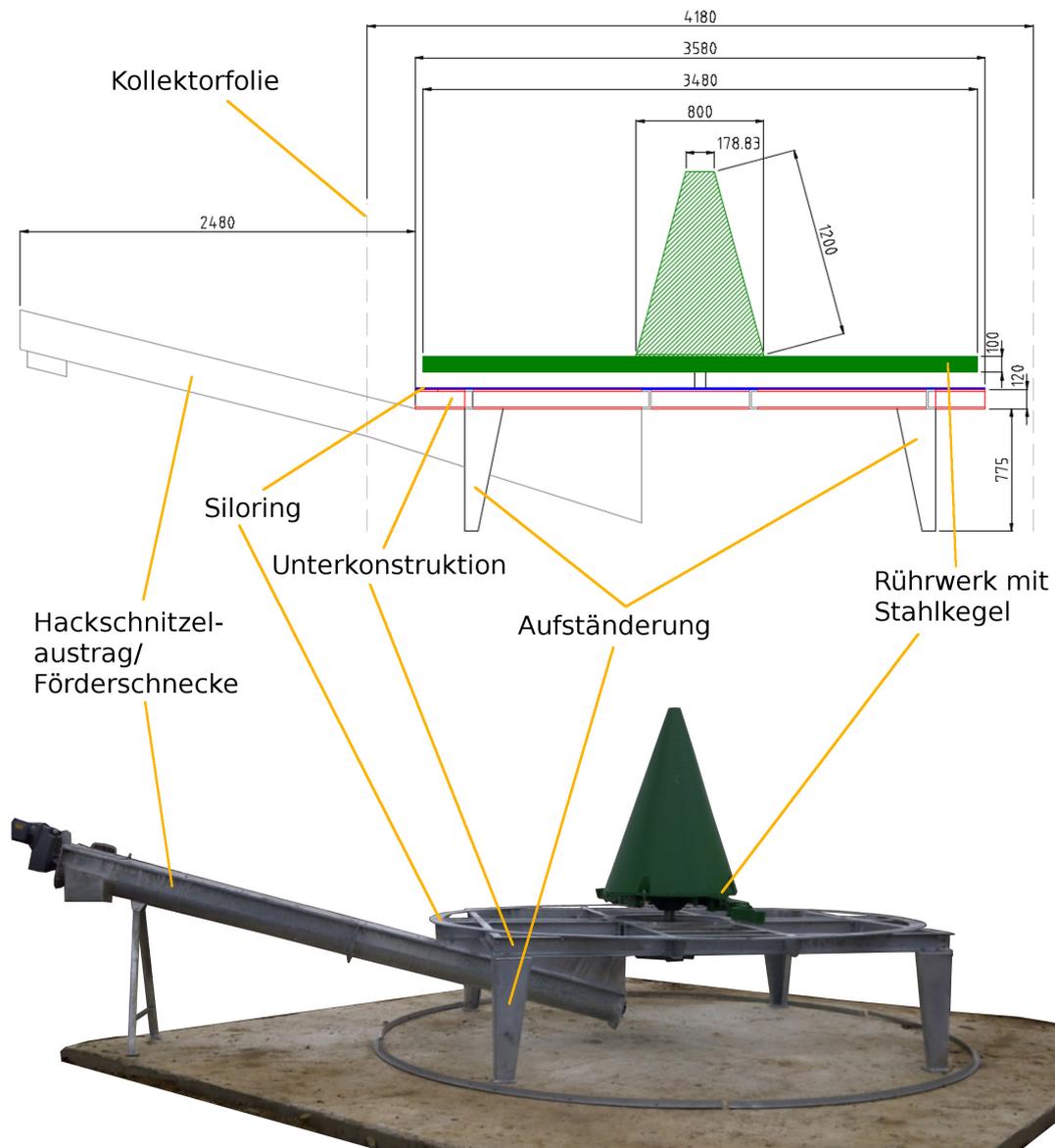


Abbildung 8.2.: Unterkonstruktion des solaren Trockners mit Rührwerk und Vorrichtung zum Austrag als Skizze (oben) und als Foto (unten) in der Seitenansicht; Bemaßung in mm; Standort: Campus Klein-Altendorf; April 2012

Das Rührwerk besteht aus zwei Armen, die unter einem Stahlteller befestigt sind. Dieser wird über eine Welle und ein Getriebe von einem Elektromotor mit der Leistung $P = 50 \text{ W}$ in Rotation versetzt werden. Durch die Bewegung wird das

8.1. Konstruktionsbeschreibung

Aufgabegut in den Schacht der Förderschnecke transportiert, über deren Kanal die Austragung der Hackschnitzel erfolgt. Die Arme des Rührwerks verfügen über jeweils zwei Gelenke, die sich bei erhöhtem Widerstand einklappen, um in einem geringeren Umkreis zu fördern und so den Motor vor Überhitzung zu schützen. Das Prinzip ist in Abbildung 8.3 anhand eines Modells in drei Stufen dargestellt.

Der in Abbildung 8.2 gezeigte Kegel diente zum Schutz des Getriebes, indem er die auf dem Stahlteller lastende Holzmasse auf eine größere, steil aufgestellte Fläche verteilt.

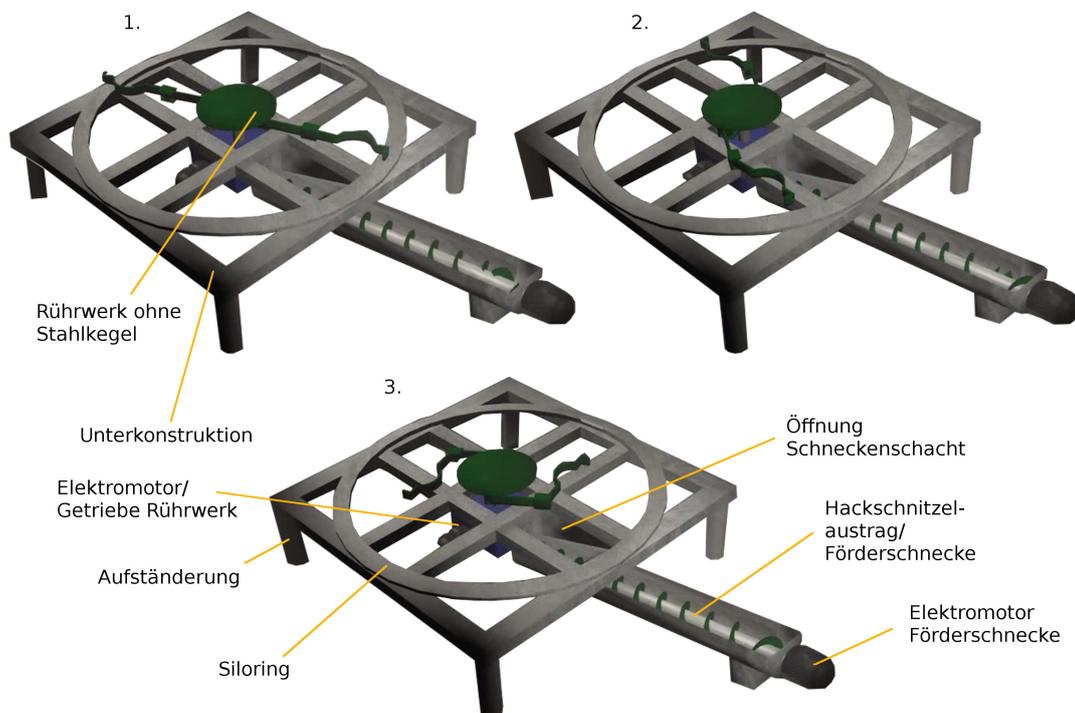


Abbildung 8.3.: Darstellung der Klappbewegung der Rührwerksarme bei erhöhtem Widerstand während der Gutförderung; Bewegungsablauf dargestellt in drei Stufen; nicht maßstabsgetreu

8.1.2. Trockengutbehälter

Bei dem TGB handelt es sich um einen Getreidesilo des Modells *NL4* der Firma *NEUERO Farm- und Fördertechnik GmbH*. Er hat einen Durchmesser von 3.580 mm und besteht aus sechs Ringen mit einer Höhe von jeweils 855 mm. Die Gesamthöhe des TGB beträgt somit 5.130 mm, wodurch sich ein Fassungsvermögen von 51,61 m³ ergibt.

Durch die Druckverlustversuche an der Universität Hohenheim konnte gezeigt werden, dass die Förderung von Luft über eine Höhe von drei Metern mit relativ wenig Energieaufwand möglich ist. Diese Tatsache führte zu der Annahme, dass auch die Konstruktion eines Satztrockners mit einer Schütthöhe von fünf Metern möglich sei, weshalb die Silohöhe auf das genannte Maß festgelegt wurde. Aus Gründen der Stabilität und um der auf den Silo wirkenden Windlast Widerstand entgegen zu setzen, wurde das Verhältnis zwischen Höhe und Durchmesser mit 1:0,7 festgelegt.

Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, führt eine Lagerung von Holzhackschnitzeln ohne oder mit unzureichender Belüftung zur Ausbildung nasser Zonen und im weiteren Verlauf zu Schimmel. Da dieses Risiko mit zunehmender Grundfläche des TGB ansteigt und in jedem Fall vermieden werden soll, beschränkt sich der Silodurchmesser auf das genannte Maß. Nach Abschluss der beiden Tests wurde jeweils eine Sichtung des Materials durchgeführt, deren Ergebnisse in Abschnitt 8.6 dargestellt sind.

Der Aufbau des *NL4* erfolgte zumeist nach der mitgelieferten Montageanleitung. Im Folgenden werden lediglich diejenigen Arbeitsschritte beschrieben, bei denen eine Abweichung von der Anleitung und Improvisation unumgänglich waren.

Zur Aufnahme des TGB auf der Unterkonstruktion diente der Siloring (Abbildungen 8.1 bis 8.3), welcher mit 3.580 mm den gleichen Außendurchmesser aufweist wie der Silo. Der Innendurchmesser bemisst sich auf 200 mm weniger

8.1. Konstruktionsbeschreibung

und die Materialstärke liegt bei 10 mm. Die Montageanleitung geht im Normalfall von der Platzierung des Silos auf einem Betonfundament aus, auf dem er mit seinen acht Füßen an jeweils zwei Punkten durch Schwerlastanker fixiert wird. Im Fall des Solartrockners war dies lediglich bei drei Füßen möglich, wofür jedoch zunächst die äußeren Stützen des Silos verlängert werden mussten. An den restlichen fünf Fixpunkten wurde der Silo mit der Unterkonstruktion verschraubt (Abbildung 8.4). Die Anordnung der Füße ist in Abbildung 8.1 zu sehen.

Zum Standard Lieferumfang des *NL4* gehört das Silodach, welches die Gesamtkonstruktion um 977 mm erhöht und eine Neigung von 30° aufweist. Zudem verfügt es über eine Inspektionsluke und einen offenen Dachkronenring mit einem Durchmesser von 550 mm. Letzterer wird gewöhnlich um einen Einlaufstutzen erweitert und so zum Befüllen des Silos benutzt. Im Zuge der Zweckentfremdung des Lagersilos wurde der Dachkronenring jedoch in eine Abluftöffnung umkonstruiert, indem er durch einen Übergang auf ein Kanalgrundrohr erweitert wurde. Das Abluftsystem ist in Abschnitt 8.1.4 beschrieben.

Zur Abdichtung des TGB an den Übergangsstellen zum Siloring und -dach wurde der Kleb- und Dichtstoff *Sikaflex-11FC+* der Firma *Sika Deutschland GmbH* verwendet.

Zur Sicherstellung einer stabilen Lagerung und optimalen Luftzufuhr ist im TGB ein Belüftungsboden verbaut, der ebenfalls vom Silohersteller bezogen wurde. Er besteht aus einzelnen Teilblechen, die so zugeschnitten und verlegt wurden, dass der Schneckenschacht offen blieb und die Antriebswelle des Rührwerks ungehindert arbeiten konnte. Der Boden wurde direkt auf der Unterkonstruktion verschraubt.

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

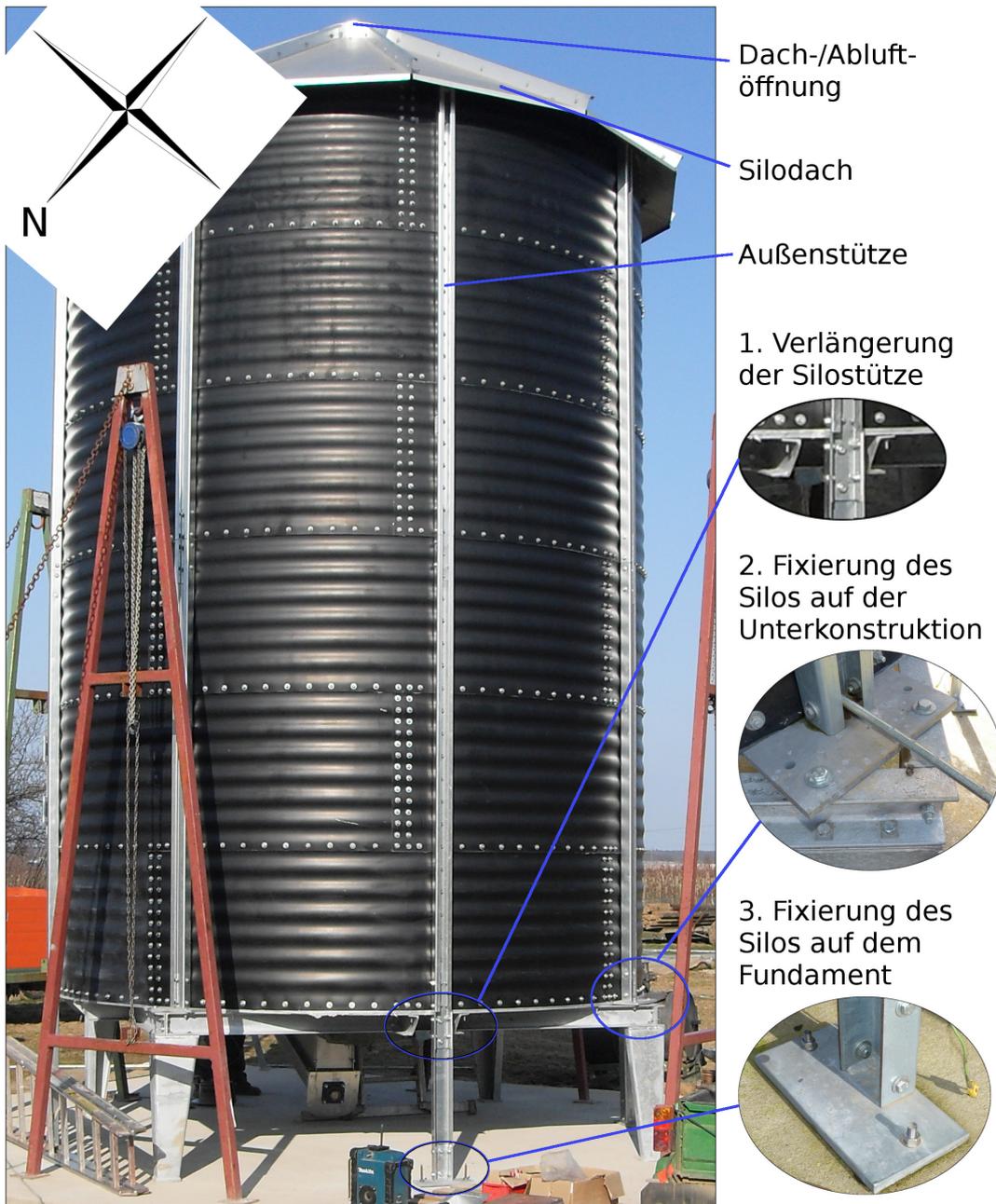


Abbildung 8.4.: Lagersilo bzw. TGB während der Montagearbeiten, sowie Detaildarstellung der Verlängerung der Außenstützen und der Fixpunkte; Standort: Campus Klein-Altendorf; März 2012

8.1.3. Solarkollektor

Aufgrund der guten Wärmeleiteigenschaft des metallischen TGB fiel die Entscheidung, dessen äußere Oberfläche als Wärmequelle für die Trocknungsluft zu verwenden und in einen Solarkollektor umzubauen. Zu diesem Zweck wurden die einzelnen Wandteile vor dem Aufbau des Trockners gereinigt, angeschliffen und mit einem speziellen Lack (*Transfer-ELECTRIC Solar- und Leitlack GmbH; Solarlack; Lemförde*), der speziell für die Anwendung in Solarkollektoren entwickelt wurde, mattschwarz lackiert.

Als Kollektorabdeckung wurde eine transparente Gewächshausfolie (*folitec Agrarfolien Vertriebs GmbH; Lumitherm; Westenburg*) verwendet (Eigenschaften siehe Anhang C). Sie wurde so angebracht, dass sie die schwarz lackierte Oberfläche des TGB mit einem Abstand von 300 mm bedeckt. Dieses Maß wurde aufgrund von zwei Bedingungen festgelegt: Zum einen sollte die Geschwindigkeit der Trocknungsluft innerhalb der Schüttung $v_S = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ nicht überschreiten, um den Druckverlust so gering wie möglich zu halten. Zum anderen war die Verweilzeit der Frischluft im Kollektor zu maximieren, um einen möglichst hohen Wärmetransfer zu erreichen. Da der Volumenstrom in der Hackschnittelschüttung gleich dem im Solarkollektor ist, kann durch folgende Beziehung die Luftgeschwindigkeit im Kollektor berechnet werden:

$$\dot{V}_S = \dot{V}_K = A_S \cdot v_S = A_K \cdot v_K \quad (8.1)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Luftgeschwindigkeit in der Schüttung $v_S = 0,06 \text{ m s}^{-1}$ beträgt, liegt die Geschwindigkeit im Kollektor bei $v_K = 0,17 \text{ m s}^{-1}$. Dadurch ergibt sich durch die Höhe des TGB von 5,13 m eine Verweilzeit der Frischluft im Kollektor von etwa 30 s.

Zur Befestigung der Folie wurde zunächst ein Skelett aus verzinktem Flachstahl der Stärke 4 mm in genanntem Abstand zum TGB mittels Gewindestangen

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

montiert, wie in Abbildung 8.5 zu sehen. Auf dem Skelett wurden die ebenfalls von *folitec* bezogenen Kunststoffhalterungen zur Fixierung der Folie mit Silikon verklebt. Aufgrund der Höhe der gesamten Trocknerkonstruktion war mit einer erhöhten Windlast auf die Kollektorfolie zu rechnen. Zu deren Schutz wurde zwischen den Folienhalterungen Angelschnur aus Nylon gespannt, da sie sich durch ihre Haltbarkeit, Reißfestigkeit und Flexibilität ideal eignete, die Windlast abzufangen. Abbildung 8.6 zeigt die Anbringung der Halterungen und Spannung der Angelschnur (a) und die Fixierung der Folie (b).

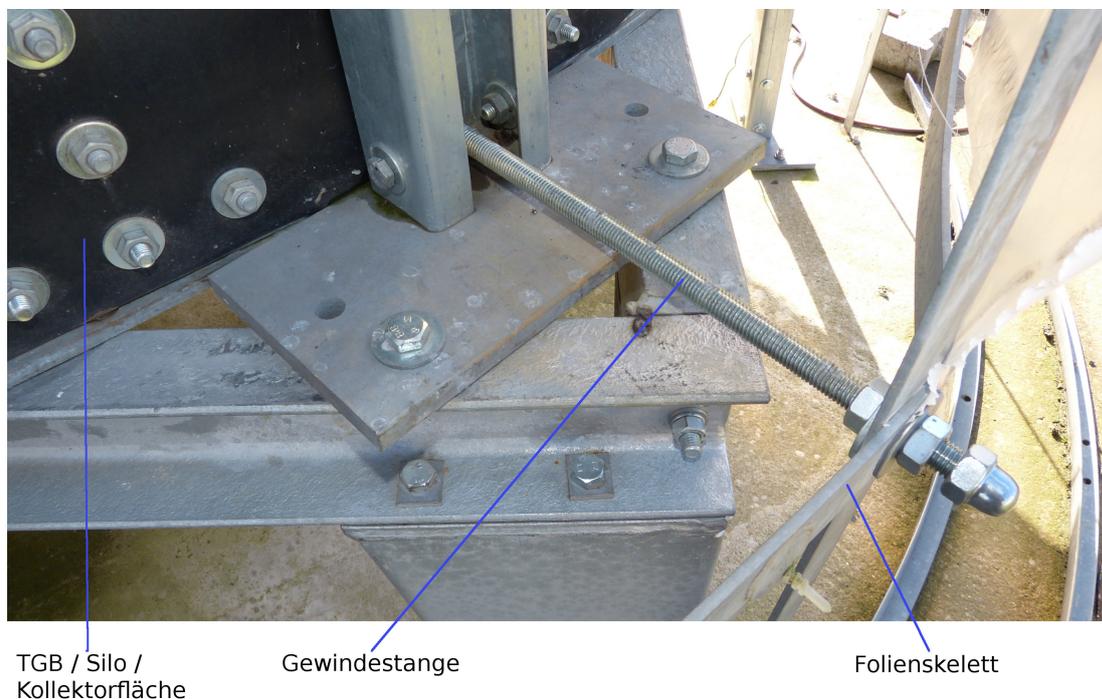


Abbildung 8.5.: Befestigung der Kollektorfolie auf einem Stahlskelett und Gewindestangen zum Festlegen des Folienabstands; Standort: Campus Klein-Altendorf; März 2012

Der Lufteinlass in den Kollektor befindet sich unter dem Dach des TGB. Die Folie liegt hier enger an als 300 mm, um ein Eindringen von Regenwasser zu vermeiden. Auf dem Fundament wurde die Folie mit Hilfe von Winkelstahl (Stärke 4 mm) fixiert, der so zu einem Ring gebogen und angeordnet wurde, dass er

8.1. Konstruktionsbeschreibung

dem Durchmesser des Kollektors von 4.180 mm entspricht. Zur Vermeidung von Nebenluft befindet sich zwischen Stahl, Folie und Beton zur Abdichtung eine flexible, selbstklebende Schaumstoffmatte aus Polypropylen (PP).

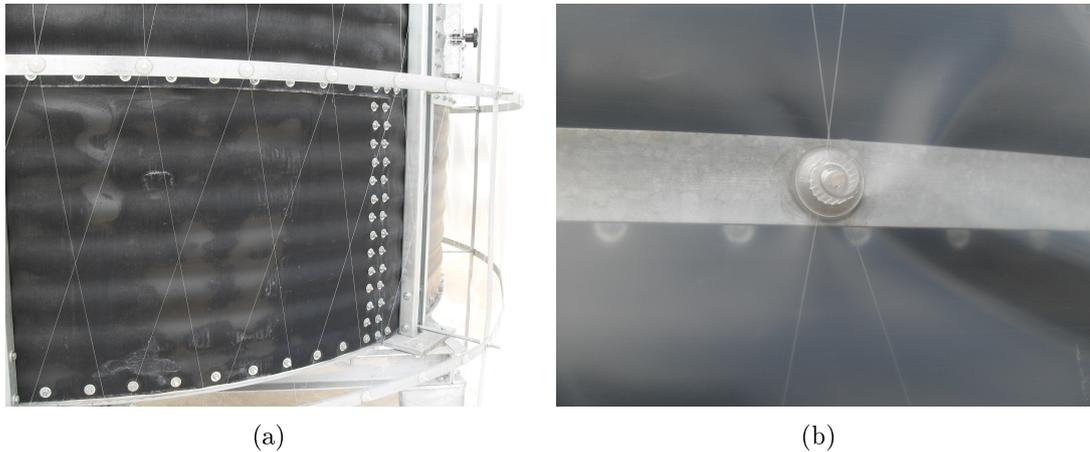


Abbildung 8.6.: Anordnung der Folienhalterungen und Angelschnur auf dem Stahlskelett (a), sowie Fixierung der Folie (b)

8.1.4. Abluftsystem und Luftförderung

Wie auch im Versuch zur Kaltlufttrocknung in Kapitel 6 beschrieben, ist der Ventilator beim solaren Satztrockner saugseitig über ein Abluftrohr mit dem TGB verbunden. Das Abluftrohr besteht aus standardmäßigen Kanalgrundrohren DN300 mit zugehörigen 90°-Krümmern und ist über einen speziell angefertigten Übergang mit dem Dachkronenring (Durchmesser: 544 mm) des Silodaches verbunden. Wie Abbildung 8.7 zeigt, wurde das Abluftrohr mit Hilfe von Rohrschellen an den Gewindestangen des Folienskeletts befestigt.

Zur Luftförderung ist ein Ventilator von *Neuero* angeschlossen, der über eine Leistung von $P = 4$ kW verfügt und mit einer 16 A Stromversorgung betrieben wird.

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

Die Steuerung des Ventilators erfolgte über einen Frequenzumformer, der in einem Stahlschrank untergebracht und neben dem Trockner installiert wurde.

8.1.5. Befüllvorrichtung

Zur Befüllung des TGB mit Holzhackschnitzeln wurde ein Wurfgebläse (*Auer Landmaschinenbau GmbH; Hackschnitzelgebläse mit Schneckenzubringer; Hofstättle, Österreich*) angeschafft. Das Gebläse besteht aus einem Trog mit Förderschnecke und verfügt über einen 11 kW Elektromotor, der mit 32 A träge abzusichern ist und ein Wurfrad antreibt.

Die Hackschnitzel werden zunächst einem Trog zugeführt, in dem eine Förderschnecke für den Weitertransport zum Gebläse bzw. Wurfrad sorgt, welches das Fördergut über ein Rohr in den TGB befördert. Da das Silodach keine Aufnahme für das Rohr vorsah, musste eine Kreisöffnung geschaffen werden.

8.1.6. Materialkosten

In der Anschaffung hat der solare Satz Trockner am Campus Klein-Altendorf EUR 36.400 gekostet. Darin enthalten sind alle zur Konstruktion notwendigen Materialien sowie das Betonfundament, auf dem der Prototyp errichtet wurde.

Den größten Aufwand verursachte die Unterkonstruktion (EUR 4.950) mitsamt der Entnahmeeinrichtung, die im Wesentlichen aus dem Rührwerk (EUR 6.630) und der Austragsschnecke (EUR 4.219) besteht. Der Anschaffungspreis für den Getreidesilo, inklusive Dach, Belüftungsboden und Einstiegs Luke, betrug EUR 5.888. Die Lüftfördereinheit, bestehend aus Ventilator, Frequenzumformer und Steuergerät, verursachte Kosten in Höhe von EUR 4.245. Das Wurfgebläse für die Befüllung des TGB wurde aus zweiter Hand angeschafft und kostete EUR 6.545. Eine detaillierte Kostenaufstellung befindet sich in Anhang C.



Abbildung 8.7.: Darstellung des solaren Satzrockners nach Beendigung der Konstruktionsarbeiten; Standort: Campus Klein-Altendorf; März 2012

8.2. Funktionsbeschreibung

Voraussetzung für einen optimalen Betrieb des solaren Satzrockners ist eine ungestörte Luftführung und -vorwärmung. Diese wird erreicht, indem der im Folgenden beschriebene Weg der Trocknungsluft bestmöglich abgedichtet und somit Nebenluft vermieden wird. Die einzigen Öffnungen, durch die ein Luftaustausch mit der Umgebung stattfinden sollte, sind der Einlass in den Kollektor unterhalb des Silodachs und der Ventilator, durch den die Abluft das System verlässt.

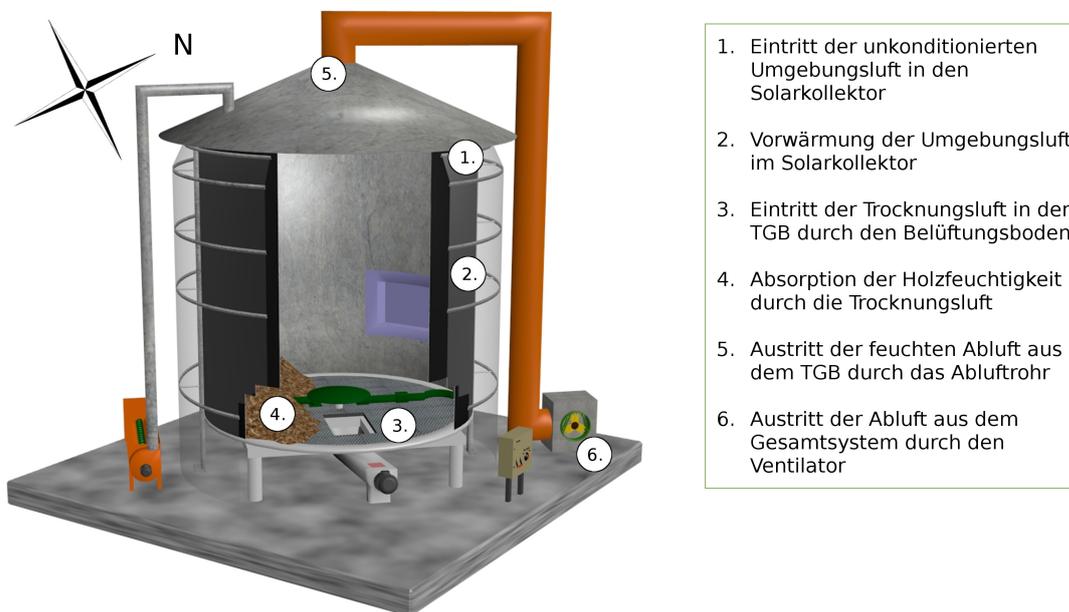


Abbildung 8.8.: Schrittweise Darstellung der Funktion des solaren Satzrockners; Modell nicht maßstabsgetreu

Nach Einschalten des Ventilator wird durch den Sog Frischluft in den Solarkollektor gefördert. Diese tritt, wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, unterhalb des Dachs in den Kollektor ein und strömt abwärts. Durch die solare Aufheizung der TGB-Außenwand kommt es zu einem Transfer von Wärmeenergie, wodurch das Temperaturniveau der Frischluft erhöht wird. Anschließend gelangt die konditionierte Umgebungsluft durch den Belüftungsboden in das Innere des TGB,

8.3. Versuchsvorbereitung und Datenaufnahme

wo sie mit dem eingefüllten Aufgabegut in Kontakt kommt und dessen Feuchtigkeit absorbiert. Durch das mittig auf dem TGB-Dach befestigte Abluftrohr und den daran angeschlossenen Ventilator verlässt die befeuchtete Trocknungsluft das System. Dieser Vorgang ist in Abbildung 8.8 veranschaulicht.

8.3. Versuchsvorbereitung und Datenaufnahme

Die Befüllung des solaren Satzrockners fand am Campus Klein-Altendorf am 16.05.2012 statt. Bei den eingelagerten Holzhackschnitzeln handelte es sich um das Produkt *Pyrohack Premium (Reterra Service GmbH; Pyrohack Premium; Erftstadt)*, welches laut ANONYMUS16 [2016] mit einem Wassergehalt von 40% bis 55% zum Kunden geliefert wird. Diese Angabe wurde durch die Bestimmung des Eingangswassergehaltes bestätigt, wie in Abschnitt 8.4 näher beschrieben.

Die Bestimmung der Wassergehalte fand nach der in Kapitel 4 erläuterten Methode in unregelmäßigen Abständen von mehreren Tagen statt. Der Eingangswassergehalt wurde durch sechs Materialproben aus der gesamten Hackschnitzelmasse bestimmt. Der Endwassergehalt ist aus jeweils sechs Proben aus dem unteren, mittleren und oberen Drittel der Schüttung ermittelt worden. Durch die Bauart des solaren Satzrockners und die Einkleidung durch Gewächshausfolie war es nicht möglich, Materialproben aus der Mitte und dem unteren Bereich zu entnehmen. Lediglich aus dem oberen Drittel der Schüttung waren durch die Inspektionsluke Proben entnehmbar, wodurch sich die Bestimmung des Wassergehaltes während der Testzeit auf dieses Material beschränkt.

Bei den Hackschnitzeln handelt es sich um gemischtes Waldholz der Korngrößenklasse P16B. Es ist zudem ungesiebt und somit vergleichbar mit dem in Kapitel 5 verwendeten Material P16B-GU (siehe auch Kapitel 4). Insgesamt wurden 50 m³ der Holzhackschnitzel eingelagert, wodurch sich im TGB eine Schütthöhe von ca. 5 m ergab.

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

Die Einlagerung des Hackgutes nahm mittels Hackschnitzelgebläse etwa zwei Stunden in Anspruch.

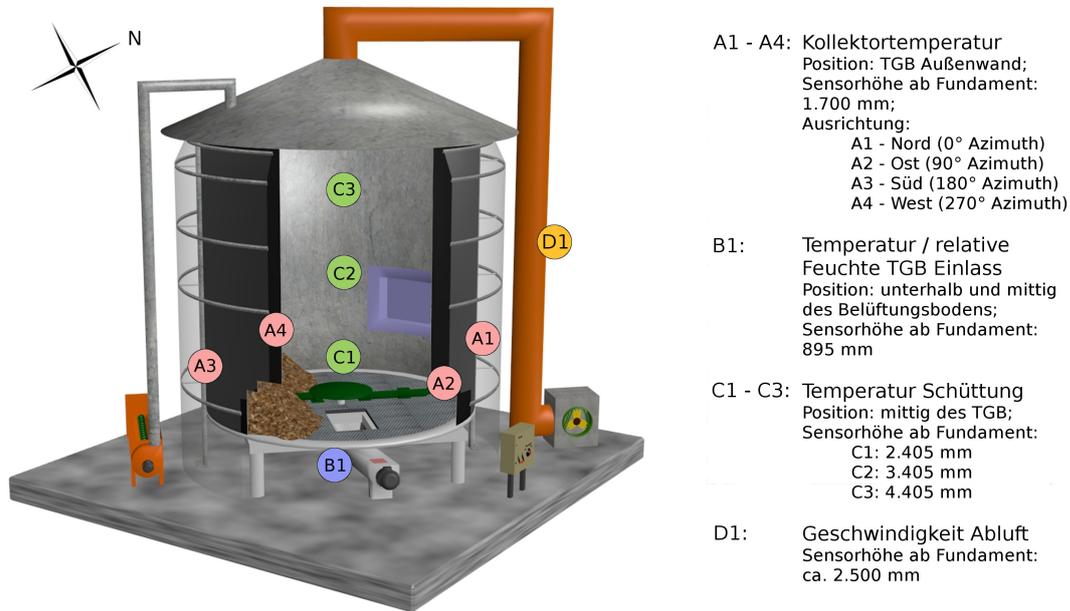


Abbildung 8.9.: Messplan zur Erfassung der Temperatur-, Luftfeuchte- und Luftgeschwindigkeitswerte während des Testzeitraumes; Modell nicht maßstabsgetreu

Abbildung 8.9 zeigt die Positionierung und Art der verwendeten Messsensoren. Während des Testzeitraumes wurde an zwei Tagen die Temperatur auf der Kollektoroberfläche bzw. TGB-Außenwand mit Hilfe des Handmessgerätes *Extech SDL200* gemessen und gespeichert (Technische Daten siehe Anhang E). Da das Gerät über vier Eingangskanäle verfügt, wurden die Typ K Thermoelemente in den Azimuthrichtungen 0° (Nord), 90° (Ost), 180° (Süd) und 270° (West) in einer Höhe von 1.700 mm ab Fundament angebracht. Die Messpunkte sind mit A1, A2, A3 und A4 gekennzeichnet.

Zur Registrierung der Lufttemperatur am TGB Einlass wurde ein Datenlogger *Voltcraft DL-121TH* verwendet, der unterhalb und mittig des Lochbodens platziert wurde (Höhe ab Fundament: 895 mm). Der Datenlogger ist in Abbildung

8.3. Versuchsvorbereitung und Datenaufnahme

8.9 mit B1 gekennzeichnet.

Als optionale Extraausstattung für den Silo wurde bei *Neuero* ein sogenanntes Messgehänge bestellt, welches mittig des Silodachs montiert wurde und die Temperatur innerhalb der Holzschüttung an drei Messpunkten (C1, C2, C3) erfasst. Die Registrierung der Daten erfolgte durch den ebenfalls mitgelieferten Logger *SGDB 1*, der im gleichen Schaltschrank verbaut wurde wie die Steuereinheit für den Ventilator. Die einzelnen Messpunkte haben einen Abstand von jeweils 1.000 mm zueinander, wobei sich der unterste Messpunkt (C1) in einer Höhe über dem Fundament von 2.405 mm befand. Messpunkt C3 war somit auf einer Höhe von 4.405 mm positioniert.

Die Luftgeschwindigkeit im System wurde täglich mit dem thermischen Anemometer *testo 425* überprüft und eingestellt. Der Messpunkt befand sich im Abluftrohr auf einer Höhe von 2.500 mm über dem Fundament. Diese Position wurde so gewählt, dass sich sowohl vor als auch nach dem Messpunkt eine Beruhigungsstrecke von mindestens 2.000 mm ergab, um eine möglichst laminare Strömung zu erreichen und die Luftgeschwindigkeit optimal feststellen zu können. Der Messpunkt besteht aus einer 6 mm Bohrung und einer Kunststoffhalterung zur Fixierung der Messgerätlanze. Die Lanze wurde bei jeder Messung bis zur Mitte des Kanalgrundrohres eingeführt, um Luftverwirbelungen, die durch die Rohrwand entstehen können, zu vermeiden.

Zusätzlich wurden für den Testzeitraum abermals Temperatur- und Luftfeuchtwerte der standorteigenen Wetterstation ausgewertet, die im nachfolgenden Abschnitt als Referenz verwendet werden. Darüber hinaus wurden standortnah aufgezeichnete Sonnenstunden zur weiteren Datenanalyse herangezogen. Die Daten werden durch das *Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR) Rheinland-Pfalz* erhoben und der Universität Bonn zur Verfügung gestellt. Die technischen Daten des Sonnenstundensensors (*Kipp & Zonen; CSD3; Delft, Niederlande*) befinden sich in Anhang E.

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

Der Solartrockner wurde ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme über die gesamte Testphase kontinuierlich betrieben, wodurch der Ventilator 24 Stunden täglich lief. Zur Feststellung des Stromverbrauchs ist zusätzlich ein Stromzähler angeschlossen worden.

8.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

Der Test des Prototypen des solaren Satzrockners, der am Campus Klein-Altendorf entwickelt wurde, lief über einen Zeitraum von etwa acht Wochen, vom 16.05.2012 bis zum 12.07.2012.

Wie bereits vorhergehend beschrieben, wurde der Wassergehalt des Aufgabegutes in unregelmäßigen Abständen kontrolliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8.10 dargestellt. Am Tag der Einlagerung wurde als Durchschnittswert des gesamten Materials ein Wert von 40,25% festgestellt. Bis zur dritten Überprüfung am 04.06.2012 verringerte sich der Wassergehalt um 7,85% auf 32,40%. Am Tag der vierten Feststellung (13.06.2012) wird durch den ermittelten Wert von 32,59% eine leichte Erhöhung deutlich. Im Anschluss folgte abermals eine Reduzierung des Wassergehaltes auf den End- und Tiefstwert von 11,73%.

Die Zunahme des Wassergehaltes am 04.06.2012 sowie die hohe Standardabweichung am darauf folgenden Probenahmetag sind zu diesem Zeitpunkt nicht zu erklären. Es wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass es sich lediglich um eine Wassergehaltsüberprüfung des Materials im oberen Drittel der Hackschnitzelschüttung handelt, die somit nicht für das gesamte Aufgabegut repräsentativ ist.

Bei der festgestellten Zunahme am dritten Probenahmetag scheint es sich trotzdem nicht um einen Messfehler zu handeln. Es entsteht der Eindruck, dass das obere Drittel der Hackschnitzelschüttung durch ungeklärte Umstände kurzzeitig

8.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

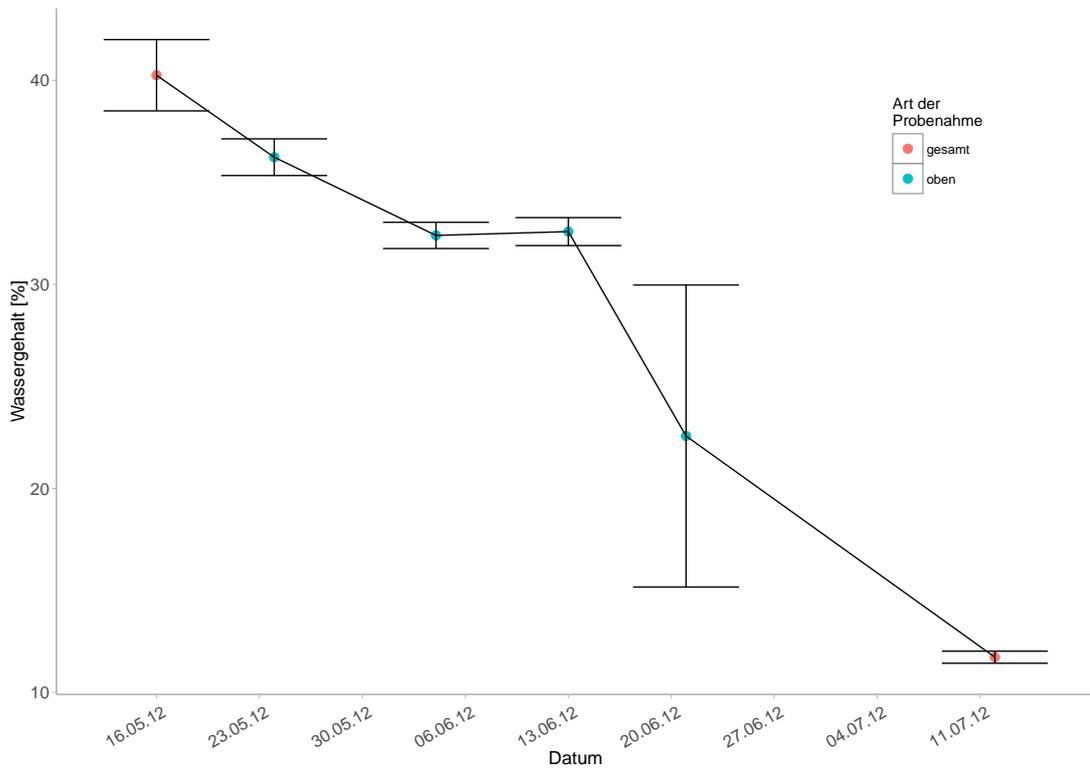


Abbildung 8.10.: Entwicklung des Wassergehaltes der Holz hackschnitzel im solaren Satz trockner; $n = 6$ Stichproben bei Probenahme 1 bis 5 und $n = 6$ Stichproben aus jeweils unterem, mittlerem und oberem Drittel der Schüttung an Probenahmetag 6; Standort: Campus Klein-Altendorf

oberflächlich befeuchtet wurde. Diese These wird durch die geringe Standardabweichung am 13.06.2012 und die darauf folgende sehr starke Abnahme des Wassergehaltes sowie die hohe Standardabweichung am 21.06.2012 unterstützt.

Die durch *AM-RLP* aufgezeichnete Sonnenscheindauer ist in Abbildung 8.11 dargestellt. Die Werte schwanken im Testzeitraum zwischen null und 14 Stunden und betragen im Durchschnitt 5,72 Stunden. Es ist ersichtlich, dass die täglichen Sonnenstunden in den Kalenderwochen 20 bis 22 höher ausfallen als in den nachfolgenden Wochen 23 bis 25. Während der letzten drei Testwochen steigen die Sonnenstunden wieder leicht an.

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

Trotz der geringeren Sonnenscheindauer ab der vierten Testwoche ist die Zunahme des Wassergehaltes zwischen den Probenahmen am 04.06.2012 und 13.06.2012 (siehe Abbildung 8.10) nicht zu erklären, denn die Anzahl der Sonnenstunden verringerte sich in den folgenden acht Betriebstagen weiterhin, wobei der Wassergehalt in diesem Zeitraum jedoch um 10,02% sank.

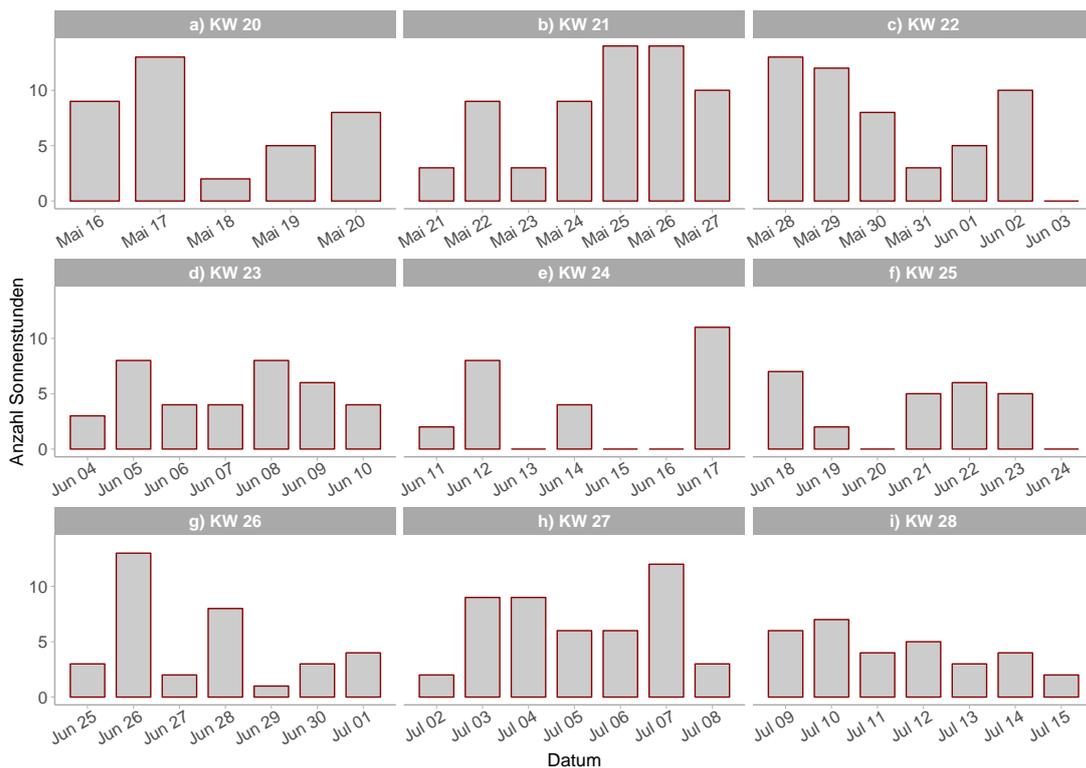


Abbildung 8.11.: Anzahl der Sonnenstunden im Testzeitraum des solaren Satztrockners vom 16.05.2012 bis zum 12.07.2012; Standort: Campus Klein-Altendorf

Während des Trocknertests wurden die Temperaturen an den in Abbildung 8.9 gezeigten Messpunkten aufgezeichnet. Da lediglich der hausinterne Elektrotechniker der Universität Bonn die Anschlussarbeiten des Messgehänges durchführen durfte und dies nur nach vorheriger Terminabsprache möglich war, kam es hier zu einem verzögerten Aufnahmestart der Daten. Auch die am TGB Einlass re-

8.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

gistrierten Werten sind nicht vollständig über den gesamten Testzeitraum. Die Aufzeichnung startet am 21.05.2012 und endet am 25.06.2012 aufgrund eines technischen Defekts des *DL-121TH*.

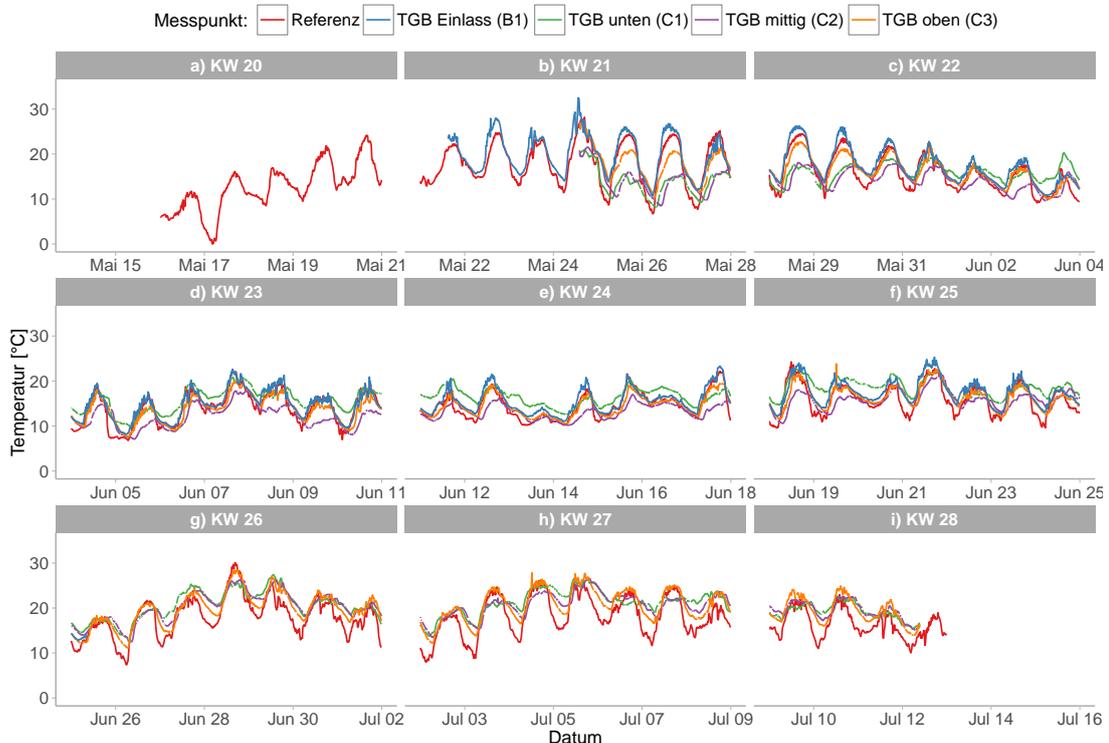


Abbildung 8.12.: Temperaturentwicklung am TGB Einlass (B1), in der Schüttung (C1, C2, C3) sowie der Umgebung (Referenz); Zeitraum: 16.05.2012 bis 12.07.2012; Standort: Campus Klein-Altendorf

Die Höchsttemperatur der Umgebung (Referenz) wurde am 28.06.2012 um 16:40 Uhr mit $30,09^{\circ}\text{C}$ registriert. Ihr Mittel lag im Testzeitraum bei $16,02^{\circ}\text{C}$. Aus Abbildung 8.12 ist zu entnehmen, dass die Temperatur am TGB Einlass (B1) während der Tagesstunden häufig und nachts nahezu konstant über der Referenz lag. Das Maximum betrug am 24.05.2012 um 13:30 Uhr $32,5^{\circ}\text{C}$. Zu diesem Zeitpunkt wies die Umgebung eine Temperatur von $25,9^{\circ}\text{C}$ auf, wodurch ein Temperaturhub von 6,6 K erreicht wurde. Der größte Temperaturunterschied zwischen Referenz

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

und TGB Einlass stellte sich am 22.05.2012 um 14:00 Uhr mit 6,8 K ein.

Über den Zeitraum der Aufzeichnung lag die Temperatur am TGB Einlass um durchschnittlich 1,18 K über der Referenz.

Die durch das Messgehänge im unteren Drittel der Schüttung aufgezeichnete Temperaturkurve C1 zeigt während der ersten Tage eine deutlich niedrigere Temperatur als am TGB Einlass. Diese Abkühlung ist auf die Absorption der Holzfeuchtigkeit zurück zu führen. Während der Nachtstunden liegt die Temperatur bis zum 30.05.2012 ebenfalls unter B1 und gleicht sich danach an deren Niveau an. Ab dem 04.06.2012 verlaufen C1 und B1 tagsüber nahezu gleich, während C1 nachts höhere Temperaturen aufweist. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Trocknung der Schüttung im unteren Drittel ab diesem Zeitpunkt soweit fortgeschritten ist, dass keine signifikante Abkühlung mehr stattfindet. Durch die hygroskopischen Eigenschaften des Holzes stellt es einen Puffer für die Feuchtigkeit und somit auch für die Temperatur dar.

Die Temperaturkurve der Schüttungsmitte (C2) verläuft anfänglich ähnlich wie, jedoch etwas zeitversetzt zu C1. Ab dem 09.06.2012 findet auch hier eine Annäherung an die Einlasstemperaturen während der Nächte statt. Durch den technischen Defekt des Datenloggers am TGB Einlass kann eine Übereinstimmung der Temperaturen zwischen C2 und B1 während der Tageszeiten nicht dargestellt werden. Allerdings ist zu erkennen, dass C1 und C2 ab dem 25.06.2012 tagsüber den gleichen Verlauf zeigen. Daraus ist zu schließen, dass die Trocknung ab diesem Tag im mittleren Bereich der Schüttung abgeschlossen war.

Die Temperaturen, die im oberen Drittel der Schüttung aufgezeichnet wurden (C3), zeigen einen gänzlich anderen Verlauf als C1 und C2, da ihre Werte signifikant höher sind. Eine deutliche Veränderung stellt sich bereits ab dem 30.05.2012 ein, da die Temperaturen ab diesem Tag das Niveau der Umgebungsluft erreichen. Der Grund für den stark abweichenden Verlauf kann durch die direkte Sonneneinstrahlung auf das Silodach begründet werden. Dadurch werden die oberen

8.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

Holzschichten erwärmt, die folglich nicht nur durch die konditionierte Prozessluft getrocknet werden, sondern auch durch die Wärmeabstrahlung des Dachs.

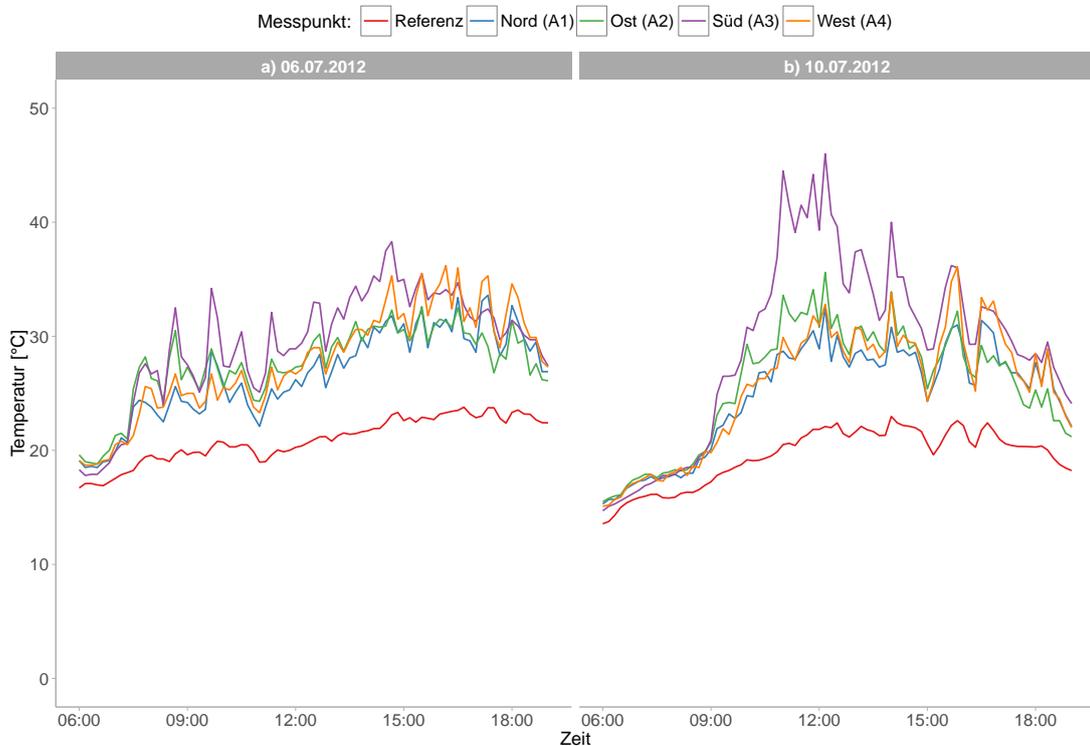


Abbildung 8.13.: Temperaturentwicklung am TGB Einlass (B1), im Solarkollektor (A1, A2, A3, A4) sowie der Umgebung (Referenz) am 06.07.2012 und 10.07.2012; Standort: Campus Klein-Altendorf

Während des Testlaufs wurde die Temperaturentwicklung im Solarkollektor an zwei Tagen, dem 06.07.2012 und 10.07.2012 zwischen 06:00 Uhr und 19:00 Uhr, aufgezeichnet. Die zugehörigen Kurvenverläufe sind in Abbildung 8.13 dargestellt. Zunächst fällt auf, dass die Kollektortemperaturen ganztägig über der Referenz liegen. Dies trifft auch auf den nördlichen Sensor A1 zu, der aufgrund seiner Position keiner direkten Einstrahlung ausgesetzt ist. An beiden Tagen wurde durch den östlichen Sensor zwischen 06:00 Uhr und 13:00 Uhr höhere Werte registriert als in nördlicher und westlicher Ausrichtung. Zwischen etwa 10:00 Uhr und 15:00

8. Konstruktion und Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

Uhr stiegen die Temperaturen in 180° Azimuth auf die maximalen Kollektortemperaturen an. Am 06.07.2012 wurde diese mit 38,3°C um 14:40 Uhr und am 10.07.2012 mit 46,0°C um 12:10 Uhr registriert. In den späten Nachmittags- und Abendstunden zeigen die Temperaturen in westlicher Richtung die höchsten Werte.

8.5. Erforderliche Ventilatorleistung

Während der gesamten Testzeit verbrauchte der Ventilator 710,22 kWh. Über die gesamte Testlaufzeit von 57 Tagen lag der durchschnittliche Stromverbrauch bei 12,46 kWh pro Tag. Aufgrund des kontinuierlichen Betriebs ergibt sich daraus eine erforderliche Ventilatorleistung von 0,519 kW.

8.6. Sonstige Erkenntnisse

Aus technischer Sicht gab es während des Trocknungsbetriebs keinerlei Ausfälle. Die Gesamtkonstruktion des Solartrockners erwies sich als stabil, der Ventilator arbeitete zuverlässig im kontinuierlichen Betrieb, und auch die Kollektorfolie zeigte keine größeren Beschädigungen. Lediglich die Angelschnur sorgte durch die Windbewegung der Folie für leichten Abrieb. In unregelmäßigen Abständen musste, insbesondere nach stärkeren Windereignissen, die Folie an einigen Stellen erneut fixiert werden, da sich durch ihre Bewegung einige der Kunststoffhalterungen lösten.

Die größte Schwachstelle wurde zum Zeitpunkt der Entleerung des TGB ersichtlich. Während die Ausfuhrschnecke problemlos funktionierte, war eine Förderung der Hackschnitzel mittels Rührwerk nicht möglich. Nach Betätigung des Schalters lief der Rührwerkmotor zwar kurz an, wurde jedoch direkt danach durch das

Auslösen der zugehörigen elektrischen Sicherung gestoppt. Der Grund hierfür lag in dem zu großen Widerstand der Holzhackschnitzelschüttung durch ihre inhomogene Struktur. Aufgrund dieses Ausfalls war es notwendig, das eingelagerte Holz manuell zu entnehmen.

Eine positive Konsequenz aus der manuellen Entleerung des TGB war, dass das Material sehr gut gesichtet werden konnte. Es fiel auf, dass sich die Höhe der Hackgutschüttung durch den Wasserentzug um etwa 500 mm verringert hatte. Das Material war stark verdichtet, erwies sich als solide Masse und erschwerte die Zerkleinerung und Ausfuhr. Darüber hinaus konnte Brückenbildung beobachtet werden, die durch die Kompaktierung des Materials entstand und ein Nachrutschen des Materials Richtung Austrag verhinderte. Durch die allmähliche Abwärtsbewegung versuchte sich die Masse flächenmäßig zu vergrößern, was durch die Silowand verhindert wird.

Durch die manuelle Ausfuhr fiel zudem auf, dass sich innerhalb der Schüttung keine nassen Zonen ausgebildet hatten und dass das Material keine erkennbaren Spuren von Schimmelpilzen aufwies.

Wie aus Abbildung 8.12 ersichtlich ist, wurde die Temperatur am TGB Einlass nicht über den gesamten Versuchszeitraum registriert. Aus diesem Grund ist eine Berechnung des Ausnutzungsgrades der Trocknungsluft nicht möglich.

9. Feldversuch in Nepal

Im Anschluss an das auf 30 Monate befristete Arbeitsverhältnis mit der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn wurde im Juni 2013 eine Nachfolgeposition als Entwicklungshelfer (EH) in der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) als Entsendeorganisation angetreten. Die Projektstätigkeit sah einen Aufenthalt von 25 Monaten in Nepal vor. Während dieser Zeit ergab sich die Möglichkeit, einen weiteren Solartrockner zu konstruieren. Dieser verfügte über die gleiche Konstruktionsweise wie der Bonner Prototyp, allerdings wies er eine wesentlich kleinere Dimensionierung auf.

In diesem Kapitel werden zunächst Arbeitsinhalt und -umfeld dieser Position sowie die örtlichen und klimatischen Bedingung beschrieben. Im Anschluss erfolgt die Konstruktionsbeschreibung des Solartrockners und die Darstellung und Auswertung der aufgenommenen Messdaten.

9.1. Beschreibung der Position als Entwicklungshelfer und des Arbeitsumfeldes

Nach einer Einsatzvorbereitungszeit von insgesamt drei Monaten in der Akademie für Internationale Zusammenarbeit (AIZ) in Bad Honnef und in Nepals Hauptstadt Kathmandu wurde die Projektstätigkeit angetreten. Diese fand innerhalb des Nepal Energy Efficiency Program (NEEP) der GIZ statt und beinhaltete die enge Zusammenarbeit mit der Federation of Community Forestry Users Nepal (FECOFUN) als lokale Partnerorganisation. FECOFUN ist ein formales, landesweites Netzwerk von Waldnutzergruppen, welche zum einen für die Rechte der

9. Feldversuch in Nepal

einzelnen Waldnutzer, aber auch für die nachhaltige und schonende Nutzung der Wälder Nepals eintritt.

9.1.1. Energieversorgung im ländlichen Raum

In den ländlichen Regionen beziehen auch heutzutage immer noch 87% der Haushalte ihren Energiebedarf aus natürlichem Brennmaterial [ANONYMUS17, 2015]. Hierzu gehört, neben landwirtschaftlichen Resten und Briketts aus Kuhdung und Stroh, vorwiegend Holz. Da bereits weite Teile des Flachlands von starker Abholzung betroffen sind (siehe Abschnitt 9.1.2), zugleich jedoch ein hoher Bedarf an holzartiger Biomasse besteht, liegt es unter anderem im Interesse FECOFUNs, die Energieeffizienz des Brennmaterials zu maximieren. Aus diesem Grund bestand die Hauptaufgabe während der Projektzeit zunächst in der Verbreitung verbesserter Kochherde, deren Effizienz wesentlich über der traditioneller Kochstellen liegt. Wie in Abbildung 9.1 zu sehen ist, bestehen letztere lediglich aus einem offenen Ring, der aus Lehm, Kuhdung und Stroh bzw. Reisspeltzen geformt wird. Die von FECOFUN und GIZ verbreiteten Herde werden aus den gleichen Materialien konstruiert, sind jedoch je nach Bauweise in der Lage, über eine Brennkammer bis zu drei Kochtöpfe simultan zu erwärmen. Ein weiterer Vorteil der verbesserten Herde ist die Minimierung der Rauchbelastung in den Küchen, da sie über einen Rauchabzug verfügen und somit gesundheitliche und hygienische Vorteile mit sich bringen.

Traditionell ist die Hausarbeit und Kindererziehung Aufgabe der Frauen, wodurch sie auch für die Beschaffung von Brennholz verantwortlich sind. Durch die Ausbildung von Frauen zu Herdkonstrukteurinnen, wurde ihnen verdeutlicht, dass eine effizientere Verbrennung zur Minimierung des Arbeitsaufwandes für die Holzbeschaffung und der Kochzeit führt. Darüber hinaus wurde den Frauen eine Option zur finanziellen Unterstützung ihrer Familien durch den Bau von Koch-

9.1. Beschreibung der Position als Entwicklungshelfer und des Arbeitsumfeldes

herden in der Nachbarschaft und näheren Umgebung geschaffen.



Abbildung 9.1.: Traditionelle Kochstelle (a) und verbesserter Herd (b) als Variante mit einem Verbrennungsraum für zwei Kochtöpfe und Kamin

In der ersten Hälfte der Projektzeit, in der die Verbreitung der Kochherde durch Ausbildung von Konstrukteuren und Öffentlichkeitsarbeit voran getrieben wurde, stellte sich die Erkenntnis ein, dass holzartiges Brennmaterial mit adäquatem Trockengrad nicht ganzjährig zur Verfügung steht. Nach mündlicher Aussage von Kamala Gnwali, Vorsitzende des FECOFUN Distriktbüros in Gulariya, Bardia, ist das Schlagen von Holz aus Gründen der nachhaltigen Waldnutzung nicht gestattet. Aus diesem Grund wird vornehmlich Totholz gesammelt, welches jedoch häufig erhöhte Wassergehalte aufweist. Dies ist zum einen den örtlichen Witterungsbedingungen (siehe Abschnitt 9.1.2) geschuldet und zum anderen sorgt die hohe Nachfrage dafür, dass Totholz immer knapper wird. Dadurch sind die Lagerzeiten zu kurz, um einen optimalen Trockengrad zu erreichen [GNWALI, 2014].

Aufgrund der Tatsache, dass im Einsatzgebiet somit ein praktischer Bedarf an technischer Holz Trocknung besteht, wurde die Konstruktion eines solaren Holz trockners in den Arbeitsplan für die zweite Hälfte der Projektzeit aufgenommen.

9. Feldversuch in Nepal

NEEP genehmigte und unterstützte das Projekt finanziell durch die Anschaffung notwendiger elektronischer Messgeräte.

9.1.2. Das Projektgebiet

Geographie und Zahlen. Die im Vergleich zu seinen Nachbarn China und Indien kleine Demokratische Bundesrepublik Nepal hat eine Fläche von etwa 147.000 km². Es kann über seine Ausdehnung von West nach Ost in drei annähernd horizontale Zonen eingeteilt werden. Die nördlichste, an Tibet grenzende Zone wird durch die Gebirgskette des Himalaja geprägt. Mit Höhenlagen zwischen 4.877 m und 8.848 m macht sie 13% der Gesamtfläche aus. Wie Abbildung 9.2 verdeutlicht, nimmt die Höhe der Berge nach Süden hin ab. Das mittlere Bergland (600 m bis 2.000 m), in dem sich auch das Kathmandu Tal mit gleichnamiger Hauptstadt befindet, ist demnach als Vorgebirgsregion des Himal anzusehen und stellt mit 67% den größten Anteil der Landfläche dar. Nach Süden läuft das Gebirge immer weiter aus und bildet mit dem „Terai“ genannten Flachland den Übergang nach Indien [ANONYMUS18, 2015].

Neben den geographischen Zonen ist Nepal zusätzlich in die Regionen „Far West“, „Mid West“, „West“, „Central“, „East“ und 75 Distrikte unterteilt. Das Einsatzgebiet für die hier beschriebene EH-Position befand sich im Terai der Mid und Far West Region, in den vier Distrikten Kanchanpur, Kailali, Bardiya und Banke. Als Wohn- und Hauptarbeitsort wurde von FECOFUN die Distrikthauptstadt von Bardiya, Gulariya, bestimmt.

Sowohl aus wirtschaftlichen Gründen als auch zur energetischen Versorgung der Region sind große Flächen des Terai von starker Abholzung betroffen. Um die Restbestände der Urwälder und die darin lebenden Tiere zu schützen, sind in den Distrikten Kanchanpur, Bardiya und Banke Nationalparks eingerichtet worden. Zu den geschützten Tierarten gehören u.a. asiatische Elefanten, Rhinoceros,

9.1. Beschreibung der Position als Entwicklungshelfer und des Arbeitsumfeldes

Leoparden und Bengaltiger.

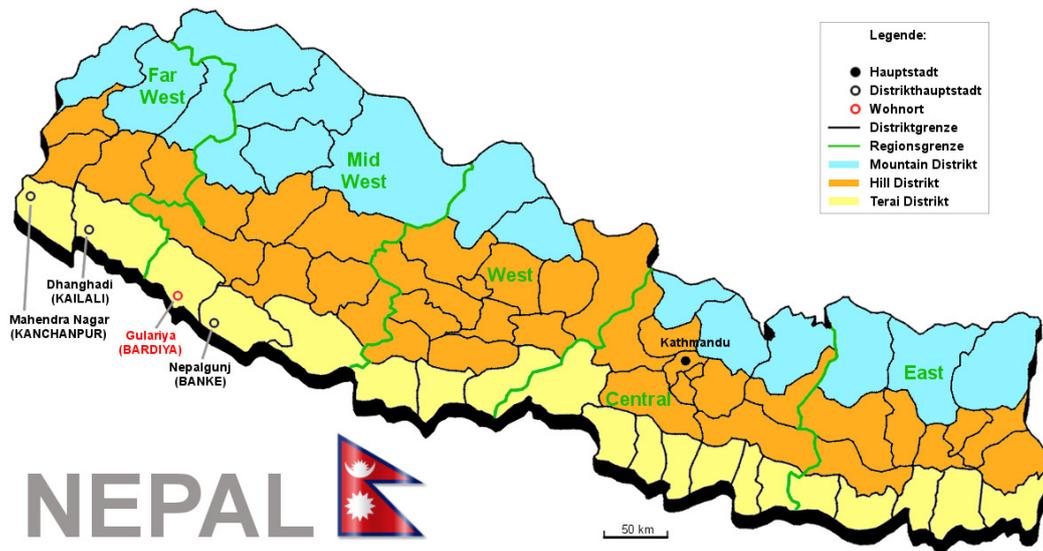


Abbildung 9.2.: Geographische Zonen, Regionen und Distrikte des Landes Nepal; abgeändert aus CONNACHIE ET AL. [2011]

Nepal hat eine Gesamtbevölkerung von 29 Millionen Menschen, wobei das Terai mit einem Anteil von nahezu 50% das bevölkerungsreichste Gebiet des Landes bildet [ANONYMUS18, 2015]. „Mit einem jährlichen Pro-Kopf-Einkommen von 730 US-Dollar (2013) ist Nepal das zweitärmste Land Südasiens und zählt weiterhin zu den 20 ärmsten Ländern der Welt. Ein Viertel der Bevölkerung lebt unterhalb der nationalen Armutsgrenze. [...] Nepal ist noch immer ein weitgehend von der Subsistenzwirtschaft geprägter Agrarstaat. Die Landwirtschaft beschäftigt mehr als die Hälfte der Erwerbstätigen und trägt mehr als ein Drittel zum Bruttoinlandsprodukt (BIP) bei. Der Anteil des verarbeitenden Sektors am BIP hingegen ist aufgrund der schwierigen Rahmenbedingungen für Industriebetriebe in den letzten Jahren kontinuierlich zurückgegangen und liegt nun bei etwa 15,5% (2013). [...] Etwa 90% aller Unternehmen des Landes sind Kleinbetriebe, die einen wichtigen Beitrag zur Beschäftigung leisten, aber nur 4% zum BIP beitragen. Die geschätzten sechs Millionen im Ausland lebenden Nepalesen tragen

9. Feldversuch in Nepal

mit ihren Finanztransfers in die Heimat mit über 25% zum BIP bei. Diese Mittel führen jedoch kaum zu Investitionen, sondern fließen unmittelbar in den lokalen Konsum. Die Inflation ist zuletzt leicht gesunken und liegt aktuell bei etwa 8,5%“ [ANONYMUS19, 2015].

Aufgrund der beschriebenen wirtschaftlichen Schwierigkeiten Nepals sind Entwicklungsmaßnahmen in der Regel auch immer mit dem übergeordneten Ziel verbunden, die lokale Wirtschaft zu stärken, indem Arbeitsplätze geschaffen oder neue Geschäftsbereiche erschlossen werden. Dies wurde im Zusammenhang mit der Verbreitung verbesserter Kochherde, den damit verbundenen Konstruktions- trainings der lokalen Bevölkerung und der Schaffung eines neuen Arbeitsfeldes erreicht.

Klima. Wie bereits dargestellt wurde, ist Nepal aus geographischer Sicht ein Land mit hoher Diversität. Da die landschaftlichen Bedingungen unmittelbaren Einfluss auf das Klima haben, sind innerhalb des Landes unterschiedlichste Klimazonen anzutreffen. Aufgrund der Tatsache, dass sich das Projektgebiet jedoch im westlichen Terai des Landes befand, wird folgend lediglich auf die dortigen klimatischen Gegebenheiten eingegangen.

Aufgrund der Tatsache, dass verlässliche Klimadaten für die abgelegeneren Regionen des Landes nur handschriftlich festgehalten werden, sind sie in elektronischer Form nur schwer erhältlich. Aus diesem Grund wurde auf Daten zurückgegriffen, die über die Internetpräsenz www.weather2.com [ANONYMUS20, 2016] abgerufen werden können. Die Wetterdaten werden von dem meteorologischen Unternehmen *Aerospace and Marine International* mit Hauptsitz in Kalifornien, USA, erhoben und zur Verfügung gestellt. Abbildung 9.3 zeigt die Mittelwertkurven für Temperatur und relative Feuchte, die sich aus den historischen Daten der letzten zwei Jahrzehnte für Nepalgunj, Banke, ergeben. (*„To maintain relevance to current weather trends the displayed information has been calculated using data*

9.1. Beschreibung der Position als Entwicklungshelfer und des Arbeitsumfeldes

collected over the past two decades“ [ANONYMUS20, 2016].)

Für den Wohn-, Hauptarbeits- und Trocknerstandort Gulariya, Bardia, sind Klimadaten nicht erhältlich.

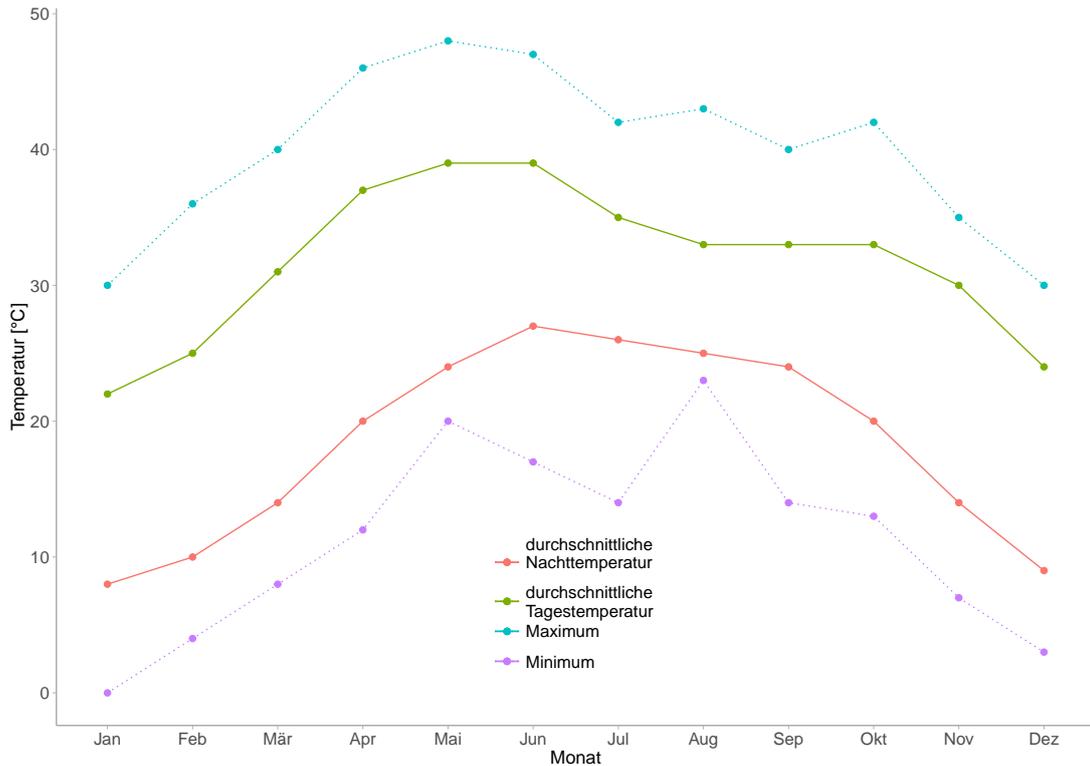


Abbildung 9.3.: Mittlere monatliche Tages- und Nachttemperaturen sowie monatliches Maximum und Minimum in Nepalgunj, Nepal; entwickelt aus ANONYMUS20 [2016]

Das nepalesische Flachland gehört laut Definition zu den subtropischen Regionen. Diese „liegen in der geographischen Breite zwischen den Tropen in Äquatorrichtung und den gemäßigten Zonen in Richtung der Pole, ungefähr zwischen 25 und 40 Grad nördlicher, bzw. südlicher Breite. [...] Eine weit verbreitete Definition definiert das Klima dort als subtropisch, wo die Mitteltemperatur im Jahr über 20°C liegt, die Mitteltemperatur des kältesten Monats jedoch unter der Marke von 20°C bleibt“ [ANONYMUS21, 2016]. Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur,

9. Feldversuch in Nepal

gebildet aus den Differenzen der monatlichen Tages- und Nachttemperaturen aus Abbildung 9.3, liegt bei 25,08°C. Der kälteste Monat ist der Januar mit durchschnittlich 15°C.

Die Monate von Mitte November bis Mitte Februar sind als „Winter“ zu bezeichnen. Die nächtlichen Temperaturen erreichen in dieser Zeit Tiefstwerte von 0°C bis 7°C. An klaren, sonnigen Tagen kann die Temperatur auf über 30°C ansteigen. Jedoch tritt in dieser Jahreszeit häufig starker Tiefnebel auf, der eine direkte Sonneneinstrahlung verhindert. Nach ANONYMUS20 [2016] liegt die Anzahl der Tage mit nebeligen Wetterbedingungen zwischen 13 und 14 in den Monaten Dezember und Januar. Aus persönlicher Erfahrung liegen die Temperaturen während dieser Phasen deutlich unter den gezeigten durchschnittlichen Tagestemperaturen.

Zwischen Mitte Februar und Mitte April, den „Frühlingsmonaten“, steigt die Temperatur auf über 35°C an, Nebel tritt nicht mehr auf. Nachts liegen die Temperaturen zumeist bei unter 20°C.

Der darauf folgende Zeitraum bis Ende Juni gilt als die trockenste Zeit des Jahres, in der nur wenig Niederschlag fällt und die relative Luftfeuchte auf ein Minimum von 37% absinkt (siehe Abbildung 9.4). Die Temperaturen können im Projektgebiet bis auf 48°C ansteigen.

Die Zeit zwischen Juli und Mitte September bildet die für subtropische Länder typische Monsunzeit. Plötzlicher, häufiger und starker Niederschlag sorgt für ein leichtes Absinken der Temperaturen, jedoch steigt die relative Luftfeuchte auf 83%. Durch die starken Regenfälle gehört das Terai zu den Hochwasser gefährdeten Gebieten. Im August 2014 kam es in Bardiya und Kailali zu einem 60-jährigen Hochwasser, in dem viele Wohnhäuser und Straßen schwer beschädigt und Ackerflächen unbrauchbar wurden.

Über die „Herbstmonate“ September, Oktober und November sinken die Temperaturen und die relative Luftfeuchte ab, da auch der Monsun nachlässt.

9.1. Beschreibung der Position als Entwicklungshelfer und des Arbeitsumfeldes

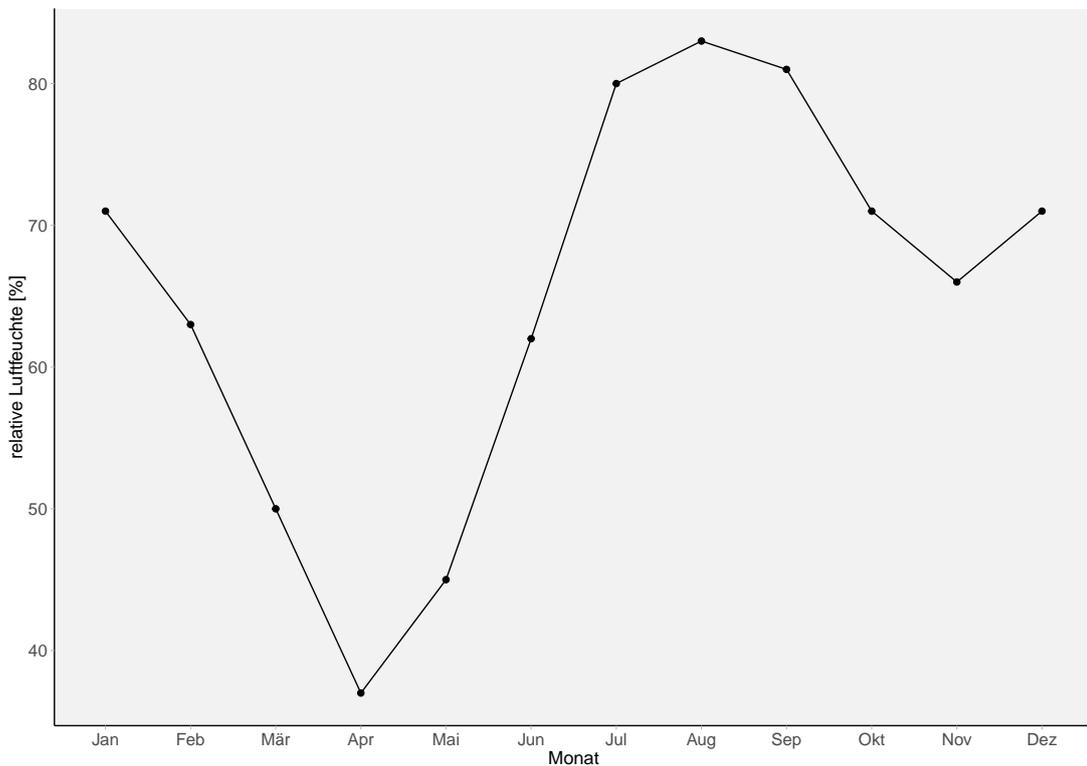


Abbildung 9.4.: Mittlere monatliche relative Luftfeuchte in Nepalgunj, Nepal; entwickelt aus ANONYMUS20 [2016]

Wie aus den beschriebenen klimatischen Bedingungen zu erkennen, ist eine natürliche Trocknung des Holzes wegen der niedrigen Umgebungstemperaturen, des häufigen Tiefnebels im Winter und des starken Niederschlags während der Monsunzeit ohne ausreichende Lagerzeit an einem adäquaten, witterungsgeschützten Ort nahezu unmöglich.

Infrastruktur. Wie aus Abbildung 9.2 zu entnehmen ist, haben die vier bereits genannten Distrikte im Einsatzgebiet jeweils eine Hauptstadt. Obwohl alle Städte einen Grenzübergang nach Indien bieten, hat sich Nepalgunj zum wichtigsten wirtschaftlichen Knotenpunkt der Region entwickelt. Sowohl Lebensmittel als auch Handelswaren wie beispielsweise Kleidung und Schuhe, Elektrogeräte und

9. Feldversuch in Nepal

Werkzeug, aber auch Energievorräte in Form von Treibstoff und Propangas werden aus Indien nach Nepalgunj importiert. Die Stadt ist mit ca. 72.000 Einwohnern (Stand: 2011) die drittgrößte der Region nach Mahendra Nagar (Population: 105.000) und Dhanghadi (Population: 102.000). Die geringste Einwohnerdichte weist Gulariya mit etwa 56.000 Menschen auf [ANONYMUS22, 2012].

Gulariya, Hauptstadt von Bardiya und Wohnort während der Projektzeit, bietet ein wesentlich ländlicheres Stadtbild als die übrigen Grenzstädte. Als typische Fortbewegungsmittel dienen Esel- bzw. Ochsenkarren, Fahrräder, Mopeds, Motorräder und Busse, die zwischen den Städten pendeln. Personen- und Lastkraftwagen machen lediglich einen geringen Anteil am Verkehrsaufkommen aus.

Sämtliche Distrikte des Terai sind von Kanchanpur im Westen bis nach Kakarbhitta im Osten des Landes durch den East-West-Highway miteinander verbunden. Dieser bildet eine der wichtigsten asphaltierten Straßenverbindungen Nepals, über die auch die Hauptstädte im Projektgebiet zu erreichen sind. Ansonsten ist lediglich ein geringer Anteil des Straßen- und Wegnetzes asphaltiert. Es besteht zumeist aus Sand- oder Schotterpisten mit starken Unebenheiten und Schlaglöchern. Die Reisegeschwindigkeit ist hierdurch stark eingeschränkt, so dass z.B. für die etwa 580 km lange Strecke zwischen Nepalgunj und Kathmandu zwei Tagesfahrten einzuplanen sind.

Während in Nepal vorwiegend existentielle Landwirtschaft betrieben wird und Agrarprodukte somit etwa 80% der Exportgüter ausmachen, hat Energie einen großen Anteil am Import [ANONYMUS19, 2015]. Aufgrund der Tatsache, dass Nepal derzeit noch nicht in der Lage ist, den elektrischen Eigenverbrauch zu decken, wird speziell im Terai Strom aus Indien zugekauft. Als Maßnahme zur Stromersparung wird das sogenannte „Load-Shedding“ praktiziert, bei dem während mehrerer Stunden täglich einzelne Stadtteile von der Versorgung abgeschnitten werden. Das Electricity Office in Gulariya gibt monatlich einen Zeitplan heraus, der über die täglichen Ein- und Ausschaltzeiten informiert. Dieser kann über jedes

9.1. Beschreibung der Position als Entwicklungshelfer und des Arbeitsumfeldes

gängige Mobiltelefon per Short Message (SMS) abgerufen werden. Dem Plan und eigenen Beobachtungen zufolge war die Stromversorgung während der Projektzeit in Gulariya für acht bis zwölf Stunden täglich unterbrochen.

Zu den exportierten Agrarprodukten gehört unter anderem Holz, welches zu meist als Nutzholz verkauft wird. Sowohl diese Veräußerung als auch der hohe Eigenverbrauch von holzartigem Brennmaterial haben in der Vergangenheit zu ausgedehnten Rodungen im nepalesischen Flachland geführt. Die starken Winde im Frühjahr sowie anhaltende Niederschläge während des Monsun führen immer wieder zu Bodenerosionen, massiven Erdrutschen und Verschleppungen durch Flüsse, die das Material in die Gangesebene tragen. Ackerboden wird hierdurch auf großen Flächen unbrauchbar und Bauland unbewohnbar.

Als zukunftsorientierte Möglichkeit, dem Energiedefizit Nepals entgegen zu kommen, wird der Ausbau von Wasserkraftwerken angesehen. Das geschätzte Gesamtpotenzial wird auf 83.000 MW geschätzt, von denen derzeit 40.000 MW als technisch und ökonomisch umsetzbar gelten. Das Leistungsdefizit liegt bei etwa 500 MW, der jährliche Verbrauch etwa 982,48 GWh (20,33%) über der Eigenproduktion. Der Ausbau von Nepals Wasserkraftwerken könnte dem Land wirtschaftlich stark nutzen und es zugleich zu einem Stromversorger Indiens und Chinas machen.

Eine weitere wirtschaftliche Einnahmequelle, die derzeit intensiv weiterentwickelt wird, ist die Tourismusbranche. Durch die bereits erwähnten Naturschutzgebiete und Nationalparks bietet das Terai sowohl für westliche Besucher als auch für Gäste aus Indien ein interessantes Urlaubsgebiet.

9.2. Aufbau und Inbetriebnahme des solaren Holzrockners in Nepal

Im vorhergehenden Abschnitt wurde beschrieben, dass die klimatischen Bedingungen eine natürliche Trocknung des Brennholzes verhindern. Das verwendete Brennholz hat somit einen unzureichend hohen Wassergehalt, der zu einer verstärkten Rauchentwicklung führt. Eine technische Trocknung trägt somit zu hygienischeren Zuständen innerhalb der Wohnhäuser bei und verringert das Risiko schwerer Atemwegserkrankungen. Darüber hinaus würde adäquat aufbereitetes Brennholz die Kochzeit der Mahlzeiten stark verringern und somit den arbeitsintensiven Alltag der Frauen Nepals, denen innerhalb der Familien die Küchenarbeit inklusive der Brennholzbeschaffung zufällt, erleichtern.

Die Planung, Konstruktion und erste Inbetriebnahme des Trockners wurden im Oktober und November 2014 durchgeführt. Als Standort diente das Flachdach des während der gesamten Einsatzzeit als EH angemieteten privaten Wohngebäudes in Gulariya, Bardia.

9.2.1. Anforderungen an den solaren Trockner

Ziel dieses Feldversuches war die Konstruktion eines Solartrockners für Entwicklungsländer. Aus diesem Grund lag das Augenmerk auf der Konstruktion eines möglichst günstigen Trockners hinsichtlich der Anschaffungs-, Betriebs- und Wartungskosten. Zugleich sollte ein hohes Maß an Robustheit und einfachste Handhabung im Vordergrund stehen, um die Akzeptanz für das Gerät in der Bevölkerung zu sichern. Dies wurde durch die ausschließliche Verwendung von Materialien erreicht, die über ein hohes Maß an Robustheit verfügen und zugleich in hohen Stückzahlen hergestellt werden.

Wie bereits erwähnt, sollte der Trockner nach dem Vorbild des, an der Universität Bonn entwickelten Prototypen, gebaut werden, um dessen Praktikabilität

9.2. Aufbau und Inbetriebnahme des solaren Holzrockners in Nepal

unter subtropischen Bedingungen zu testen. Vor der eigentlichen Konstruktionsarbeit wurde zu Zwecken der Vergleichbarkeit festgelegt, dass der Trockengutbehälter über das Fassungsvermögen für ein Bari Holz verfügen sollte. Das nepalesische Wort „Bari“ ist keine Gewichtseinheit, sondern kann in diesem Zusammenhang mit dem deutschen Wort „Bündel“ übersetzt werden. Das Holz wird von den Frauen gesammelt, zu Bündeln verschnürt und auf dem Rücken oder Kopf zur Kochstelle transportiert (siehe Abbildung 9.5).

In Nepal wird das gesammelte Brennholz bei Bedarf manuell zerkleinert. Technisches Gerät wird hierfür nicht eingesetzt, wodurch eine weitere Aufbereitung der Bari für die durchgeführten Versuche ebenfalls unterblieb. Im Gegensatz zu den in Bonn durchgeführten Versuchen, bestand das Aufgabegut dementsprechend nicht aus Hackschnitzeln sondern kleineren Ästen und Zweigen, wie in Abbildung 9.5 (b) zu sehen.



Abbildung 9.5.: Nepalesische Frauen transportieren Baris (a) und ein Bari Frischholz als Aufgabegut für den Solartrockner (b)

Zur Erreichung des in Abschnitt 9.1.2 beschriebenen übergeordneten Ziels der Entwicklungsmaßnahme, die lokale Wirtschaft zu unterstützen, und um gleich-

9. Feldversuch in Nepal

zeitig die Machbarkeit des Projektes zu überprüfen, war es von hoher Wichtigkeit, dass das gesamte für die Konstruktion verwendete Material in Nepal erhältlich war. Zudem sollten auch alle weiteren Arbeitsschritte gegebenenfalls von lokalen Handwerkern durchgeführt werden können.

9.2.2. Material und Arbeitsschritte

Als geeigneter TGB wurde ein Standardölfass mit einem Fassungsvermögen von $0,24 \text{ m}^3$ identifiziert, da es mit einer Höhe von 880 mm und einem Durchmesser von 590 mm über eine adäquate Dimensionierung zur Aufnahme eines Bari Holz verfügt. Im ersten Arbeitsschritt wurde der Deckel des Fasses entfernt, die Außenwand mit einem handelsüblichen Lack auf Lösemittelbasis mattschwarz lackiert und der obere Rand um einen Flansch erweitert (siehe Abbildung 9.6). Letzterer besteht aus Stahlblech der Stärke 2 mm und hatte zunächst eine quadratische Grundform ($h \times b$: 830 mm x 830 mm), die jedoch zur Verbesserung der Handhabbarkeit in die Form eines unregelmäßigen Oktagons abgeändert wurde. Die geometrische Form des Flansches ist für den Betrieb des Trockners unerheblich. Jedoch sollte darauf geachtet werden, dass ein Überstand verbleibt, der das Eindringen von Niederschlag in den Kollektor verhindert (Abbildung 9.8). Aus der Mitte des Stahlbleches wurde eine kreisförmige Fläche mit dem Durchmesser des Fasses ausgeschnitten und der gesamte Flansch zum Schutz vor Korrosion ebenfalls schwarz lackiert. Zusätzlich ist er mit acht Lochbohrungen des Durchmessers 8 mm versehen, um den Verschluss des Fasses mit einem Deckel zu ermöglichen.

9.2. Aufbau und Inbetriebnahme des solaren Holzrockners in Nepal

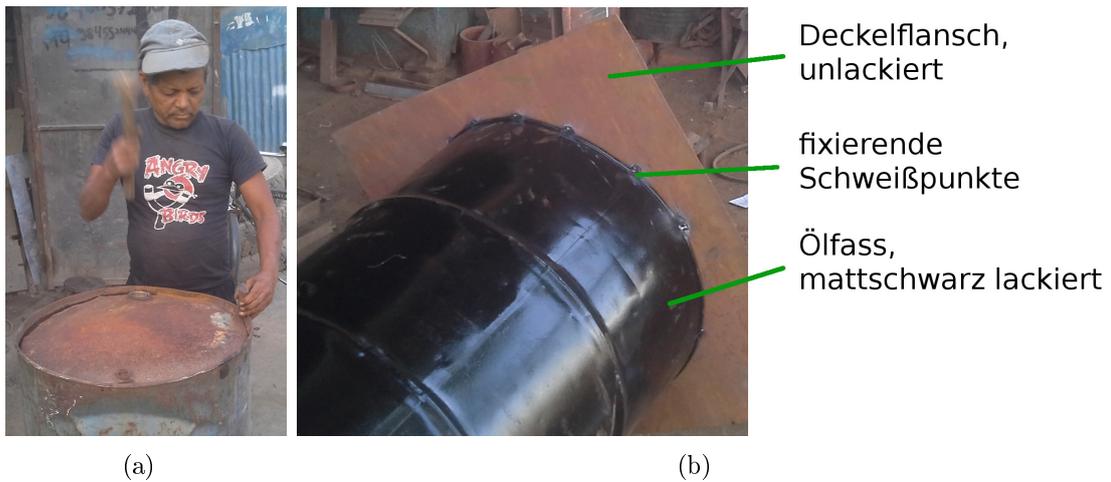


Abbildung 9.6.: Der Deckel des Ölfasses wurde manuell entfernt (a) und an den oberen Rand des schwarz lackierten Fasses wurde ein Flansch geschweißt (b).



Abbildung 9.7.: Bohrungen als Lufteinlass an der Unterseite des TGB

Der Lufteinlass in den TGB befindet sich auch bei diesem Trockner an der Behälterunterseite, indem sie in regelmäßigen Abständen durchbohrt wurde (siehe Abbildung 9.7). Die Löcher haben einen Durchmesser von 6 mm und einen Abstand von etwa 15 mm zueinander.

9. Feldversuch in Nepal

Der Deckel besteht aus mehreren Einzelteilen. Er dient nicht nur als Witterungsschutz und Übergang zum Abluftrohr, sondern auch als Halterung für den Ventilator. Sein Grundbauteil, die Deckelplatte, besteht wie der Flansch aus einem 2 mm starken Stahlblech der gleichen äußeren Form und entsprechenden Lochbohrungen (Abbildung 9.9). Lediglich der Kreisausschnitt in der Mitte hat einen kleineren Durchmesser von $d = 270$ mm, um einen Auslass für die Abluft zu schaffen und zugleich die Montage des Ventilators zu ermöglichen.

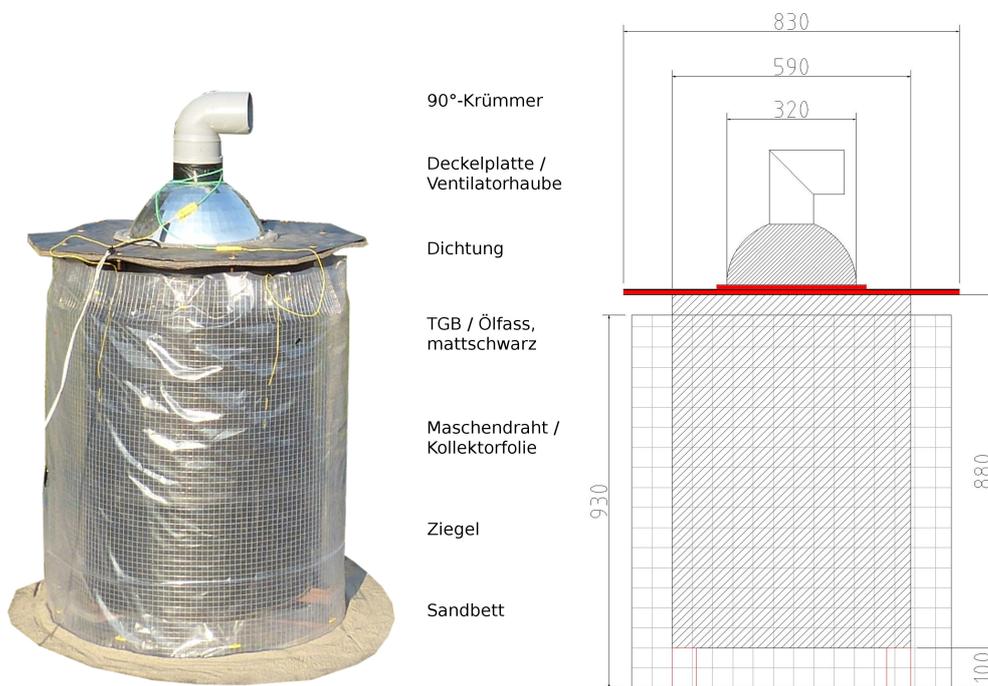


Abbildung 9.8.: Realistische Darstellung (links) und technische Zeichnung (rechts) der Ansicht des Solartrockners aus dem Feldversuch in Nepal; Bemaßung in mm

Ein Lampenschirm aus Weißblech ist auf der Oberseite der Deckelplatte mit Hilfe von selbstschneidenden Blechschrauben montiert worden (Abbildung 9.8). Durch die Flexibilität des Haubenmaterials konnte mit geringem Aufwand ein Übergang zu einem standardmäßigen Kanalgrundrohr DN110 90°-Krümmer geschaffen wer-

9.2. Aufbau und Inbetriebnahme des solaren Holzrockners in Nepal

den. So wird ein Eindringen von Niederschlag durch den Abluftauslass bzw. die Ventilatoröffnung verhindert. Zum Verschluss des Fasses durch den Deckel wurden M8-Stahlschrauben und zugehörige Schraubenmuttern verwendet.

Als Dichtungen zwischen Deckelflansch, -platte und Ventilatorhaube dient sogenannter geschlossenzelliger Schaumstoff aus Polypropylen (PP), der zwar vornehmlich als Isoliermaterial Verwendung findet, sich jedoch durch seine namensgebende Zellstruktur und hohe Flexibilität ebenfalls zur Luftabdichtung eignet. Das Material hat eine Stärke von 10 mm und lässt sich mit einer Haushaltsschere in die gewünschten Formen schneiden.

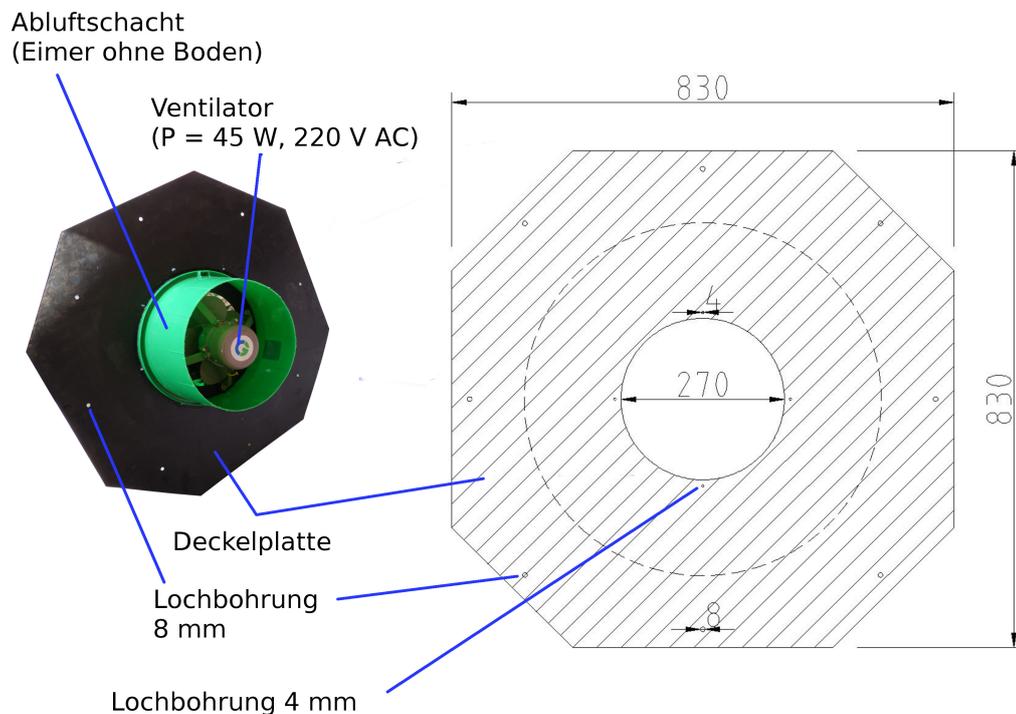


Abbildung 9.9.: Darstellung der Deckelplatte mit Ansicht von unten (links) und technischer Zeichnung mit Ansicht von oben (rechts); Bemaßung in mm

Für die Kollektorabdeckung wurde in diesem Projekt abermals UV-stabile Gewächshausfolie verwendet, die mit Kabelbindern auf einen Maschendraht (Ma-

9. Feldversuch in Nepal

schenweite $h \times b$: 10 mm x 10 mm) gespannt und um das Ölfass herum aufgestellt wurde, wie in Abbildung 9.8 gezeigt. Da die Windlast auf den Kollektor aufgrund des kleineren Trocknermaßstabs wesentlich geringer ausfällt, wurde auf eine mechanische Verbindung zwischen Kollektorfolie und TGB verzichtet.

Insgesamt wurde der Solartrockner in Nepal zwei Tests unterzogen, wobei er im ersten über das öffentliche Stromnetz und im zweiten durch PV betrieben wurde. Die Änderung der elektrischen Versorgung zwang zum Austausch des Wechselstromventilators (AC) durch zwei Gleichstromgeräte (DC).

Abbildung 9.9 zeigt die Anbringung des AC-Ventilators ($P = 40 \text{ W}$) an der Unterseite der Deckelplatte durch Schrauben des Durchmessers $d = 4 \text{ mm}$. Er findet im Normalfall Anwendung in Zu- oder Abluftrohren, um die Durchlüftung von Gebäuden zu unterstützen. Mit der Absicht, die Effizienz des Ventilators zu verbessern und seine Rotation nicht durch das eingelagerte Aufgabegut zu behindern, wurde er in einem improvisierten Luftkanal untergebracht, der aus einem handelsüblichen Kunststoffeimer besteht, dessen Boden entfernt wurde. Die Fixierung des Eimers an der Deckelunterseite erfolgte mit Silikon.

Für den zweiten Test ist die Ventilatoröffnung in der Deckelplatte mit Maschendraht abgedeckt worden, die mittels Kabelbindern an den 4 mm Lochbohrungen fixiert wurde. Auf die gleiche Weise wurden die DC-Ventilatoren mit dem Maschendraht verbunden. Die Luftkanäle bestehen aus Resten der Kollektorfolie, die mit Klebeband positioniert wurde. Aufgrund der relativ kleinen Bauform der DC-Ventilatoren beeinträchtigte das Trockengut nicht deren Betrieb. Abbildung 9.10 zeigt die Befestigung der DC-Ventilatoren an der Unterseite der Deckelplatte.

Das Schaltbild in Abbildung 9.11 stellt ein PV-System im Inselbetrieb dar. Die DC-Ventilatoren ($U = 12 \text{ V}$) sind über einen Laderegler mit dem PV-Modul ($P_{max} = 40 \text{ W}$; $U_{max} = 19 \text{ V}$) und einem Bleiakкумуляtor ($U = 12 \text{ V}$; $Q = 20 \text{ Ah}$) verbunden. Der Laderegler sorgt für eine gleichbleibende Spannungsver-

9.2. Aufbau und Inbetriebnahme des solaren Holzrockners in Nepal

sorgung der Ventilatoren. Der Akkumulator dient der Unterstützung während Betriebszeiten mit temporär niedriger solarer Einstrahlung (z.B. Verschattung durch Wolken). Wie die unterschiedlichen Angaben der elektrischen Leistung P in Abbildung 9.11 verdeutlichen, wurden zwei ungleiche Ventilatoren verwendet. Für einen einwandfreien Betrieb war es unabdingbar, dass die Stromstärken I der Geräte nur gering voneinander abweichen. Andernfalls flöbe der elektrische Strom den Weg des geringsten Widerstands, wodurch nur ein Luftförderer angetrieben würde. Verwendung fanden ein Lüfter für Central Processing Units (CPU) des Herstellers *Intel Corporation* und ein Ventilator, der für den Innenraum von KFZ bestimmt ist und normalerweise über die dort befindliche 12 V Steckdose betrieben wird.

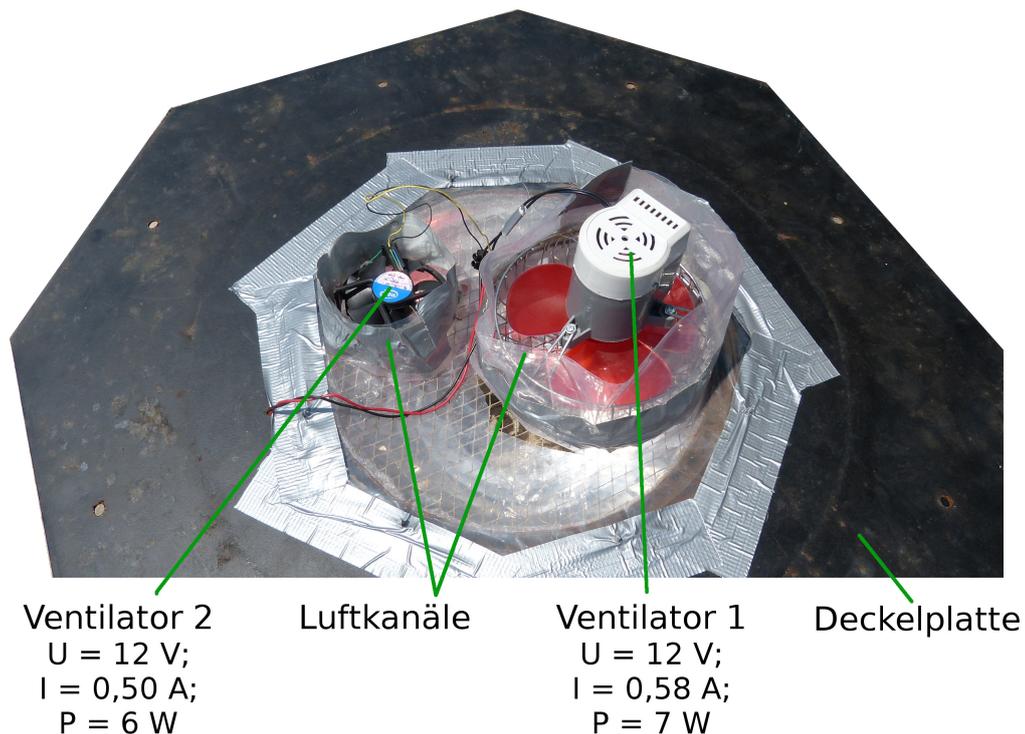


Abbildung 9.10.: Befestigung der DC-Ventilatoren an der Deckelplatte; Februar 2015

9. Feldversuch in Nepal

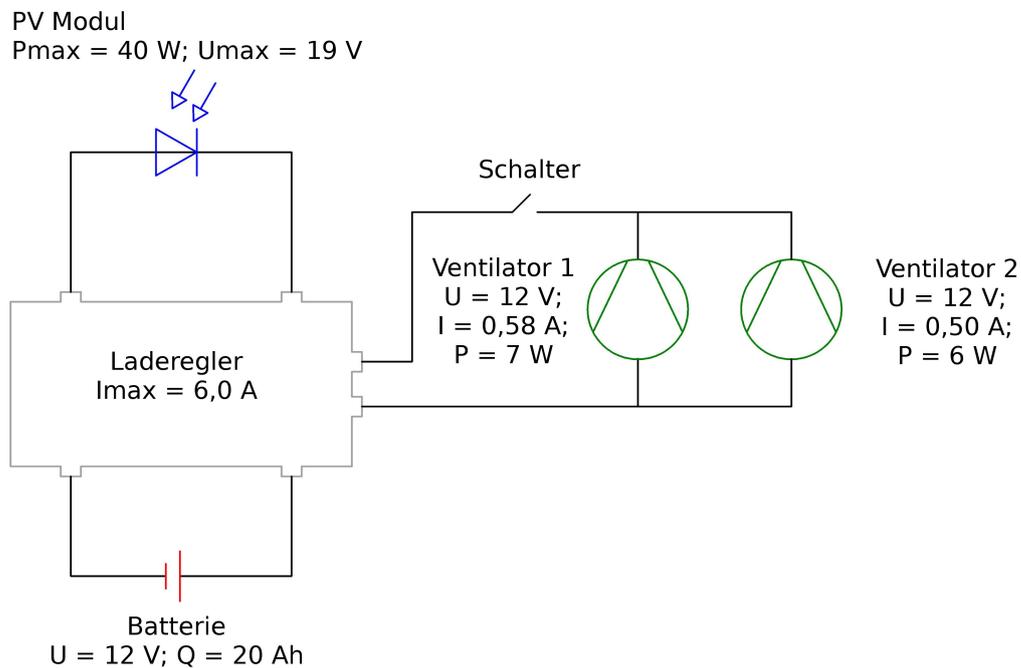


Abbildung 9.11.: Schaltbild der elektrischen Verbindung des Solartrockners im PV-Betrieb

Sowohl die AC- als auch die DC-Konfiguration des Trockners verfügt über einen Kippschalter, mit dem die Stromzufuhr ein- oder abgeschaltet wird.

In Anhang D.1 sind die Kosten des Solartrockners dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass die Materialkosten für die Variante im Netzbetrieb bei EUR 78,28 lagen, wobei der AC-Ventilator mit EUR 37,54 die teuerste Komponente darstellte. Durch die Anschaffung des PV-Systems erhöhten sich die Ausgaben auf EUR 155,12. Hierbei waren der Akkumulator (EUR 42,71) und das PV-Modul (EUR 41,04) die kostenintensivsten Bauteile. In beiden Fällen lagen die Arbeitskosten bei EUR 31,28. Die elektrischen Anschlussarbeiten werden eigenhändig durchgeführt, sodass hierfür keine weiteren Kosten entstanden.

9.3. Versuchsvorbereitung und Datenaufnahme

Wie bereits beschrieben, ist der Solartrockner zwei Tests unterzogen worden. Der erste fand im Zeitraum vom 25.11.2014 bis 20.03.2015 statt. Hierfür wurden drei Bari Frischholz verwendet, welche mit einer Sondergenehmigung der Waldnutzerorganisation FECOFUN geschlagen werden durften. Nach Aussage von GNWALI [2014] handelt es sich dabei um Sal (*Shorea Robusta*), welches für diese Region typisch ist (Abbildung 9.5 (b)).

Zum Vergleich der Leistung des Solartrockners mit der natürlichen Abtrocknung des Holzes unter lokalen klimatischen Bedingungen wurden drei Bari verwendet. Diese wurden im Trockner, auf dem Flachdach des angemieteten Wohnhauses und im Garten platziert. Das Hausdach stellt einen nicht überdachten, unverschatteten Ort dar, während der Garten teils durch Bäume verschattet wurde und somit den realistischen Sammel- und Lagerorten am nächsten kommt. Länge und Durchmesser der Zweige und Äste wurde nach Augenmaß bewertet und möglichst gleichmäßig auf die Bari verteilt, so dass sich annähernd drei gleiche Holzstapel ergaben.

Im zweiten Test, der vom 27.03.2015 bis 16.04.2015 statt fand, war keine Sondergenehmigung zu bekommen, weshalb alternativ auf Bambus zurück gegriffen wurde. Es wurde zudem aus zeitlichen Gründen darauf verzichtet, weitere Bari auf dem Dach oder im Garten zu platzieren. Dieser Versuch zielte nicht darauf ab, einen Vergleich mit der natürlichen Trocknung ziehen zu können, sondern die Funktion des Solartrockners im PV-Betrieb und die Eignung der verwendeten Komponenten zu überprüfen.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem hier beschriebenen Projekt um einen Feldversuch handelt, standen folglich keine Laborgeräte zur Verfügung. Zur Feststellung des Wassergehaltes fand dementsprechend kein Trockenschrank Anwendung sondern ein elektrisches Handgerät (*Conrad Electronic AG; Voltcraft FM-300; Wollerau, Schweiz*). Dieses misst den elektrischen Widerstand des Hol-

9. Feldversuch in Nepal

zes über zwei Messdorne, die in das Material gestochen werden. In beiden Versuchen wurden die Dorne mit einer Tiefe von etwa 2 mm eingeführt, um möglichst vergleichbare Ergebnisse zu erhalten (Abbildung 9.12). In beiden Versuchen wurden je Fraktion 20 Stichproben gezogen, deren Wassergehalte an drei über die Länge des Materials gleich verteilten Messpunkten festgestellt wurde.



Abbildung 9.12.: Holzfeuchtemessgerät *Voltcraft FM-300* [ANONYMUS27, 2016] (a) und Demonstration der Einstichtiefe zur Feuchtemessung mit dem Gerät (b)

Zur Aufzeichnung von Temperatur und relativer Feuchte der Umgebungsluft fand der in Kapitel 4 beschriebene Datenlogger *Voltcraft DL-121TH* Verwendung. Er wurde in einem Abstand von etwa 3 m vom Solartrockner an einer ganzjährig verschatteten Position platziert. Darüber hinaus sind im ersten Test zwei weitere Logger innerhalb des Trockners positioniert worden, deren Zweck die Registrierung der Luftkonditionen am Ein- und Auslass des TGB waren (Abbildung 9.13). Aufgrund der Erkenntnisse aus dem ersten Testlauf, wurde auf die Feststellung von Temperatur und relativer Luftfeuchte am TGB Auslass im zweiten Test verzichtet, wie im Kapitel 9.4 beschrieben ist.

Für die Feststellung und Speicherung der Kollektortemperaturen wurde aber-

9.3. Versuchsvorbereitung und Datenaufnahme

mals das *Extech SDL200* benutzt, dessen Sensoren auch in diesem Projekt in 0° , 90° , 180° und 270° Azimuth, auf halber Höhe des Ölfasses ($h = 440$ mm) angebracht wurden.

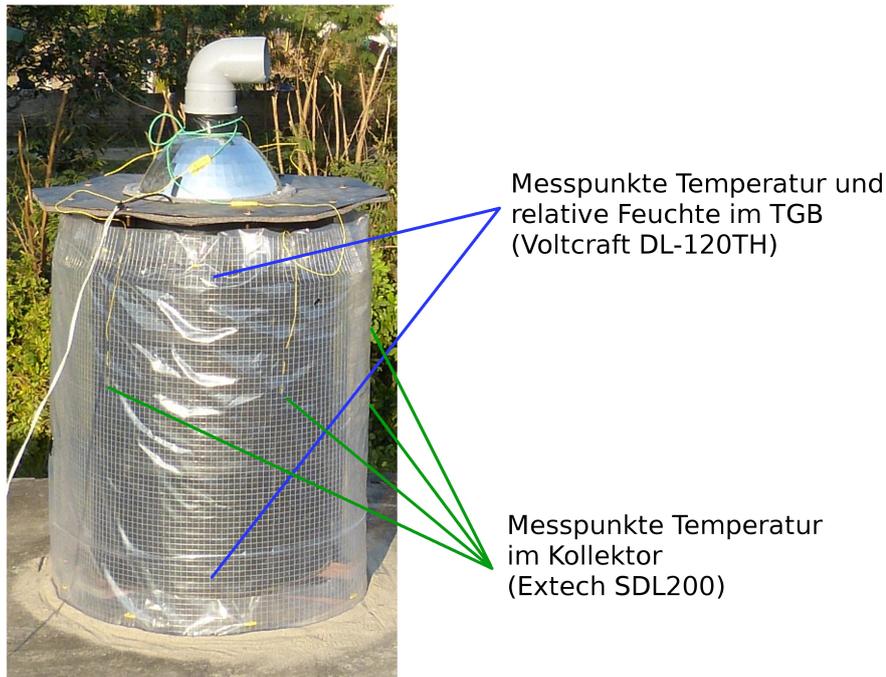


Abbildung 9.13.: Messpunkte für Temperatur und relative Luftfeuchte innerhalb des TGB am Einlass und unterhalb des Ventilators sowie im Solarkollektor auf Höhe $h = 440$ mm

Sowohl die *Votcraft DL-121TH* als auch das *Extech SDL200* wurden so programmiert, dass sie Daten in einem Zeitintervall von $t_I = 300$ s speichern.

Auf die Messung und Einstellung der Geschwindigkeit der Trocknungsluft musste in diesem Projekt verzichtet werden, da kein Anemometer zur Verfügung stand.

Zur Feststellung des Stromverbrauchs des AC-Ventilators wurde ein Stromzähler angeschlossen und täglich abgelesen.

Die Betriebszeit des Trockners beschränkte sich auf die Tagesstunden und

9. Feldversuch in Nepal

richtet sich nach den aktuellen Wetterbedingungen. So kam es während Niederschlagsereignissen und starker Bewölkung zur Abschaltung des Systems.

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

In diesem Unterkapitel werden zunächst die Messergebnisse aus dem ersten Test des ans öffentliche Stromnetz angeschlossenen Solartrockners dargestellt und ausgewertet. Aufgrund einiger Erkenntnisse aus diesem Versuch, wurde ein zweiter Testlauf gestartet, in dem der Trockner über ein PV-Modul mit Strom versorgt wurde. Die erhobenen Messdaten sind im zweiten Abschnitt dieses Unterkapitels beschrieben.

9.4.1. Test 1 - 25.11.2014 bis 20.03.2015

Die Ergebnisse der im vorigen Abschnitt beschriebenen Messung der Wassergehalte aller drei Holzfraktionen des ersten Tests sind in Abbildung 9.14 dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass die Fraktion „Hausdach“ mit 66,63% den höchsten Anfangswassergehalt aufwies, während die Werte der anderen beiden Bari bei knapp unter 60% lagen.

Zu Beginn des Tests wurde der Solartrockner kontinuierlich betrieben, da eine möglichst hohe Vergleichbarkeit mit dem Versuch zur Kaltlufttrocknung und dem Trocknerprototypen am Campus Klein-Altendorf hergestellt werden sollte. In Anhang D.2 sind Diagramme der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte abgebildet, die während der Betriebswochen des Solartrockners mit Hilfe des *Voltcraft DL-121TH* aufgezeichnet wurden. Darin ist zu erkennen, dass die relative Feuchte täglich auf über 80% und zeitweise auf über 90% ansteigt.

Aus Abbildung 9.14 wird zwar deutlich, dass der Wassergehalt des Holzes im

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

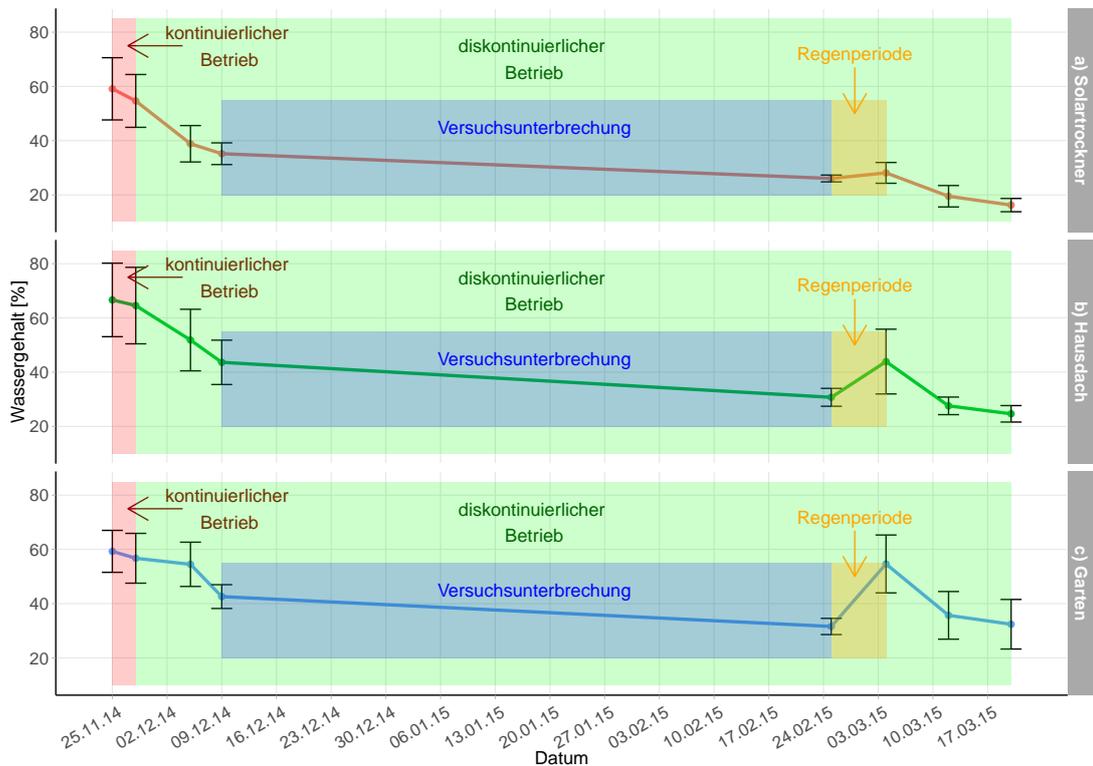


Abbildung 9.14.: Entwicklung des Wassergehaltes des Holzes an den unterschiedlichen Lagerorten; $n = 20$ Stichproben; Standort: Gulariya, Bar-diya; Test 1

Trockner stärker abnimmt als im Fall der übrigen Fraktionen, jedoch ließ sich vermuten, dass die feuchteren Abend- und Nachtstunden für eine Rückbefeuchtung des Aufgabegutes sorgten. Aus diesem Grund wurde nach den ersten drei Testtagen auf einen diskontinuierlichen Betrieb während der Tagesstunden umgestellt. In den folgenden Tagen ist bei dem Aufgabegut im Trockner eine etwas stärkere Abnahme des Wassergehaltes zu erkennen als bei der Fraktion „Hausdach“.

Am 09.12.2014, nach etwa zwei Testwochen, wurde der Versuch unterbrochen, da zunächst weitere Arbeitsverpflichtungen einen mehrwöchigen Aufenthalt in der Landeshauptstadt Kathmandu erforderten. Aus diesem Grund wurde das Holz aller drei Fraktionen in einem kühlen, dunklen Zimmer des Wohnhauses ver-

9. Feldversuch in Nepal

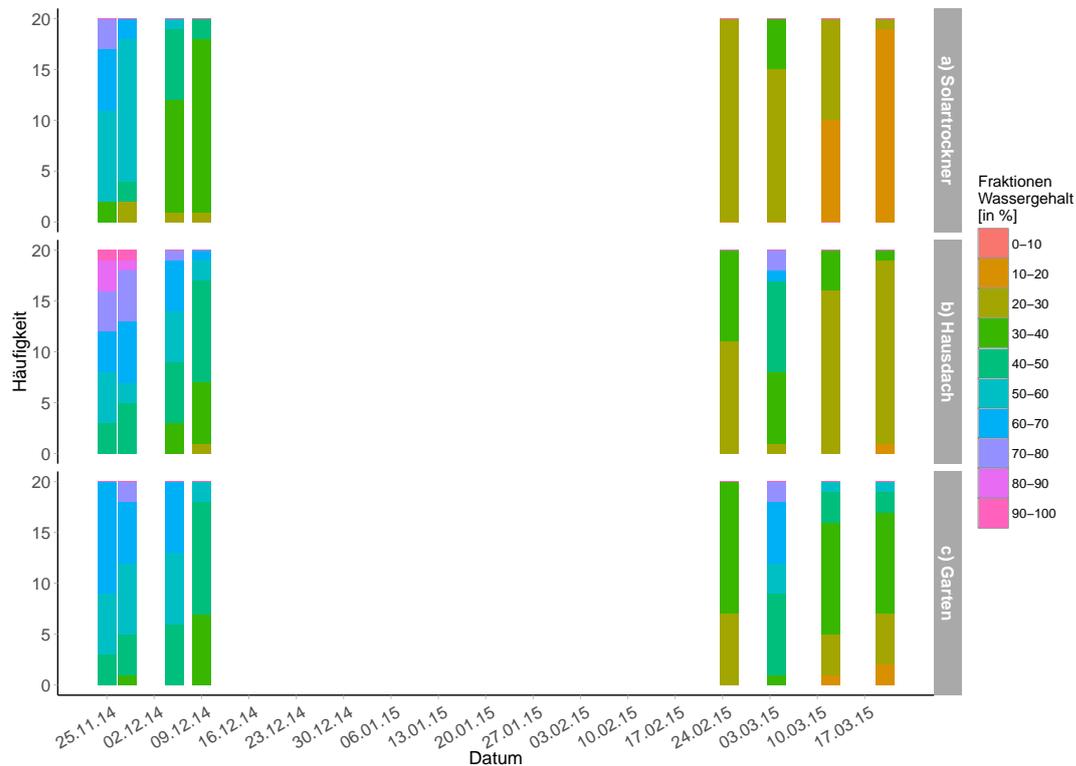


Abbildung 9.15.: Entwicklung des Wassergehaltes anhand der Holzstichproben aus den unterschiedlich gelagerten Bari durch Einteilung in Prozentfraktionen; $n = 20$ Stichproben; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1

staut, um die natürliche Trocknung auf ein Minimum zu reduzieren. Die für Mitte Januar 2015 geplante Rückkehr ins Projektgebiet und die Wiederaufnahme des Trocknertests wurden durch einen landesweiten Generalstreik und ein damit verbundenes Fahrverbot für GIZ Mitarbeiter verhindert. Erst am 25.02.2015 konnte der Test fortgesetzt werden. Wie aus der Abbildung deutlich wird, fand in dem Unterbrechungszeitraum in allen Fraktionen eine nahezu identische Abnahme des Wassergehaltes statt.

In den darauf folgenden Tagen kam es bis zum 04.03.2015 zu häufigen, starken Niederschlägen, die speziell das im freien gelagerte Holz rückbefeuchteten. So stieg der Wassergehalt des im Garten gelagerten Holzes von etwa 32% auf 50%

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

an. Sogar bei dem Aufgabegut im Solartrockner konnte eine leichte Erhöhung des Wassergehaltes von 26% auf 28% festgestellt werden. Dass das Niederschlagswasser lediglich oberflächlich in das Holz eindrang, zeigt die darauf folgende Messung am 12.03.2015, bei der stark reduzierte Wassergehalte festgestellt wurden.

Der Test wurde am 20.03.2015 beendet. An diesem Tag wurden durch eine abschließende Messung Wassergehalte von 16,23% (Solartrockner), 24,63% (Hausdach) und 32,40% (Garten) festgestellt.

Abbildung 9.15 verdeutlicht die Trocknungsprozesse nochmals durch eine andere Darstellungsweise. Hierbei wurden die Ergebnisse der Stichproben in Wassergehaltsfraktionen zu jeweils 10% eingeteilt und aufsummiert. Während die Wassergehalte am Anfang des Tests innerhalb der einzelnen Bari noch stark schwanken, gleichen sie sich mit fortlaufendem Trocknungsprozess immer weiter an. Dies ist wiederum auf die bereits in Kapitel 6 beschriebene exponentiell verlaufende Trocknungskurve zurückzuführen.

Während des ersten Tests, in dem der Trockner an das öffentliche Stromnetz angeschlossen war, sind sowohl die täglichen Ein- und Ausschaltzeiten (Betriebszeit) als auch die Stromverbräuche in einem Logbuch notiert worden. Dies war zur Feststellung der tatsächlichen Ventilatorlaufzeiten unabdingbar, da diese aufgrund der bereits beschriebenen Stromausfallzeiten von der Betriebszeit abweichen. Abbildung 9.16 stellt diese Unterschiede dar. In den ersten drei Testtagen sind Betriebs- und Laufzeit identisch, da der Trockner kontinuierlich betrieben wurde. Danach schwankt die Betriebszeit zwischen $t_B = 0,00$ h und 12,67 h. Die Laufzeit t_L betrug zwischen 0,00 h und 12,00 h. Im diskontinuierlichen Betrieb lag die mittlere Ausnutzung der Betriebszeit bei $51,63 \pm 26,51\%$.

In einem weiteren Auswertungsschritt wurden die täglich festgestellten Stromverbräuche entsprechend den Intervallen der Holzfeuchtebestimmung aufsummiert und die Differenz der Wassergehalte zwischen den aufeinander folgenden

9. Feldversuch in Nepal

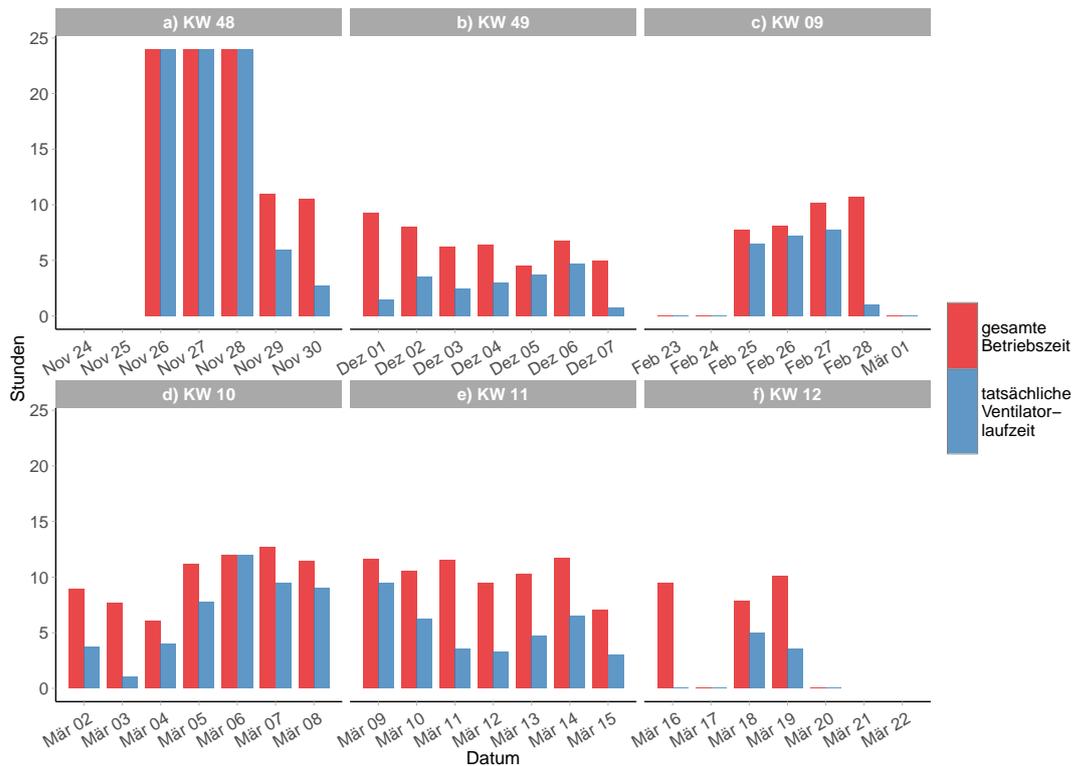


Abbildung 9.16.: Gesamte tägliche Betriebszeit und tatsächliche Laufzeit des Solartrockners im AC-Betrieb; Einteilung nach Kalenderwochen (KW); Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1

Probenahmetagen festgestellt. Wie Abbildung 9.17 erahnen lässt, besteht lediglich ein geringer Zusammenhang zwischen diesen Werten. Diese Vermutung wird durch eine Korrelationsanalyse und den dadurch ermittelten, geringen Korrelationswert von $R^2 = 0,153$ bestätigt.

Der Stromverbrauch betrug über die gesamte Testlaufzeit 8,13 kWh, wobei 21,40% davon während des kontinuierlichen Betriebs verbraucht wurden. Laut mündlicher Aussage des *Electricity Office Bardiya* betragen die Stromkosten für Privathaushalte NPR 9,00 kWh⁻¹ (EUR 0,08 kWh⁻¹; Umrechnungskurs: NPR 1,00 $\hat{=}$ EUR 0,00834; Stand: 14.03.2016) [ANONYMUS23, 2015]. Somit entstanden Betriebskosten in Höhe von EUR 0,65.

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

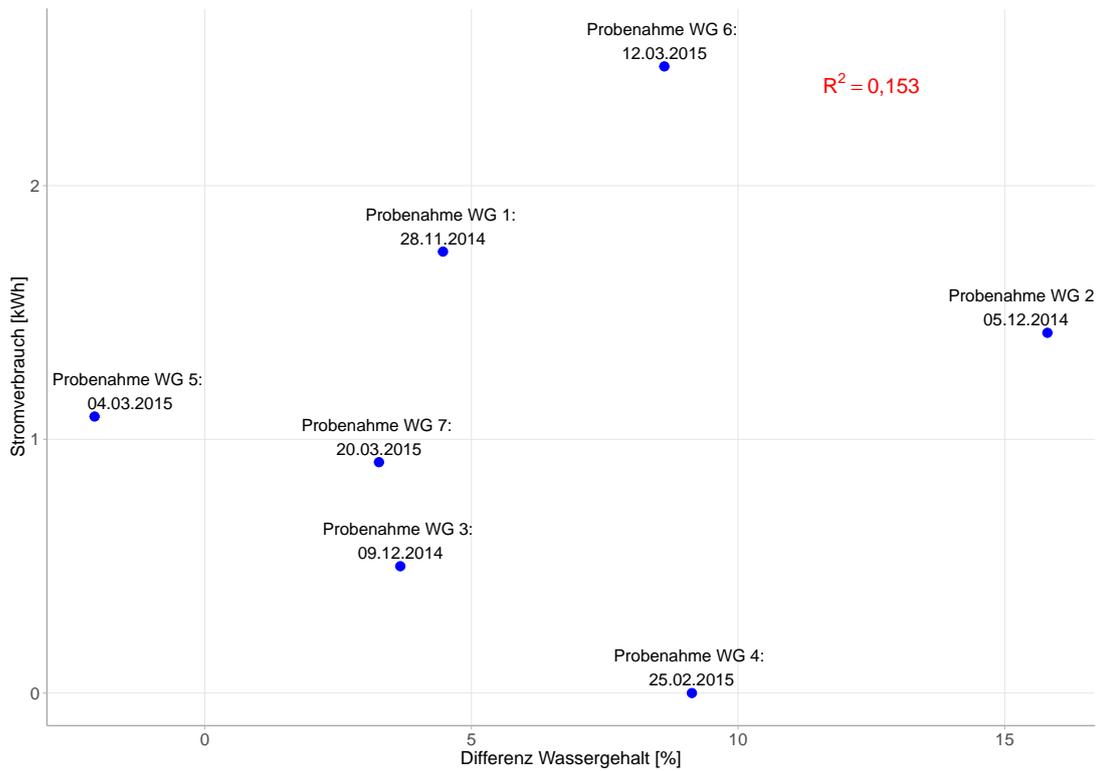


Abbildung 9.17.: Entsprechend den Intervallen der Wassergehaltsbestimmung aufsummierter Stromverbrauch in Abhängigkeit von den ermittelten Wassergehaltsdifferenzen; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1: 25.11.2014 bis 20.03.2015

Die Temperaturwerte, die an den einzelnen Messstellen (Kollektoroberfläche, TGB Ein- und Auslass, Umgebung) am 29.11.2014, 11.03.2015 und 19.03.2015 während der Betriebszeit erhoben wurden, sind in den Abbildungen 9.18, 9.21 und 9.22 dargestellt.

Am vierten Tag nach dem Start des ersten Tests (29.11.2014) betrug die maximale Temperatur der Umgebungsluft um 15:05 Uhr Ortszeit 27,1°C. Nach den Eintragungen im Logbuch handelte es sich um einen wolkenlosen Tag. Die Kollektortemperatur stieg auf einen Maximalwert von 59,6°C. Dieser Wert wurde vom südwärts orientierten K-Fühler um 13:25 Uhr auf der Oberfläche erfasst. Am TGB

9. Feldversuch in Nepal

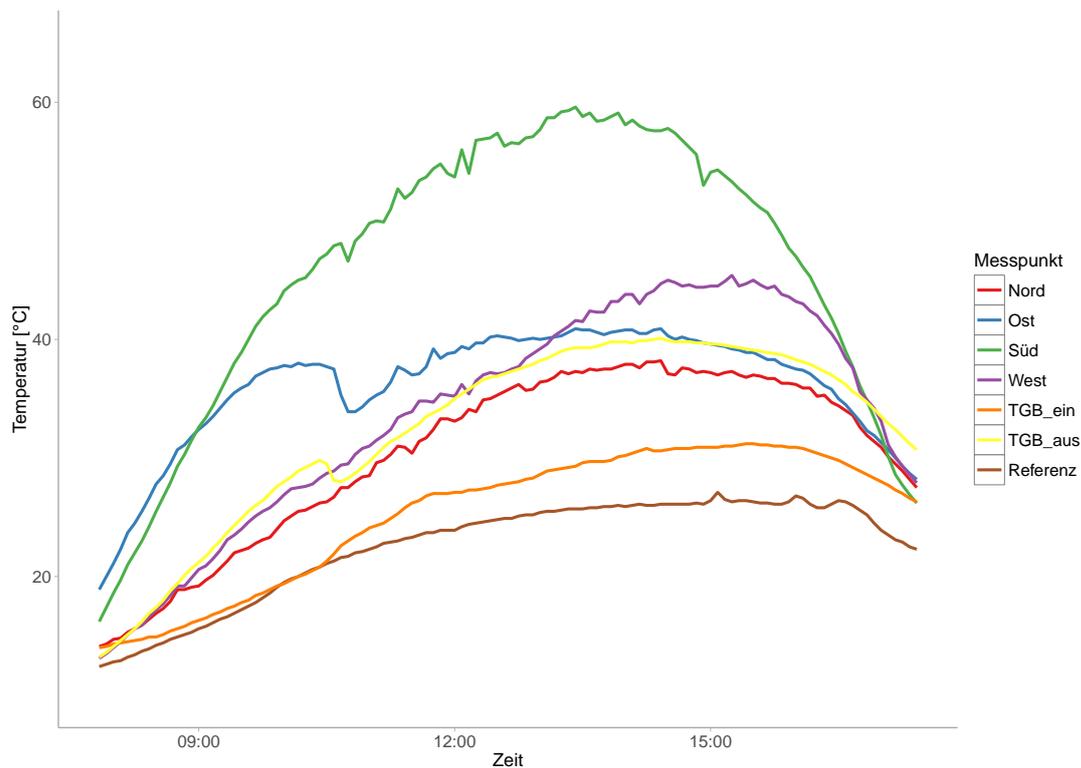


Abbildung 9.18.: Temperaturentwicklung der Kollektoroberfläche in 0°, 90°, 180° und 270° Azimuth sowie am TGB Ein- und Auslass und der Umgebung (Referenz); Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1, Tag 4: 29.11.2014

Einlass wurde die höchste Lufttemperatur mit 31,2°C um 15:25 Uhr und 15:30 Uhr registriert. Mit der Positionierung eines Datenloggers am Ausgang des TGB war beabsichtigt, den Trocknungsprozess anhand der Temperaturentwicklung zu verdeutlichen. Theoretisch wäre es, wie bereits in Kapitel 7 beschrieben, im Fall einer Entfeuchtung des Holzes zu einer Temperaturabsenkung gekommen, sodass die Ausgangs- unter der Eingangstemperatur läge. Abbildung 9.18 zeigt jedoch einen gänzlich anderen Temperaturverlauf, in dem die Temperatur am TGB Auslass noch über den in nördlicher Kollektorausrichtung gemessenen Werten liegt. Diese Tatsache führt zu dem Schluss, dass die Werte durch die natürliche Aufheizung des TGB stark beeinflusst wurden und somit für diese Auswertung keine

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

relevanten Ergebnisse liefern. Sie werden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Abbildung 9.18 zeigt zudem das Verhalten der Temperatur am TGB Einlass zum Ende des Load-Shedding um 10:30 Uhr. Es wird deutlich, dass die Stromversorgung des Ventilators für eine konstante Zufuhr vorgewärmter Frischluft sorgt. Die maximal erreichte Temperaturdifferenz zwischen der unkonditionierten Frischluft (Referenz) und der Messstelle am TGB Einlass lag bei $4,9^{\circ}\text{C}$. Dieser Wert wurde über einen Zeitraum von etwa 20 Minuten zwischen 15:30 Uhr und 15:50 Uhr registriert. Um 16:30 Uhr folgte nach einer Laufzeit von sechs Stunden (siehe Abbildung 9.16) ein weiterer Stromausfall.

Die Berechnung des Kollektorwirkungsgrades η_K erfolgt nach folgender Formel:

$$\eta_K = \frac{\Delta T_{real}}{\Delta T_{max}} \quad (9.1)$$

Hierin ist ΔT_{real} die tatsächlich erreichte Differenz zwischen der Lufttemperatur am TGB Einlass und der Umgebung und ΔT_{max} die Differenz zwischen der Temperatur auf der Kollektoroberfläche und der Umgebung.

Daraus ergeben sich für die drei untersuchten Betriebstage die in Abbildung 9.19 gezeigten Kurvenverläufe. Am vierten Testtag nimmt der Wirkungsgrad ab dem Zeitpunkt der Stromversorgung zunächst stark zu. Er steigt innerhalb der ersten 1,5 h von 0% auf 20% an. Der maximale Wirkungsgrad, der während der Laufzeit registriert wurde, beträgt 33,65% (16:20 Uhr). Der starke Anstieg nach 16:30 Uhr ist darauf zurück zu führen, dass die Temperatur im Kollektor mit dem Untergang der Sonne schnell auf das Niveau am TGB Einlass absank.

Es wird zudem deutlich, dass die starke solare Einstrahlung während der Mittagszeit zwar einen kurzzeitigen Anstieg des Wirkungsgrades auf über 20% nach sich zieht, allerdings wird das Maximum während der Laufzeit, wie beschrieben, erst am späten Nachmittag erreicht. Dies ist durch den niedrigen Sonnenstand

9. Feldversuch in Nepal

kurz vorm Untergang und die damit verbundene, annähernd senkrechte Einstrahlung auf die Oberfläche des Ölfasses zu erklären.

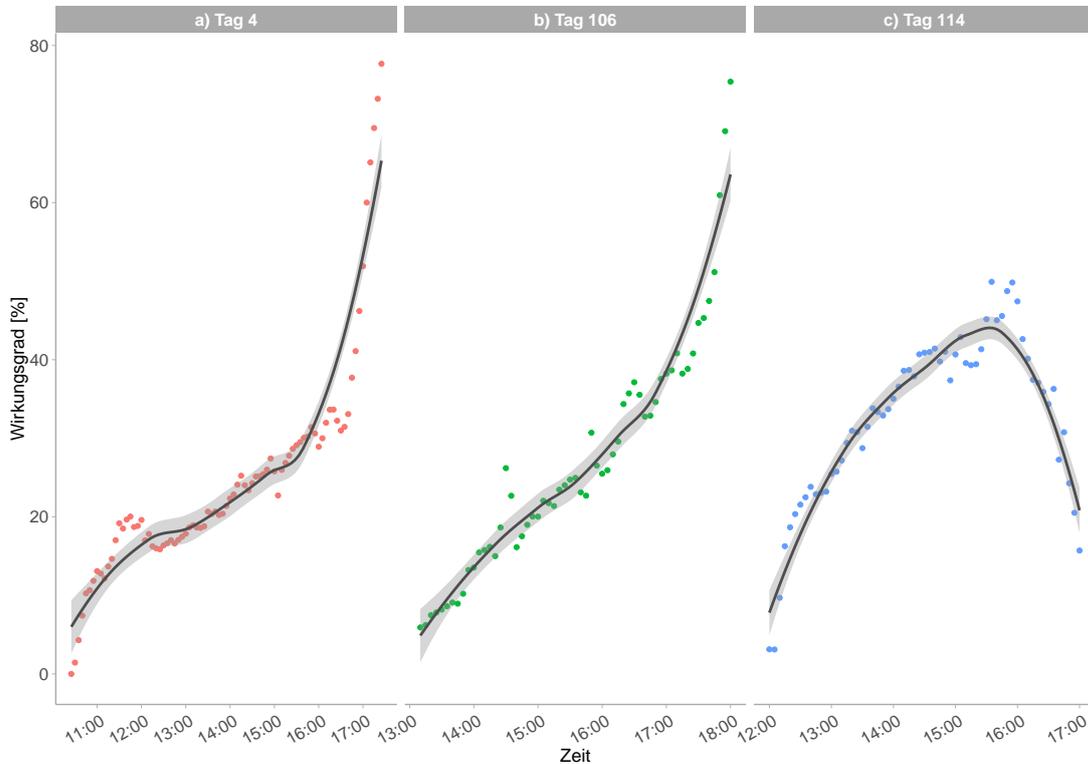


Abbildung 9.19.: Entwicklung des Kollektorwirkungsgrades während der Betriebszeit am 29.11.2014 (Tag 4), 11.03.2015 (Tag 106) und 19.03.2015 (Tag 114); Standort: Gulariya, Bardiya

Abbildung 9.20 zeigt die Kurvenverläufe der relativen Luftfeuchte an den drei untersuchten Betriebstagen. Während der beschriebenen Laufzeit des Ventilators am vierten Testtag von 10:30 Uhr bis 16:30 Uhr kommt es durch die Vorwärmung der Trocknungsluft im Kollektor zu einer Absenkung der relativen Feuchte auf einen Minimalwert von 42,7% (14:20 Uhr). Zur gleichen Zeit liegt die relative Feuchte der Umgebungsluft bei 54,3%. Die größte Differenz zwischen der Kondition der Umgebungsluft und der Trocknungsluft am TGB Einlass beträgt 12,9% und wurde um 14:40 Uhr registriert.

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

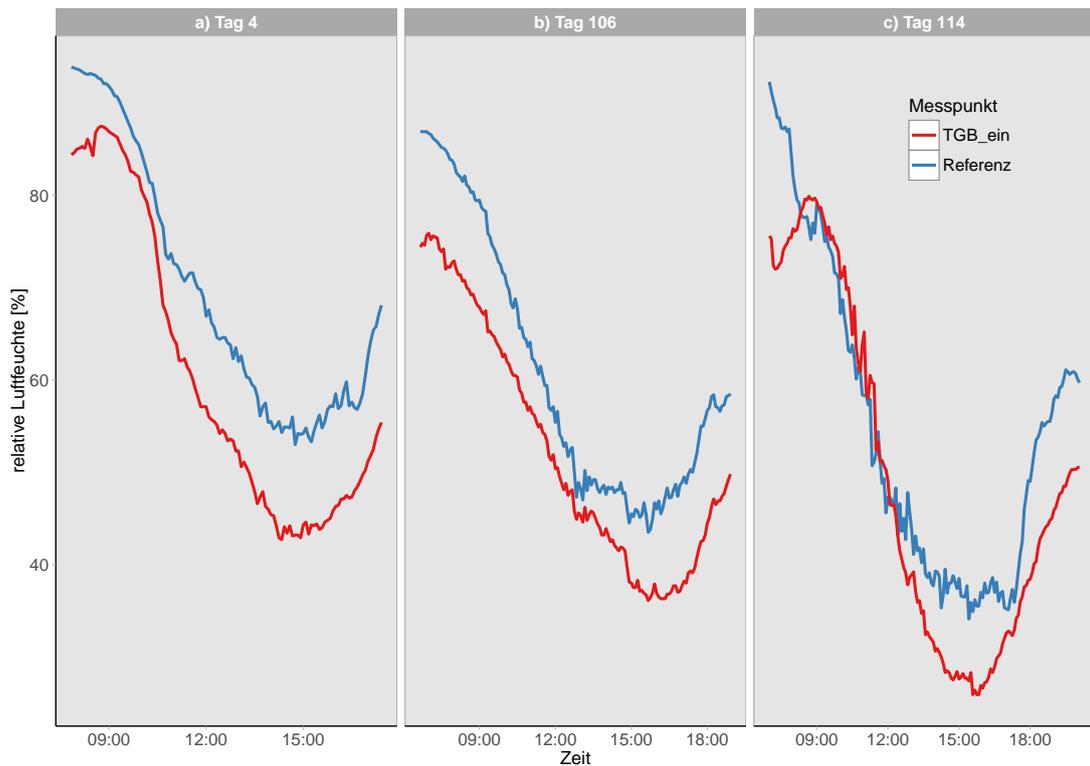


Abbildung 9.20.: Entwicklung der relativen Feuchte der Umgebung (Referenz) und am TGB Einlass; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1, Tag 4 (29.11.2014), Tag 106 (11.03.2015), Tag 114 (19.03.2015)

Die Kurvenverläufe der Temperaturdaten des 11.03.2015 (Tag 106) sind den vorher beschriebenen des vierten Testtages ähnlich (Abbildung 9.21). Die höchste Kollektortemperatur wurde um 12:40 Uhr in südlicher Ausrichtung mit $58,9^{\circ}\text{C}$ festgestellt. Allerdings wurde der Ventilator lediglich im Zeitraum von 13:30 Uhr bis 17:00 Uhr mit Strom versorgt. In diesem Zeitraum lag die maximale Kollektortemperatur bei $57,2^{\circ}\text{C}$ (13:45 Uhr). Die Höchstwerte der Umgebung und am TGB Einlass lagen bei $31,8^{\circ}\text{C}$ (15:40 Uhr) und $35,2^{\circ}\text{C}$ (15:35 Uhr). Die größte Differenz zwischen diesen Messpunkten stellte sich zwischen 16:20 Uhr und 16:25 Uhr mit $4,5^{\circ}\text{C}$ ein.

Der maximale Wirkungsgrad des Solarkollektors, der sich innerhalb der Laufzeit ergab, wurde zum Ende der Stromversorgung mit $38,22\%$ (17:00 Uhr) regis-

9. Feldversuch in Nepal

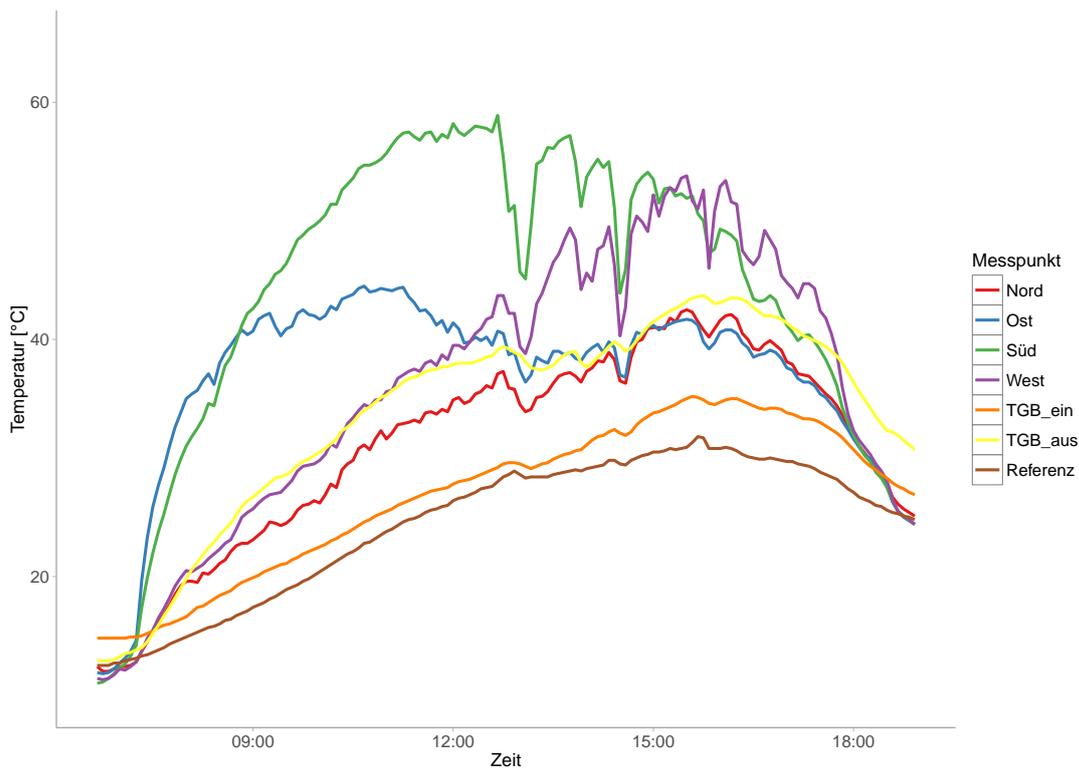


Abbildung 9.21.: Temperaturentwicklung der Kollektoroberfläche in 0° , 90° , 180° und 270° Azimuth sowie am TGB Ein- und Auslass und der Umgebung (Referenz); Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1, Tag 106: 11.03.2015

triert. Abbildung 9.19 zeigt auch für diesen Testtag einen Anstieg der Wirkungsgradkurve zum Ende der Betriebszeit bzw. während des Sonnenuntergangs.

Die minimale relative Luftfeuchte wird am TGB Einlass um 15:40 Uhr mit 36,1% registriert (Abbildung 9.20). Die größte Differenz zwischen Umgebungs- und Trocknungsluft wurde um 16:25 Uhr und 16:55 Uhr mit 11,5% festgestellt.

Am 19.03.2015, dem 114. Testtag, wurde der AC-Ventilator von 12:00 Uhr bis 15:30 Uhr mit elektrischem Strom versorgt. Wie Abbildung 9.22 verdeutlicht, lagen die Spitzentemperaturen im Kollektor ($59,4^\circ\text{C}$ um 16:15 Uhr in westlicher Ausrichtung) und der Umgebung ($33,9^\circ\text{C}$ um 17:20 Uhr) außerhalb der Laufzeit. Die höchsten Werte während der Stromversorgung betragen für die Umgebung

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

32,1°C um 15:30 Uhr und im Kollektor 59,1°C um 12:05 Uhr in 180° Azimuth. Die maximale Temperatur am TGB Einlass wurde zwischen 15:30 Uhr und 15:35 Uhr mit 39,2°C gemessen. Die höchste Differenz zwischen TGB Einlass und Umgebung betrug 7,5°C um 14:35 Uhr.

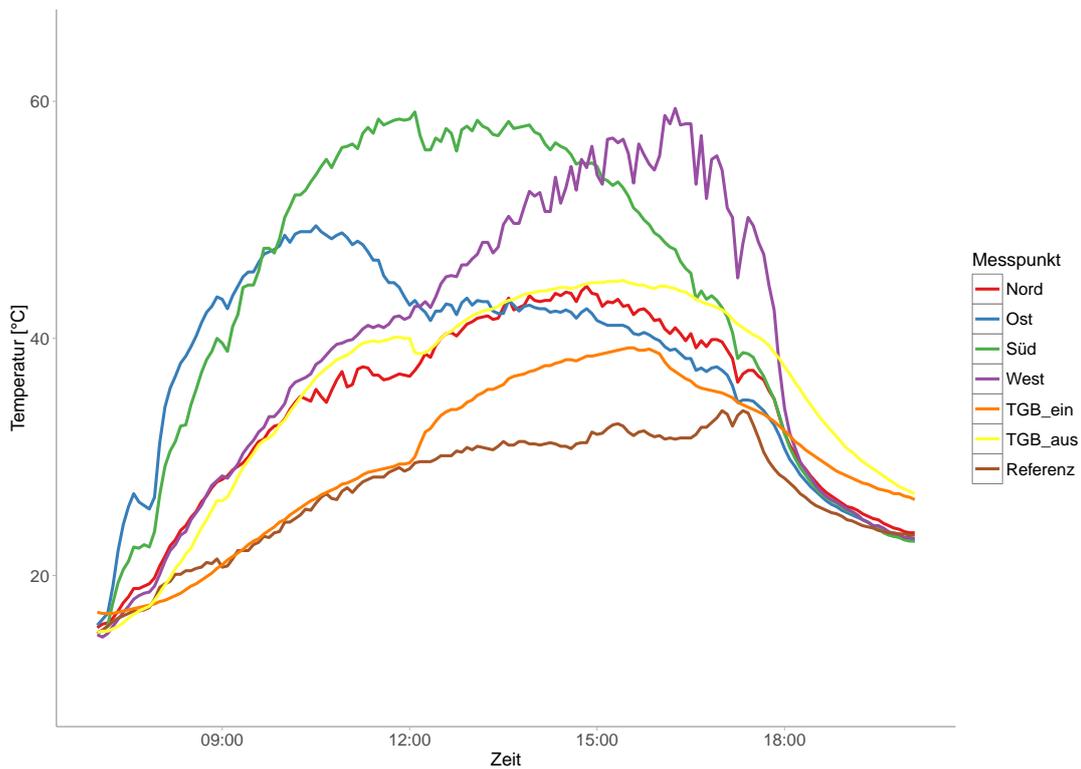


Abbildung 9.22.: Temperaturentwicklung der Kollektoroberfläche in 0°, 90°, 180° und 270°Azimuth sowie am TGB Ein- und Auslass und der Umgebung (Referenz); Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1, Tag 114: 19.03.2015

Um 15:30 Uhr, zum Ende der Ventilatorlaufzeit, stellte sich der höchste Kollektorstromwirkungsgrad der drei untersuchten Testtage von 45,15% ein. Die Kurve in Abbildung 9.19 zeigt im Anschluss an die Stromversorgung jedoch keinen Anstieg des Wirkungsgrades sondern einen Abfall. Dies ist darauf zurück zu führen, dass das Load-Shedding nicht mit oder kurz vor dem Sonnenuntergang einsetzte. Dadurch blieben die Kollektortemperaturen hoch und die Temperatur am TGB

9. Feldversuch in Nepal

Einlass nahm nur langsam ab.

Die erfassten Werte der relativen Feuchte der Umgebung und am TGB Einlass erreichen am 114. Testtag niedrigere Werte als an den übrigen untersuchten Betriebstagen. Am TGB Einlass wird der Tiefstwert von 27,4% um 15:25 Uhr registriert und die maximale Differenz zwischen den Messpunkten beträgt um 14:45 Uhr 11,3%.

Durch den ersten Test des Solartrockners und die aufgezeichneten sowie erhobenen Messwerte konnte seine technische Funktionsfähigkeit bestätigt werden. Während der gesamten Testzeit kam es darüber hinaus zu keinerlei Ausfällen oder notwendigen Reparaturarbeiten, wodurch die Eignung der verwendeten Materialien für den Testzeitraum bestätigt wird. Auch wurde eine Verkürzung der Trocknungszeit durch die wiederholte Bestimmung der Wassergehalte des Aufgabegutes festgestellt. Aufgrund der hohen Stromausfallzeiten und der damit verbundenen geringen Ausnutzung der täglichen Betriebsstunden liegt die Vermutung nahe, dass die zeitlichen Einsparungen im Falle einer ununterbrochenen Stromversorgung ungleich höher ausfielen. Zu diesem Zweck wurde der Solartrockner auf den vom Stromnetz unabhängigen Betrieb mittels PV System umgebaut. Die zugehörigen Messergebnisse werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

Wie auch im Fall des Solartrockners am Campus Klein-Altendorf konnte nach Beendigung des Tests keine Schimmelbildung im Aufgabegut durch visuelle Prüfung nachgewiesen werden (Abbildung 9.23 (a)). Wie Abbildung 9.23 (b) zeigt, trifft dies jedoch nicht auf die Bari zu, die auf dem Flachdach bzw. im Garten gelagert wurden. Es wurden bereits zum Zeitpunkt der Versuchsunterbrechung am 09.12.2014, nach einer Versuchszeit von 14 Tagen, grünliche Verfärbungen auf den Schnittflächen der Äste und Zweige festgestellt. Ob es sich dabei bereits um Schimmel handelt, kann ohne genauere Untersuchung nicht bestätigt werden.

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse



Abbildung 9.23.: Das Aufgabegut im Trockner (a) zeigt keine Schimmelspuren, während das im freien gelagerte Holz (b) nach 14 Tagen Testzeit bereits grünliche Verfärbungen aufwies. Standort: Gulariya, Bardiya; Tag 14: 09.12.2014

Zweifellos wies das im Trockner eingelagerte Material ein qualitativ hochwertigeres Erscheinungsbild auf.

9.4.2. Test 2 - 27.03.2015 bis 16.04.2015

In Kapitel 9.3 wurde bereits beschrieben, dass der PV betriebene Solartrockner mit einem Bari Bambus befüllt wurde. Auf die Platzierung weiterer Bari auf dem Hausdach und im Garten musste aus zeitlichen Gründen verzichtet werden, da die Projektarbeit in Nepal kurz vor dem Ende stand. Somit lag der Schwerpunkt bei diesem Testlauf auf der Funktionsüberprüfung des Trockners im PV-Betrieb, durch den eine gänzliche Unabhängigkeit vom Stromnetz erreicht wurde. Dies wiederum führt zu einer wesentlich höheren Flexibilität in der Wahl des Aufstellungsortes und erhöht so die Einsatzmöglichkeiten.

Der anfänglich errechnete durchschnittliche Wassergehalt der 20 Stichproben betrug $50,43 \pm 9,50\%$. In den knapp vier Betriebswochen des Trockners sank der

9. Feldversuch in Nepal

Wassergehalt auf $18,30 \pm 4,66\%$ ab. Insgesamt wurde der Wassergehalt vier Mal gemessen, wie die Abbildungen 9.24 und 9.25 zeigen.

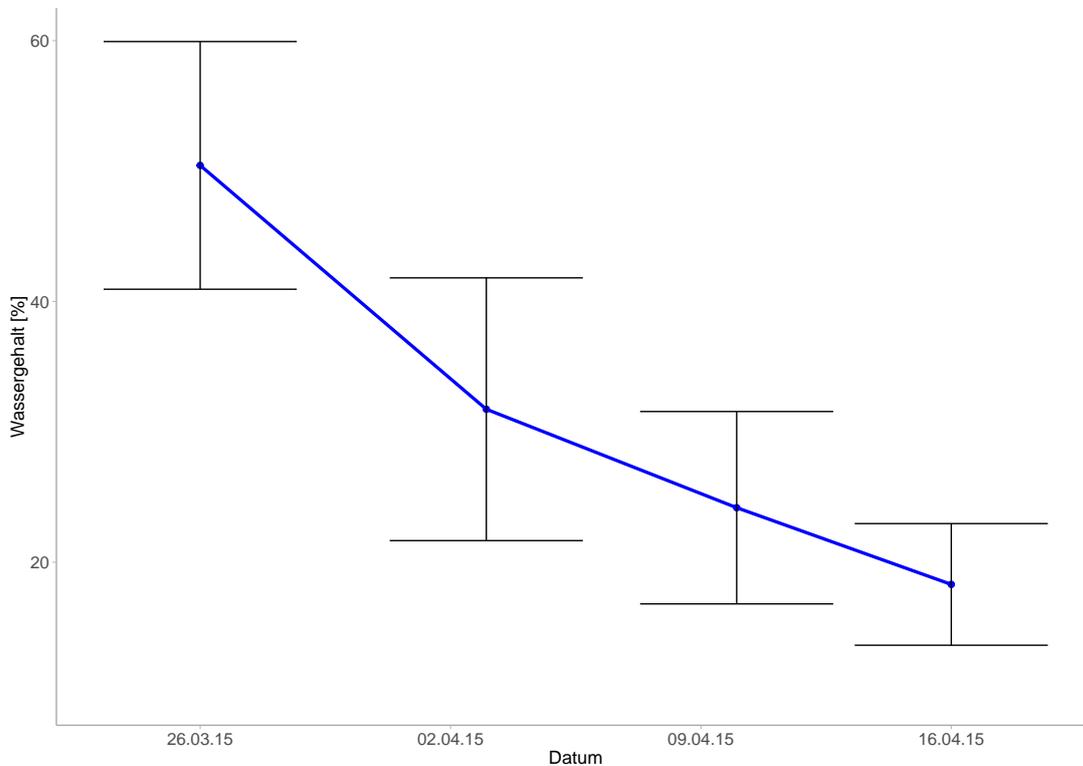


Abbildung 9.24.: Darstellung der Entwicklung des Wassergehaltes des im Solar-trockner eingelagerten Bambus; $n = 20$ Stichproben; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 2

Die Temperaturwerte, die in der Umgebung, im Kollektor und am TGB Einlass am 02.04.2015 gemessen wurden, sind in Abbildung 9.26 dargestellt. Es handelt sich hierbei um den siebten Tag des zweiten Tests. Laut Logbuch war das Wetter wolkenlos, allerdings wehte ein stark böiger Wind. Der Trockner wurde um 07:45 Uhr in Betrieb genommen und lief durchgängig bis 18:15 Uhr. Zwischen 14:20 Uhr und 14:25 Uhr betrug die maximale Umgebungstemperatur $46,4^{\circ}\text{C}$. Wie Abbildung 9.26 verdeutlicht, zeigt jedoch keine andere Temperaturkurve diese signifikante Spitze. Dies lässt darauf schließen, dass der Datenlogger für die Um-

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

gebungskonditionen kurzzeitig der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt war. Es kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Temperatur in verschatteter Umgebung etwa 8°C bis 10°C niedriger war.

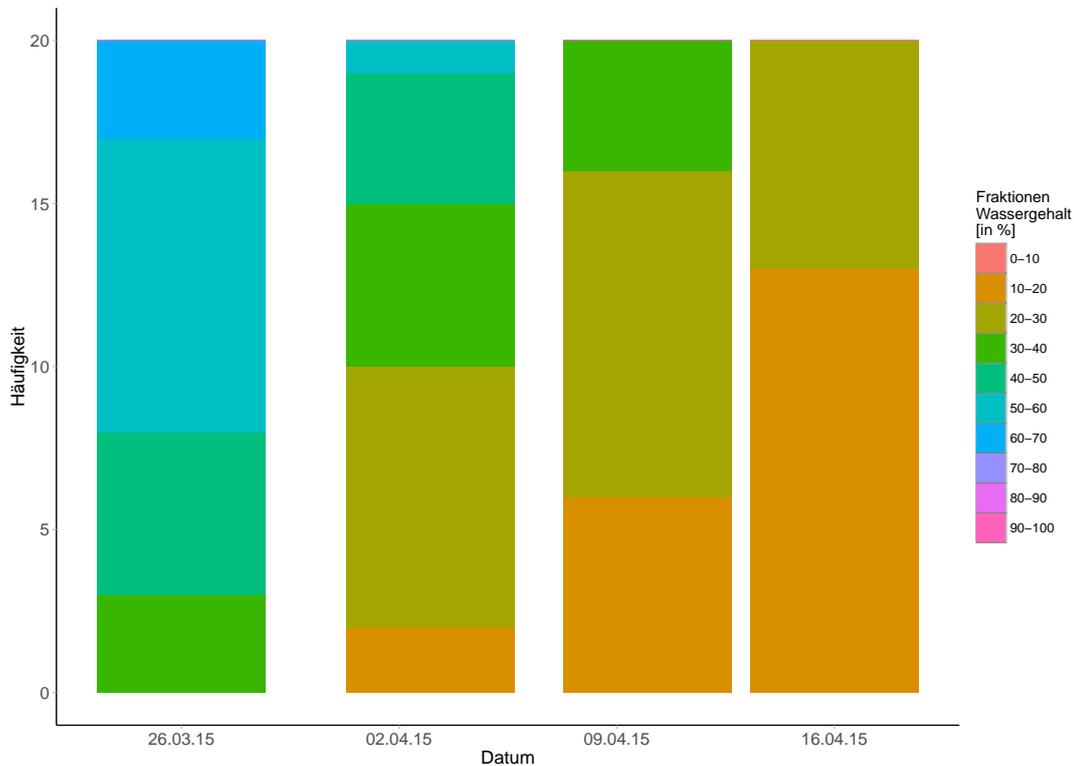


Abbildung 9.25.: Entwicklung des Wassergehaltes anhand der Bambusstichproben aus dem im Solartrockner eingelagerten Bari durch Einteilung in Prozentfraktionen; $n = 20$ Stichproben; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 2

Der Höchstwert im Kollektor wurde um 15:15 Uhr mit $60,4^{\circ}\text{C}$ ermittelt. Um 16:00 Uhr wurde die maximale Temperaturdifferenz zwischen Umgebung (Referenz) und TGB Einlass mit $5,4^{\circ}\text{C}$ ermittelt.

Es fällt auf, dass die in Abbildung 9.26 gezeigte Kurve der Temperatur am TGB Einlass zwar konstant über der der Umgebungsluft liegt, allerdings nimmt deren Differenz zunächst bis etwa 11:00 Uhr ab, bevor sie anschließend wieder leicht ansteigt. Der Grund dafür könnte in der zu dieser Jahreszeit hoch stehen-

9. Feldversuch in Nepal

den Sonne und der damit verbundenen schlechteren Wärmeausbeute durch den Kollektor liegen. Diese These wird dadurch unterstützt, dass die maximale Temperaturdifferenz ($5,4^{\circ}\text{C}$) erst um 16:00 Uhr registriert wurde, als die Sonne bereits tiefer stand.

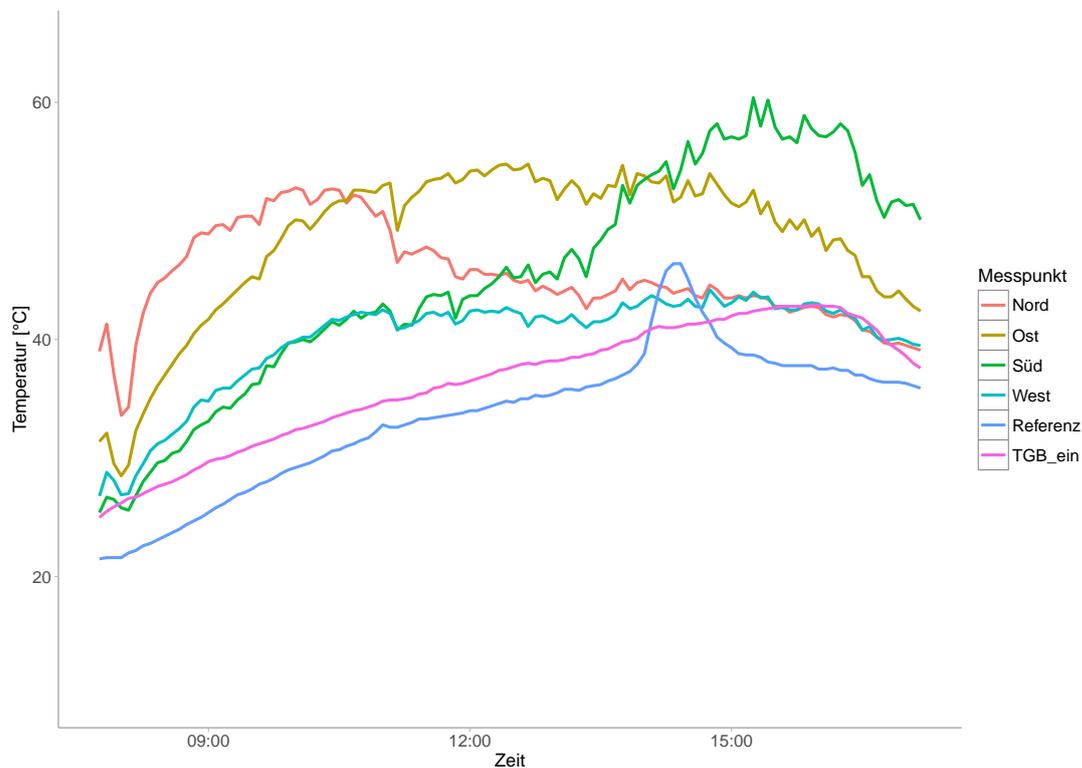


Abbildung 9.26.: Temperaturentwicklung der Kollektoroberfläche in 0° , 90° , 180° und 270° Azimuth sowie am TGB Einlass und der Umgebung (Referenz); Standort: Gulariya, Bardiya; Test 2, Tag 7: 02.04.2015

Die Wirkungsgradkurve des Kollektors in Abbildung 9.27 unterstützt die vorher beschriebenen Beobachtungen. Der Wirkungsgrad fällt bis 11:00 Uhr von über 40% auf unter 20% ab, bevor er anschließend nahezu konstant auf ca. 50% ansteigt. Der kurzzeitige Abfall um etwa 14:00 Uhr ist auf die bereits beschriebene direkte Einstrahlung auf den Datenlogger für die Umgebungskonditionen zurückzuführen. Im Vergleich mit den Wirkungsgraden aus Abbildung 9.19 fällt auf,

9.4. Darstellung und Auswertung der Messergebnisse

dass die Werte wesentlich stärker gestreut sind. Eine definitive Erklärung hierfür, kann an dieser Stelle nicht gegeben werden. Es ist jedoch denkbar, dass die erwähnten böigen, starken Winde für eine Verwirbelung der Luft im Kollektor gesorgt haben.

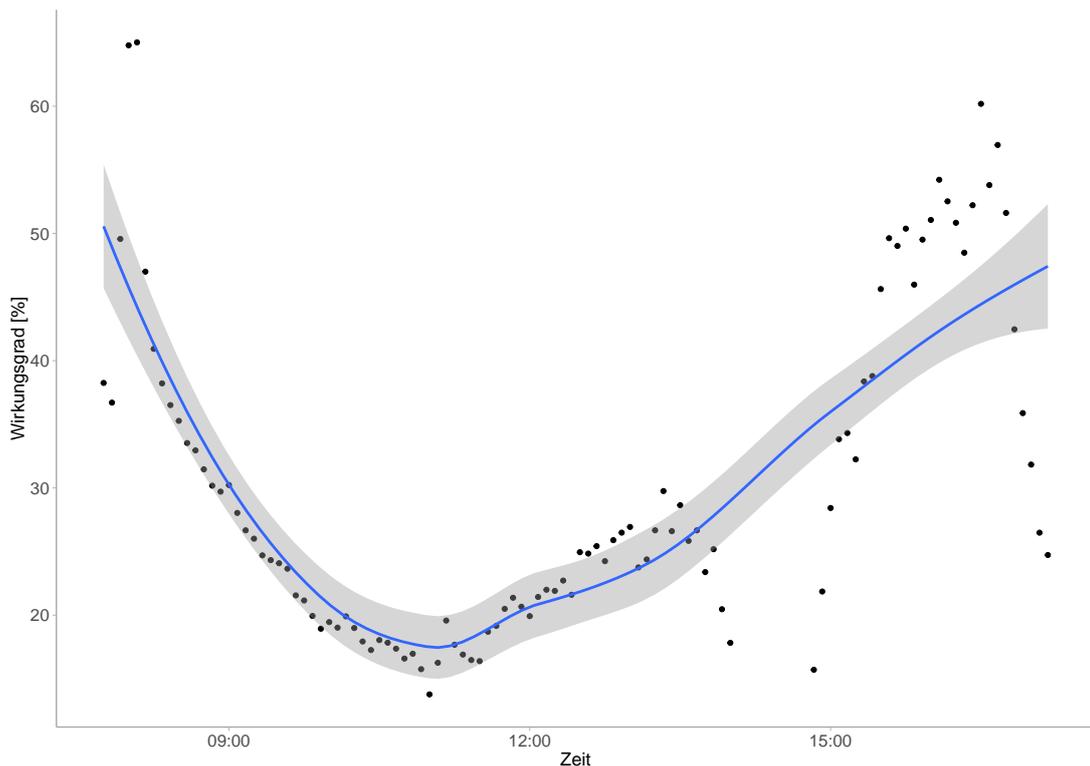


Abbildung 9.27.: Entwicklung des Kollektorstärke während der Betriebszeit; Standort: Gulariya, Bardiya; Tag 7: 02.04.2015

Die in Abbildung 9.28 dargestellten Kurven der relativen Feuchten zeigen, dass die Werte am TGB Einlass nahezu konstant unter denen der Umgebung liegen. Die maximale Differenz wurde zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme um 07:45 Uhr registriert und betrug 11,97%. Die Kurven verdeutlichen, dass der Kollektor speziell während der Morgenstunden für eine signifikante Absenkung der relativen Feuchte sorgt. Dadurch werden diese Stunden nutzbar, da die relative Feuchte der Trocknungsluft unter die Trocknungsgrenze von 75% abfällt.

9. Feldversuch in Nepal

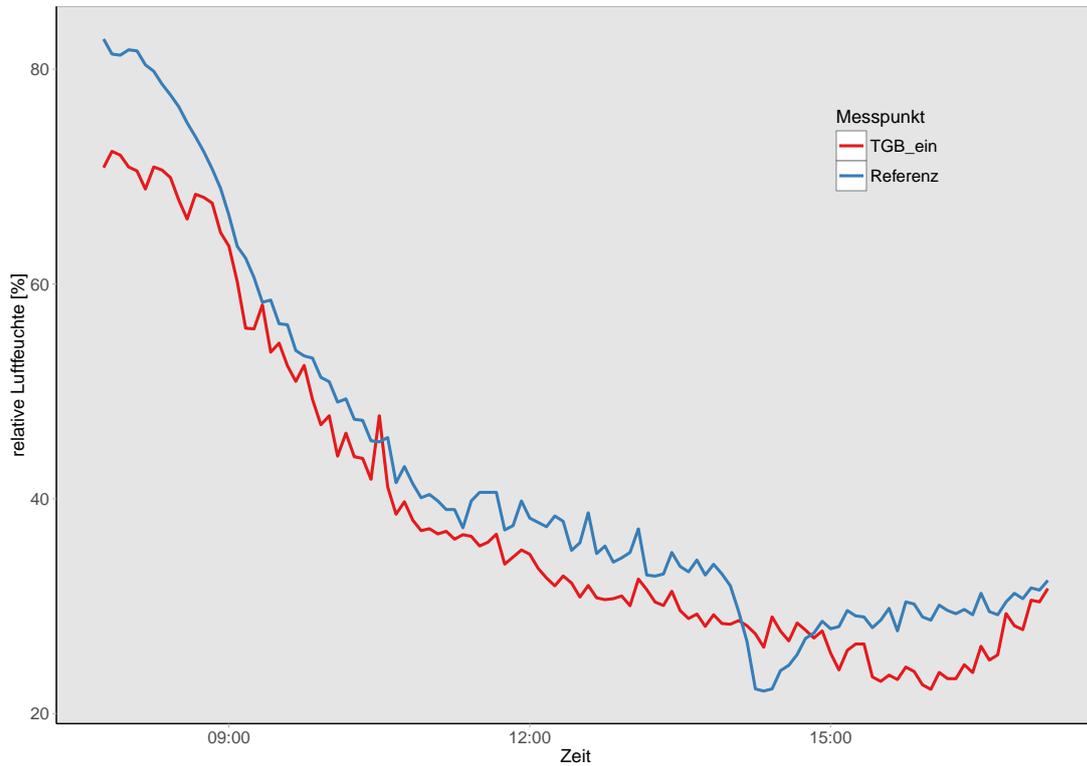


Abbildung 9.28.: Entwicklung der relativen Luftfeuchte in der Umgebung (Referenz) und am TGB Einlass; Standort: Gulariya, Bardiya; Tag 7: 02.04.2015

Auch im zweiten Test hat sich der Solartrockner und dessen verwendetes Baumaterial bewährt. Lediglich in der Folie des Kollektors mussten kleinere Löcher mit durchsichtigem Klebeband ausgebessert werden, die durch den alltäglichen Gebrauch und Verschleiß entstanden. Da kein Anemometer zur Feststellung der Geschwindigkeit der Trocknungsluft zur Verfügung stand, kann lediglich eine sehr vage Abschätzung zur Eignung der verwendeten DC-Ventilatoren gemacht werden. Diese erfolgt im Kapitel 10.

10. Diskussion und Ausblick

Dieses Kapitel teilt sich in drei Abschnitte. Im ersten werden die Ergebnisse der einzelnen Kapitel mit dem aktuellen Stand des Wissens und der Technik verglichen, mit den aufgestellten Arbeitshypothesen in Kontext gesetzt und die Qualität der Daten kritisch hinterfragt. Im zweiten Abschnitt wird der technische Aufbau, die Funktionsweise und mögliche Verbesserungen der entwickelten Solartrockner diskutiert. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf eventuelle Folgeprojekte und Einsatzgebiete für den Solartrockner.

10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

10.1.1. Empirische Untersuchung des Druckverlustes in Holz hackschnitzelschüttungen

Wie aus Kapitel 2 zu entnehmen ist, gibt GUSTAFSSON [1981] zwar Werte für den Belüftungswiderstand einzelner Partikelgrößen an, jedoch konnten keine konkreten Angaben zu Hackgutschüttungen in der aktuellen Literatur identifiziert werden. Die Berechnung ist aufgrund der oft inhomogenen Zusammensetzung und stark variierenden Partikelform des Materials kaum möglich. Das Kooperationsprojekt mit der Universität Hohenheim gab durch einen praktischen Versuch darüber Aufschluss. Das getestete Aufgabegut wies dabei unterschiedliche Korngrößen und je nach Herstellungsmethode schwankende Feinanteile auf.

Der Test ergab, dass die Geschwindigkeit der Trocknungsluft in Hackgutschüttungen mit Höhen von 3 m für einen möglichst energiesparenden Betrieb unter $0,1 \text{ m s}^{-1}$ betragen sollte. Da dies auch auf das feinste getestete Material der

10. Diskussion und Ausblick

Korngröße P16B zutraf, lag die Annahme nahe, dass auch eine wenig energieaufwendige Luftförderung durch eine Hackgutschüttung mit einer Höhe von 5 m möglich sei. Die erste Arbeitshypothese konnte durch diesen Versuch bestätigt werden.

Wie in Kapitel 2 dargestellt, erklären KUPITZ ET AL. [2015], dass bei Schütthöhen von bis zu 2 m ein linearer Zusammenhang zwischen dem Belüftungswiderstand und der Durchströmlänge besteht. Dieser Sachverhalt kann durch die durchgeführte empirische Untersuchung des Druckverlustes nicht bestätigt werden. Wie Tabelle 10.1 verdeutlicht, verdoppelt sich der gemessene Druck zwischen den Punkten P_1 ($h = 1$ m) und P_2 ($h = 2$ m) nicht, sondern er steigt lediglich um das 1,39- bis 1,78-fache an. Auffällig ist, dass im Falle der Materialien P31,5-F, P45-F und NK-B der Multiplikator zwischen den Messpunkten P_3 ($h = 3$ m) und P_2 nahezu identisch ist. Der Grund dafür ist auf die Herstellung des Hackguts mittels Schneckenhackern zurückzuführen, wodurch wenig Feinmaterial erzeugt wird.

Tabelle 10.1.: Druckmultiplikatoren zwischen den Messpunkten P_2 und P_1 sowie P_3 und P_2 im Versuch zur Druckverlustbestimmung

Kennung Material	Druckmultiplikatoren zwischen den Messpunkten	
	$P_2 : P_1$	$P_3 : P_2$
P16B-GU	1,57	1,26
P31,5-F	1,44	1,19
P45-F	1,54	1,17
NK-B	1,39	1,18
NK-AoW	1,78	1,38

Zur Optimierung der Energieeffizienz ist die Ermittlung weiterer relevanter Faktoren notwendig. So wurde in dem Versuch bislang völlig außer Acht gelassen, ob die Schüttungen über ihre Grundflächen in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit gleichmäßig durchströmt werden. Die Ermittlung der minimal notwendigen Luftgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Aufgabegüter, bei denen noch ei-

10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

ne gleichmäßige Durchströmung festgestellt werden kann, würde wesentlich zur Energieeffizienzsteigerung beitragen.

Wie die Versuchsergebnisse belegen, wird das in einer Schüttung unten befindliche Material durch darüber liegende Schichten stärker kompaktiert. Dadurch nimmt gerade der untere Bereich mit zunehmender Schütthöhe als Einflussgröße auf den Belüftungswiderstand zu. Weitere Untersuchungen zur Durchströmung von Hackgut mit variierenden Schütthöhen können Aufschluss über die maximal mögliche und/oder optimale Schütthöhe in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit und der Korngröße geben.

10.1.2. Praktischer Versuch zur Kaltlufttrocknung

Durch den praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung konnte gezeigt werden, dass die Verwendung einer technischen Luftförderung im Vergleich zur unbelüfteten Lagerung, wie beschrieben durch SCHMID [2013] und GOLSER ET AL. [2005], die Trocknungszeit von mehreren Monaten auf wenige Wochen verkürzt. Die Trocknungsvorgänge waren innerhalb von 29 Tagen (erster Versuchsdurchgang) und 41 Tagen (zweiter Versuchsdurchgang) abgeschlossen, obwohl die Geschwindigkeit der Trocknungsluft jeweils weniger als $0,1 \text{ m s}^{-1}$ in der Schüttung betrug. Die zweite Arbeitshypothese erweist sich dadurch als korrekt.

Die Aufzeichnung der relativen Luftfeuchte in der Schüttung verdeutlichte, dass eine nahezu vollständige Sättigung der Trocknungsluft erreicht wurde. Dies ist auf die niedrige Luftgeschwindigkeit und die daraus resultierende lange Verweilzeit im Hackgut zurückzuführen.

Die Auswertung der registrierten Temperaturwerte zeigte, dass deren Erhöhung durch die Holzrestatmung und die Entwicklung von biomasseabbauenden Pilzen und Bakterien, wie beschrieben durch IDLER ET AL. [2008], durch die konstante Zufuhr von Frischluft verhindert wurde. Sichtprüfungen des Hackgutes am Ende

10. Diskussion und Ausblick

der Tests bestätigten dies.

Während der Versuch ein recht verlässliches Abbild über die Temperatur- und Feuchteentwicklung im inneren der Schüttung ergab und die dafür verwendeten Messgeräte zuverlässig funktionierten, bestand der größte Unsicherheitsfaktor in der Feststellung und Regulierung der Luftgeschwindigkeit. Durch die Verwendung eines mobilen Hitzdrahtanemometers wie dem *testo 425* weisen die gemessenen Werte höhere Unsicherheiten auf als mit fest installierten Vortex Sensoren, da die Sensorlanze bei jeder Messung neu positioniert werden muss und dabei bereits kleine Abweichungen zu fehlerhaften Daten führen.

Nichtsdestotrotz gab der Versuch Aufschluss über die zu erwartenden notwendigen Trocknungszeiträume, und er bestätigte, dass eine Luftgeschwindigkeit von unter $0,1 \text{ m s}^{-1}$ zur gleichmäßigen Trocknung von Holzhackschnitzeln ausreicht.

Es kann ferner angenommen werden, dass die Zufuhr von Frischluft mit Temperaturen unter 0°C zu einer kurzfristigen Vereisung des Aufgabegutes führte. Dies verursachte zwar eine zeitliche Verzögerung des Trocknungsprozesses, was auch durch die niedrigeren errechneten Wirkungsgrade belegt wird, jedoch konnten keine negativen Folgen für die qualitativen Eigenschaften des Materials festgestellt werden. Das Risiko der Schimmelbildung wird reduziert.

Die Wahl fiel bei diesem Versuch auf die verwendeten 70 W Ventilatoren *AXC100B*, da sie sich ohne großen Aufwand mit den Kanalgrund- bzw. Abluftrohren verbinden ließen. Abbildung 10.1 zeigt die Ventilator Kennlinie bei maximaler Leistung nach ANONYMUS26 [2012] und die Kennlinien des Aufgabegutes NK-AoW bei einer Schütthöhe von 1 m (P_1) und 2 m (P_2), wie in Kapitel 5 ermittelt. Da die Förderleistung der Ventilatoren jedoch mittels Frequenzumformer so angepasst wurde, dass sich die gewünschte Luftgeschwindigkeit einstellte, weichen die realen Kennlinien aus beiden Versuchen von der gezeigten ab. Durch die von GRUNDMANN U. SCHÖNHOLTZ [1999] beschriebenen Proportionalgesetze, lässt

10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

sich der reale Betriebspunkt der beiden durchgeführten Versuche ermitteln.

1. Der Volumenstrom ändert sich proportional der Drehzahl:

$$\frac{\dot{V}_{max}}{\dot{V}_{real,1}} = \frac{n_{max}}{n_{real,1}} \quad (10.1)$$

Bei einer Luftgeschwindigkeit von $v_{real,1} = 0,07 \text{ m s}^{-1}$ im ersten Versuch und einer Grundfläche der Schüttung von $0,36 \text{ m}^2$ ergibt sich ein realer Volumenstrom $\dot{V}_{real,1} = 90,72 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Durch Einsetzen des maximalen Volumenstroms $\dot{V}_{max} = 250 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und der maximalen Drehzahl $n_{max} = 2.530 \text{ min}^{-1}$ (siehe Ventilator-daten in Anhang C) ergibt sich eine reale Drehzahl $n_{real,1} = 918 \text{ min}^{-1}$.

Im zweiten Versuch betrug die Luftgeschwindigkeit $v_{real,2} = 0,08 \text{ m s}^{-1}$, sodass sich ein Volumenstrom $\dot{V}_{real,2} = 103,68 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ einstellte. $n_{real,2}$ beträgt somit 1.049 min^{-1} .

2. Die Druckerhöhung ändert sich proportional dem Quadrat der Drehzahl:

$$\frac{p_{max}}{p_{real,1}} = \left(\frac{n_{max}}{n_{real,1}} \right)^2 \quad (10.2)$$

Der maximale Druck liegt bei dem verwendeten Ventilator bei $p_{max} = 380 \text{ Pa}$. Daraus ergibt sich ein realer Druck von $p_{real,1} = 50,03 \text{ Pa}$ und $p_{real,2} = 65,33 \text{ Pa}$.

3. Der Leistungsbedarf des Lüfters und die ins geförderte Medium eingebrachte Strömungsleistung ändern sich proportional der dritten Potenz der Drehzahl:

$$\frac{P_{max}}{P_{real,1}} = \left(\frac{n_{max}}{n_{real,1}} \right)^3 \quad (10.3)$$

Die maximale Leistung des Ventilators von $P_{max} = 70 \text{ W}$ wurde im ersten Versuch lediglich zu $4,77\%$ ($P_{real,1} = 3,34 \text{ W}$) und im zweiten zu $7,13\%$ ($P_{real,2} = 4,99 \text{ W}$) ausgenutzt.

10. Diskussion und Ausblick

Da die Hackgutschüttung eine Höhe von $h_S = 1,5$ m aufwies, müsste der Betriebspunkt bzw. der berechnete Druck idealerweise zwischen den Kennlinien P_1 und P_2 liegen. Wie die Berechnung zeigt und Abbildung 10.1 verdeutlicht, ist der Druck im ersten Versuch jedoch wesentlich höher, wodurch der Betriebspunkt oberhalb der Hackgutlinien liegt. Exakte Gründe können hierfür nicht gegeben werden, allerdings wurde bereits darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Material NK-AoW um ein äußerst inhomogenes Aufgabegut handelt. Es ist folglich denkbar, dass der Feinanteil im Versuch zur Kaltlufttrocknung ungleich höher war als bei der Feststellung des Druckverlustes.

Im zweiten Versuch liegt der reale Betriebspunkt zwischen den Hackgutlinien, wie Abbildung 10.2 verdeutlicht.

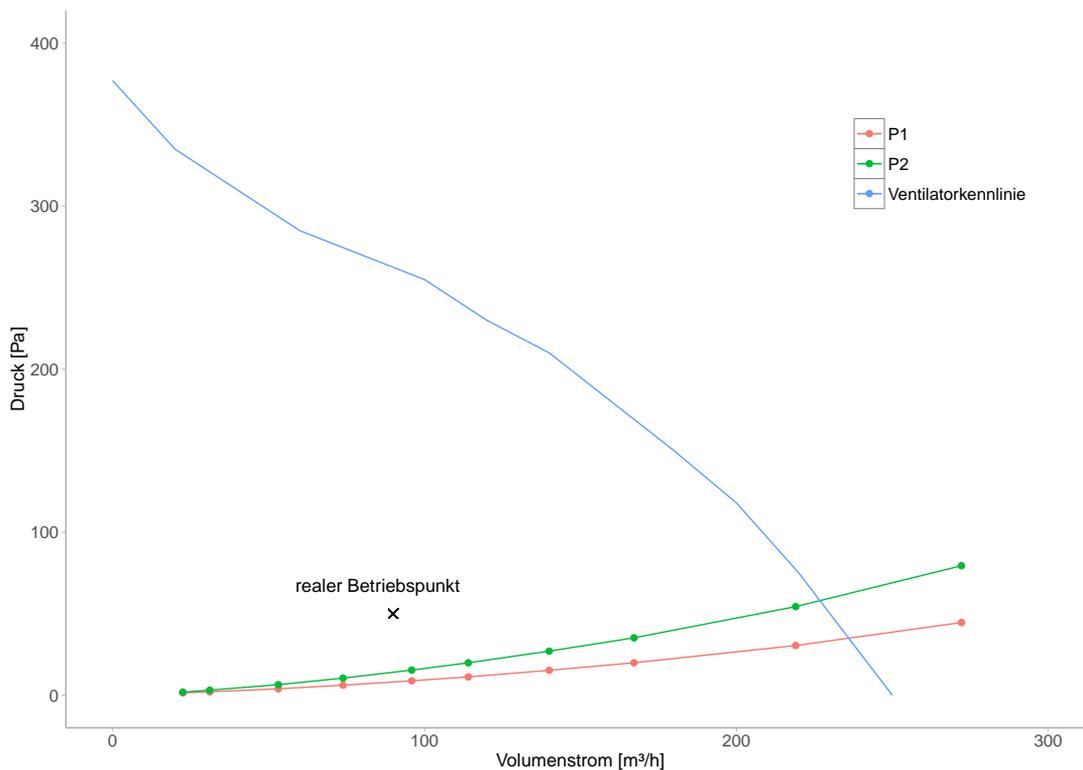


Abbildung 10.1.: Ventilator- und Hackgutkennlinien des *AXC100B*, Kennlinien für P_1 und P_2 des Hackguts NK-AoW sowie der reale Betriebspunkt im ersten Versuch zur Kaltlufttrocknung

10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

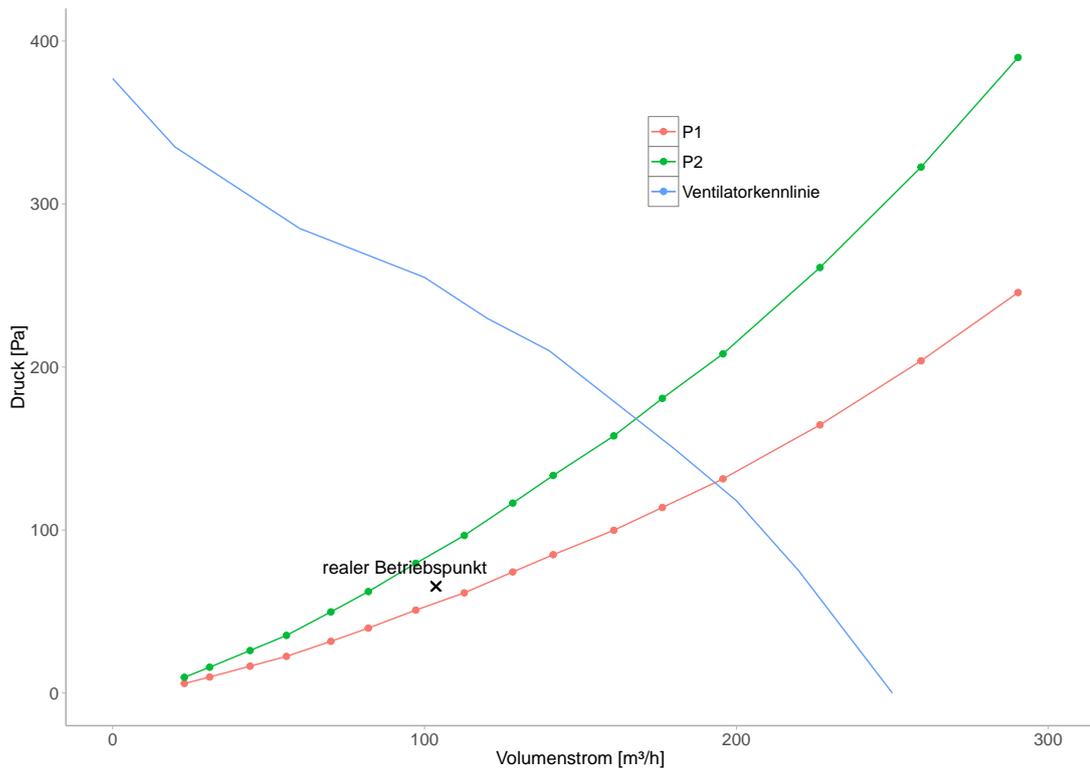


Abbildung 10.2.: Ventilator Kennlinie des *AXC100B*, Kennlinien für P_1 und P_2 des Hackguts P16B-F sowie der reale Betriebspunkt im zweiten Versuch zur Kaltlufttrocknung

Es kann zweifelsfrei festgehalten werden, dass der Ventilator in beiden Versuchen wesentlich kleiner dimensioniert werden kann, wodurch die Anschaffungskosten für diese Komponente geringer ausfielen.

10.1.3. Berechnung des Trocknungspotentials

Die in Kapitel 7 beschriebene Berechnung des Trocknungspotentials geschah unter Verwendung der am Campus Klein-Altendorf aufgezeichneten Wetterdaten der Jahre 2008 bis 2011. Es ist unumstritten, dass die Auswertung weiterer Jahre ein realistischeres Abbild der Wetterbedingungen am Campus Klein-Altendorf gäbe. Jedoch beschränkte sich die Auswertung vor allem aus zeitlichen Gründen

10. Diskussion und Ausblick

auf diese Zeitspanne. Die iterative Bestimmung des Feuchtegrades der Abluft für 210.384 aufgezeichnete Stundenmittelwerte je Temperaturniveau durch ein in der statistischen Programmiersprache „R“ geschriebenes Skript nahm etwa zwei Wochen in Anspruch. Die mittlere Jahrestemperatur der ausgewerteten Jahre liegt mit $9,93^{\circ}\text{C}$ leicht über dem Durchschnittswert nach KUNZ U. VÖLKERING [2015] von $9,4^{\circ}\text{C}$.

Anhand der untersuchten Wetterdaten konnte dargestellt werden, dass eine Erhöhung der Trocknungstemperatur um $+5,0\text{ K}$ das Trocknungspotential der Luft um $135,98\%$ steigert. Gleichzeitig wird die Anzahl der Jahresstunden, an denen eine Vereisung des Aufgabegutes auftreten könnte, nahezu halbiert. Somit werden durch eine Vorwärmung die zur Trocknung nutzbaren Stunden im Winter gesteigert. Ohne eine Vorwärmung der Trocknungsluft, sollte sich die Trocknung von Hackgut nach Möglichkeit auf die Übergangs- und Sommermonate beschränken. Es ist anzunehmen, dass sich der zeitliche Aufwand für die praktischen Versuche zur Kaltlufttrocknung noch einmal wesentlich verringert hätte, wenn die Versuche in den Monaten Mai bis August statt gefunden hätten und/oder die Trocknungsluft vorgewärmt worden wäre.

Wie bereits in Kapitel 2 aufgezeigt wurde, kommen Solartrockner zumeist in Entwicklungsländern zum Einsatz, in denen die klimatischen Verhältnisse stark von denen am Campus Klein-Altendorf abweichen. HEGDE ET AL. [2015] beschreiben einen Solartrockner, der in Indien zur Trocknung von Bananenscheiben eingesetzt wurde und der einen maximalen Temperaturhub von $10,7\text{ K}$ erreichte. Ein einfacher zylindrischer Solarkollektor, der in den Vereinigten Arabischen Emiraten getestet wurde und ebenfalls einen Temperaturhub von 10 K erreichte, wird durch AHMAD [2001] erläutert. Dass eine noch stärkere Luftvorwärmung durch Solarkollektoren möglich ist, wird durch MIDILLI [2001] deutlich. Er vergleicht die solarunterstützte Trocknung von Pistazien mit der natürlichen Freilufttrock-

10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

nung. Während die Temperatur im Solarkollektor $50 \pm 10^\circ\text{C}$ erreichte, betrug die Umgebungstemperatur bei $28 \pm 4^\circ\text{C}$, wodurch sich eine Differenz von etwa 22 K ergibt.

Durch die genannten Veröffentlichungen wird deutlich, dass die durch Solarkollektoren zu erreichenden Temperaturanstiege durchaus größer als 5 K sein können. Ob dies auch auf den Einsatz des Solartrockner unter den klimatischen Bedingungen am Campus Klein-Altendorf zutreffen würde, konnte zum Zeitpunkt der Berechnung noch nicht abgeschätzt werden. In den folgenden Abschnitten 10.1.4 und 10.1.5 wird auf diese Fragestellung nochmals eingegangen.

Nach KALTSCHMITT ET AL. [2016] kommt „in der Praxis [...] eine 100%-ige Beladung der Trocknungsluft kaum vor“. Diese Aussage bestätigte sich, da das durchschnittliche Trocknungspotential im ersten Versuch zur Kaltlufttrocknung nur zu etwa 85% ausgenutzt werden konnte. Allerdings schreibt KALTSCHMITT ET AL. [2016] weiter: „Um die Trocknungsdauer zu verkürzen, wird meist eine niedrigere Luftfeuchte der Abluft von ca. 80% akzeptiert.“ Diese Aussage trifft in erster Linie auf konventionelle Trockner zu, in denen die relative Feuchte der Trocknungsluft durch starkes Erhitzen soweit abgesenkt wird, dass auf eine vollständige Sättigung verzichtet werden kann. Zudem wird durch den hohen Luftmassenstrom ein großes Aufnahmepotential der Luft geschaffen. Im Versuch zur Kaltlufttrocknung hingegen war eine vollständige Sättigung der Trocknungsluft erwünscht, um das geringe Potential der unconditionierten Luft maximal auszunutzen. Während der Anfangsphase, in der sich das Aufgabegut im kapillaren Feuchtebereich befand, wurde eine nahezu vollständige Sättigung erreicht. Erst mit Erreichen der Fasersättigung sank die Feuchtigkeitsaufnahme der Luft ab.

Zusätzlich konnte die Verminderung des Ausnutzungsgrades durch eine Vereisung des Hackgutes aufgezeigt werden (Versuch 2).

10.1.4. Test des solaren Trockners am Campus Klein-Altendorf

Mit dem Test des ersten Prototypen des solaren Satzrockners wurde gezeigt, dass der Wassergehalt von 50 m³ Holzhackgut (P16B-GU) in acht Wochen von 40,25% auf 11,73% gesenkt werden konnte. Dieses Ergebnis wurde wiederum mit einer niedrigen Luftgeschwindigkeit von unter 0,1 m s⁻¹ erreicht. Es konnte ferner bestätigt werden, dass Hackgut ohne Qualitätsverluste und Abbrandgefahr in fünf Meter hohen Schüttungen gelagert werden kann, wenn für eine geringe Durchströmung mit Luft gesorgt wird. Qualitätsverluste durch die Ausbildung nasser Zonen und Schimmel wurden nicht festgestellt, wodurch sich auf eine gleichmäßige Belüftung und Absorption der Holzfeuchte schließen lässt.

Die Darstellung des Korrelationsgrades zwischen der Wassergehaltsentwicklung der Gesamtmasse und der Sonnenscheindauer könnte dazu dienen, die Effektivität des Solarkollektors und des Trocknungsprozesses näher zu untersuchen. Zwar gibt die in Abbildung 8.10 gezeigte Trocknungskurve einen Eindruck der Konditionen im oberen Drittel der Schüttung, jedoch können daraus keine Rückschlüsse auf die Gesamtmasse gezogen werden. Eine Korrelation der genannten Parameter ist folglich nicht möglich. Diese Tatsache zieht die Notwendigkeit nach sich, den Aufbau nachfolgender Trocknerkonstruktionen um die Möglichkeit der Probenahme zu erweitern. Hierfür müsste die Siloaußenwand bzw. die Kollektoroberfläche mit einem Entnahmestutzen ausgestattet werden. Die Integration dieser Entnahmepunkte in die Kollektorfolie stellt ein erhöhtes Risiko für Undichtigkeiten dar. Aus diesem Grund wurde bei der Konstruktion des Prototypen darauf verzichtet.

Es kann bestätigt werden, dass die Nutzung der äußeren Silowand als Solarkollektor funktionierte. Ein Vergleich der in Abbildung 8.11 gezeigten Sonnenstunden mit den aufgezeichneten Temperaturen in Abbildung 8.12 zeigt einen

10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

deutlichen Temperaturhub an Tagen mit hoher Sonnenscheindauer (25.05.2012, 26.05.2012, 28.05.2012, 29.05.2012). Auch die im Kollektor registrierten Temperaturwerte (Abbildung 8.13) bestätigen, dass eine Erwärmung seiner Oberfläche stattfand.

Besonders auffällig ist zudem die Tatsache, dass die Temperatur am TGB Einlass auch während der Nachtstunden über der Umgebung lag. Durch den kontinuierlichen Betrieb des Trockners wäre zu erwarten, dass sie gegen das Referenzniveau strebt, da konstant unkonditionierte Frischluft in das System gefördert wird. Allerdings verhindern der Überstand des Silodachs und die Kollektorfolie ein Eindringen von Niederschlag in Form von Tau oder Regen und dienen als Windschutz. Auch eigene visuelle Beobachtungen bestätigen, dass sich auf dem Fundament unterhalb des Belüftungsbodens keine Feuchtigkeit ansammelte. Es kann angenommen werden, dass unter anderem die bauliche Form des Trockners grundsätzlich für eine bessere Zuluftqualität verantwortlich ist. Eine detailliertere Untersuchung des Strömungsverhaltens und der Änderung der physikalischen Eigenschaften der Trocknungsluft im Kollektor und in der Schüttung kann weitere Erkenntnisse zur Optimierung des solaren Satzrockners und Verbesserung des Kollektorwirkungsgrades bringen. Eine detailliertere Darstellung der Temperaturniveaus über die gesamte Grundfläche und Höhe des TGB und des Kollektors wäre hilfreich.

Es ist darüber hinaus zu beachten, dass der Versuch in den Sommermonaten Mai bis Juli durchgeführt wurde. Weitere Tests sind erforderlich, um die Eignung des Solartrockners für einen ganzjährigen Einsatz zu ermitteln. Es ist durchaus denkbar, dass ein kontinuierlicher Betrieb während der Jahreszeiten mit erhöhter relativer Luftfeuchte wenig sinnvoll ist. Hier sollte auf diskontinuierlichen Betrieb gewechselt werden.

In Kapitel 8 wurde bereits erläutert, dass die maximal erreichte Temperaturerhöhung 6,8 K und der durchschnittliche Wert über die gesamte Testzeit 1,18 K

10. Diskussion und Ausblick

betrug. Die durch HEGDE ET AL. [2015], AHMAD [2001] und MIDILLI [2001] genannten Werte von 10 K und mehr wurde somit nicht erreicht. Eine Vergleichbarkeit ist durch die unterschiedlichen Standorte der Solartrockner nicht gegeben.

Der Test des Solartrockners zeigte zudem, dass die Leistung des verwendeten 4 kW Ventilators lediglich zu etwa einem Achtel beansprucht wurde und demzufolge kleiner dimensioniert werden kann. Der niedrige Leistungsbedarf ist auf den geringen Volumenstrom zurückzuführen, der gefördert wurde. Die Wahl fiel auf diesen Luftförderer, da der Hersteller ihn als geeignetes Gerät in Verbindung mit dem Silo empfahl, er sich ohne aufwendige Änderungsarbeiten mit dem verwendeten Abluftrohr verbinden ließ und keine genauen Angaben aus der Literatur über den zu erwartenden Belüftungswiderstand in einer Schüttung dieser Höhe gefunden werden konnten.

Nach den in Abschnitt 10.1.2 beschriebenen Gleichungen 10.1 bis 10.3 lässt sich wiederum der Betriebspunkt des Ventilators ermitteln. Da der Stromverbrauch und somit der tatsächliche Leistungsbedarf durch einen Stromzähler ermittelt wurde, kann in diesem Versuch auf die tatsächliche Luftgeschwindigkeit in der Schüttung zurückgerechnet werden: Mittels Gleichung 10.3 lässt sich die reale Drehzahl des Ventilators n_{real} bestimmen. Sie beläuft sich bei maximaler Drehzahl $n_{max} = 2.900 \text{ min}^{-1}$, maximaler Leistung $P_{max} = 4.000 \text{ W}$ und realer Leistung $P_{real} = 519 \text{ W}$ auf 1.468 min^{-1} .

Gleichung 10.1 zufolge liegt der tatsächliche Volumenstrom \dot{V}_{real} bei $1.620,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Bei einem TGB Durchmesser von 5.580 mm ergibt sich eine Luftgeschwindigkeit in der Schüttung von $v_S = 0,045 \text{ m s}^{-1}$. Dieser Wert liegt unter der beabsichtigten Geschwindigkeit von $0,06 \text{ m s}^{-1}$, was auf Ungenauigkeiten des Messgerätes und Fehler bei der Messdurchführung zurückgeführt werden kann, wie bereits unter 10.1.2 beschrieben.

Nach Gleichung 10.3 beträgt der tatsächliche Druck p_{real} in der 5 m hohen

10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

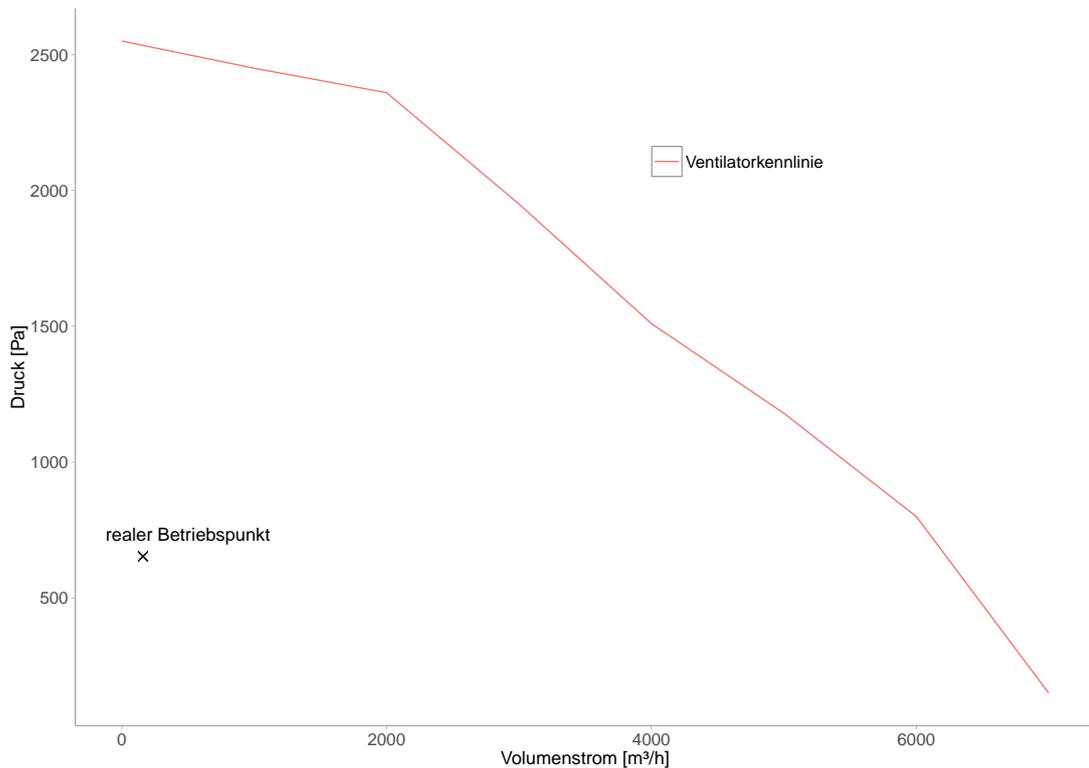


Abbildung 10.3.: Ventilator Kennlinie des *NV 35* sowie der reale Betriebspunkt bei Prototypentest in Bonn vom 16.05.2012 bis 12.07.2012; Campus Klein-Altendorf

Schüttung 653,34 Pa. Abbildung 10.3 verdeutlicht die Überdimensionierung des Ventilators.

Der entwickelte Solartrockner hebt sich durch seine bauliche Form stark von anderen Modellen ab. Zum einen verfügt er über einen Aufbau und eine Funktionsweise, dessen Einfachheit mit den in Kapitel 2 dargestellten indirekten Solartrocknern vergleichbar ist. Zum anderen ist sein Fassungsvermögen, im Gegensatz zu diesen Trocknern, ungleich höher. Während die zumeist in Entwicklungsländern eingesetzten indirekten Solartrockner zur Trocknung von Obst und Gemüse mit einem Gewicht von wenigen Kilogramm eingesetzt werden (siehe BELESSIO-

10. Diskussion und Ausblick

TIS U. DELYANNIS [2011]), bestand das Aufgabegut am Campus Klein-Altendorf aus Holzhackgut im vierstelligen Kilogramm Bereich.

Zudem weist der Solarkollektor eine zylindrische Form auf, wodurch sich seine Funktionsweise und -fähigkeit von den durch die Literaturrecherche identifizierten Typen (siehe Kapitel 2) unterscheidet.

Aufgrund dieser Sonderstellung des Solartrockners ist eine Diskussion der erzielten Ergebnisse mit denen weiterer Literaturquellen kaum möglich.

10.1.5. Feldversuch in Nepal

Durch die Feststellung der Wassergehaltsentwicklung von drei verschiedenen Fraktionen, die für den ersten Versuch im Trockner, auf dem Hausdach und im Garten platziert wurden, ist ein direkter Vergleich des Solartrockners mit der natürlichen Trocknung möglich. Die Differenz zwischen Anfangs- und Endwassergehalt liegt bei den Fraktionen „Solartrockner“ und „Hausdach“ bei ca. 42% und bei dem Bari im Garten bei etwa 27%. Somit bot die Trocknung des Holzes im Solartrockner in diesem Test keine zeitlichen Vorteile gegenüber einer unabgedeckten Lagerung unter ansonsten gleichen klimatischen Bedingungen.

Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die maximale Betriebszeit aufgrund der täglichen Stromausfälle nur zu knapp 52% ausgenutzt wurde. Es kann folglich angenommen werden, dass sich die Trocknungszeit durch eine konstante Stromversorgung wesentlich verkürzt hätte.

Die Funktion des Solarkollektors konnte auch bei diesem Prototypen durch die Aufzeichnung von Temperaturwerten belegt werden. Zudem gab die Darstellung der erreichten Wirkungsgrade in Abbildung 9.19 einen Einblick in dessen Effizienz. Aufgrund der vertikalen Orientierung (90°) des Solarkollektors erreichten diese ihr Maximum erst in den Nachmittagsstunden bei tieferem Sonnenstand. Folglich

10.1. Kritische Betrachtung der Ergebnisse

könnte die Energieausbeute vor allem während der Mittagsstunden gesteigert werden, indem die Neigung des Kollektors angepasst würde. ROUSTAPOUR U. GAZOR [2015] beispielsweise schlagen für einen im Iran untersuchten solaren Flachkollektor eine Neigung von 30° vor. Dagegen beschreibt EKE [2011], dass der Kollektorwinkel in Abhängigkeit vom Monat zwischen 10° und 30° variieren sollte. Seine Untersuchungen wurde ebenfalls mit einem Flachkollektor durchgeführt. Der Versuchsstandort lag in Zaira, Nigeria.

Des Weiteren können auf der Kollektoroberfläche montierte Leitbleche für eine Verlängerung der Verweilzeit der Luft sorgen, wodurch sich ein höheres Temperaturniveau am TGB Einlass einstellte.

Ein großer Vorteil in der Verwendung der TGB Außenwand als Solarkollektor liegt darin, dass der solaren Einstrahlung ganztägig eine in alle Azimuthrichtungen orientierte Absorberfläche geboten wird. Allerdings wird auch kontinuierlich Luft aus dem nicht erwärmten, nördlichen Kollektorsegment zugeführt. Die Wärmeausbeute könnte weiter gesteigert werden, indem dies unterbunden wird.

Im zweiten Test wurde der Wassergehalt von frischem Bambus von über 50% innerhalb von vier Wochen auf etwa 18% reduziert. Nach SCHRÖDER [2012] beträgt der durchschnittliche Zeitaufwand für die natürliche Trocknung zwischen sechs und zwölf Wochen. Eine Überprüfung mit mehreren Fraktionen wie im ersten Test des Trockners würde eine weitaus exaktere Beurteilung des Solartrockners erlauben. Dies war jedoch aus Zeitgründen nicht mehr möglich.

Das Hauptaugenmerk lag bei diesem Test deshalb auf der Eignungsprüfung des PV-Systems zum Antrieb der Ventilatoren. Die in Abbildung 9.26 dargestellten Temperaturverläufe zeigen, dass die im Kollektor vorgewärmte Luft in den TGB eintrat und die Leistung der 12 V-Luftförderer somit ausreichte.

Die Funktionsweise beider getesteter Systeme konnte dargelegt werden. Auf die

10. Diskussion und Ausblick

Einstellung der Luftgeschwindigkeit musste allerdings verzichtet werden, da in Nepal kein geeignetes Gerät vorhanden war. Aus diesem Grund ist auch eine Berechnung des Betriebspunktes des Ventilator nicht möglich.

Die Feststellung der Wassergehalte mit Hilfe des beschriebenen Voltcraft Handgeräts weist wesentlich höhere Toleranzen und Messfehler auf als die Überprüfung nach DIN. Für eine genaue Beurteilung der Eignung des Trockners für den ganzjährigen Einsatz in Entwicklungsländern sind weitere Tests unumgänglich.

Während die Dimensionierung des Trockners und dessen Einsatzgebiet in einem subtropischen Land eher den Vergleich mit weiteren einfachen Solartrocknerkonstruktionen erlauben würde, konnte keine Literaturquelle identifiziert werden, in der Holz als Aufgabegut Verwendung fand. Eine kritische Diskussion und ein Vergleich mit anderen getesteten Trocknern ist somit nicht möglich.

10.2. Beurteilung des konstruktionstechnischen Aufbaus der getesteten Solartrockner

Die getesteten Solartrockner erwiesen sich im Trocknungsbetrieb aufgrund ihrer einfachen Bauweise als robuste und für Störungen wenig anfällige Entwicklungen. Sowohl der Getreidesilo als auch das Ölfass waren aufgrund ihrer Stabilität und großen Verfügbarkeit kostengünstige und praktische TGB. Die zylindrische Form bietet den Vorteil einer massenhaften Verfügbarkeit unterschiedlicher Volumina.

Allerdings kam es, wie in Kapitel 8 beschrieben, innerhalb der Hackgutschüttung zu Brückenbildung, wodurch das Material nicht Richtung Austrag nachrutschte. Durch die zylindrische Form des TGB und seine leicht wellige Oberfläche (siehe Abbildung 8.6 (a)) wird dies begünstigt. Ein kegelförmiger, glattwandiger Aufbau des TGB mit etwa 5° bis 10° geneigten Außenwänden und nach oben zulaufender Verjüngung könnte zur Vermeidung von Brücken beitragen. Auch aus energetischer Sicht ist die Wärmeausbeute durch das Neigen der Außenwände op-

10.2. Beurteilung des konstruktionstechnischen Aufbaus

timierbar. Da die optimale Neigung hier von den klimatischen und geologischen Bedingungen abhängt, ist sie für jeden Standort individuell zu bestimmen.

Aus praktischer Sicht wäre die Herstellung kegelförmiger Metallbehälter in Entwicklungsländern bis zu einer Höhe von 1,50 m bis 2,00 m möglich und wenig kosten- und zeitaufwendig. Die Verwendung eines konischen TGB im Maßstab des solaren Satzrockners in Bonn ist mit ungleich mehr Aufwand verbunden, da keine Standardsilos dieser Form auf dem Markt erhältlich sind. Somit wären genaue statische Berechnungen nötig, um die Stabilität des TGB nachweisen zu können. Die Möglichkeit, eine offizielle Genehmigung für einen derartigen Aufbau zu erhalten, wäre im Vorfeld zu prüfen.

Trotz des einfachen Funktionsprinzips des Solarkollektors gestaltete sich dessen Aufbau als zeit- und personalaufwendig, da für die Spannung der Folie bis zu vier Mann eingesetzt wurden. Darüber hinaus ist ihre Montage wetterabhängig und sollte unter möglichst windstillen Bedingungen erfolgen.

Der in Bonn entwickelte Solartrockner weist aus energetischer Perspektive einen Nachteil auf. Die im Kollektor erwärmte Luft wird entgegen ihrer Thermik durch den Ventilator nach unten gefördert und tritt anschließend in den TGB ein. Durch den Absorptionsprozess in der Schüttung, kommt es zu einer Abkühlung der Trocknungsluft, wodurch sie im Normalfall absinken würde anstatt durch das Hackgut nach oben zu strömen. Dieser Sachverhalt war vor dem Bau des Trockners bereits bekannt, musste jedoch aus konstruktionstechnischen Gründen ignoriert werden. Die Bauweise wurde in den anschließenden Versuchen in Nepal ebenfalls nicht geändert, da die Projektzeit in Nepal für eine derart umfassende Projekt nicht ausgereicht hätte. Allerdings wäre der Umbau auf eine Luftförderung, die das natürliche Fluidverhalten unterstützt, für Solartrockner im kleineren Maßstab mit relativ wenig Aufwand zu realisieren. Dies würde die Energieeffizienz weiter steigern, da die Ventilatoren einen geringeren Strömungswiderstand

10. Diskussion und Ausblick

überwinden müssten.

In den Abbildungen 9.18 bis 9.22 hat die am TGB Auslass aufgezeichnete Temperatur zwar wenig Aussagekraft über die Qualität des Trocknungsprozesses, aber sie zeigt, dass sich das Innere des TGB durch die Sonneneinstrahlung stark aufheizt. Daher lässt sich annehmen, dass die natürliche Luftströmung durch die Erweiterung des Solartrockners um einen Solarkamin verstärkt werden könnte. Die darin durch die solare Einstrahlung aufgewärmte Luft würde aufsteigen und so für eine Durchströmung des Systems sorgen.

Die Beladung des Prototypen am Campus Klein-Altendorf funktionierte problemlos und mit einem geringen Zeitaufwand von etwa 2 Stunden. Wie in Kapitel 8 beschrieben, war jedoch der Austrag zu leistungsschwach dimensioniert. Sowohl die Ausstattung des System mit einem leistungsstärkeren Motor und Getriebe als auch die Umrüstung auf eine hydraulische Förderung wären arbeits- und materialintensive Maßnahmen, deren finanzieller Aufwand an dieser Stelle nicht abzuschätzen ist.

Die Be- und Entladung stellte bei dem Trocknermodell in Nepal keine Probleme dar und war für eine Person mit wenig Arbeitsaufwand zu lösen.

10.3. Ausblick

In den vorangegangenen Abschnitten wurde deutlich, dass die reine Trocknungsfunktion des Solartrockners durch diese Arbeit nachgewiesen werden konnte. Allerdings war der Aufbau des Trockners am Campus Klein-Altendorf ein personal- und zeitintensives Projekt, wohingegen die Konstruktionsarbeiten des Solartrockners in Nepal von einer Person in wenigen Tagen zu erledigen sind. Die angesprochenen Umbau- und Verbesserungsmaßnahmen sowie die noch durchzuführenden Tests sind an Trocknern kleineren Maßstabs mit weniger Aufwand durchführbar.

Die Trocknung holzartiger Biomasse ist in westlichen Ländern ein wesentlich wichtigerer Aspekt, da die zur Verfügung stehende große Frischmasse nicht zur Abholzung geschützter Wälder beiträgt. In Entwicklungsländern sollte der Trend jedoch in Richtung Vermeidung holzartiger Biomasse und den Schutz lokaler Regen- und Urwälder gehen. Dies wird bereits durch Entwicklungsprojekte zur Verbreitung verbesserter Kochherde und von Biogasanlagen unterstützt. Ein für Entwicklungs- und Schwellenländer großes Potential besteht in der Trocknung höherwertiger Güter. Durch persönliche Kontakte zum Umweltministerium der Republik Uganda und des dortigen GIZ Energieprogramms (*Promotion of Renewable Energy and Energy Efficiency Programme - PREEEP*) ist bekannt, dass die Trocknung von Kaffeebohnen, Reis, Mais, Biobrikettes und weiterer Brennstoffe wie z.B. Kaffeebohnschoten und Reisspelzen ein wichtiges Thema für die Steigerung der Energieeffizienz im ländlichen Raum ist. Derzeit wird eine Möglichkeit diskutiert, weitere Tests innerhalb eines Projektes mit der staatlichen schweizer Organisation *Helvetas Swiss Intercooperation* durchzuführen, dessen Schwerpunkt die Trocknung von Kaffeebohnen, Nüssen und Biobrikettes umfasst und zudem Stammholz von Bananengewächsen zur Papierproduktion bereitstellen soll.

Nachfolgende Versuche sollten darauf abzielen, die Eignung des Solartrockners für unterschiedliche Obst- und Gemüsesorten sowie Heilkräuter und Gewürzpflanzen zu untersuchen. Es ist denkbar, dass der TGB für einige dieser Güter über seine Höhe durch Zwischenböden unterteilt werden muss, um eine Beschädigung des Aufgabegutes durch darüber befindliches Material so verhindern. Der Umbau zu einem Hordentrockner ließe sich mit wenig Material- und Zeitaufwand realisieren.

Zudem würde der Trockner durch Mobilität an Praktikabilität gewinnen. Auch dieser Umbau ließe sich mit wenig Aufwand durchführen: Durch die Begrenzung des Solarkollektors auf 90° bis 270° Azimuth, wäre an der „Nordseite“ genug Platz für die Anbringung von Rädern und Haltegriffen. So ließe sich der Trockner

10. Diskussion und Ausblick

ähnlich einer Sackkarre oder Schubkarre bewegen.

Für einen dauerhaften Einsatz am Campus Klein-Altendorf ist der Solartrockner auf ein alternatives Entnahmesystem (z.B. hydraulisch) umzurüsten, was jedoch erhebliche Kosten bedeutet. Dass der Trocknungsprozess durch den Trockner beschleunigt werden kann, konnte zwar gezeigt werden, jedoch sind weitere Tests notwendig, um ein Maß für die maximale Produktionsmenge pro Jahr zu ermitteln.

Einen wesentlich vielversprechenderen Anwendungsort bieten Entwicklungsländer, in denen die benötigten Materialien zumeist kostengünstig zu bekommen sind und in denen der manuelle Aufwand aufgrund niedriger Stundenlöhne rentabel ist. Die Anschaffung des Trockners könnte für die lokale Bevölkerung zudem durch Mikrokredite erleichtert oder Subventionen durch Hilfsorganisation unterstützt werden.

Ein Schwachpunkt des Trockners ist speziell für Entwicklungsländer relevant: Die Kollektorfolie ist in regelmäßigen Abständen auf Beschädigungen zu untersuchen und gegebenenfalls zu reparieren. Aus eigener Erfahrung ist die Folie jedoch in diesen Ländern einer weitaus anspruchsvolleren Umgebung ausgesetzt. Abgesehen von den klimatischen Einflüssen laufen oftmals Haustiere und Vieh frei herum, die das Gerät beschädigen können. Es ist somit entscheidend, einen geeigneten Aufstellort zu identifizieren. An der Weiterentwicklung des Solarkollektors wird gearbeitet.

11. Zusammenfassung

In der Beschreibung des aktuellen Standes des Wissens und der Technik wurde dargelegt, dass eine technische Trocknung des am Campus Klein-Altendorf anfallenden Hackgutes unabdingbar ist, um Schimmelbildung und Trockenmasseverluste zu vermeiden sowie die Abbrandgefahr von Lagermieten zu verringern. Aufgrund mangelnder Alternativen wurde ein Projekt zur Entwicklung eines solaren Satzrockners ins Leben gerufen. Die dafür im Vorfeld durchgeführten Versuche dienten der Überprüfung der Machbarkeit des Vorhabens und der Identifikation des konstruktionstechnischen Aufbaus des Trockners.

Der erste in Kapitel 5 beschriebene Vorversuch zeigte, dass bei der Durchströmung von Hackgut mit einer Schütthöhe von 3 m der Strömungswiderstand bzw. Druckverlust auf 150 Pa zu begrenzen ist, wenn die Luftgeschwindigkeit unter $0,1 \text{ m s}^{-1}$ beträgt. Dies trifft auch auf die nach DIN EN 14961-4:2011-09 kleinste Korngrößenklasse P16 zu. Bei einer Luftgeschwindigkeit von $0,099 \text{ m s}^{-1}$ stellte sich ein Strömungswiderstand von 143,70 Pa ein. Die in Kapitel 3 beschriebene Arbeitshypothese konnte dadurch bestätigt werden.

Im folgenden Kapitel wurde die Möglichkeit der Trocknung von Hackgut mittels unkonditionierter Frischluft am Campus Klein-Altendorf praktisch untersucht. Dies geschah in zwei Versuchsdurchgängen. Im ersten Durchgang, der im Sommer (07.09.2011 - 06.10.2011) stattfand, wurde Rodungsholz aus der standorteigenen Apfelplantage ohne Wurzelanteil mit einem Anfangswassergehalt von durchschnittlich 47,11% innerhalb von 29 Tagen auf einen mittleren Endwasser-

11. Zusammenfassung

gehalt von 15,50% getrocknet. Der Ausnutzungsgrad des Trocknungspotentials der Trocknungsluft lag hier zwischen 82,5% und 85,11%.

Im zweiten Durchgang wurde wiederholt das feinere P16-Material verwendet, dessen Wassergehalt in einem Zeitraum von 41 Tagen von durchschnittlich 38,49% auf 19,86% verringert wurde. Der zweite Versuch wurde im Januar und Februar 2012 unter zeitweise negativen Umgebungstemperaturen durchgeführt, die niedrigere und schwankende Ausnutzungsgrade des Trocknungspotentials zwischen 66,65% und 85,36% mit sich brachten.

Eine visuelle Prüfung des Materials nach Abschluss des jeweiligen Durchgangs ergab, dass sich in der Schüttung keine nassen Zonen ausbildeten, wodurch eine Schimmelbildung verhindert wurde. Somit konnte die dritte Arbeitshypothese ebenfalls bestätigt werden.

Die Berechnung des Trocknungspotentials (Kapitel 7) von +2,5 K und +5,0 K vorgewärmter Trocknungsluft ergab unter den klimatischen Bedingungen am Campus Klein-Altendorf eine Steigerung der Absorptionsfähigkeit gegenüber unconditionierter Frischluft von 65,64% und 135,98%.

Der in Kapitel 8 beschriebene solare Satzrockner für holzartige Biomasse wurde über einen Zeitraum von acht Wochen getestet. In dieser Zeit wurden Hackschnittel der Größenklasse P16 mit einem Anfangswassergehalt von 40,25% auf 11,73% getrocknet.

Auch in diesem Versuch und trotz einer Schütthöhe von 5 m konnten zum Zeitpunkt des Gutaustrags keine nassen Zonen bzw. Schimmelbildung festgestellt werden. Diese Tatsache, die geringe Standardabweichung beim Endwassergehalt (siehe Abbildung 8.10) und eine aufgebrauchte Trocknungszeit von unter acht Wochen lassen darauf schließen, dass die vierte Arbeitshypothese erfüllt wurde.

Durch die Aufzeichnung von Temperaturwerten in der Schüttung und im So-

larkollektor konnte zudem nachgewiesen werden, dass tatsächlich eine Lufterwärmung und Trocknung stattfand. Die Nennleistung des Ventilators von 4 kW wurde dabei lediglich zu etwa einem Achtel genutzt, was wiederum auf die geringe Luftgeschwindigkeit in der Schüttung zurückzuführen ist.

Während des Trocknungsvorgangs kam es zu keinerlei technischen Ausfällen des Systems, jedoch versagte die Entnahmeeinrichtung zum Zeitpunkt der Hackgutausfuhr. Der Grund hierfür lag an einem zu leistungsschwachen Elektromotor, der nicht fähig war, das Rührwerk zu rotieren.

In den in Kapitel 9 beschriebenen Feldversuchen in Nepal, wurden kleinere Zweige und Ästen getrocknet. Im ersten Versuch fand tropisches Hartholz Verwendung, dessen Wassergehalt innerhalb von fünf Betriebswochen von 59,12% auf 16,23% gesenkt werden konnte. Im Vergleich zu der Fraktion, die unter gleichen klimatischen Bedingungen auf dem Hausdach platziert wurde, ergaben sich lediglich geringe zeitliche Einsparungen. Dies ist auf tägliche Stromausfälle zurückzuführen, die den Betrieb des ans öffentliche Stromnetz angeschlossenen Solartrockners beeinflussten und die Ausnutzung der maximal möglichen Sonnenstunden auf 51,63% reduzierten.

Die Trocknung des Bambus im PV-angetriebenen Trockner erstreckte sich über einen Zeitraum von vier Wochen. Der Wassergehalt wurde von 50,43% auf 18,30% reduziert.

Auch dieser Prototyp erwies sich als verlässlich und robust. So kam es zu keinerlei Ausfällen, jedoch musste die Kollektorfolie in regelmäßigen Abständen kontrolliert und gegebenenfalls ausgebessert werden.

Literaturverzeichnis

- [Ahmad 2001] AHMAD, N.: Agricultural solar air collector made from low cost plastic packing film. In: *Renewable Energy* Bd. 23 (2001), Juli, S. 663–671
- [Ammer 1964] AMMER, U.: Über den Zusammenhang zwischen Holzfeuchtigkeit und Holzzerstörung durch Pilze. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 22. Jg. Heft 2 (1964), S. 47–51
- [Anonymus01 2012] ANONYMUS01: Die Welt der Batterien - Funktion, Systeme, Entsorgung / Stiftung gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (Hrsg.). Hamburg, Mai 2012. – Broschüre
- [Anonymus02 2010] ANONYMUS02: Kurzumtriebsplantagen für die Energieholzgewinnung - Chancen und Risiken - / Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). Berlin, Juli 2010 (55). – Positionspapier
- [Anonymus03 2016] ANONYMUS03: *Erneuerbare Energien in Zahlen - Status Quo der Erneuerbaren Energien*. Internet. Version: Mai 2016. www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen. – Bundesamt für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)
- [Anonymus04 2009] ANONYMUS04 ; EUROPÄISCHE UNION (Hrsg.): *Amtsblatt der Europäischen Union - Rechtsvorschriften - Richtlinie 2009/28/EG*. Internet. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2009:140:FULL&from=DE>. Version: Juni 2009. – Richtlinie
- [Anonymus05 2009] ANONYMUS05: *Heizen mit Scheitholz und Holzhackschnitzeln - Holz - ein umweltschonender Brennstoff wird wieder entdeckt*. Straubing: C.A.R.M.E.N. - Centrales Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungsnetzwerk (Hrsg.), Juni 2009
- [Anonymus06 2011] ANONYMUS06: *TRP-RT - Schnittholz-Mulchgeräte für den Wein- und Obstbau*. Internet. <http://www.kuhn.de/de/range/hckseln-und-mulchen/rotormulchgerate/trp-120-rt-cv.html>. Version: 2011. – Kuhn Maschinen-Vertrieb GmbH; Genthin

Literaturverzeichnis

- [Anonymus07 2016] ANONYMUS07: *Solarunterstützte Trocknung*. Internet. <http://dx.doi.org/06.06.2016>. Version: Juni 2016. – energie+innovation, München
- [Anonymus08 2016] ANONYMUS08: *Prinzip der Heißdampftrocknung bei Atmosphärendruck*. Internet. <http://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/kompetenzen/physikalische-prozesstechnik/waerme-und-sorptionssysteme/trocknung-und-torrefizierung/heissdampftrocknung.html>. Version: 2016. – Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart
- [Anonymus09 2014] ANONYMUS09: *Solarer Tunnelrockner „Hohenheim“*. Internet. www.innotech-ing.de/de/index.php/tunnelrockner. Version: 2014. – Innotech Ingenieursgesellschaft mbH
- [Anonymus10 2011] ANONYMUS10: *Feste Biobrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 4: Holzhackschnitzel für nichtindustrielle Verwendung; Deutsche Fassung EN 14961-4:2011*. ICS 75.160.10. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Normenausschuss Materialprüfung (NMP), September 2011. www.ostermaier-dienstleistungen.de/files/1753875.pdf
- [Anonymus11 2014] ANONYMUS11: *Qualitätshackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4*. Straubing : Internet, Juli 2014. – Technologie- und Förderzentrum (TFZ) - Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe
- [Anonymus12 2016] ANONYMUS12: *Chippo 510 C*. Internet. www.komptech.com/de/produkte-komptech/pdetails/chippo-510-c.html. Version: 2016. – Komptech GmbH, Frohnleiten, Österreich
- [Anonymus13 2016] ANONYMUS13: *Multi-Datenlogger VOLTCRAFT DL-121TH*. Internet. www.conrad.de/de/. Version: 2016. – Conrad Electronic SE
- [Anonymus14 2016] ANONYMUS14: *Temperatur-Messgerät Extech SDL 200*. Internet. www.conrad.de/de/. Version: 2016. – Conrad Electronic SE
- [Anonymus15 2016] ANONYMUS15: *Anemometer testo 425*. Internet. <https://www.conrad.de/de/anemometer-testo-425-0-bis-20-ms-hitzdrahtsensor-101159.html>. Version: 2016. – Conrad Electronic SE
- [Anonymus16 2016] ANONYMUS16: *Energie aus Holz. Brennstoff mit Zukunft*. Internet. www.reterra.de/ret/spektrum/energie/pyrohack/. Version: Mai 2016. – Reterra Service GmbH

- [Anonymus17 2015] ANONYMUS17: *Asien - Nepal - Beratung zur Energieeffizienz*. Internet. www.giz.de/de/weltweit. Version: 2015. – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, Bonn
- [Anonymus18 2015] ANONYMUS18: *Alles über Nepal & Tibet*. Internet. www.allesuebernepal.com. Version: 2015. – Abgerufen am: 02.04.2015
- [Anonymus19 2015] ANONYMUS19: *Länderinformationen - Nepal - Wirtschaft*. Internet. www.auswaertiges-amt.de. Version: März 2015. – Auswärtiges Amt Berlin
- [Anonymus20 2016] ANONYMUS20: *Local Weather - Nepal Climate History*. Weather2 Ltd, Mercat House, 1103 Argyle Street, Glasgow, G3 8ND, UK : Internet: www.weather2.com, Februar 2016
- [Anonymus21 2016] ANONYMUS21: *Subtropen*. Frankreich : Internet: dictionary.sensagent.com, Februar 2016
- [Anonymus22 2012] ANONYMUS22: *National Population and Housing Census 2011*. Government of Nepal, National Planning Commission Secretariat, Central Bureau of Statistics (Hrsg.), November 2012
- [Anonymus23 2015] ANONYMUS23: *mündliche Mitteilung des Electricity Office Bardiya*. März 2015
- [Anonymus24 2016] ANONYMUS24: *Übersicht Gewächshausfolien*. Internet. www.folitec.de/gewaechshausfolien.html. Version: 2016. – folitec Agrarfolien-Vertriebs GmbH
- [Anonymus25 2016] ANONYMUS25: *Rohr-Radial-Lüfter AXC100B*. Internet. www.conrad.de/de/. Version: 2016. – Conrad Electronic SE
- [Anonymus26 2012] ANONYMUS26: *Montage-, Betriebs- und Wartungsanleitung - Radialventilator*. Produkt beiliegend. www.neuero-farm.de. Version: 2012. – Neuero Farm- und Fördertechnik GmbH
- [Anonymus27 2016] ANONYMUS27: *Holzfeuchtemessgerät FM-300*. Internet. www.conrad.de/de/. Version: Januar 2016. – Conrad Electronic SE
- [Anonymus28 2016] ANONYMUS28: *CSD3 - Sunshine Duration Sensor*. Internet. <http://www.kippzonen.com/Product/35/CSD-3-Sunshine-Duration-Sensor>. Version: 2016. – Kipp & Zonen B.V.; Delft, Niederlande
- [Balmer 2004] BALMER, H.: Kompostbiologie - Pilze und Bakterien die großen Unbekannten. In: *compost magazin* Nr. 2 (2004), S. 6 f.

Literaturverzeichnis

- [Belessiotis u. Delyannis 2011] BELESSIOTIS, V. ; DELYANNIS, E.: Solar Drying. In: *Solar Energy* Bd. 85 (2011), S. 1665–1691
- [Bruhn u. Reisinger 2015] BRUHN, K. ; REISINGER, K.: Wärmegewinnung aus Biomasse / Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.). Straubing, September 2015 (8). – Berichte aus dem TFZ
- [Brummack 2008] BRUMMACK, J.: Fremdenergiefreie Trocknung von Holzhackgut / Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. Potsdam-Bornim, 2008 (Bd. 63). – Bornimer Agrartechnische Berichte. – S. 5-20
- [Connachie et al. 2011] CONNACHIE, J. ; REED, D. ; GALENT, A. ; HASLAM-JONES, E. ; MEGHJI, S.: *NEPAL*. Stefan Loose Travel Handbücher, 2011
- [Diener et al. 1965] DIENER, R.G. ; BUELOW, F.H. ; RIES, S.K.: A plane area method for estimating the weight of living fruit trees. In: *Michigan Quart. Bulletin* 47 Nr. 4 (1965), S. 527 ff.
- [Diessenbacher u. Olbrisch 2009] DIESENBACHER, P. ; OLBRISCH, A.: Machbarkeitsstudie zur dezentralen Energieversorgung der Lehr- und Forschungsstation Campus Klein-Altendorf / Institut für angewandtes Stoffstrommanagement und Universität Bonn. 2009. – Forschungsbericht
- [Ebert 2010] EBERT, S.: *PHAST - Solare Trocknung mit Null-Primärenergie-Verbrauch*. Mai 2010. – Persönlicher Vortrag durch S. Ebert vom 14.12.2008, SEB - Solar Energie & Biomwärme, Altdorf
- [Eke 2011] EKE, A.: Prediction of optimum angle of inclination for flat plate solar collector in Zaria, Nigeria. In: *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* Bd. 13 (2011), Nr. 4
- [El-Sebaïi u. Shalaby 2013] EL-SEBAII, A. A. ; SHALABY, S.M.: Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. In: *Energy Conversion and Management* Bd. 74 (2013), Juni, S. 109–116
- [Falck 1907] FALCK, R.: Wachstumsgesetze, Wachstumsfaktoren und Temperaturwerte der holzzerstörenden Mycelien. In: *Hausschwammforschung* H. 1 (1907), S. 53 f.
- [Feller et al. 1999] FELLER, S. ; WEBENAU, B. v. ; WEIXLER, H. ; KRAUSENBOECK, B. ; GÖLDNER, A. ; REMLER, N.: Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln / Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.). Freising, April 1999 (Bd. 21). – LWF-Schriftreihe

- [Ferrero et al. 2009] FERRERO, F. ; MALOW, M. ; KRAUSE, M. SchmM. S.: Leitfaden zur Brandvermeidung bei der Lagerung von Biomasse / Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Berlin, 2009 (284). – Forschungsbericht. – S. 2 ff
- [Gnwali 2014] GNWALI, K.: *mündliche Mitteilung*. September 2014. – K. Gnwali, Vorsitzende der Federation of Comunity Forestry Users Nepal (FECOFUN), Bardiya
- [Golser et al. 2005] GOLSER, M. ; PICHLER, W. ; HADER, F.: Energieholztrocknung / Kooperationsabkommen Forst-Platte-Papier. Wien, Österreich, März 2005 (HFA-Nr.: F1887/04). – Forschungsbericht
- [Grundmann u. Schönholtz 1999] GRUNDMANN, R. ; SCHÖNHOLTZ, F.: *Ventilatoren-Fibel*. Karlsruhe : Promotor Verlag, 1999. – S. 30
- [Gustafsson 1981] GUSTAFSSON, G.: Artificial Drying of Wood Chips for Energy Purposes. In: FAZZOLARE RA, Smith C. (Hrsg.): *Beyond the Energy Crisis - Opportunity and Challenge*. Berlin, 1981, S. A151–A171. – Third International Conference on Energy Use Management
- [Hahn et al. 2014] HAHN, J. ; SCHARDT, M. ; SCHULMEYER, F. ; MERGLER, F.: Der Energieinhalt von Holz / Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) (Hrsg.). Freising, Juli 2014 (12). – Merkblatt
- [Hegde et al. 2015] HEGDE, V. N. ; HOSUR, V. S. ; RATHOD, S. K. ; HARSOOR, P. A. ; NARAYANA, K. B.: Design, fabrication and performance evaluation of solar dryer for banana. In: *Energy, Sustainability and Society - SpringerOpen Journal* Bd. 5 (2015), S. 1–12
- [Hemming 1999] HEMMING, W.: *Verfahrenstechnik*. 8. Auflage. Würzburg : Vogel Verlag, 1999 (Kamprath-Reihe)
- [Horváth et al. 2012] HORVÁTH, Z. ; MAROSVÖLGYI, B. ; IDLER, C. ; PECENKA, R. ; LENZ, H.: Storage Problems of Poplar Chips from Short Rotation Plantations with Special Emphasis on Fungal Development. In: *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 8 (2012), January, S. 123 – 132
- [Idler et al. 2008] IDLER, Christine ; SCHOLZ, Volkhard ; DARIES, Werner ; EGERT, Johannes: Schimmelpilzentwicklung und Trockenmasseverluste in Holzhackschnitzelhaufen. In: *Bornimer Agrartechnische Berichte* Heft 63 (2008), Juni, S. 45 ff.
- [Kaltschmitt et al. 2016] KALTSCHMITT, M. ; HARTMANN, H. ; HOFBAUER, H. ; KALTSCHMITT, M. (Hrsg.) ; HANSMANN, H. (Hrsg.) ; HOFBAUER, H. (Hrsg.):

Literaturverzeichnis

- Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren.* 3. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer Verlag GmbH, 2016 (ISBN 978-3-662-47437-2). – 3. Auflage
- [Karaj et al. 2011] KARAJ, Sh. ; BARFUSS, I. ; SCHALK, J. ; REISINGER, G. ; PUDE, R. ; MÜLLER, J.: Modelling of air resistance during drying of wood chips / Universität Hohenheim. Hohenheim, 2011. – Forschungsbericht
- [Karaj et al. 2012] KARAJ, Sh. ; MEISSNER, K. ; MÜLLER, J.: Geometric vs. aerodynamic diameter for modelling airflow resistance of wood chip / Institute of Agricultural Engineering, Universität Hohenheim. Hohenheim, 2012. – Forschungsbericht. – Hohenheim
- [Kollmann 1951] KOLLMANN, F.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe.* Bd. Erster Band. 2. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1951
- [Kraska 2016] KRASKA, T.: *persönliche Weitergabe.* August 2016. – Geschäftsführer des Campus Klein-Altendorf, Universität Bonn
- [Kromer et al. 1982] KROMER, K.-H. ; MOSER, E. ; RANNERTSHAUSER, J. ; SCHULZE-LAMMERS, P. ; SINN, H.: Verwertung von Obstbaum-Schnittholz - Mulchen - Kompostieren - Verheizen / KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. Darmstadt, 1982. – Forschungsbericht. – KTBL-Schrift 275
- [Kumar et al. 2015] KUMAR, M. ; SANSANIWAL, S. K. ; KHATAK, P.: Progress in solar dryers for drying various commodities. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Bd. 55 (2015), November, S. 346–360
- [Kunz 2016] KUNZ, A.: *schriftliche Mitteilung (eMail) vom 11.02.2016.* Februar 2016. – A. Kunz, Versuchstechniker am Campus Klein-Altendorf, Bereich Gartenbau
- [Kunz u. Völkerling 2015] KUNZ, A. ; VÖLKERING, G.: *Feldversuche Campus Klein-Altendorf 2015.* CKA 2015. Rheinbach: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Juni 2015
- [Kuptz et al. 2015] KUPTZ, D. ; SCHULMEYER, F. ; HÜTTL, K. ; DIETZ, E. ; TURROWSKI, P. ; ZORMAIER, F. ; BORCHERT, H. ; HARTMANN, H.: Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel / Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.). Version: April 2015. www.tfz.bayern.de. Straubing und Freising-Weihenstephan, April 2015 (40). – Berichte aus dem TFZ

- [Midilli 2001] MIDILLI, A.: Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. In: *International Journal of Energy Research* Bd. 25 (2001), Juni, Nr. 8, S. 715–725
- [Mollekopf u. Brummack 2011] MOLLEKOPF, N. ; BRUMMACK, J.: *Apparatefreie Trocknung von Hackgut*. 2011. – Vortrag an der Technischen Universität Dresden, Institut für thermische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
- [Montero et al. 2015] MONTERO, I. ; MIRANDE, M. T. ; SEPÚLVEDA, F. J. ; ARRANZ, J. I. ; ROJAS, C. V. ; NOGALES, S.: Solar Dryer Application for Olive Oil Mill Wastes. In: *Energies* Bd. 8 (2015), Dezember, S. 14049–14063
- [Mühlbauer 2009] MÜHLBAUER, W. ; SALFELD, F. (Hrsg.): *Handbuch der Getreidetrocknung - Grundlagen und Verfahren*. 1. Auflage. Clenze : Agrimedia GmbH, 2009
- [Mühlbauer u. Esper 2001] MÜHLBAUER, W. ; ESPER, A.: *Erneuerbare Energien in der Entwicklungszusammenarbeit*. Internet. www.aee.at/aee/index.php?option=com_content&view=article&id=673&Itemid=113. Version: Januar 2001. – Ursprünglich veröffentlicht in der Zeitschrift „erneuerbare energie“ der Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGIE Dachverband vom 01/2001
- [Neuhaus 2009] NEUHAUS, H.: *Ingenieurholzbau - Grundlagen-Bemessung-Nachweise-Beispiele*. 2. Auflage. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2009
- [Nollau u. Herschel 2008] NOLLAU, R. ; HERSCHEL, D. ; WILL, D. (Hrsg.) ; GEBHARDT, N. (Hrsg.): *Hydraulik: Grundlagen, Komponenten, Schaltungen*. 4. Auflage. Springer Verlag, 2008
- [Prankl u. Weingartmann 1994] PRANKL, H. ; WEINGARTMANN, H.: *Hackgut-trocknung Wippenham / Bundesanstalt für Landtechnik Wieselburg* (Hrsg.). Wieselburg, Österreich, September 1994 (Bd. 40). – Forschungsbericht
- [Prasad et al. 2006] PRASAD, J. ; PRASAD, A. ; VIJAY, V.K.: Studies on the Drying Characteristics of Zingiber Officinale Under Open Sun and Solar Biomass (Hybrid) Drying. In: *International Journal of Green Energy* Bd. 3 (2006), Nr. 1, S. 79–89
- [Roustapour u. Gazor 2015] ROUSTAPOUR, O. ; GAZOR, H.: Influence Collector Inclination of Solar Dryer on Apple Golab Chips Drying. In: *Agriculturae Conspectus Scientificus* Bd. 80 (2015), Nr. 2, S. 101–108
- [Schmid 2013] SCHMID, M.: *Analyse und Optimierung innovativer Verfahrensketten zur Kaskadennutzung von Schnitt- und Rodungsholz aus Obstplantagen als biogener Festbrennstoff*. Campus Klein-Altendorf, Rheinbach, Rheinische

Literaturverzeichnis

Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Forschungsbereich Nachwachsende Rohstoffe, Diss., 2013

[Schröder 2012] SCHRÖDER, S.: *Bamboo Preservation - Drying Bamboo Poles*. Internet. www.guaduabamboo.com/preservation/drying-bamboo-poles. Version: November 2012. – Guadua Bamboo; Beverwijk, Niederlande

[Vakkilainen et al. 2013] VAKKILAINEN, E. ; KUPARINEN, K. ; HEINIMÖ, J.: Large Industrial Users of Energy Biomass / Lappeenranta University of Technology für die International Energy Agency (IEA) Bioenergy - Task 40: Sustainable International Bioenergy Trade. Lappeenranta University of Technology, September 2013. – Bericht

[Wagner 2012] WAGNER, W.: *Strömung und Druckverlust*. 7. Auflage. Würzburg : Vogel Verlag, 2012

[Weege 2016] WEEGE, T.: *2.000 Kubikmeter Holzhackschnitzel in Brand*. Internet. www.feuerwehrmagazin.de/nachrichten/einsatze/2-000-kubikmeter-holzhackschnitzel-in-brand-59575. Version: Mai 2016. – Feuerwehr Magazin

Anmerkung des Verfassers: Sämtliche Abbildungen, die nicht mit einer Quellenangabe versehen wurden, stammen aus dem persönlichen Archiv des Verfassers.

Anhang

A. Druck- und Druckverlustkurven zu Kapitel 5

A.1. Druckkurven

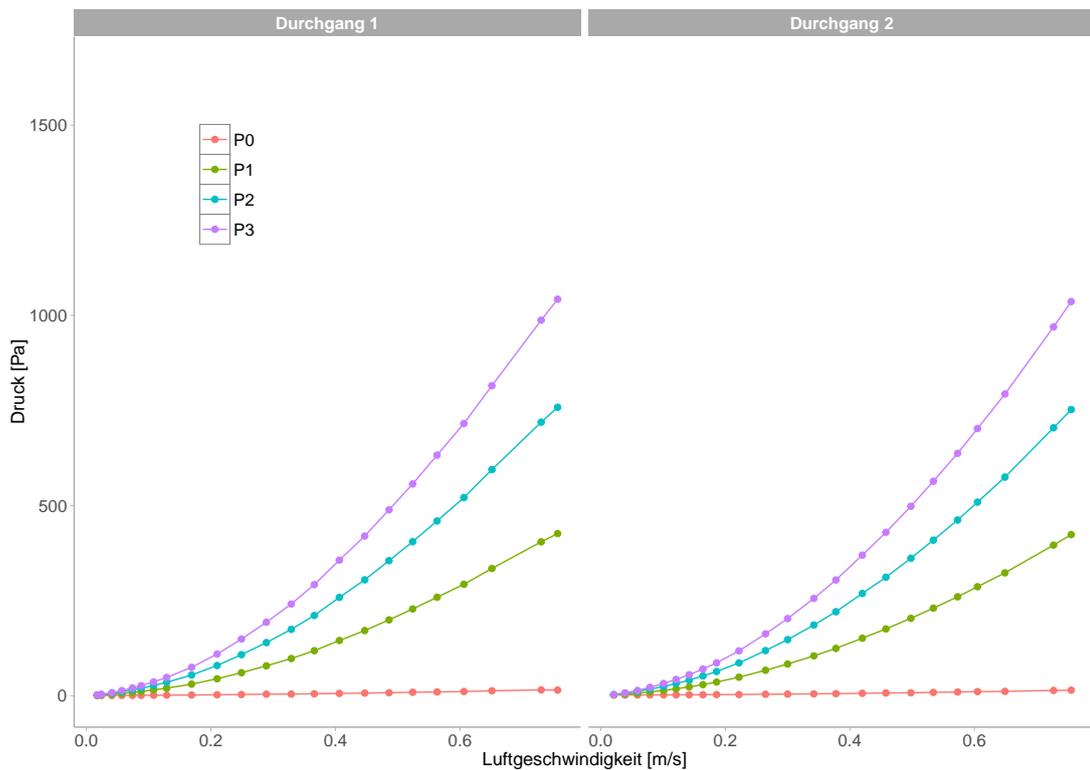


Abbildung A.1.: Druckkurve des Apfelbaumrodungsholzes ohne Wurzelanteil

A. Druck- und Druckverlustkurven zu Kapitel 5

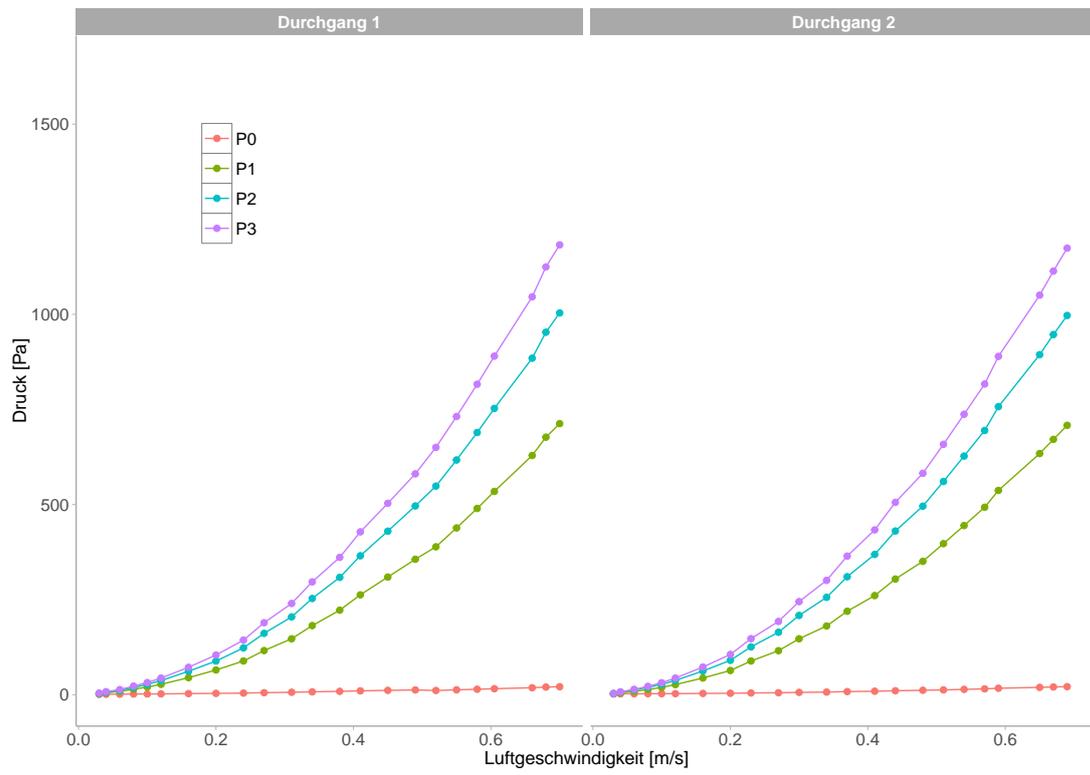


Abbildung A.2.: Druckkurve der Buchenhackschnitzel der Größenklasse P100

A.1. Druckkurven

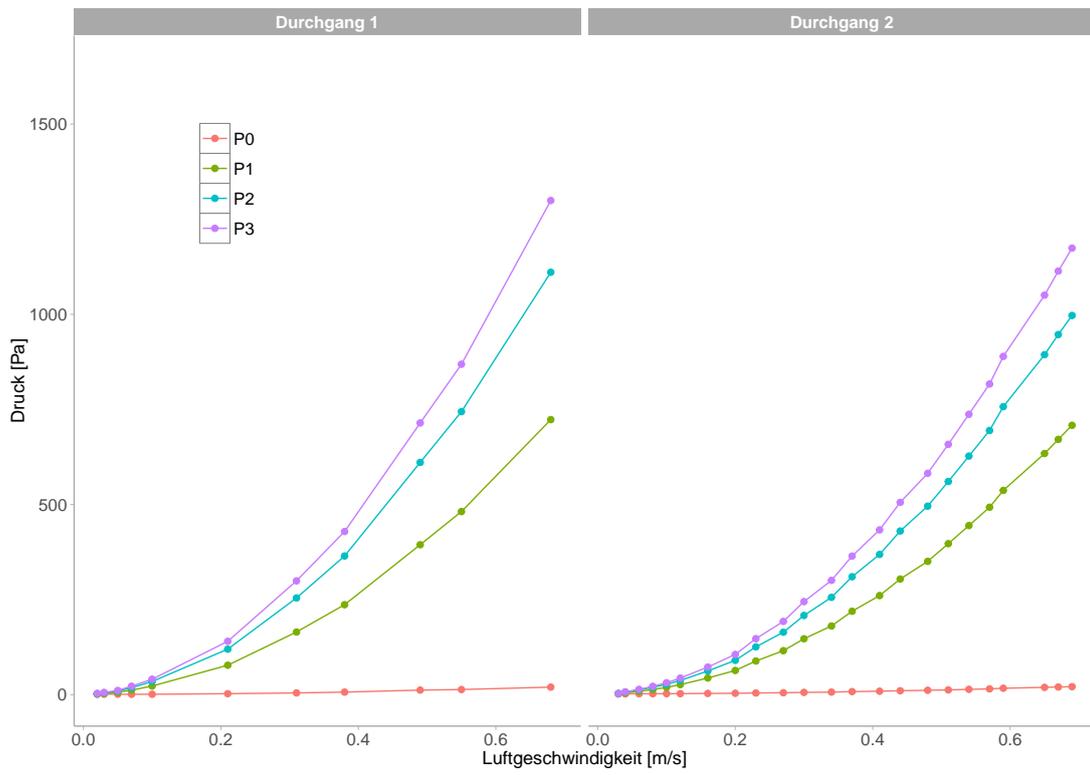


Abbildung A.3.: Druckkurve der Fichtenhackschnitzel der Größenklasse P63

A. Druck- und Druckverlustkurven zu Kapitel 5

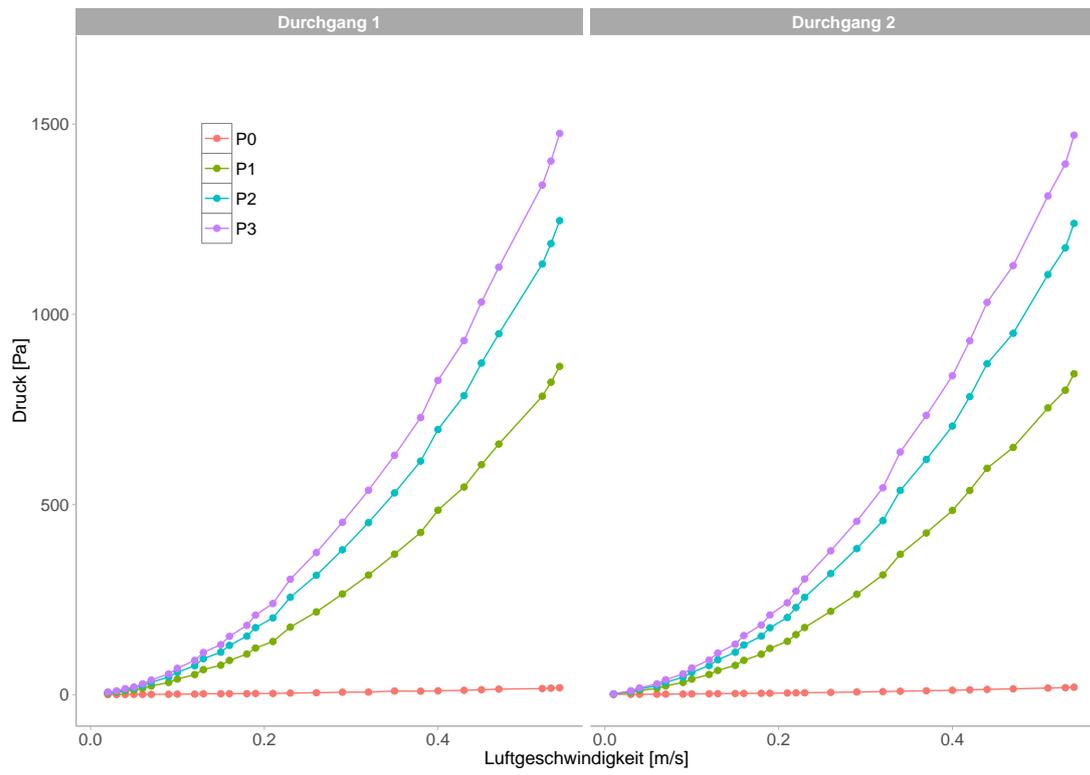


Abbildung A.4.: Druckkurve der Fichtenhackschnitzel der Größenklasse P45

A.1. Druckkurven

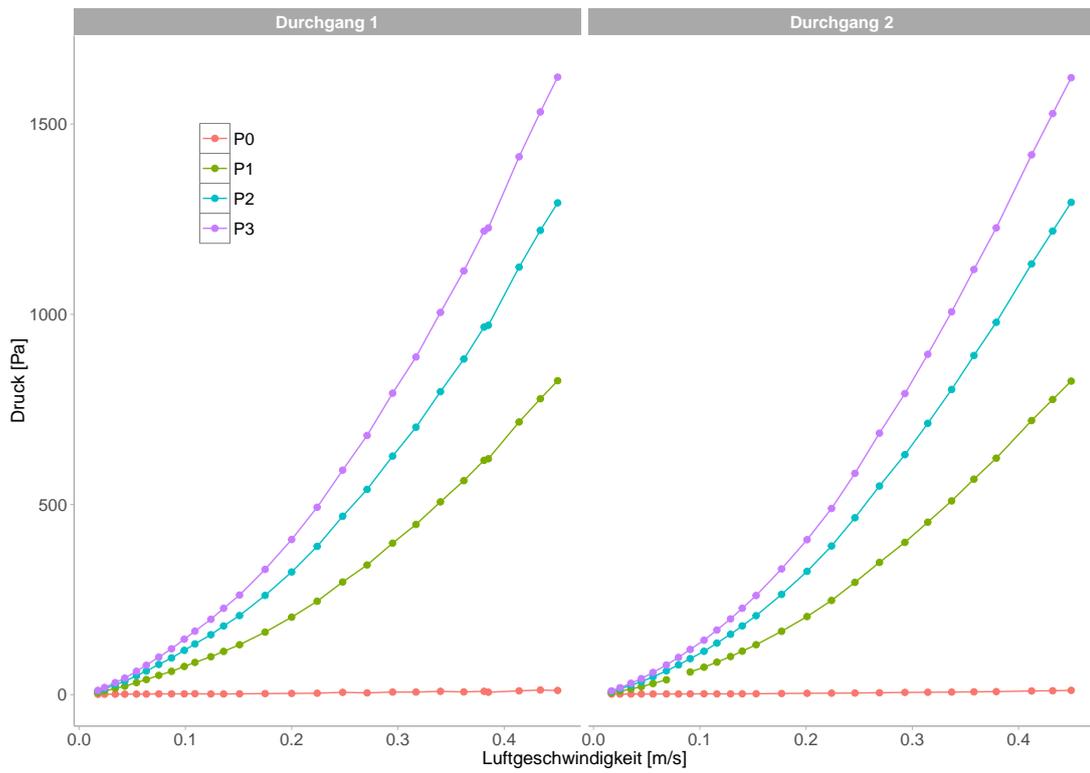


Abbildung A.5.: Druckkurve der Fichtenhackschnitzel der Größenklasse P16

B. Temperatur- und relative Feuchteentwicklung zu Kapitel 6

B.1. Versuchsdurchgang 1 - 07.09.2011-11.10.2011

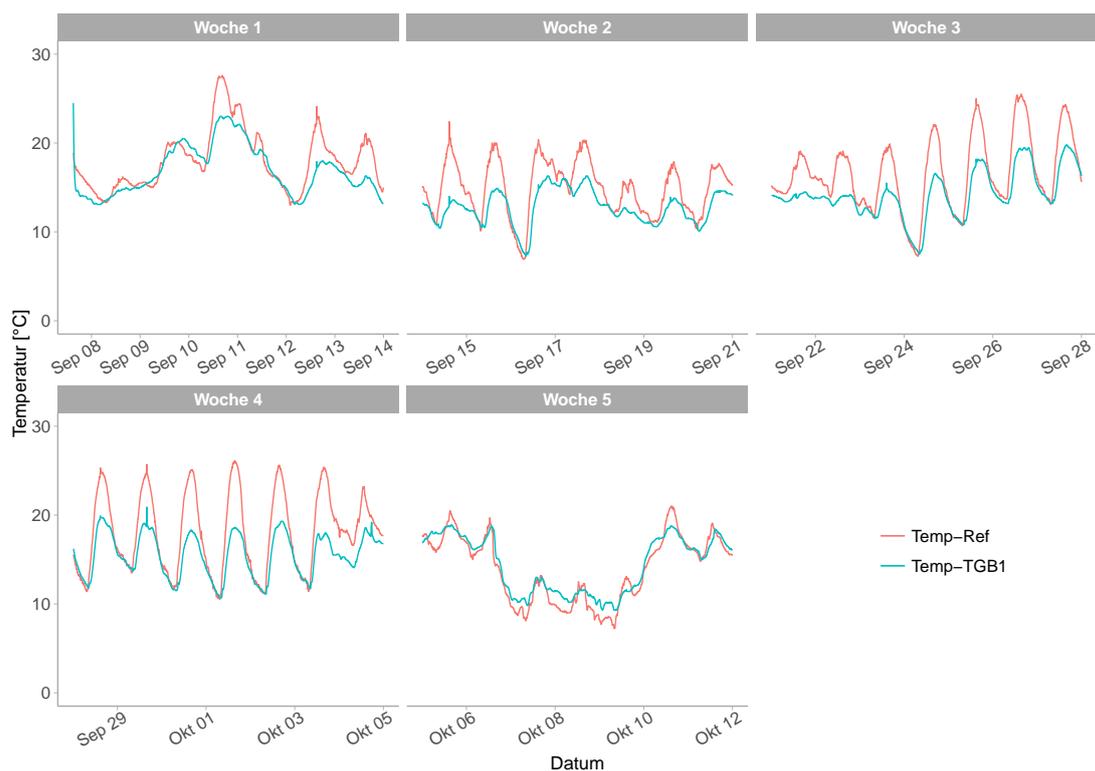


Abbildung B.1.: Temperaturentwicklung in TGB 1.1 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B.1. Versuchsdurchgang 1 - 07.09.2011-11.10.2011

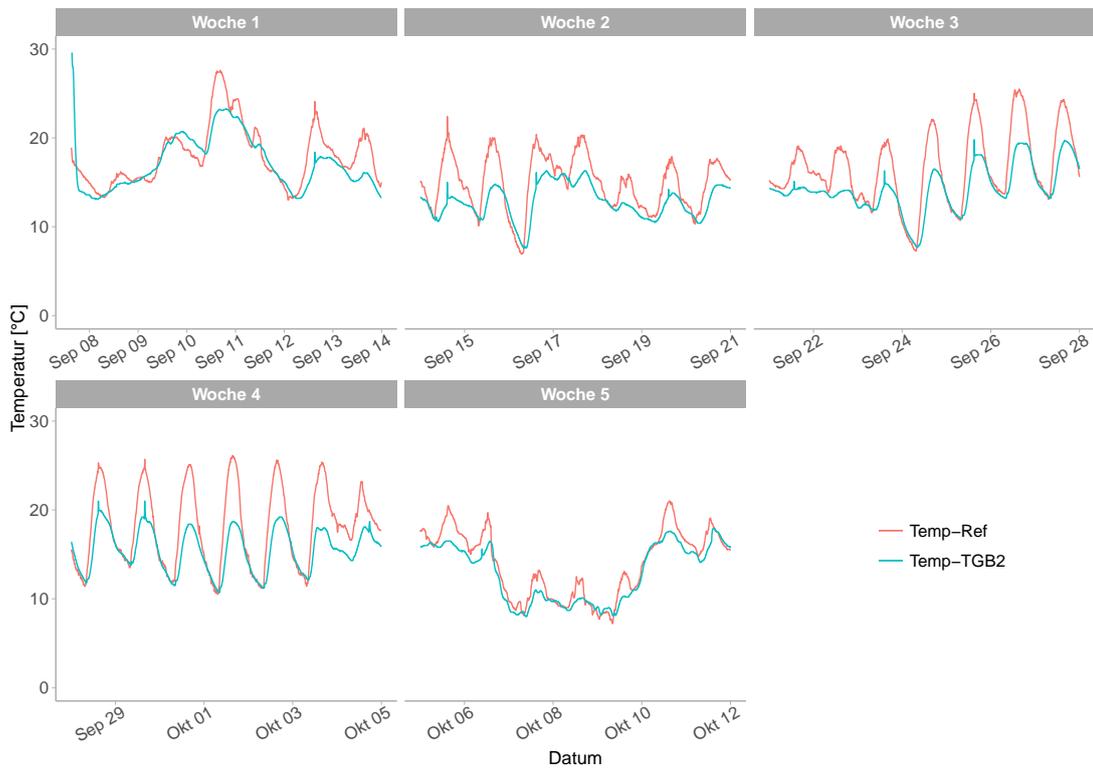


Abbildung B.2.: Temperaturentwicklung in TGB 1.2 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B. Temperatur- und relative Feuchteentwicklung zu Kapitel 6

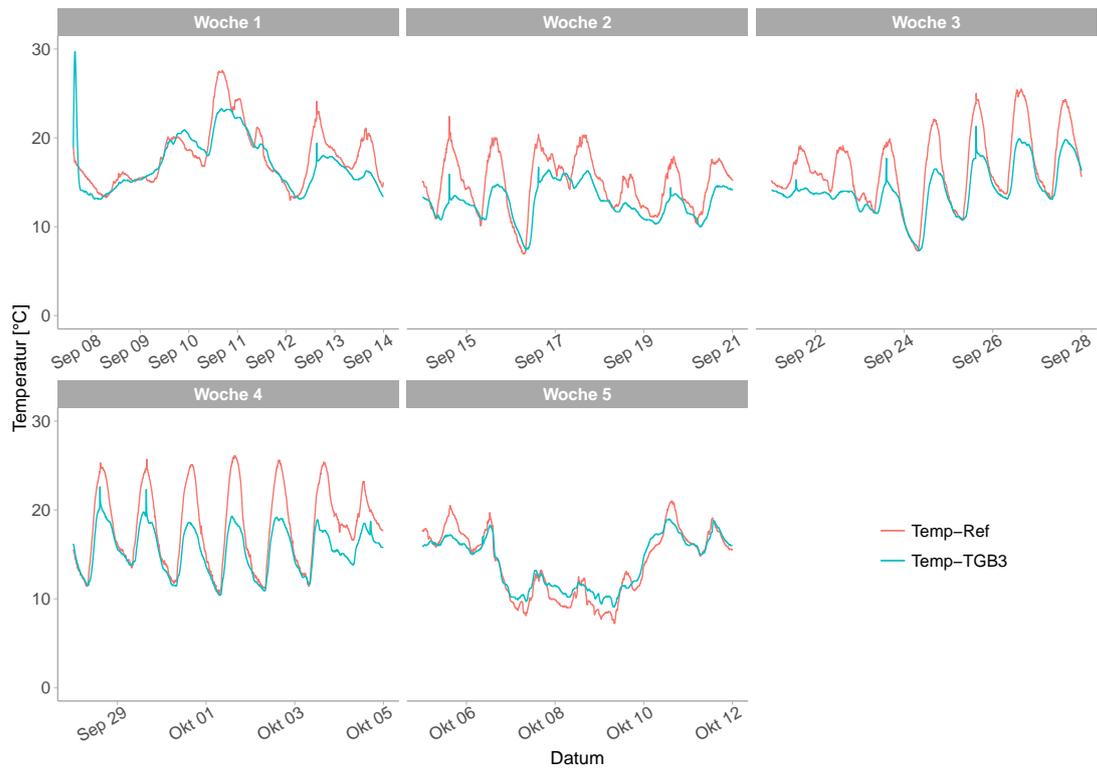


Abbildung B.3.: Temperaturentwicklung in TGB 1.3 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B.1. Versuchsdurchgang 1 - 07.09.2011-11.10.2011

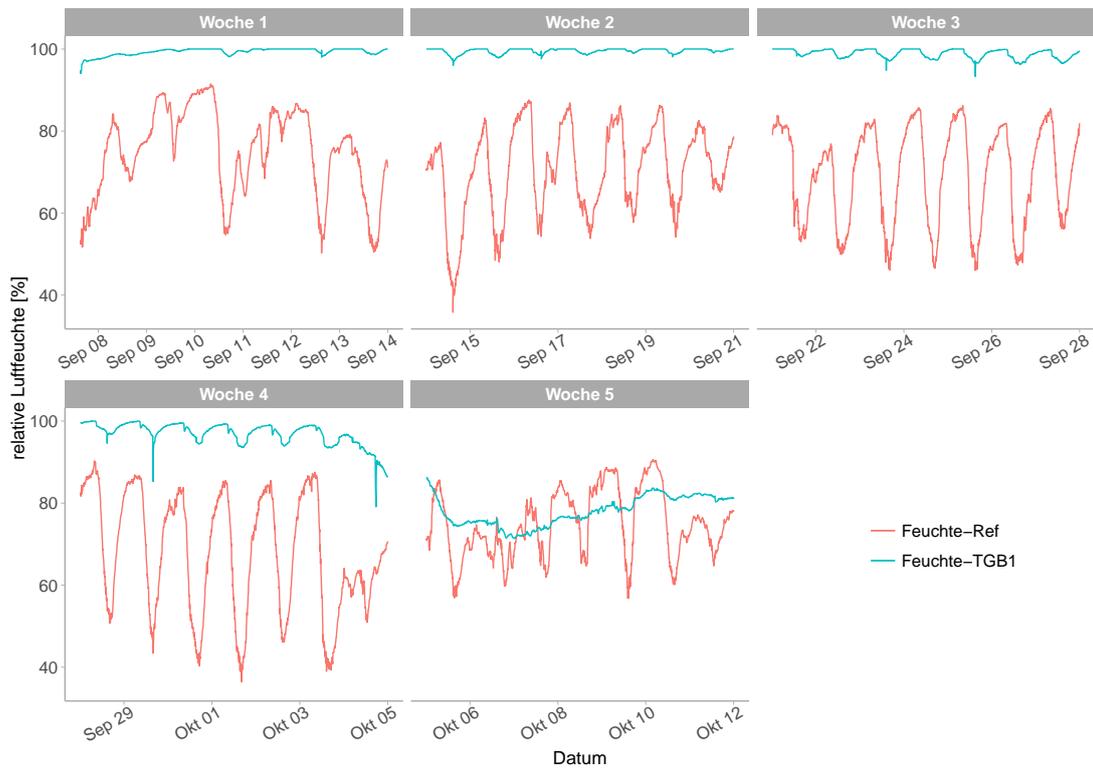


Abbildung B.4.: Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 1.1 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B. Temperatur- und relative Feuchteentwicklung zu Kapitel 6

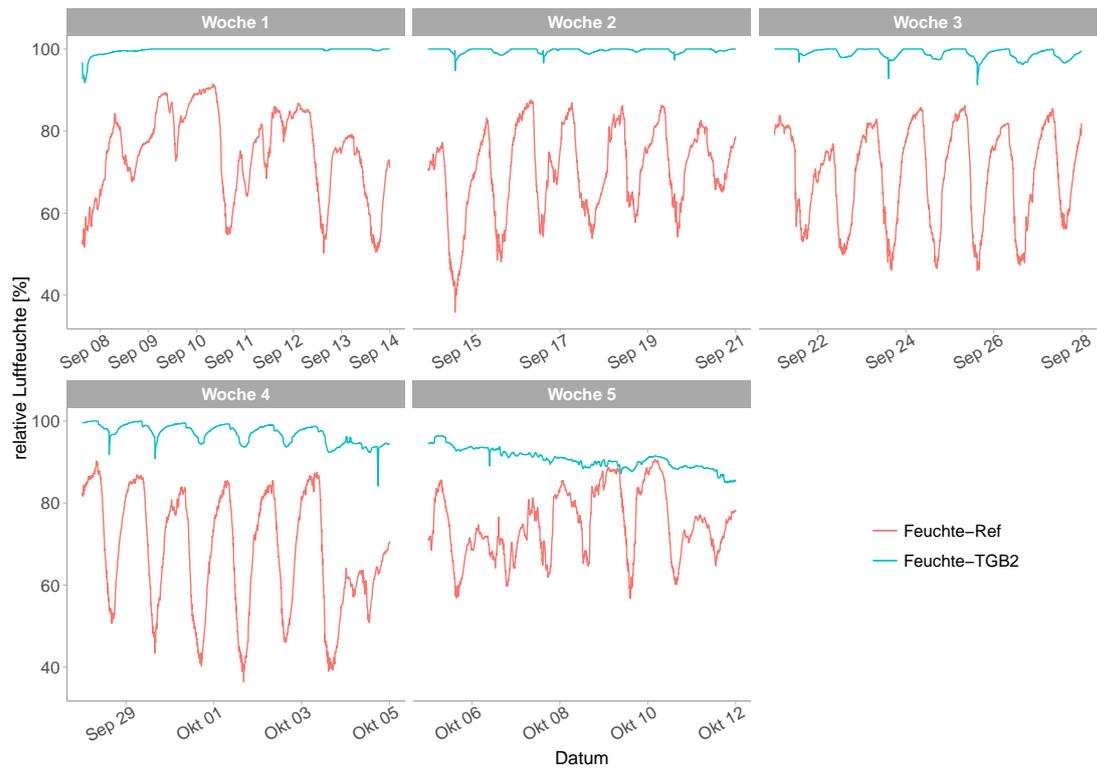


Abbildung B.5.: Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 1.2 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B.1. Versuchsdurchgang 1 - 07.09.2011-11.10.2011

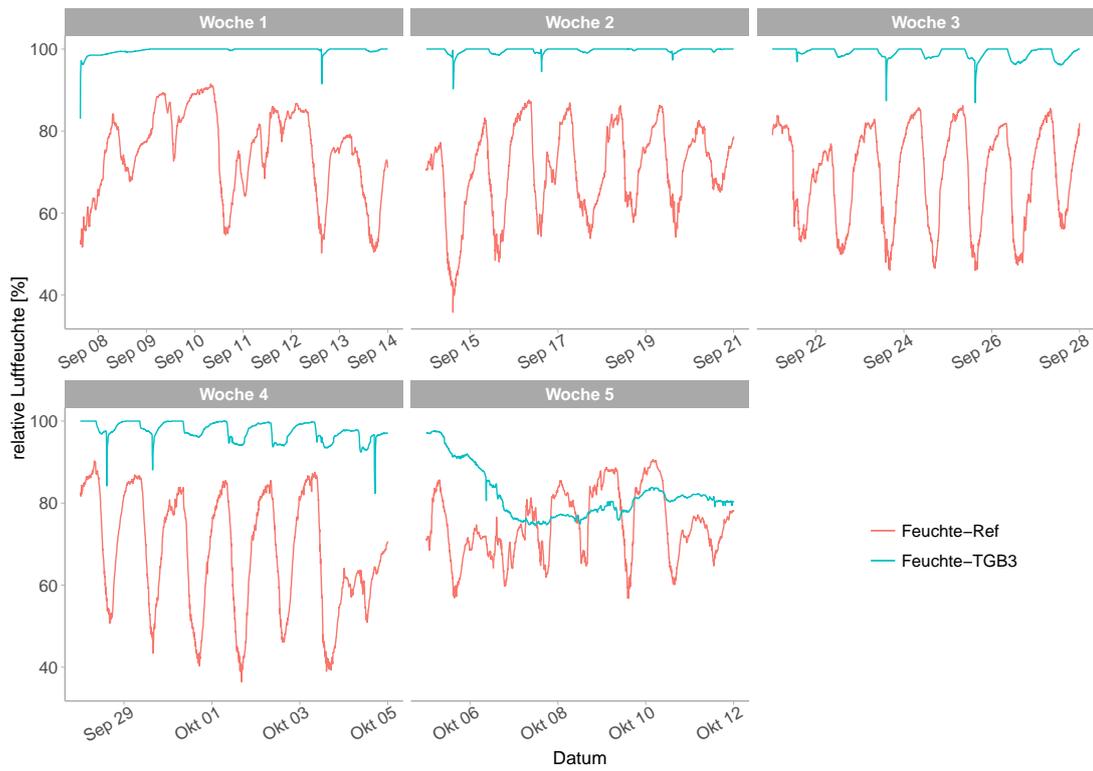


Abbildung B.6.: Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 1.3 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 1 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B.2. Versuchsdurchgang 2 - 18.01.2012-21.02.2012



Abbildung B.7.: Temperaturentwicklung in TGB 2.1 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2 vom 18.01.2012 bis 21.02.2012, Campus Klein-Altendorf

B.2. Versuchsdurchgang 2 - 18.01.2012-21.02.2012



Abbildung B.8.: Temperaturentwicklung in TGB 2.2 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2 vom 18.01.2012 bis 21.02.2012, Campus Klein-Altendorf

B. Temperatur- und relative Feuchteentwicklung zu Kapitel 6



Abbildung B.9.: Temperaturentwicklung in TGB 2.3 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2 vom 18.01.2012 bis 21.02.2012, Campus Klein-Altendorf

B.2. Versuchsdurchgang 2 - 18.01.2012-21.02.2012

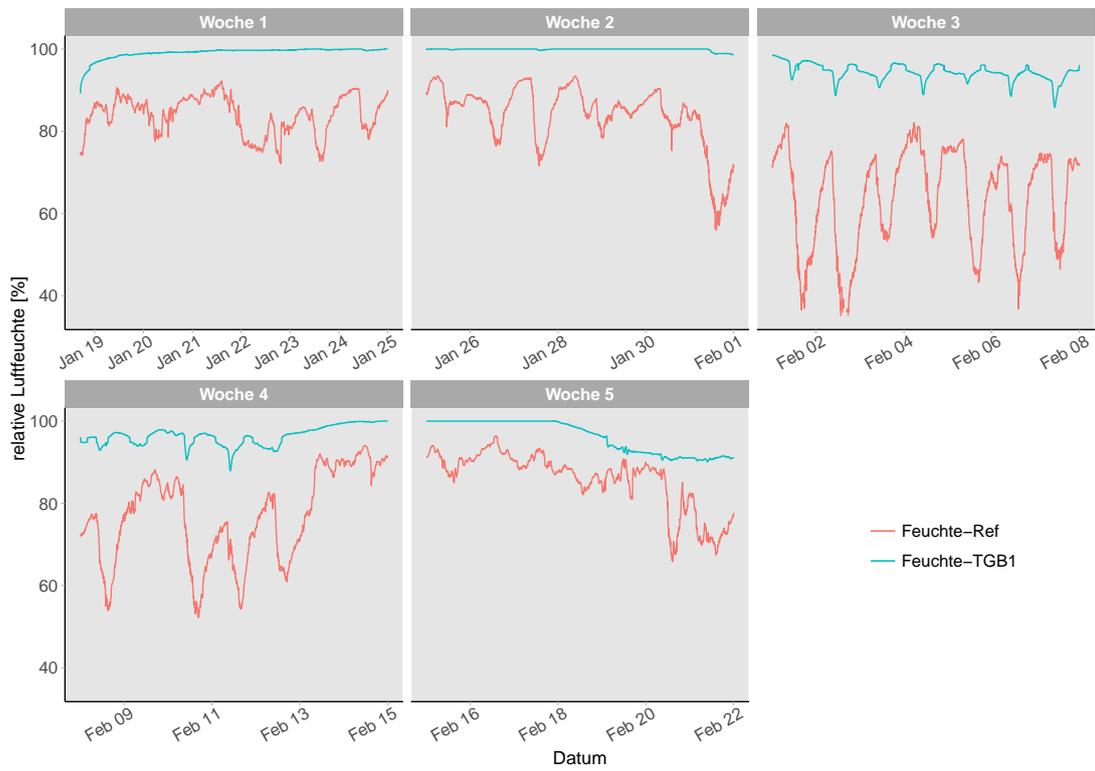


Abbildung B.10.: Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 2.1 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B. Temperatur- und relative Feuchteentwicklung zu Kapitel 6

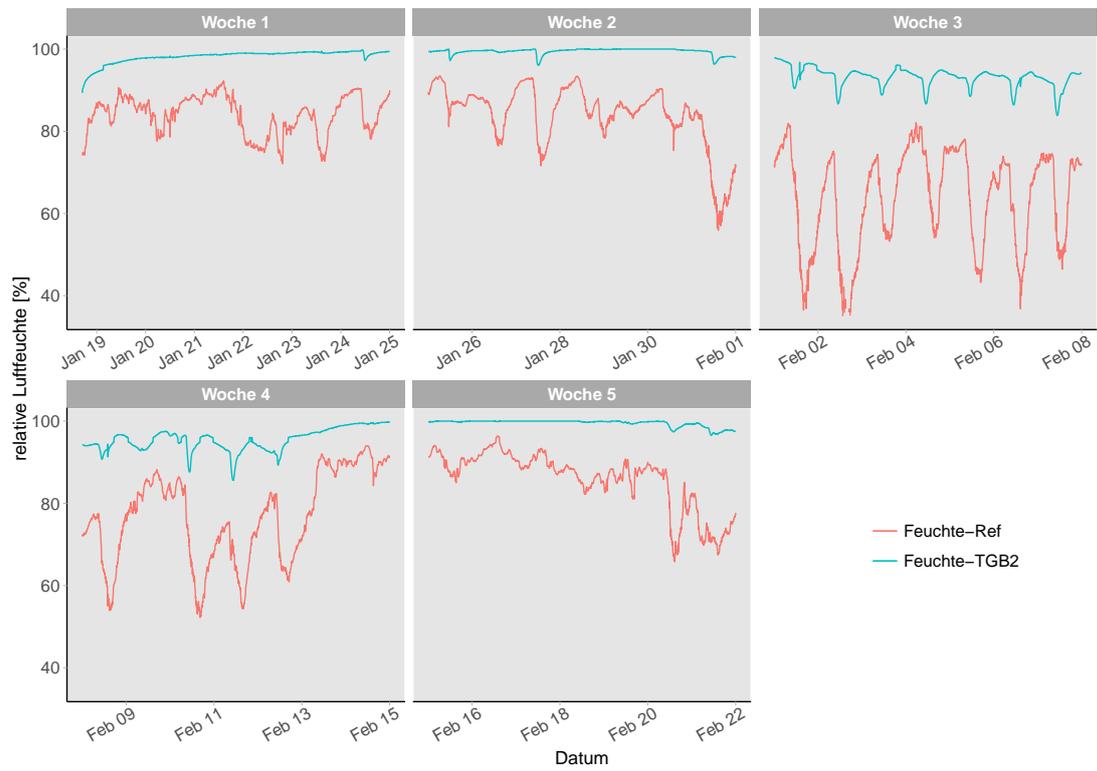


Abbildung B.11.: Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 2.2 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B.2. Versuchsdurchgang 2 - 18.01.2012-21.02.2012

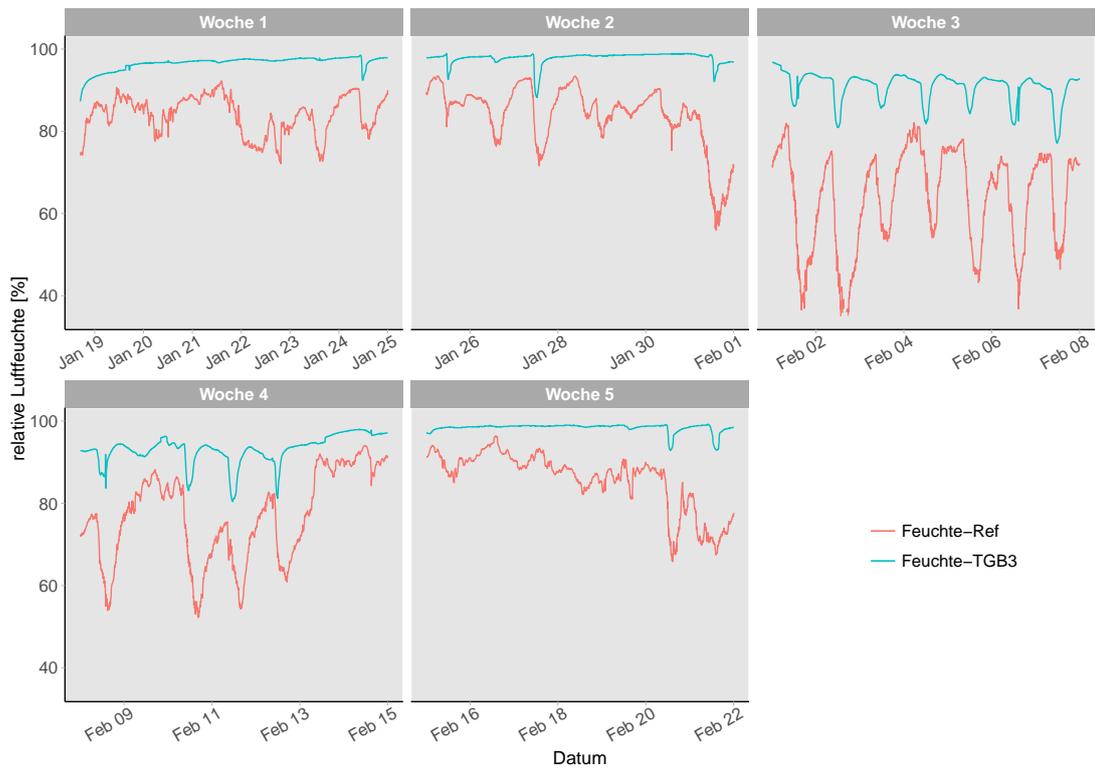


Abbildung B.12.: Entwicklung der relativen Feuchte in TGB 2.3 und Umgebung im praktischen Versuch zur Kaltlufttrocknung; Versuchsdurchgang 2 vom 08.09.2011 bis 11.10.2011, Campus Klein-Altendorf

B.3. Technische Daten und Kennlinie des Ventilators *AXC100B*

Tabelle B.1.: Technische Daten des AXC100B nach ANONYMUS25 [2016]

Kategorie		Radiallüfter
maximale Leistung	P_{max}	70 W
maximale Drehzahl	n_{max}	2.530 min^{-1}
maximaler Druck	p_{max}	380 Pa
maximale Förderleistung	\dot{V}_{max}	$0,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ bzw. $250 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
Nennspannung	U_{Nenn}	230 V

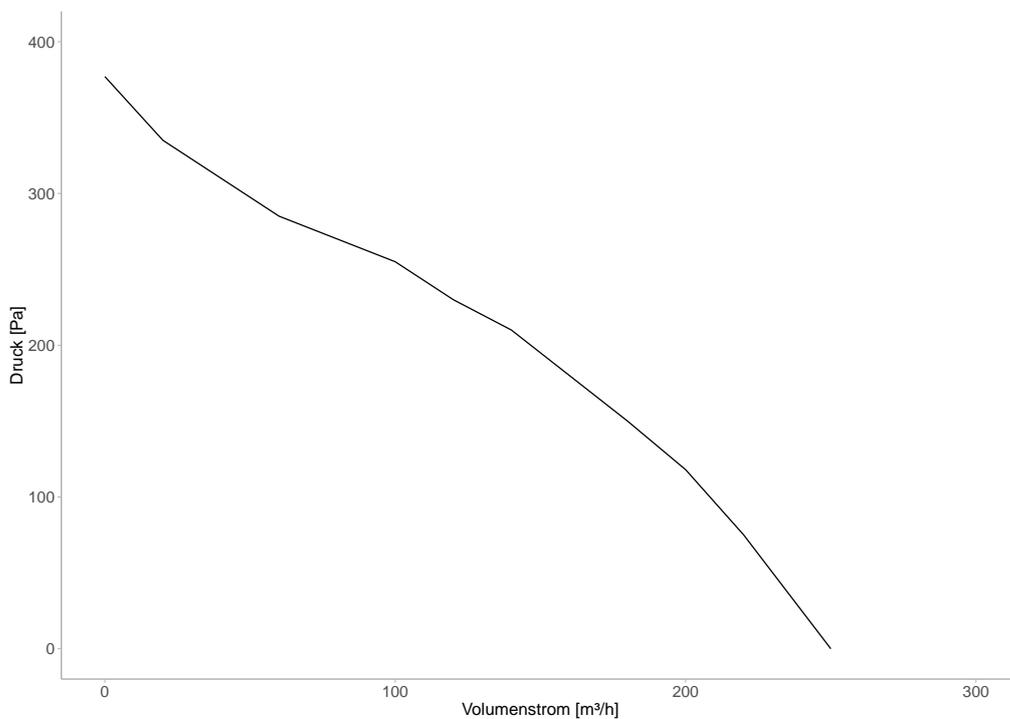


Abbildung B.13.: Ventilator Kennlinie des *AXC100B*; abgeändert aus ANONYMUS25 [2016]

C. Anhang zu Kapitel 8

C.1. Technische Daten Kollektorfolie

Tabelle C.1.: Technische Daten der Kollektorfolie nach ANONYMUS24 [2016]

Folie	Lumitherm / UV5
Farbe	transparent
Stärke	200 μ
UV-Garantie	5 Jahre (90 kLy a ⁻¹)
Lichtdurchlässigkeit	ca. 90% Total ca. 30% diffuses Licht
UV-A Durchlässigkeit	ja (ab 340 nm)

C.2. Konstruktionskosten

Tabelle C.2.: Materialkosten für den solaren Satztrockner; Standort: Campus Klein-Altendorf

ld. Nr.	Bezeichnung	Einzelpreis EUR	Anzahl / Menge	Gesamtpreis EUR
I. Unterkonstruktion und Entnahmeeinrichtung				
1	Unterkonstruktion	4.950,00	1 Stk	4.950,00
2	Rührwerk	6.630,00	1 Stk	6.630,00
3	Austragsschnecke	4.219,00	1 Stk	4.219,00
4	Kegelaufsatz	730,00	1 Stk	730,00
Zwischensumme I.:				16.529,00
II. Befülleinrichtung				
5	Hackschnitzelgebläse	6.545,00	1 Stk	6.545,00
6	Gebläseanschluss	730,00	1 Stk	730,00
Zwischensumme II.:				7.275,00

C. Anhang zu Kapitel 8

lfd. Nr.	Bezeichnung	Einzelpreis EUR	Anzahl / Menge	Gesamtpreis EUR
III. Trockengutbehälter und Luftfördersystem				
7	Lagersilo <i>NL4</i>	1.957,00	1 Stk	1.957,00
8	Silodach <i>NL4</i>	1.432,00	1 Stk	1.432,00
9	Einstiegs Luke	665,00	1 Stk	665,00
10	Belüftungsboden	1.834,00	1 Stk	1.834,00
11	Ventilator	1.432,00	1 Stk	1.432,00
12	Frequenzumformer	1.525,00	1 Stk	1.525,00
13	Steuergerät	1.288,00	1 Stk	1.288,00
14	weiteres Material	306,10		306,10
Zwischensumme III.:				10.439,10
IV. Solarkollektor				
15	Folie	1,07	100,1 m ²	107,11
16	Winkelstahlring	356,00	1 Stk	356,00
17	Flachstahl (Gerüst Kollektor- folie)	1,53	126,97 m	194,26
18	<i>Solarlack</i>	28,50	7 kg	199,50
19	Angelschnur	2,50	2 Stk	5,00
20	Kunststoffhalterung (Kollektorfolie)	15,00	5 Stk	75,00
21	weiteres Material	155,25		155,25
Zwischensumme IV.:				1.092,12
V. Weiteres Material				
22	Beton	63,00	12 m ³	756,00
23	Kanalgrundrohr DN 300 x 2.000 mm	43,04	5 Stk	215,20
24	90°-Krümmer DN 300	32,69	3 Stk	98,07
Zwischensumme V.:				1.069,27
Gesamtsumme:				36.404,49

C.3. Technische Daten und Kennlinie des Ventilators NV 35

Tabelle C.3.: Technische Daten des NV 35 nach ANONYMUS26 [2012]

Kategorie		Radiallüfter
maximale Leistung	P_{max}	4.000 W
maximale Drehzahl	n_{max}	2.900 min ⁻¹
maximaler Druck	p_{max}	2.550 Pa
maximale Förderleistung	\dot{V}_{max}	0,89 m ³ s ⁻¹ bzw. 3.200 m ³ h ⁻¹

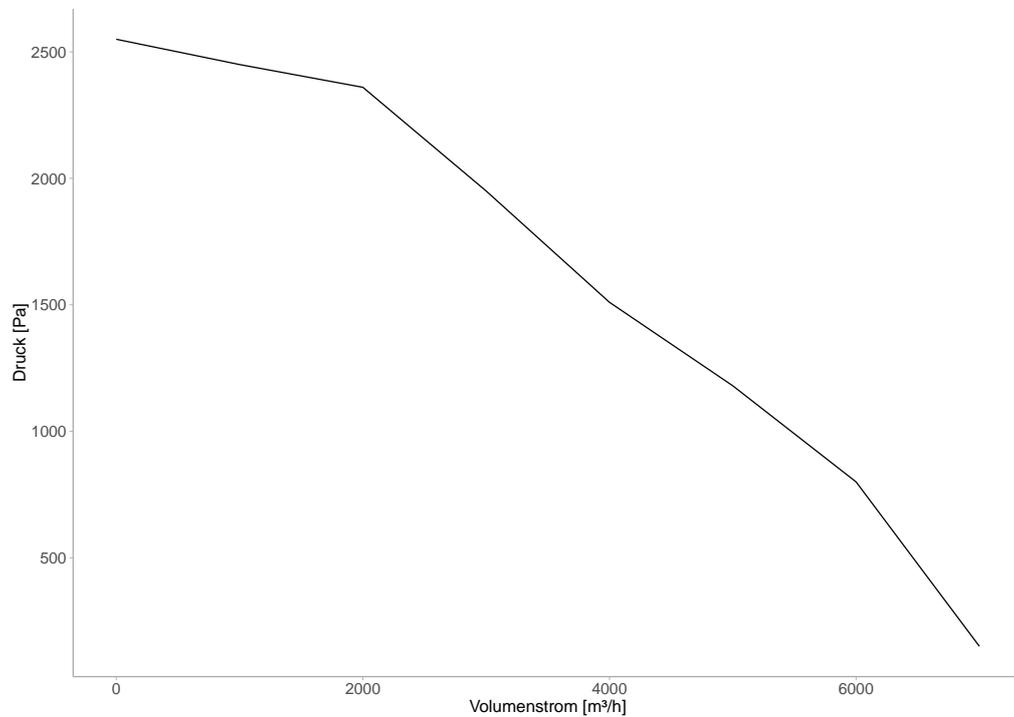


Abbildung C.1.: Ventilator Kennlinie des NV 35; abgeändert aus ANONYMUS26 [2012]

D. Anhang zu Kapitel 9

D.1. Konstruktionskosten

Tabelle D.1.: Material- und Arbeitskosten für den solaren Satztrockner im Netzbetrieb; Standort: Gulariya, Bardiya

Pos.-Nr.	Material / Arbeit	Anzahl / Menge	Kosten	
			NPR	EUR ¹
1	Ventilator	1 Stk	4.500	37,54
2	Ölfass gebraucht	1 Stk	1.250	10,43
3	Maschendraht	3 m	1.050	8,76
4	Lampenschirm Aluminium	1 Stk	950	7,92
5	sonstiges Material		500	4,17
6	PE-Folie	3 m	450	3,75
7	PVC 90°-Krümmer	2 Stk	354	2,95
8	PP Isolierschaummatte	1,5 m ²	170	1,42
9	Kabel	10 m	160	1,33
10	Metallarbeiten (Entfernung und Modifikation von Fassdeckel, Flansch und Deckelplatte)		3.750	31,28
Summe Material- und Arbeitskosten			13.134	109,56

¹Umrechnungskurs: NPR 1,00 $\hat{=}$ EUR 0,00834; Stand: 14.03.2016

D.1. *Konstruktionskosten*

Tabelle D.2.: Material- und Arbeitskosten für den solaren Satztrockner im PV-Betrieb; Standort: Gulariya, Bardiya

Pos.-Nr.	Material / Arbeit	Anzahl / Menge	Kosten	
			NPR	EUR ¹
1	12 V Akkumulator	1 Stk	5.120	42,71
2	40 W PV-Modul	1 Stk	4.920	41,04
3	Ölfass gebraucht	1 Stk	1.250	10,43
4	Maschendraht	3 m	1.050	8,76
5	Aufständerung PV-Modul	1 Stk	1.000	8,34
6	Ladecontroller	1 Stk	1.000	8,34
7	Ventilator (12 V; 0,6 A)	2 Stk	1.000	8,34
8	Lampenschirm Aluminium	1 Stk	950	7,92
9	Kabel	52 m	832	6,94
10	sonstiges Material		500	4,17
11	PE Kunststoffolie	3 m	450	3,75
12	PVC 90°-Krümmer	2 Stk	354	2,95
13	PP Isolierschaummatte	1,5 m ²	170	1,42
14	Metallarbeiten (Entfernung und Modifikation von Fassdeckel, Flansch und Deckelplatte)		3.750	31,28
Summe Material- und Arbeitskosten			22.346	186,40

²Umrechnungskurs: NPR 1,00 $\hat{=}$ EUR 0,00834; Stand: 14.03.2016

D.2. Temperatur und relative Feuchte der Umgebungsluft

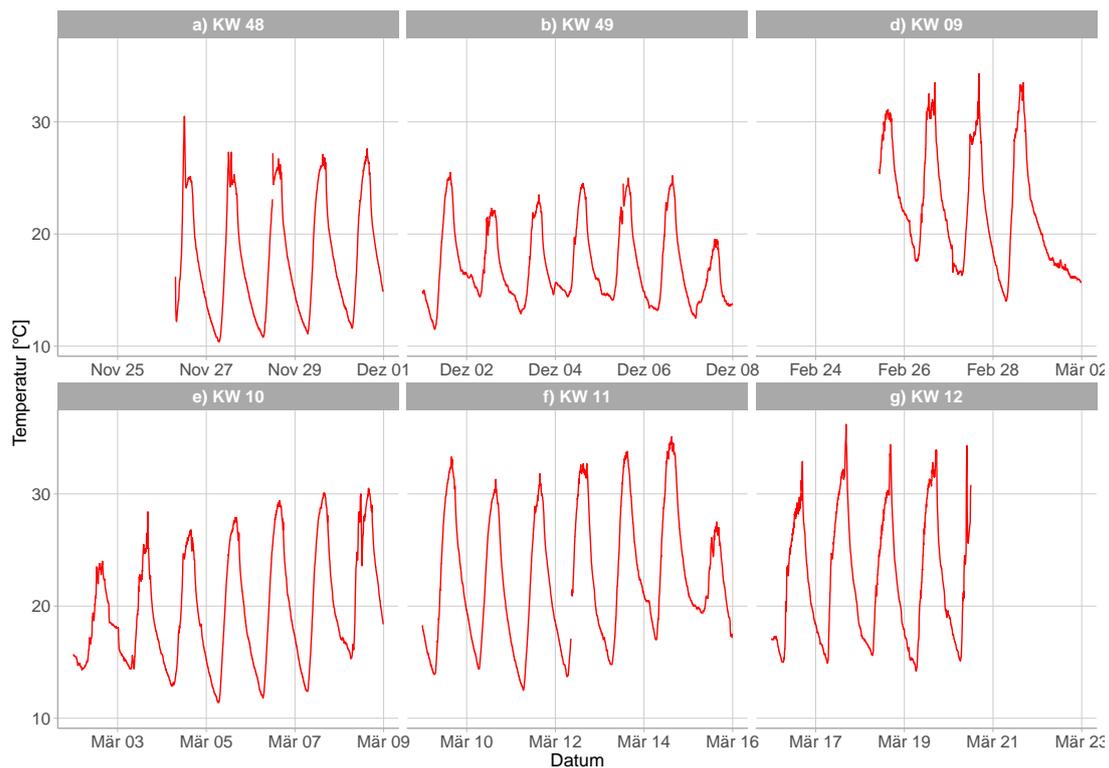


Abbildung D.1.: Entwicklung der Umgebungstemperatur während der Betriebswochen des Solartrockners in Nepal vom 26.11.2014 bis 20.03.2015; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1

D.2. Temperatur und relative Feuchte der Umgebungsluft

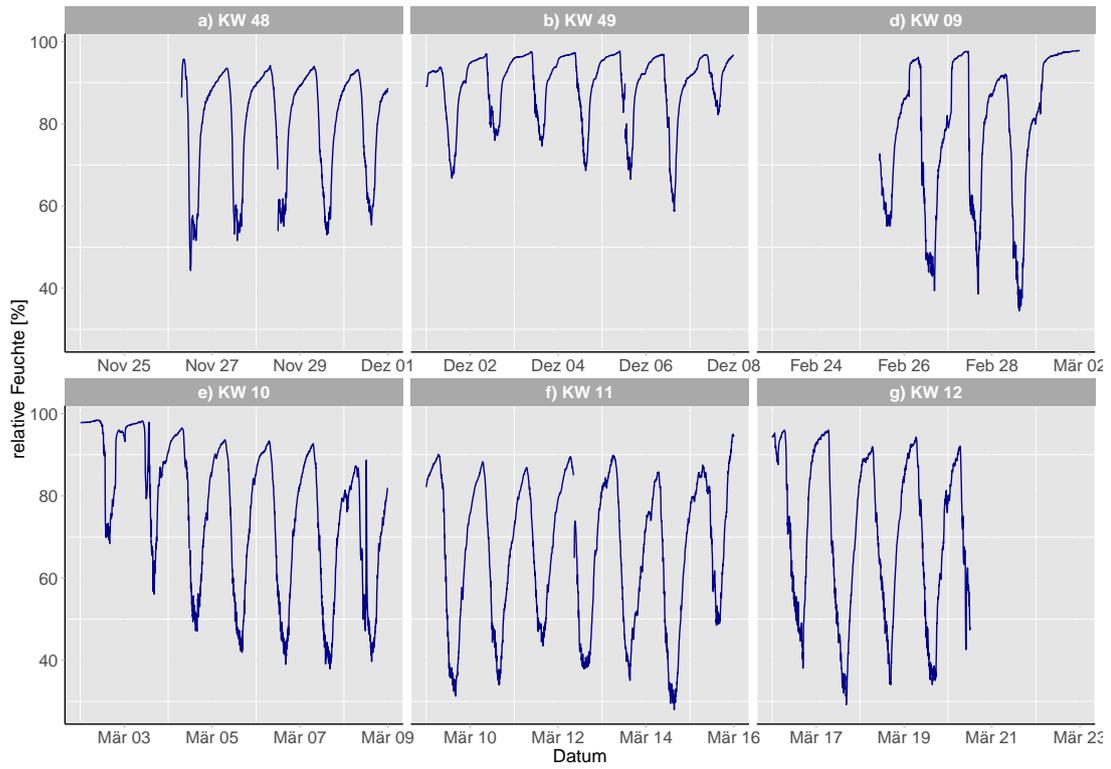


Abbildung D.2.: Entwicklung der relativen Luftfeuchte der Umgebung während der Betriebswochen des Solartrockners in Nepal vom 26.11.2014 bis 20.03.2015; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 1

D. Anhang zu Kapitel 9

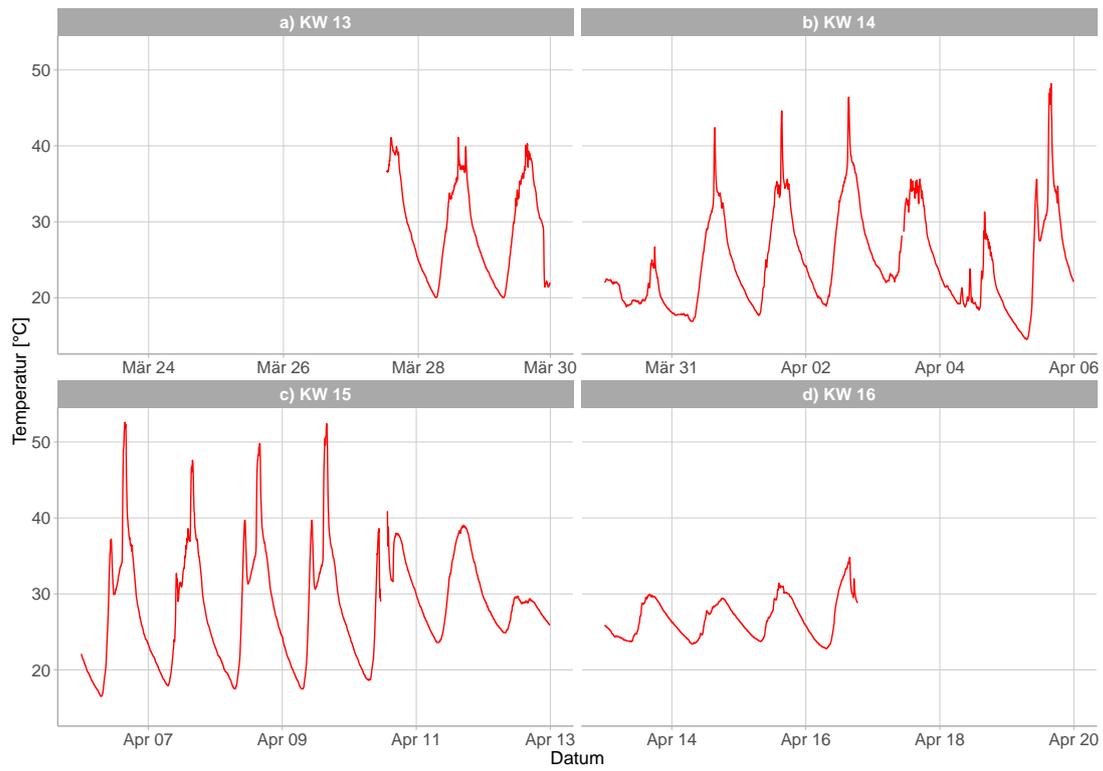


Abbildung D.3.: Entwicklung der Umgebungstemperatur während der Betriebswochen des Solartrockners in Nepal vom 27.03.2015 bis 16.04.2015; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 2

D.2. Temperatur und relative Feuchte der Umgebungsluft

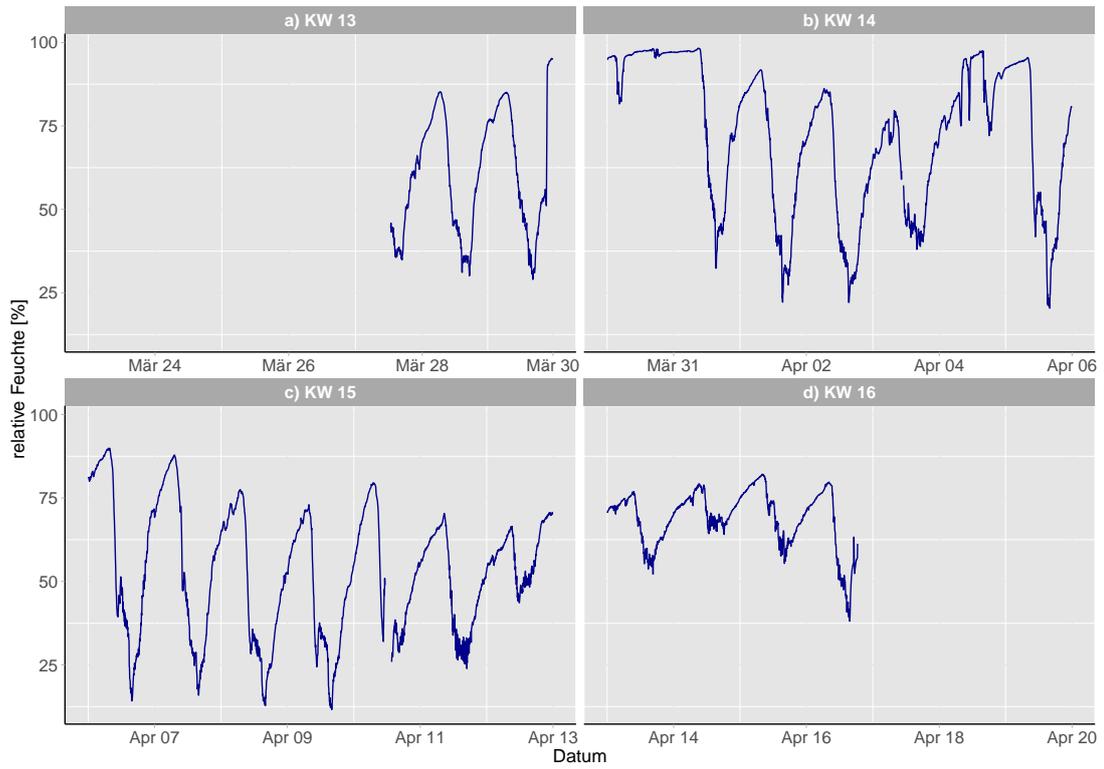


Abbildung D.4.: Entwicklung der relativen Luftfeuchte der Umgebung während der Betriebswochen des Solartrockners in Nepal vom 27.03.2015 bis 16.04.2015; Standort: Gulariya, Bardiya; Test 2

E. Technische Daten der verwendeten Messinstrumente

E.1. Holzfeuchtemessung

Tabelle E.1.: Technische Daten des *Voltcraft FM-300*

Betriebsspannung:	3 V DC
Stromaufnahme:	<8 mA
Batteriewechselsymbol:	bei <2 V
Abmessungen (L x B x H):	49 x 180 x 31.4 mm
Messprinzip:	Elektrischer Widerstand
Gewicht:	137 g
Feuchte Messbereich:	6% to 99.9%
Auflösung (Feuchte):	0.1
Genauigkeit (Feuchte):	±1% (im Feuchtemessbereich 6% ~ 40%)
Temperaturmessbereich:	-35°C bis +80°C
Auflösung (Temperatur):	1 (≥ -10°C); 0.1 (< -10°C)
Genauigkeit (Temperatur):	±2°C
Betriebsluftfeuchte:	< 70% RH (nicht kondensierend)
Betriebstemperatur:	-10°C bis +50°C
Lagertemperatur:	-30°C bis +60°C
Lagerfeuchte:	< 80% RH

E.2. Temperatur- und Feuchtedatenlogger

Tabelle E.2.: Technische Daten des *Extech SDL200*

Display:	Hintergrundbeleuchtetes LCD LCD size: 52 x 38 mm
Messkanäle:	T1, T2, T3, T4 und T1-T2
Sensortypen:	Thermoelement Typen: K, J, T, E, R und S RTD type: platinum 100 Ohm (erfüllt 0,00385 des Alpha Koeffizienten nach DIN IEC 751)
Maßeinheiten:	°C / °F
Offset Einstellung:	Verfügbar für Thermoelement und RTD Eingänge
Eingangslinearität:	Sensorkurven werden in der CPU des Messgeräts gespeichert
Datenlogger	
Abtastrate:	AUTO LOGGING: 1, 2, 5, 10, 30, 60, 120, 300, 600, 1800, 3600 seconds MANUAL LOGGING: Einstellen der Abtastrate auf "0"
Speicherkarte:	SD-Speicherkarte (1 GB bis 16 GB)
Temperaturkompensation:	Automatische Temperaturkompensation für alle Thermoelement Typen
Display Anzeigegeschwindigkeit:	~1 s
Datenausgabe:	RS-232 / USB-PC-Schnittstelle
Betriebstemperatur:	0°C bis +50°C
Betriebsfeuchte:	85% RH max.
Automatische Abschaltfunktion:	Nach 10 Minuten Inaktivität (kann deaktiviert werden)
Stromversorgung:	Sechs 1.5 VDC Batterien (optional: 9V AC-Adapter)
Stromverbrauch:	Normalbetrieb: ~9.7 mA DC
Gewicht:	347 g
Abmessungen:	182 x 73 x 47.5 mm

E. Technische Daten der verwendeten Messinstrumente

Tabelle E.3.: Technische Daten des Thermoelement Typ K des *Extech SDL200*

Auflösung	Bereich	Genauigkeit
0.1°C	-50.1°C to +100.00°C	±(0.4% + 1°C)
	-50.0°C to +999.9°C	±(0.4% + 0.5°C)
1°C	+1,000°C to +1,300°C	±(0.4% + 1°C)

Tabelle E.4.: Technische Daten des *Voltcraft DL-121TH*

Betriebsspannung:	3.6 V DC Lithium Batterie 1/2AA
Batterielebensdauer:	ca. 1 Jahr bei 5 s und ca. 2,5 Jahre bei 10 s Aufzeichnungsintervall
Max. Messdaten:	16.000 für Temperatur 16.000 für Luftfeuchte
Messbereich Temperatur:	-40°C bis +70°C
Genauigkeit Temperatur:	±1°C (0°C bis +40°C) ±2.5°C (Restbereich)
Ansprechzeit Temperatur:	~ 20 s
Messbereich rel. Luftfeuchte:	0% bis 100% RH
Genauigkeit rel. Luftfeuchte:	±3%
Ansprechzeit rel. Luftfeuchte:	~5 s
Genauigkeit Taupunkt (bei 25°C und 40% bis 100% RH):	±2°C
Auflösung:	0.1°C / 0.1 % RH
Messintervall:	2, 5, 10, 30 Sekunden 1, 5, 10, 30 Minuten 1, 2, 3, 6, 12, 24 Stunden
Abmessung (L x B x H):	100 x 23 x 20 mm
Gewicht:	20 g

Tabelle E.5.: Technische Daten des Sensors 41382VC/VF

Betriebsspannung:	12 - 28 V DC, 10 mA
Relative Luftfeuchte	
Messbereich:	0-100%
Genauigkeit bei 20-25°C:	± 2%
Stabilität:	< ± 1% p. a.
Ansprechzeit:	10 s
Ausgangssignal:	0-1 V
Sensortyp:	Rotronic Hygromer
Temperatur	
kalibrierter Messbereich:	-50 bis + 50°C
Genauigkeit bei 20-25°C:	± 0,3°C
Ansprechzeit:	10 s
Ausgangssignal:	0-1 V
Sensortyp:	100 Ohm Platinum RTD

E.3. Anemometer

Tabelle E.6.: Technische Daten des *testo 425*

Messgrößen:	Strömung (m s^{-1}) Temperatur ($^{\circ}\text{C}$ / $^{\circ}\text{F}$)
Messbereich:	0 m s^{-1} bis +20 m s^{-1} -20°C bis +70°C / -4°F bis +158°F
Auflösung:	0,01 m s^{-1} 0,1°C / 0,1°F
Genauigkeit:	±0,03 m s^{-1} + 5% v. Mw. ±0,5°C (0°C bis +60°C) ±0,9°F (+32°F bis +140°F) ±0,7°C / ±1,3°F (Restbereich)
Fühler:	Teleskop-Strömungs-/Temperatursonde (Hitzdrahtsonde) mit NTC-Temperatursensor
Messrate:	2 s^{-1}
Betriebstemperatur:	-20°C bis +50°C / -4°F bis +122°F
Lagertemperatur:	-40°C bis +85°C / -40°F bis +185°F
Stromversorgung:	1 x 9V-Blockbatterie / -akku
Standzeit:	ca. 20 h

E.4. Sonnenstundensensor

Tabelle E.7.: Technische Daten des *CSD3*; aus ANONYMUS28 [2016]

Spektralbereich:	400 bis 1.100 nm
Betriebstemperaturbereich:	-40°C bis +70°C
Sonnenscheinsignal:	$1 \pm 0,1$ V (bei direkter Strahlung > 120 W m ⁻²)
Genauigkeit der Sonnenscheindauer:	$> 90\%$ (über den gesamten Monat)
Analoges Ausgangssignal:	1 mV W ⁻¹ m ⁻² (direkte Strahlung)
Genauigkeit der Direktstrahlung:	$> 90\%$ (bei klarem Himmel)
Stabilitätsabweichung:	$< 2\%$ Abweichung pro Jahr
Temperaturabhängigkeit:	$< 0,1\%$ °C ⁻¹
Ansprechzeit:	< 1 ms
Leistungsaufnahme:	$< 0,1$ W bei 12 VDC (9 - 15 VDC)
Heizstufe 1:	$1 \pm 0,1$ W bei 12 VDC (bei Tauanlagerungen)
Heizstufe 2:	10 ± 1 W bei 12 VDC (bei Frost und Schnee)
Temperaturregler (optional):	Stufe 2 AN $< 6^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ Stufe 2 AUS $> 14^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$
