

Technische Hochschule Ingolstadt

Fakultät Maschinenbau

Studiengang Technik Erneuerbare Energien

Bachelorarbeit

Erstellung eines Konzeptes zur Trocknung von Moringablättern unter Verwendung
von Bio- und Solarenergie

vorgelegt von

Sebastian Sommer

Ausgegeben am: 07.01.2015

Abgegeben am: 28.01.2015

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Wilfried Zörner

Zweitprüfer: Prof. Dr. Ing. Markus Goldbrunner

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Ingolstadt, _____
(Datum)

(Unterschrift)
Sebastian Sommer

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken die mir während der Erstellung dieser Arbeit mit Wort und Tat zur Seite gestanden haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Zörner, der mich auf das Thema dieser Arbeit aufmerksam gemacht und mich während der Bearbeitungszeit mit konstruktiven Vorschlägen unterstützt hat.

Natürlich möchte ich auch meinen Eltern danken. Sie haben mich in jeder Entscheidung die ich in meiner schulischen und beruflichen Laufbahn getroffen habe bestätigt und unterstützt. Erst sie haben mir ein Studium ermöglicht und mir jederzeit den Rücken frei gehalten.

Ich möchte hier auch die Gelegenheit nutzen, um mich bei meinem Nachbarn Konni zu bedanken. Er hat mich seit Kindesalter an gefördert und mir vieles beigebracht.

Großer Dank gebührt auch Jonas Busch, der sich die Zeit genommen hat, Botswanas Märkte nach Moringa zu durchforsten.

Meiner Freundin Linda danke ich dafür, dass sie mich auch in schwierigen Phasen der Arbeit ermutigt und aufgebaut hat. Sie hat immer ein offenes Ohr und einen guten Rat.

Herzlichen Dank!

Zusammenfassung / Abstract

Trotz Globalisierung gibt es noch immer Regionen auf dieser Erde die mit Hungersnöten zu kämpfen haben. Die Gründe hierfür sind vielzählig, ein gravierender ist jedoch die fehlende Möglichkeit, Nahrungsmittel zu konservieren. Die Trocknung von Lebensmitteln bietet eine Möglichkeit, diese längerfristig haltbar zu machen. Speziell die Blätter von *Moringa oleifera*, welche in dieser Arbeit als Trocknungsgut untersucht werden, bieten eine besonders große Zahl an Vitaminen und Mineralien, die auch nach einer Trocknung noch vorhanden sind.

Im ersten Schritt wird die Pflanze *Moringa oleifera* untersucht. Dabei ist besonders die enthaltene Menge an Wasser in den Blättern interessant. Anschließend wird zur Untersuchung des Trocknungsvorgangs übergegangen, bis hin zur Entwicklung eines Gerätes für die Moringatrocknung. Um den Trockner zu betreiben werden biogene und solare Energiequellen betrachtet, dabei wird zwischen zwei verschiedenen Nutzungsprofilen von Farmen unterschieden. Nachdem für jedes Profil ein Konzept gewählt ist, wird eine grobe wirtschaftliche Betrachtung vorgenommen.

Es resultiert, dass Bau eines Trockners technisch möglich und sinnvoll ist, jedoch die wirtschaftlichen Voraussetzungen genauer untersucht werden müssen.

Despite globalization efforts, famines are still a big problem of various regions in this world. While there are many reasons for this situation, one of the major ones is the lack in the ability to properly preserve food. Food drying is one possibility to preserve food for an extended time period. In particular *Moringa oleifera*, the food to be dried that is investigated in this thesis, offers abundance in vitamins and minerals, which are preserved even after the drying process.

In the initial stage, the plant *Moringa oleifera* will be investigated. To that end, the water content of the plant is of particular interest. Subsequently, the drying process itself will be planned and evaluated, leading to the development of a dryer for the Moringa plant. Biogenic and solar energy sources will be considered in order to power the dryer; to that end two different user profiles will be used. Following the selection of a proper concept for each profile, a broad economic assessment will be conducted. The results of this thesis show that the construction of a dryer is technologically possible and relevant; however the economic circumstances need to be assessed further

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	II
Danksagung	III
Zusammenfassung / Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
1. Einleitung.....	1
2. Analyse des zu trocknende Materials.....	2
2.1 Moringa Oleifera	2
2.2 Bestandteile und ihre Verwendung.....	5
2.3 Zusammensetzung und Aufbau der Blätter	5
2.4 Untersuchung der Feuchtigkeit im Trocknungsgut	7
2.4.1 Wassergehalt des Trocknungsgutes	7
2.4.2 Aktivität des Trocknungsgutes	8
2.4.3 Feuchtegehalt des Trocknungsgutes	9
2.4.4 Berechnung des Wasser- und Feuchtegehaltes des Trocknungsgutes	9
2.5 Versuch zur Feststellung des Wassergehaltes	10
2.5.1 Versuchsaufbau	10
2.5.2 Ergebnisse der Versuche	13
2.5.3 Auswertung der Ergebnisse.....	13
2.6 Betrachtung der Erntemenge.....	14
3. Analyse des Trocknungsvorgangs.....	15
3.1 Theorie der Trocknung	15
3.1.1 Bindung der Feuchte am und im Gut	15
3.1.2 Mechanische Trocknung.....	16
3.1.3 Thermische Trocknung	17
3.1.4 Zustandsbeschreibung des Trocknungsmediums	18
3.1.5 Der Trocknungsverlauf hygroskopischer Güter.....	19
3.2 Berechnungen zur Trocknung	21
3.2.1 Der zeitliche Verlauf der Trocknung.....	21
3.2.2 Der erste Trocknungsabschnitt	21
3.2.3 Der zweite Trocknungsabschnitt	23
3.2.4 Der dritte Trocknungsabschnitt.....	24

3.2.5 Betrachtung des Druckverlustes im System	25
3.2.6 Der Energiebedarf des Trockners	26
3.3 Der allgemeine Aufbau eines Trockners	30
3.4 Bisheriger Stand der Trocknungsanlage auf der Beispielfarm	30
3.5 Versuche zur Trocknung	32
3.5.1 Untersuchung der Trocknungsmöglichkeiten	32
3.5.2 Trocknungsversuch im Analyseofen	35
3.5.3 Ergebnisse des Versuchs	35
3.5.4 Bewertung des Versuchs	39
4. Analyse des geplanten Gebäudes	40
5. Analyse der Bereitstellung von Bio- und Solarenergie	40
5.1 Die Farm eines durchschnittlichen Kleinbauern	41
5.1.1 Betrachtung der tierischen Reststoffe	41
5.1.2 Betrachtung der pflanzlichen Reststoffe	42
5.2 Die Farm von Herrn Prof. Sinkala	43
5.2.1 Betrachtung der tierischen Reststoffe	43
5.2.2 Betrachtung der pflanzlichen Reststoffe	44
5.3 Energieertrag der tierischer Reststoffe	44
5.4 Analyse des Klimas in Sambia	45
5.5 Analyse der Solarenergiegewinnung	47
5.6 Auswahl der Solarkollektoren	49
6. Entwicklung des Trockners	50
6.1 Auswahl des Trocknungsverfahrens	50
6.2 Planung des Trockners	51
6.2.1 Größe und Aufbau des Trockners	51
6.2.2 Luftführung im Trockner	52
6.2.3 Auswahl der Materialien für den Trockner	54
6.3 Planung und Bau eines Versuchstrockners	57
7. Energieversorgung des Trockners	59
7.1 Auslegung der Solar-Luft-Kollektoren	62
7.2 Auslegung der Biogasanlage	64
7.3 Thermische Umwandlung des Biogases	68
7.4 Auslegung des Ventilators	68
7.5 Nutzungsprofile der beiden Farmtypen	70
7.5.1 Farm von Herrn Prof. Sinkala	70
7.5.2 Farm eines durchschnittlichen Landwirtes	70

7.6 Konzepte für die Farm eines durchschnittlichen Landwirtes.....	70
7.6.1 Trocknung durch die Verwendung von Solar-Luft-Kollektoren.....	70
7.6.2 Trocknung durch die Verwendung von Solar-Luft-Kollektoren und Biogas	72
7.7 Konzepte für die Farm von Herrn Prof. Sinkala	74
7.7.1 Trocknung durch die Verwendung von Biogas und Strom aus dem Netz.....	74
7.7.2 Trocknung durch die Verwendung von Biogas und Solarstrom	75
7.7.3 Trocknung mittels solarer Wärmeerzeugung und Biogas-Unterstützung.....	76
8. Regelung der Trocknungsanlage	78
8.1 Regelungarten der solaren Versorgung	79
8.1.1 Regelungsart 1.....	79
8.1.2 Regelungsart 2.....	80
8.2 Regelung der Biogasversorgung.....	81
9. Wirtschaftliche Betrachtung der Konzepte	82
9.1 Kosten zum Bau des Trockners.....	82
9.2 Kosten der Konzepte für einen Kleinbauern	83
9.3 Kosten der Konzepte für die Farm von Herrn Prof. Sinkala	84
9.4. Verkaufserlös.....	87
10. Auswahl der Konzepte.....	87
11.Schlussfolgerungen und Ausblick	88
11.1 Weitere Analyse der Reststoffe.....	89
11.2 Weitere Untersuchung der Trocknung.....	89
11.3 Weitere Betrachtung der Energiebereitstellung	90
11.4 Weitere wirtschaftliche Betrachtungen	91
Literaturverzeichnis.....	92
Anhang:	i

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptbestandteile Moringa oleifera (wikimedia, 2014)	4
Abbildung 2: Aufbau des Blattes (wikimedia, 2014)	7
Abbildung 3 Klimaschrank zur Analyse des Gutes.....	11
Abbildung 4: Frische Moringablätter	12
Abbildung 5: Getrocknete und zerstoßene Moringablätter	12
Abbildung 6: Schematischer Trocknungsverlauf (Krischer, et al., 1978)	20
Abbildung 7: Nikuradse Diagramm (HAW-Hamburg, n.d.).....	25
Abbildung 8: Mollier-Diagramm mit den Trocknungsvorgängen bei Extrembedingungen im Winter und Sommer (ILK Dresden, 2014)	29
Abbildung 9: Moringatrocknung durch Ausbreitung auf Netzen (Sinkala, 2014)	31
Abbildung 10: Trocknung durch Küchendörrgerät (Sinkala, 2014).....	31
Abbildung 11: Wirbelschicht mit Lufterhitzungseinheit	33
Abbildung 12: Ergebnis des Trocknungsversuchs zum Feststellen der Trocknungsgeschwindigkeit.....	36
Abbildung 13: Schematischer Trocknungsverlauf mit Abgrenzung der Moringatrocknung	37
Abbildung 14: Vergleich von frischen und getrockneten Moringablättern	38
Abbildung 15: Geplantes Trocknungsgebäude (Sinkala, 2014).....	40
Abbildung 16: Solare Einstrahlungswerte weltweit (Zörner, 2014)	45
Abbildung 17: Wirkungsgrad im Vergleich zu Temperaturhub verschiedener Kollektortypen (Zörner, 2014)	49
Abbildung 18: Schematische CAD Zeichnung des Trockners.....	52
Abbildung 19: Querschnitt durch den Trockner mit Strömungspfeilen.....	54
Abbildung 20: Sandwichpaneele aus Metall und Polyurethan (HNB Nordblech GmbH, 2015)	55
Abbildung 21: CAD-Zeichnung einer Horde im Trockner	55
Abbildung 22: Wickelfalzrohr zu Luftverteilung (Extreme-House OHG, 2014)	56
Abbildung 23: Aufsteckbare Isolierung für Wickelfalzrohre (CVB s.r.o Ventilatoren und Klimaanlage, 2015)	57
Abbildung 24: Versuchstrockner	58
Abbildung 25 Innenaufbau des Versuchstrockners.....	59
Abbildung 26: Diagramm zur Auslegung von Solar-Luft-Kollektoren (Solar, n.d.)	62
Abbildung 27: Solar-Luft-Kollektor (Solar, n.d.)	63
Abbildung 28: Volldurchmischter Fermenter mit Folienspeicher	67
Abbildung 29: Luft-Wärmetauscher zum Einbringen der Energie in das Trocknungsmedium (Nordluft GmbH und Co. KG, 2014).....	68
Abbildung 30: Trocknung durch Solar-Luft-Kollektoren (ländliche Bevölkerung)	71
Abbildung 31: Trocknung durch Kombination Solar-Luft-Kollektoren und Biogas (ländliche Bevölkerung)	73
Abbildung 32: Trocknung mit Biogas und Netzstrom (Farm Prof. Sinkala)	74
Abbildung 33: Trocknung mit Biogas und Solarstrom (Farm Prof. Sinkala)	76
Abbildung 34: Trocknung mit Solar-Luft-Kollektoren und Biogas (Farm Prof. Sinkala).....	77
Abbildung 35: Energieversorgung durch Solar, Ausfallzeiten, aus Simulation mit Simulink ..	78
Abbildung 36: Temperaturen und Solarstrahlung Solar-Luft-Kollektor, mit geregelter Massenstrom.....	79
Abbildung 37: Temperaturen an Solar-Luft-Kollektoren mit kontinuierlichem Massenstrom..	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Masse der Blätter vor und nach der Trocknung nach Prof. Sinkala (Sinkala, 2014)	9
Tabelle 2: Versuchsergebnisse, Feuchtigkeit frische Blätter	13
Tabelle 3: Versuchsergebnisse, Feuchtigkeit Moringapulver	13
Tabelle 4: Auswertung Versuch Feuchtigkeit frische Blätter	14
Tabelle 5: Auswertung Versuch Feuchtigkeit Moringapulver	14
Tabelle 6: Versuch Trocknung auf der Wirbelschicht	34
Tabelle 7: Methanertrag Ermittlung durchschnittliche kleinbäuerliche Farm in Sambia.....	41
Tabelle 8: Methanertrag Ermittlung Farm Prof. Sinkala	43
Tabelle 9: Klimatablelle Lusaka (Wetterkontor GmbH, 2014)	46
Tabelle 10: Schafmist (Archea Service, n.d.)	65
Tabelle 11: Überschlagsrechnung Druckverlust Trockner	69
Tabelle 12: Zusammenstellung der Trocknerkosten	82
Tabelle 13: Kostenvergleich der Konzepte für Herrn Prof. Sinkala	87
Tabelle 14: Datenerfassung und Auswertung Versuch im Analyseofen	i

1. Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Planung einer Anlage zur Trocknung von Moringablättern in Lusaka, Sambia. Dabei soll zur Energieversorgung auf Bio- und Solarenergie zurückgegriffen werden.

Der Großteil der Bevölkerung in Sambia besteht aus Kleinbauern, die auf dem Land ihre Felder bestellen. Die produzierten Waren verkaufen sie auf örtlichen Märkten, das Meiste davon ist jedoch zum eigenen Verbrauch gedacht. Viele der Lebensmittel verderben, da, bedingt durch die Jahreszeiten, am Ende der Regenzeit eine Fülle an Pflanzen reif ist, also auch geerntet wird, aber nicht verbraucht werden kann. Die darauf folgende Trockenzeit bietet hingegen nur wenige Möglichkeiten Nahrung zu produzieren, wodurch ein Mangel entsteht. Dieser Mangel könnte durch das Verteilen von Lebensmitteln umgangen werden. Jedoch fehlt hierzu das nötige Straßennetz mit dem Lebensmittel aus anderen Regionen herbeigebracht werden können. In ländlichen Zonen Sambias fehlt auch ein gut ausgebautes Stromnetz, mit dem durch Kühlen, Gefrieren oder Trocknen Lebensmittel haltbar gemacht werden können. Fraglich ist auch ob es für einen provinziellen Kleinbauern finanziell möglich wäre, eine dauerhafte Konservierung mit elektrischer Energie zu betreiben. Um dieser Personengruppe eine Möglichkeit zu geben, ihre Güter haltbar zu machen und dadurch eine Einnahmequelle, aber auch eine Absicherung vor Ernteaussfällen und Dürren zu bieten, soll untersucht werden, wie eine Trocknung durch die Nutzung vorhandener biogener und solarer Energiequellen ermöglicht werden kann. Zu den biogenen Quellen zählen in diesem Fall nur biogene Reststoffe wie z.B. tierische Exkrememente oder Rückstände der Ölgewinnung, die keine Konkurrenz zu Nahrungsmitteln darstellen.

Zur Entwicklung eines Trockners muss zuerst das Gut betrachtet werden, welches im Trockner behandelt werden soll. Auch Wissen über das Trocknungsverhalten muss zusammengetragen werden. Sind die Daten über das Gut ermittelt, wird zur Analyse der vorhandenen biogenen und solaren Energiequellen übergegangen. Nachdem alle Analysen durchgeführt sind, kann ein Trockner für die örtlichen Gegebenheiten entwickelt und dessen Energieversorgung ausgewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass der Trockner in der Herstellung, wie im Betrieb sehr kostensparend konstruiert werden muss, um das geringe Budget eines Kleinbauern in Sambia nicht zu

überschreiten. Die unterschiedlichen Bedingungen einer Farm eines einfachen Landwirts und der, in dieser Arbeit als Beispiel verwendeten, Farm von Herrn Prof. Sinkala machen eine Aufspaltung der Untersuchungen in diese beiden Farmtypen nötig. Wenn es zu Störungen des Trockners kommen sollte, ist es in Sambia sehr schwierig, geschultes Fachpersonal zur Reparatur der Anlage zu organisieren. Eine komplizierte Regelung oder eine falsche Bedienung können zu Ausfällen der Anlage führen, weshalb der Trockner auf einer möglichst einfachen Konstruktion, ohne großen Regelungsaufwand, basieren soll.

2. Analyse des zu trocknende Materials

2.1 Moringa Oleifera

Bei dem zu trocknenden Gut handelt es sich um die Blätter des Moringa oleifera, einer Gattung des Moringabaumes, im Deutschen, wegen seines meerrettichartigen Geruches der Wurzeln, auch Meerrettichbaum genannt. Verbreitungsgebiet sind weltweit sowohl die Tropen als auch die Subtropen weltweit. Ursprünglich stammt der Moringa jedoch aus Indien, wo er in der Ayurveda Medizin bis heute Verwendung findet. Schon im alten Ägypten, in Rom sowie in Griechenland wird der Baum für verschiedene Zwecke, wie Nahrung, Kosmetik und Medizin eingesetzt. Auch heute noch wird Moringa in weiten Teilen der Erde als wichtige Feldfrucht angebaut.

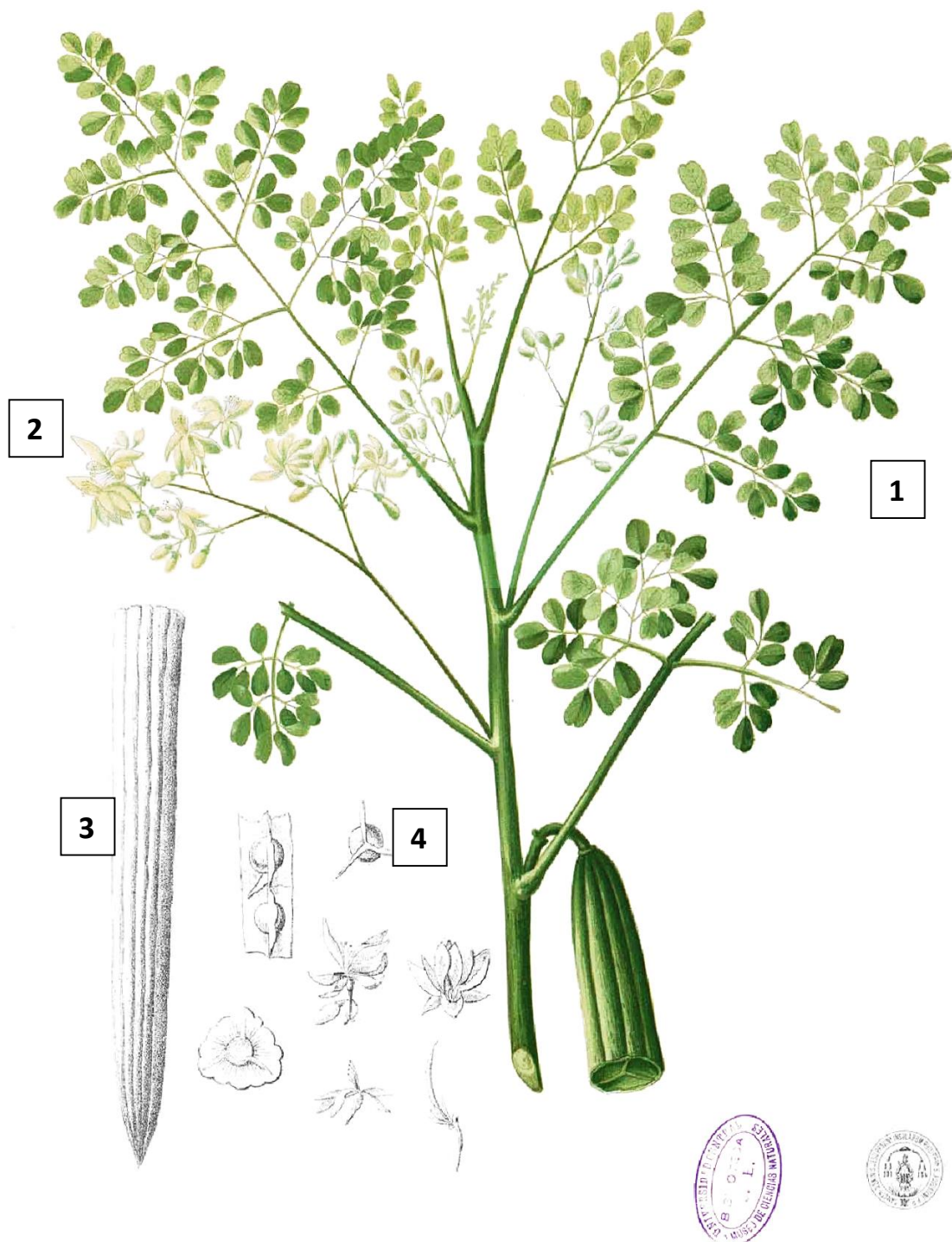
Bei Moringa oleifera handelt es sich um einen Baum, dessen Bestandteile alle zum Verzehr geeignet sind. Da Moringa eine immergrüne Pflanze ist, kann das ganze Jahr hindurch geerntet werden. Seine Unempfindlichkeit gegen Trockenheit ermöglicht den Menschen auch bei Dürren eine gesicherte Ernte einzufahren. Dadurch, dass der Baum in den Tropen am Ende der Trockenzeit in voller Blüte steht, bietet er eine Nahrungsquelle zu einem Zeitpunkt, an dem andere Nahrungsmittel nichtmehr zur Verfügung stehen.

Vor einigen Jahren haben mehrere Organisationen, unter anderen Trees for Life und Church World Service, begonnen Moringa, gezielt, in Tropenregionen, in denen in Trockenzeiten Nahrungsmittelmangel herrscht, als Mittel zur Bekämpfung von Mangelerscheinungen zu etablieren (Fahey, 2005). Grund dafür ist der hohe Gehalt an Nährstoffen und Vitaminen, den vor Allem die Blätter des Baumes enthalten und

somit Symptome einer Nährstoffunterversorgung, besonders bei Säuglingen und stillenden Müttern, entgegenwirken können. Aber auch in der „westlichen Welt“ ist Moringa immer häufiger zu finden. Hier wird die Pflanze überwiegend zur Nahrungsergänzung und Krankheitsvorbeugung, in Form von Pulver, konsumiert. (Anwar, et al., 2007) (Lüdicke, 2014)

Die Abbildung 1 zeigt die Hauptbestandteile des Baumes mit:

1. Blätter
2. Blüten
3. Samenhüllen
4. Samen



F. Domingo.

MORINGA OLEIFERA:—LAM.—Blanco.
=MORINGA PTERYGOSPERMA:—GÆRTN.—DC.

1/1 C. Verdaguer 2000-2001

Abbildung 1: Hauptbestandteile *Moringa oleifera* (wikimedia, 2014)

2.2 Bestandteile und ihre Verwendung

Jeder morphologische Teil des Baumes bietet eine Vielzahl an Verwendungsmöglichkeiten, welche im Folgenden grob betrachtet werden sollen. (Barta, 2011)

- Wurzeln: - innerliche wie äußerliche medizinische Anwendung,
- Holz: - Papierherstellung, Farbstoff
- Rinde: - medizinische Anwendungen, Geburtenkontrolle, Gewürz, Seile
- Blüten: - Honig, Tee
- Früchte: - Nahrungsmittel, Dünger
- Samen: - Nahrungsmittel, Medizin, Wasseraufbereitung, Öl, Kosmetik
- Blätter: - Nahrungsmittel, Medizin, Dünger, Pestizid

Aktuelle Forschungen beschäftigen sich insbesondere mit dem Hormon Zeatin, welches für das Wachstum in der Pflanze zuständig ist. Dieses Hormon wirkt, beim Menschen, Alterungserscheinungen entgegen und kommt in *Moringa oleifera* in einer sehr hohen Dosis vor. (Lüdicke, 2014) (Barta, 2011) (Fuglie, n.d.)

2.3 Zusammensetzung und Aufbau der Blätter

Wie bei jeder Pflanze bestehen auch bei *Moringa oleifera* die Blätter hauptsächlich aus Wassermolekülen. Zusammen mit Kohlenstoffdioxid bildet das Blatt in den Chloroplasten Glucose, die zur Synthese von Fetten und Eiweißen benötigt wird. Des Weiteren sind Mineralien und Spurenelemente im Blatt zu finden. (Biologie-schule.de, 2014) Das Blattwerk des Moringabaumes im Speziellen enthält folgende Nährstoffe: (Barta, 2011)

Eiweiße:

Arginin, Histidin, Isoleucin, Leucin, Lysin, Methionin, Phenylalanin, Threonin, Tryptophan, Valin

Vitamine:

A, B1, B2, B3, B5, B6, Biotin, Folsäure, C, E

Mineralien:

Calcium, Magnesium, Eisen, Phosphor, Kalium, Kupfer, Zink

Der unterschiedliche Aufbau der einzelnen Substanzen zeigt eine unterschiedliche Empfindlichkeit bei Veränderung der Temperatur, des pH-Wertes und einer Sauerstoff-Aussetzung. Vor Allem Vitamine sind dabei sehr anfällig. Auch UV-Licht verändert einige Vitamine oder zerstört sie gar. Da es sich bei den Blättern um ein Nahrungsmittel handelt, ist es sehr wichtig die Bestandteile nicht zu zerstören oder zu verändern, da sonst der Nährgehalt vermindert würde. Bei der Trocknung ist folglich darauf zu achten, die Temperatur nicht über die Maximaltemperatur des empfindlichsten Inhaltsstoffes hinaus zu erhöhen. (Blume, 2002)

Bekanntermaßen ist Vitamin C, also Ascorbinsäure, sehr hitzeempfindlich und sollte nicht Temperaturen über 50°C ausgesetzt werden. Ascorbinsäure wird häufig als Indikator zur Beurteilung von Vitaminverlusten herangezogen. Vitamin B6 und Vitamin A sind äußerst UV-instabil. Daher sollte vermieden werden die Blätter beim Trocknen der direkten Sonneneinstrahlung auszusetzen. (Blume, 2002) (Kröll, et al., 1989)

Die Blätter des Baumes sind folgendermaßen aufgebaut. Die äußerste Hautschicht, die Cuticula, ist eine wachsartige, wasserundurchlässige Schicht, welche verhindert, dass das Wasser, welches sich im Blatt befindet, austritt. Darunter befindet sich die Epidermis, die zur Stabilität des Blattes beiträgt und durchlässig für Licht ist. Im darauf folgenden Palisadengewebe befindet sich der Großteil der Chloroplasten, hier findet die Fotosynthese statt. Darauf folgt das Schwammparenchym, welches unregelmäßig ist und viele Interzellulare besitzt. In diesem Schwammgewebe können Wasser und Reststoffe gespeichert werden. An der Unterseite des Blattes folgen wieder eine Epidermis und eine Cuticula. Außerdem befinden sich an der Unterseite die Spaltöffnungen auch Stomata genannt, sie dienen der Pflanze zum Stoffaustausch. Für den Trocknungsprozess sind die Stomata dahingehend relevant, dass sie einen Weg durch die ansonsten wasserundurchlässige Cuticula bilden. Die Trocknung geht also bei geöffneten Stomata deutlich schneller voran, als bei geschlossenen. (Kröll, et al., 1989) (Spektrum Akademischer Verlag, 2001)

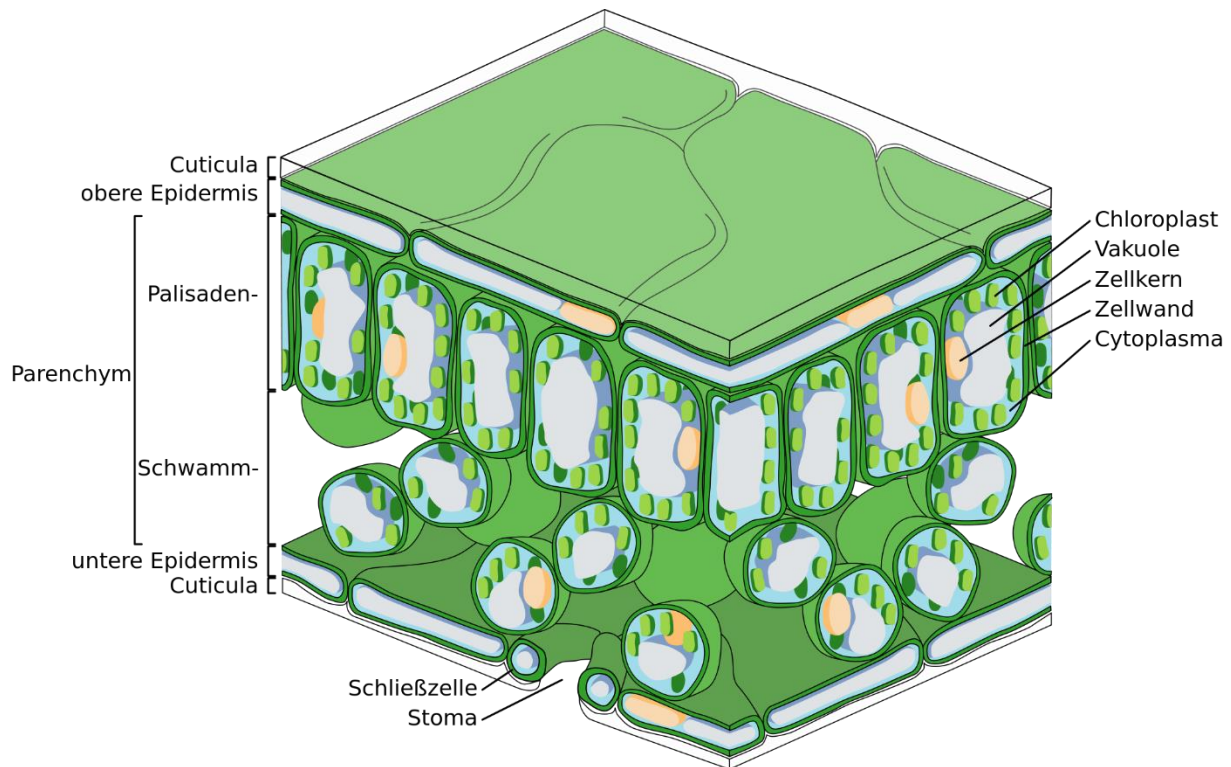


Abbildung 2: Aufbau des Blattes (wikimedia, 2014)

2.4 Untersuchung der Feuchtigkeit im Trocknungsgut

2.4.1 Wassergehalt des Trocknungsgutes

Die Masse des Trocknungsgutes, auch Frischmasse genannt, setzt sich aus der Masse des im Gut gebundenen Wassers und der Masse der Trockensubstanz zusammen:

$$m_{FM} = m_{H_2O} + m_{TS} \quad (2.0)$$

Der Wassergehalt w des Gutes ist die Masse an Wasser, die im Gut enthalten ist, bezogen auf die Gesamtmasse des untersuchten Gutes.

$$w = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{TS}} = \frac{m_{H_2O}}{m_{FM}} \quad (2.1)$$

Somit kann aus dem Wassergehalt und der Gesamtmasse die Menge des Wassers im Gut bestimmt werden:

$$m_{H_2O} = w \cdot m_{FM} \quad (2.2)$$

Formt man Formel (2.1) auf die Trockenmasse um und setzt Formel (2.2) ein ergibt sich für die Trockenmasse:

$$m_{TS} = \frac{m_{H_2O}}{w} - m_{H_2O} \quad (2.3)$$

mit (2.1) folgt: $m_{TS} = m_{FM} - (m_{FM} \cdot w)$ (2.4)

mit: m_{FM} = Frischmasse [kg]
 m_{H_2O} = Masse des Wassers [kg]
 m_{TS} = Masse der Trockensubstanz [kg]
 w = Wassergehalt [-]

(Kaltschmitt, et al., 2009) (CHEMIE.DE Information Service GmbH, 2014)

2.4.2 Aktivität des Trocknungsgutes

Die Aktivität des Gutes beschreibt die Feuchtigkeit an dessen Oberfläche. Sie liegt im Bereich zwischen 0 und 1:

$$a_W = \frac{p_D}{p'_D} = \varphi \quad (2.5)$$

mit: a_W = Aktivität des Trocknungsgutes [1...0]
 p_D = Dampf-Partialdruck an der Oberfläche des Gutes [Pa]
 p'_D = Sattedampfdruck [Pa]
 φ = relative Luftfeuchtigkeit

Befindet sich das System im Gleichgewicht, stimmt die Aktivität mit der relativen Luftfeuchtigkeit überein, was zur Folge hat, dass kein Stoffaustausch zwischen der das Gut überströmenden Luft und dem Gut stattfindet. Ist das System jedoch nicht im Gleichgewicht, wird so lange Feuchtigkeit mit der Umgebung getauscht, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Die Differenz zwischen der Aktivität und der Luftfeuchtigkeit, kann also als treibende Kraft des Stofftransportes bezeichnet werden. (Straub, 2002)

2.4.3 Feuchtegehalt des Trocknungsgutes

Der Feuchtegehalt u beschreibt die Wassermenge eines Gutes, bezogen auf die Trockenmasse, die nach vollständigem Verdampfen des enthaltenen Wassers zurückbleibt. (Kaltschmitt, et al., 2009)

$$u = \frac{m_w}{m_{TS}} \quad (2.6)$$

2.4.4 Berechnung des Wasser- und Feuchtegehaltes des Trocknungsgutes

In Tabelle 1 sind die Masse der frischen und getrockneten Blätter und Äste, vor und nach der Trocknung aufgezeigt.

Tabelle 1: Masse der Blätter vor und nach der Trocknung nach Prof. Sinkala (Sinkala, 2014)

Bag number:	1	2	3	4	5	Total	Dried leaves (kg)
Weight of leaves (kg)	18	18	15	19	15	85	13.07692
Weight of twig/stems (kg)	18	15	11	10	9	63	
TOTAL	36	33	26	29	24	148	

Aus 85kg frischen Blättern werden 13,08kg getrocknete Blätter, mit einem Wassergehalt von 7%, gewonnen. Mit Formel (2.3) ergibt sich eine Masse der Trockensubstanz von 12,16kg. Nach Formel (2.0), umgestellt nach m_w , sind 72,84kg von den 85kg Wasser. Damit kann man mit Formel (2.1) einen Wassergehalt von 85,7% bestimmen. Mit Formel (2.6) berechnet sich der Feuchtegehalt zu 599%.

Es kann bei der Trocknung jedoch zu Verlusten von Material kommen, etwa beim Ausbreiten auf den Netzen oder beim Verpacken des Trockengutes. Diese Verluste verfälschen die eben berechneten Ergebnisse. Eine genauere Angabe des Feuchte- und Wassergehaltes kann nur durch einen eigenen Versuch ermittelt werden.

2.5 Versuch zur Feststellung des Wassergehaltes

Um eine normgerechte Angabe, nach DIN EN 12880, zum Wasser- und Feuchtegehalt des zu trocknenden Gutes und des Endproduktes zu bekommen, wird eine Probe frischer Moringablätter und eine Probe des Pulvers aus getrockneten und zerriebenen Blättern untersucht. Dazu wird das frische Material vakuumverpackt und verschickt. Sobald das Gut zur Verfügung steht, kann mit einer Messung im Klimaschrank begonnen werden.

Die Blätter stammen aus Gabarone, Botswana, werden direkt vom Baum geerntet und in einer Plastikfolie fest verschlossen. Eine relativ kurze Versanddauer macht es möglich die Blätter in einem nahezu frischen Zustand zu untersuchen. Das Pulver stammt ebenfalls aus Gabarone und wird dort direkt auf dem örtlichen Markt gekauft. Es handelt sich also um das Produkt, welches, durch Einsatz des hier zu planenden Trockners, hergestellt werden soll.

2.5.1 Versuchsaufbau

Die Blätter werden zuerst von den Zweigen entfernt und in ein Gefäß, wie in Abbildung 4 dargestellt, gegeben. Der Analyseofen, in Abbildung 3, wird auf 105°C aufgeheizt und hält anschließend die Temperatur konstant. Um die Feuchtigkeit zu bestimmen, wird, nach Norm DIN EN 12880 das Gefäß mit dem zu untersuchenden Gut gewogen und anschließend für 30 Minuten in dem Ofen getrocknet. Nach der Trocknung wird das Gut ein weiteres Mal gewogen. Die Massendifferenz ist das verdampfte Wasser aus dem Gut. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die Differenz der letzten und der aktuellen Wägung nicht mehr als 2mg beträgt. Ab diesem Zeitpunkt gilt der Trockenrückstand als konstant. Es muss außerdem darauf geachtet werden, dass der Trockenrückstand nicht weniger als 0,5g beträgt. (Deutsche/ Europäische Norm, 2001) Für die getrockneten und zerstoßenen Blätter, in Abbildung 5 gezeigt, wird die gleiche Vorgehensweise angewandt.



Abbildung 3 Klimaschrank zur Analyse des Gutes



Abbildung 4: Frische Moringablätter



Abbildung 5: Getrocknete und zerstoßene Moringablätter

2.5.2 Ergebnisse der Versuche

Bei dem Versuch mit frischen Moringablättern werden die Werte, wie sie in Tabelle 2 dargestellt sind, festgestellt.

Tabelle 2: Versuchsergebnisse, Feuchtigkeit frische Blätter

Messungsnummer	Zustand	Gewicht in g
1.	Feuchter Zustand	2,2059
2.	Nach 30 Minuten im Ofen	0,5771
3.	Nach 30 Minuten im Ofen	0,5704
4.	Nach 30 Minuten im Ofen	0,5686
5.	Nach 30 Minuten im Ofen	0,5684

Im Vergleich zu den Frischen Blättern sind in Tabelle 3 die Ergebnisse des Versuchs mit dem Moringapulver zusammengetragen.

Tabelle 3: Versuchsergebnisse, Feuchtigkeit Moringapulver

Messungsnummer	Zustand	Masse in g
1.	Frisches Pulver	3,3006
2.	Nach 30 Minuten im Ofen	3,0864
3.	Nach 30 Minuten im Ofen	3,0840
4.	Nach 30 Minuten im Ofen	3,0832

2.5.3 Auswertung der Ergebnisse

Die absolute verdampfte Wassermenge bildet sich aus der Differenz der Masse des Gutes im feuchten Zustand und der absoluten trockenen Masse.

$$m_w = m_{FM} - m_{TM} \quad (2.7)$$

Mit dieser Formel und mit Formel (2.1) und (2.5) können die Wassermasse, der Wassergehalt und der Feuchtegehalt bestimmt werden. Somit ergeben sich für die frischen Blätter die Werte, wie sie in Tabelle 4 zusammengefasst sind.

Tabelle 4: Auswertung Versuch Feuchtigkeit frische Blätter

Wassermasse m_w [g]	1,6375
Wassergehalt w [%]	74
Feuchtegehalt u [%]	288

Für das Pulver aus getrockneten Blättern ergeben sich die Werte in Tabelle 5.

Tabelle 5: Auswertung Versuch Feuchtigkeit Moringapulver

Wassermasse m_w [g]	0,2174
Wassergehalt w [%]	6,6
Feuchtegehalt u [%]	7,1

Die Blätter müssen im Trockner also auf einen Endfeuchtegehalt von 7% getrocknet werden.

2.6 Betrachtung der Erntemenge

Auf der Plantage von Herrn Prof. Sinkala werden nach eigenen Angaben auf 0,18ha Land 18 Tonnen Moringablätter in 5 Monaten geerntet. Es wird täglich ein Teil der Plantage geerntet. (Sinkala, 2014) Rechnet man die Menge auf eine tägliche Ernte um, ergibt sich eine Tagescharge von 120kg frischen Blättern. Auch für die Farm eines Kleinbauern soll dies als die tägliche Erntemenge angenommen werden.

3. Analyse des Trocknungsvorgangs

Unter Trocknung im Allgemeinen versteht man das Entziehen von Flüssigkeit aus einem Feststoff. Das Ziel der Trocknung ist das Herstellen eines trockenen Gutes zur weiteren Verwendung, in diesem Fall von getrockneten Moringablättern. (Krischer, et al., 1978)

3.1 Theorie der Trocknung

Materialien können, je nach ihren Produkteigenschaften und dem späteren Zustand des getrockneten Gutes, auf mehrere Arten getrocknet werden. Zum einen die mechanische Trocknung durch mechanische Kräfte, wie Pressen, zum anderen das thermische Trocknen durch Zuführung von Energie in Form von Wärme. (Krischer, et al., 1978)

3.1.1 Bindung der Feuchte am und im Gut

Es wird angenommen, dass es sich bei Moringablättern, ähnlich wie bei gewöhnlichem Gras und anderem Grüngut, um ein hygroskopisches Gut handelt. Erkennbar ist dies an den drei Knickpunkten bei der Betrachtung des Trocknungsverlaufes über die Zeit. Dabei ist die Feuchtigkeit auf verschiedene Arten an das Gut gebunden. (Kröll, et al., 1989)

Zum einen durch eine physikalisch-mechanische Bindung, wobei die Feuchtigkeit an der Oberfläche des Gutes haftet oder in Kapillaren des Gutes gebunden ist. Die Flüssigkeit in den Kapillaren besitzt dabei eine größere Bindungskraft als die Flüssigkeit an der Oberfläche. Flüssigkeit in feinen Kapillaren setzt den Dampfdruck der Flüssigkeit herab und erhöht somit die Bindungskraft. Dieser Zusammenhang wird durch die Kelvin-Gleichung beschrieben (Dechema, 2010):

$$\ln \frac{p_s}{p} = \frac{2\sigma M}{\rho r RT} \quad (2.8)$$

mit: p_s = Sättigungsdampfdruck freie Oberfläche [Pa]
 p = Dampfdruck über Pore [Pa]
 σ = Oberflächenspannung [N/m]

M	= Mol-Masse der Flüssigkeit [kg/mol]
ρ	= Dichte der Flüssigkeit [kg/m ³]
r	= Radius der Pore [m]

Bis zum ersten Knickpunkt der Trocknung liefern die Kapillaren im Gut Flüssigkeit an die Oberfläche des Gutes, die, wie bei einer offenen Wasseroberfläche, einfach verdunsten kann. Der Energieeinsatz ist dabei vergleichsweise gering.

Eine weitere Bindungsart ist die physikalisch-chemische Bindung, worunter man in erster Linie adsorptive aber auch osmotische und strukturelle Bindungen versteht. Um solche Bindungen zu lösen, ist ein deutlich höherer Energieaufwand zu betreiben.

Die letzte Art der Feuchtigkeitsbindung ist die chemische Bindung, welche jedoch nur durch Einsatz hoher Temperaturen gelöst werden kann. Für eine Trocknung im Niedertemperaturbereich ist sie also nicht relevant.

Hygroskopisches Verhalten tritt erst ab einer Unterschreitung eines gewissen Feuchtegehaltes auf, da die Feuchtigkeit vorher ständig durch Kapillaren an die Gutsoberfläche transportiert werden kann. Vorher verhält sich auch ein eigentlich hygroskopischer Stoff wie ein nichthygroskopischer. (Straub, 2002)

3.1.2 Mechanische Trocknung

Unter mechanischer Trocknung versteht man eine Trocknung ohne Phasenübergang, welche rein durch mechanische Kräfte, wie Pressen oder Zentrifugieren, stattfindet. Diese Art der Trocknung wird meist nur zur Vorentfeuchtung verwendet, da nur die Makrokapillaren geleert werden können. Die hohen Kräfte, die bei der mechanischen Trocknung auf das Gut wirken, begrenzen den Einsatz dieser Technik auf Güter, die unempfindlich gegenüber Deformation sind. Damit die Flüssigkeit aus dem Gut entfernt werden kann ist es außerdem wichtig, dass das Gut ausreichend flüssigkeitsdurchlässig ist. (Krischer, et al., 1978) Für die hier untersuchten Moringablätter kommt eine solche Trocknung nicht in Frage, da das Gut von sehr feinen Kapillaren durchzogen ist, die bei dieser Art der Trocknung nicht geleert werden können.

3.1.3 Thermische Trocknung

Die thermische Trocknung ist eine Trocknung bei der mindestens ein Stoff den Aggregatzustand in die Gasphase wechselt. Je nach Entstehungsort des Gases kann dieses dann einfach mit dem Trocknungsmedium abtransportiert werden oder muss erst durch bereits getrocknete Schichten diffundieren. Bei dieser Trocknungsart kann auch Flüssigkeit aus den Mikrokapillaren entfernt werden.

Diese Art der Trocknung setzt sich aus zwei Vorgängen zusammen:

- Überführung der Flüssigkeit in Dampf
- Abtransport des Dampfes vom Gut

Dabei ist es wichtig zu wissen, wie die Wärme an den benötigten Ort gelangt. Mehrere Verfahren sind gängig:

- Konvektionstrocknung
- Kontaktstrocknung
- Strahlungstrocknung
- Elektrische Trocknung (el. Mag. Strahlung)

Außerdem muss betrachtet werden, wie der entstandene Dampf abtransportiert wird. Die gängigen Methoden dabei sind:

- Lufttrocknung
- Vakuumtrocknung
- Heißdampftrocknung

Im Laufe des Trocknungsvorgangs verändert sich ständig der Ort der Verdampfung, auch Trocknungsspiegel genannt. Er wandert mit der Zeit weiter in das Gutsinnere. Die bereits getrocknete Schicht, bildet dabei ein immer größer werdendes Hindernis, zum einen für die Wärme, die zum Trocknungsspiegel gelangen muss, zum anderen für den Dampf, der aus dem Gutsinneren an die Gutsoberfläche transportiert werden muss. Der Prozess der Trocknung ist also eine Kopplung von Wärmebewegung, Dampfbewegung und Flüssigkeitsbewegung im Gut. (Krischer, et al., 1978)

3.1.4 Zustandsbeschreibung des Trocknungsmediums

Als Trocknungsmedium wird das Medium beschrieben, welches die Feuchtigkeit aus dem zu trocknenden Gut aufnimmt und abtransportiert. Das Trocknungsmedium kann des Weiteren auch die Energie zum Trocknungsgut liefern, die zum Lösen der Flüssigkeit aus dem Gut nötig ist. Aus Gründen der einfachen Verfügbarkeit, der Kosten und der Umweltverträglichkeit wird Luft als das Trocknungsmedium für die Trocknung der Moringablätter eingesetzt. (Krischer, et al., 1978)

Das am häufigsten verwendete Trocknungsmedium ist Luft, die sich aus mehreren Einzelbestandteilen zusammensetzt. Den größten Teil dieser Bestandteile macht Stickstoff mit etwa 78% aus, gefolgt von Sauerstoff mit etwa 21%. Argon und CO₂ sind die Gase die die größten Anteile der Spurengase in der Luft ausmachen. Zudem kann Luft einen gewissen Anteil an Wasserdampf enthalten, der sein Maximum je nach Temperatur ändert. (Soika, 2014) Die absolute Feuchte der Luft kann nach folgender Gleichung berechnet werden (Päßler, 2009):

$$x_L = 1000 \cdot 0,622 \cdot \frac{\varphi_L \cdot p_{s,L}}{p - \varphi_L \cdot p_{s,L}} \quad (3.0)$$

mit: x_L = absolute Feuchte der Luft [g/kg]
 p = Umgebungsdruck [Pa]
 $p_{s,L}$ = Sättigungsdampfdruck [Pa]
 φ_L = relative Luftfeuchtigkeit [%]

Der Partialdruck beschreibt den Anteil des Gesamtdruckes, der durch einen einzelnen Bestandteil der Luft wie Wasserdampf hervorgerufen wird. Um den maximal erreichbaren Partialdruck des Wasserdampfes in der Luft bei einem bestimmten Zustandspunkt zu bestimmen, wird die Magnus Formel angewandt (Soika, 2014):

$$p_{s,H_2O}(\vartheta_s) = 6,112 hPa \cdot \exp\left(\frac{17,504 \cdot \vartheta_s}{241,2^\circ C + \vartheta_s}\right) \quad (3.1)$$

mit: ϑ_s = Lufttemperatur des Sättigungszustandes [°C]
 $p_{s,H_2O}(\vartheta_s)$ = Sättigungsdampfdruck [Pa]

Der tatsächlich vorherrschende Partialdruck des Wassers in der Luft errechnet sich zu (Soika, 2014):

$$p_{H_2O} = r_{H_2O} \cdot p \quad (3.2)$$

mit: p_{H_2O} = Wasserdampfpartialdruck
 r_{H_2O} = Volumenanteil des Wassers

Um die prozentuale Wasserbeladung der Luft feststellen zu können wird die relative Feuchte der Luft bestimmt (Soika, 2014):

$$\varphi_{H_2O} = \frac{p_{H_2O}}{p_{s,H_2O}(\vartheta_s)} \quad (3.3)$$

Die Dichte der feuchten Luft ergibt sich durch die Formel (Päßler, 2009):

$$\rho_L = \frac{1}{T_L} \cdot \left(\frac{p - p_{s,H_2O} \cdot \frac{\varphi_{H_2O}}{100}}{287} + \frac{p_{s,H_2O} \cdot \frac{\varphi_{H_2O}}{100}}{462} \right) \quad (3.4)$$

mit: T_L = Lufttemperatur in K

bestimmt.

Die spezifische Wärmekapazität kann durch die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und den Umgebungsdruck mit folgender Formel bestimmt werden (Kreller, et al., 2009):

$$c_{p,L} = 1,007 \cdot \left[\left(1 - \frac{\varphi_{H_2O} \cdot p_{s,H_2O}}{p} \right) + \frac{\varphi_{H_2O} \cdot p_{s,H_2O}}{p} \cdot \frac{8}{7} \right] \quad (3.5)$$

mit: $c_{p,L}$ = spezifische Wärmekapazität der Luft

3.1.5 Der Trocknungsverlauf hygroskopischer Güter

Im ersten Abschnitt der Trocknung verdunstet das Wasser an der Oberfläche des zu trocknenden Gutes. Dabei stellt sich ein scheinbarer thermischer Beharrungszustand ein, wobei das Wasser aus dem Inneren durch die Kapillaren des Trocknungsgutes an die Oberfläche transportiert wird. Es ändert sich also nur die Verteilung des Wassers im Gut. Das Wasser an der Oberfläche ist ungebunden und kann durch Aufwenden der Verdampfungsenthalpie in Dampf gewandelt und abtransportiert werden. Die Trocknungsgeschwindigkeit bleibt in diesem Abschnitt nahezu konstant. Die Temperatur des Gutes bleibt dabei deutlich unter der Temperatur des Trocknungsmediums.

Sobald die Feuchtigkeit nicht mehr ohne weiteres durch die Kapillaren an die Oberfläche gefördert werden kann, ist der erste Knickpunkt erreicht. Die Trocknungsgeschwindigkeit sinkt nun kontinuierlich ab. Die Feuchtigkeit kann ab diesem Zeitpunkt nicht mehr direkt verdampft und abtransportiert werden. Es müssen zuerst die Bindungskräfte überwunden werden bis der entstandene Dampf durch Diffusion das Trocknungsgut verlässt und anschließend abtransportiert werden kann. Die Energie, die zum Verdampfen des Wassers im Gut nötig ist, muss den bereits getrockneten Teil des Gutes durchqueren, um zum Trocknungsspiegel zu gelangen.

Ab einem bestimmten Zeitpunkt zeigt das gesamte Gut hygroskopisches Verhalten und ein dritter Abschnitt der Trocknung beginnt, mit einem zweiten Knickpunkt, wobei nun der restliche Teil der Feuchtigkeit, der jedoch am stärksten gebundene, ausgetrieben wird. Diese Restfeuchte ist z.B. das chemisch gebundene Kristallwasser in den Zellen. In diesem letzten Bereich sinkt der Dampfdruck an der Oberfläche des Gutes sehr schnell ab, dadurch verlangsamt sich auch die Trocknung sehr schnell. Sobald der Dampfdruck den Sattdampfdruck des Trocknungsmediums erreicht endet die Trocknung. (Krischer, et al., 1978) (Kröll, 1978) (Päßler, 2009)

In Abbildung 6 wird der Vorgang grafisch, qualitativ dargestellt. Die sprunghaften Änderungen in der Kurve werden als Knickpunkte bezeichnet.

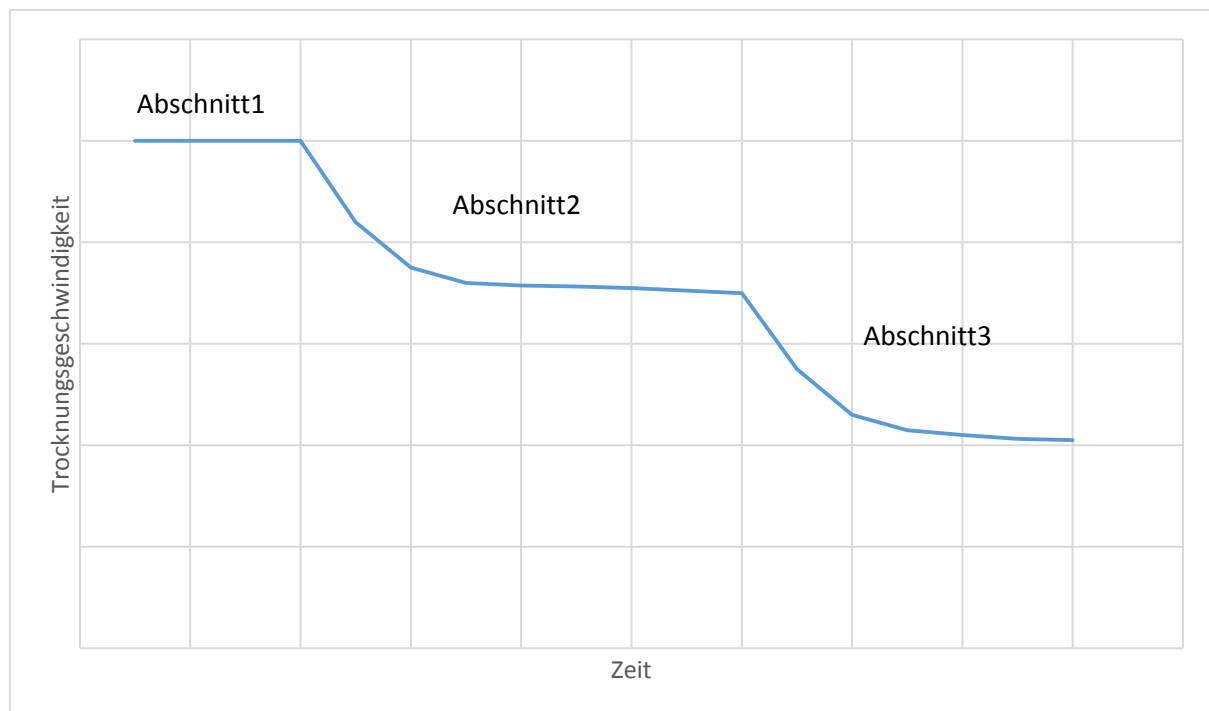


Abbildung 6: Schematischer Trocknungsverlauf (Krischer, et al., 1978)

3.2 Berechnungen zur Trocknung

3.2.1 Der zeitliche Verlauf der Trocknung

Die Trocknungsgeschwindigkeit wird über die verdampfte Flüssigkeitsmenge aus dem Gut je Zeit berechnet, dies gilt für einen konstanten Volumenstrom, konstanter Geschwindigkeit, Temperatur und Feuchtigkeit:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} \quad (3.6)$$

Wie in der Abbildung 6 in Kapitel 3.1.5 gezeigt kann damit eine Trocknungskurve ermittelt werden, in der die Trocknungsgeschwindigkeit zur Trocknungszeit aufgetragen wird. Nach einer gewissen instationären Anfangsphase, gliedert sich die Trocknungsgeschwindigkeit in drei Teilabschnitte, die jeweils durch einen Knickpunkt getrennt werden. (Dechema, 2010) (Krischer, et al., 1978)

3.2.2 Der erste Trocknungsabschnitt

Im ersten Trocknungsabschnitt verdunstet das Wasser, welches sich an der Gutsoberfläche befindet und durch große Kapillaren nachgeliefert wird. Es stellt sich nach kurzer Zeit ein Beharrungszustand ein. Während dieser Zeit bleiben die Temperatur des Gutes und die Trocknungsgeschwindigkeit konstant, an der Oberfläche des Gutes tritt nun ein Wärme- und Stoffaustausch ein. Es gilt für den Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{zu} = A \cdot \dot{m}_D \cdot h_V \quad (3.7)$$

Wird allein durch das Trocknungsmedium Wärme auf das Gut übertragen, gilt folgende Gleichung (Krischer, et al., 1978):

$$\dot{Q}_{zu} = A\alpha(T_L - T_O) \quad (3.8)$$

Formel (3.8) kann weiter auch als Wärmeleitungsansatz formuliert werden (Krischer, et al., 1978):

$$\dot{Q}_{zu} = A\lambda \frac{(T_L - T_O)}{s_{th}} \quad (3.9)$$

mit: s_{th} = Dicke der thermischen laminaren Grenzschicht [m]

Der Wärmübergangskoeffizient α beschreibt den Wärmeübergang von einem gasförmigen Wärmeträger auf einen Festkörper. Ermittelt wird dieser aus der Definition der Nusselt-Zahl (Dechema, 2010):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (3.10)$$

mit: α = Wärmeübergangskoeffizient [J/(kg K)]
 λ = Wärmeleitfähigkeit der Luft [W/(m K)]
 L = charakteristische Länge [m]

Für eine erzwungene Konvektion einer parallel überströmten Platte gelten die folgenden Nusselt-Zahl Korrelationen (Soika, 2013):

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad Re < 10^5 \quad (3.11)$$

$$Nu = 0,037 \cdot (Re^{0,8} - 23100) \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7 \quad (3.12)$$

Mit Re , der Reynolds-Zahl und Pr , der Prandtl-Zahl, welche folgendermaßen definiert sind (Soika, 2013):

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (3.13)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\rho \cdot L \cdot c_{p,L} \cdot \nu}{\lambda} \quad (3.14)$$

mit: w = Geschwindigkeit des Luftstromes [m/s]
 ν = Kinematische Viskosität der Luft [m²/s]
 $a = \frac{\lambda \cdot \rho}{c_p}$ = Temperaturleitfähigkeit [m²/s]

Um die Stoffbewegung im System darzustellen, müssen die Wasserdampfpartialdrücke an der Oberfläche des Gutes und in dem Trocknungsmittel betrachtet werden. Der Dampfmassenstrom, der auch als Trocknungsgeschwindigkeit bezeichnet wird, ergibt sich zu (Dechema, 2010):

$$\dot{m}_D = M \cdot A \cdot \beta \cdot \frac{1}{R \cdot T} \cdot (p_{H_2O,O} - p_{H_2O,L}) \quad (3.15)$$

mit: M = Mol-Masse Wasser [kg/mol]
 T = Temperatur der Luft

Es wird angenommen, dass sich durch die erzwungene Konvektion eine laminare Luftschicht über der Gutoberfläche bildet. Durch diese Luftschicht muss das verdunstende Wasser diffundieren, wodurch ein Stoffstrom zustande kommt. Diese Grenzschicht bildet einen Widerstand gegen die Verdunstung, sie wird mit einer Dicke von s_c angenommen. Mit dem Stefan'schen Diffusionsgesetz folgt (Dechema, 2010):

$$\dot{m}_D = A \cdot \frac{\delta}{s_c} \cdot \frac{M}{R \cdot T} \cdot \left(\frac{p}{p - p_{H_2O,m}} \right) \cdot (p_{H_2O,O} - p_{H_2O,L}) \quad (3.16)$$

mit: δ = Diffusionskoeffizient [m²/s]
 s_c = Dicke der Konzentrations-Grenzschicht [m]

Der Stoffübergangskoeffizient ergibt sich daraus zu (Dechema, 2010):

$$\beta = \frac{\delta}{s_c} \left(\frac{p}{p - p_{H_2O,m}} \right) \quad (3.17)$$

mit: p = Gesamtdruck [Pa]

Es ist $p_{H_2O,m}$ der mittlere logarithmische Partialdruck des Wasserdampfes und berechnet sich zu (Dechema, 2010):

$$p_{H_2O,m} = \frac{p_{H_2O,O} - p_{H_2O,L}}{\ln \frac{p_{H_2O,O}}{p_{H_2O,L}}} \quad (3.18)$$

Zur Berechnung des Stoff- und Wärmestromes fehlen die Fläche und die Wärmeübergangskoeffizienten. Welche nur über einen Versuch ermittelt werden können. Die Geräte, die für diese Art von Versuch benötigt werden, stehen jedoch nicht zur Verfügung.

3.2.3 Der zweite Trocknungsabschnitt

Sobald die Feuchtigkeit an der Oberfläche verdunstet ist und keine weitere Flüssigkeit durch Kapillare nachgeliefert wird, beginnt der zweite Abschnitt der Trocknung. Dabei kann die Feuchtigkeit nicht mehr allein durch das Aufbringen der Verdampfungsenthalpie gelöst werden. Die Wärme muss durch den bereits

getrockneten Teil des Gutes gelangen, um im Inneren des Gutes Flüssigkeit zu verdampfen. Durch Diffusion, durch die bereits trockene Gutsschicht und die laminare Grenzschicht, gelangt der Dampf anschließend in den Strom des Trocknungsmediums und wird abtransportiert.

Der Trocknungsverlauf im zweiten Abschnitt der Trocknung kann allgemein durch die Gleichung (Krischer, et al., 1978):

$$\dot{m}_{DE} \cdot h_V = \frac{\lambda}{s'} \cdot (\vartheta_{OE} - \vartheta_E) + \frac{\lambda}{s-s'} \cdot (\vartheta_B - \vartheta_E) \quad (3.19)$$

beschrieben werden.

mit:	s'	= Lage des Trocknungsspiegels im Gut [m]
	s	= Dicke des Trocknungsgutes [m]
	ϑ_{OE}	= Temperatur an der Gutoberfläche [°C]
	ϑ_E	= Temperatur am Trocknungsspiegel [°C]
	ϑ_B	= Temperatur an der Gutsunterseite [°C]
	$\dot{m}_{DE}$	= Endtrocknungsgeschwindigkeit [kg/s]

Die Parameter zur Bestimmung der Trocknungsgeschwindigkeit im zweiten Trocknungsabschnitt sind im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelbar, da die benötigten Messmittel nicht zur Verfügung stehen.

3.2.4 Der dritte Trocknungsabschnitt

Für hygroskopisches Gut, wie es Blätter sind, folgt nach dem zweiten Trocknungsabschnitt ein Dritter. In diesem Bereich wird das hygroskopisch gebundene Wasser ausgetrieben. Für die Trocknung der Moringablätter ist dieser Abschnitt jedoch nicht relevant, da zum einen diese Art der Bindung nur bei sehr hohen Temperaturen gelöst werden kann, die bei dieser Art der Trocknung nicht erreicht werden können und auch nicht erreicht werden dürfen. Zum anderen ist ein Entfernen des so gebundenen Wassers nicht notwendig ist. (Krischer, et al., 1978)

Auch wenn alle Parameter zur Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit vorhanden wären, müsste eine Versuchsreihe zur Trocknung der Blätter durchgeführt werden. Das Verhalten der Schüttung des Gutes im Trockner und die Zirkulation der Luft um das Gut können nur auf diese Weise eindeutig bestimmt werden.

3.2.5 Betrachtung des Druckverlustes im System

Für die nötige Druckerhöhung, die vom Ventilator zu erzeugen ist, muss der Druckverlust des Systems bestimmt werden. Die Strömungsform in den Rohren der Anlage wird mit der Reynoldszahl ermittelt, dazu kann Formel (3.13) verwendet werden. Für die charakteristische Länge muss hier der Rohrdurchmesser eingesetzt werden. Ist die Reynoldszahl größer als 2320, handelt es sich um eine turbulente Strömung. Ist sie kleiner, ist die Strömung laminar. Aus dem folgenden Diagramm kann dann mit der berechneten Reynoldszahl der Rohrreibungsbeiwert λ bestimmt werden. (Bschorer, 2013)

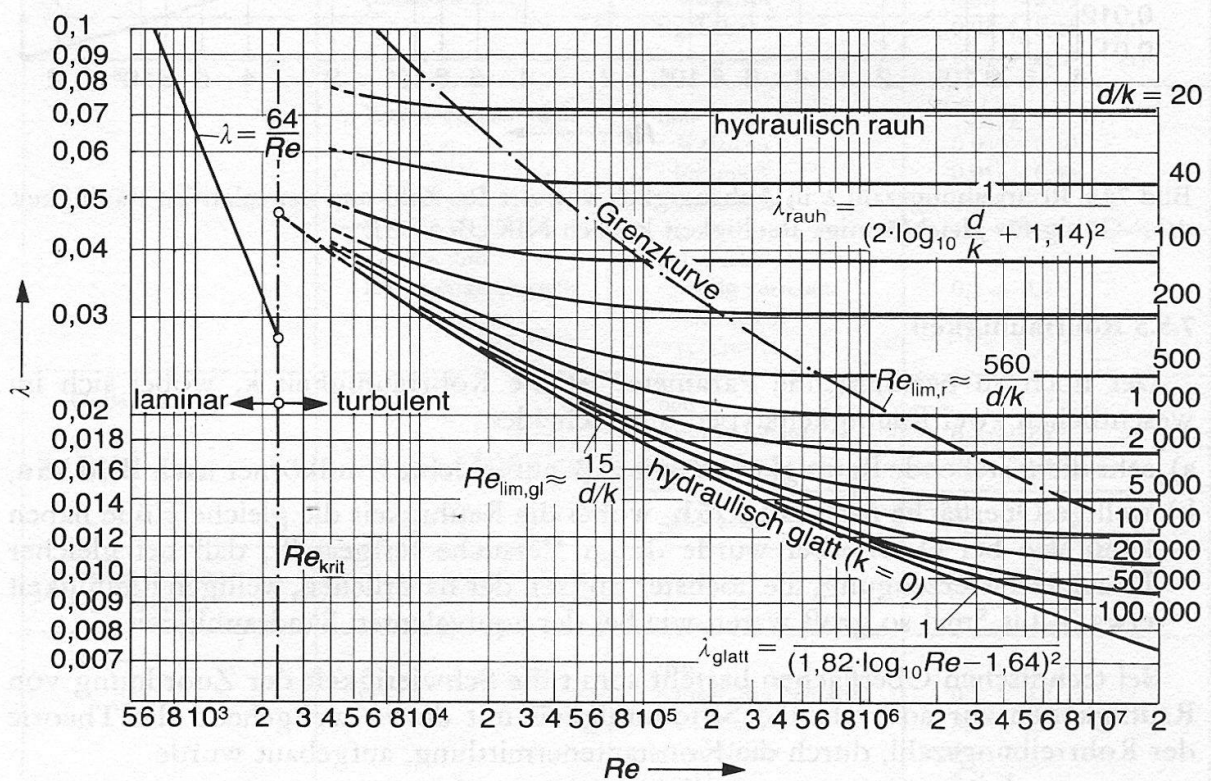


Abbildung 7: Nikuradse Diagramm (HAW-Hamburg, n.d.)

Setzt man diesen Wert in die Formel:

$$\Delta p_V = \lambda \frac{l}{D} \frac{\rho}{2} w^2 \quad (3.20)$$

mit: Δp_V = Druckverlust [Pa]
 λ = Rohrreibungsbeiwert
 l = Rohrlänge [m]
 D = Innerer Rohrdurchmesser [m]

kann man den Druckverlust der Rohrstrecke berechnen.

Für Rohrkrümmungen und andere Bauteile, wie Diffusoren und Düsen, wird eine Widerstandszahl zur Berechnung herangezogen:

$$\zeta = \lambda \frac{l}{D} \quad (3.21)$$

Zeta wird dann in Formel (3.20) eingesetzt. Am Ende werden alle Druckverluste zu einem Gesamtdruckverlust addiert. (Bschorer, 2013)

3.2.6 Der Energiebedarf des Trockners

Der minimal aufzuwendende Energiebedarf setzt sich aus der Erwärmung des Gutes und der Verdampfungsenthalpie des Wassers zusammen (Schelle, et al.) (Universität Jena, n.d.):

$$W_{min} = (m_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} + m_{TM} \cdot c_{p,TM}) \cdot \Delta T + h_V \cdot m_{H_2O} \quad (3.22)$$

mit:	m_{H_2O}	= Masse Wasser [kg]
	c_{p,H_2O}	= spez. Wärmekapazität des Wassers [J/kg K]
	m_{TM}	= Masse des trockenen Gutes
	$c_{p,TM}$	= spez. Wärmekapazität trockenes Gut [J/kg K]
	ΔT	= Temperaturdifferenz [K]
	h_V	= Verdampfungsenthalpie [J/kg]
	W_{min}	= minimaler Energieverbrauch [J]

Zusätzlich ist die Energie zum Aufbringen des Volumenstroms, also zur Überwindung des Druckverlustes, zu betrachten (Bschorer, 2013):

$$P_{el} = \frac{\Delta p_V \cdot \dot{V}_L}{\eta_L} \quad (3.23)$$

mit:	P_{el}	= elektrische Leistung Gebläse [W]
	$\dot{V}_L$	= Luftvolumenstrom [m³/s]
	η_L	= Wirkungsgrad des Ventilators [0...1]

Sind die Parameter der Luft bekannt, kann der Energieverbrauch der Anlage auch über die zu erwärmende Luft und die Leistung des Ventilators bestimmt werden.

$$W = m_L \cdot c_{p,L} \cdot (T_{L,zu} - T_{L,umg}) \quad (3.24)$$

mit: $\dot{m}_L$ = Massenstrom der Luft [kg/s]
 $T_{L,zu}$ = Lufttemperatur die dem Trockner zugeführt wird [°C]
 $T_{L,umg}$ = Temperatur der Umgebungsluft [°C]

Dabei muss der Luftmassenstrom bestimmt werden:

$$\dot{m}_L = \dot{V}_L \cdot \rho_L \quad (3.25)$$

mit: $\dot{V}_L$ = Volumenstrom der Luft [m³/s]

Der Massenstrom des in der Luft befindlichen Dampfes kann wie folgt berechnet werden.

$$\dot{m}_D = \dot{m}_L \cdot \Delta X \quad (3.26)$$

mit: $\dot{m}_D$ = Massenstrom Dampf [kg/s]
 ΔX = Differenz zwischen eintretendem- und austretendem Feuchtegehalt [g/kg]

Der Nutzungsgrad eines Trockners wird über den Vergleich der tatsächlich eingebrachten Energie mit der für den Prozess minimal notwendigen Energie ermittelt. Es ergibt sich die Gleichung (Schelle, et al.):

$$\mu = \frac{W_{min}}{W_{zu}} \cdot 100 \quad (3.27)$$

mit: W_{zu} = zugeführte Energiemenge [W]
 μ = Nutzungsgrad der Trocknung [%]

ΔX wird durch die Verwendung eines Mollier-Diagrammes bestimmt. (Soika, 2014)

Im Mollier-Diagramm in Abbildung 8 werden die Trocknungsprozesse für die beiden Extrembedingungen in Sommer und Winter dargestellt. Die maximale Beladung der Luft wird dabei mit 75% angenommen, wodurch ein Auskondensieren des Wassers im

Trockner vermieden wird. Bei einem gleichbleibenden Massenstrom des Trocknungsmediums sinkt die Wasserbeladung der Luft im Trockner, da die Trocknungsgeschwindigkeit aufgrund der sinkenden Aktivität des Gutes reduziert wird.

Die Trocknung setzt sich aus einem Prozess der Lufterwärmung und einem Prozess der isobaren adiabaten Befeuchtung mit flüssigem Wasser zusammen. Dabei kann angenommen werden, dass die Enthalpie nach der Erwärmung unverändert bleibt. Der Zustand der Luft wandert dabei auf der Isenthalpen in Richtung der Sättigungskurve. (Soika, 2014)

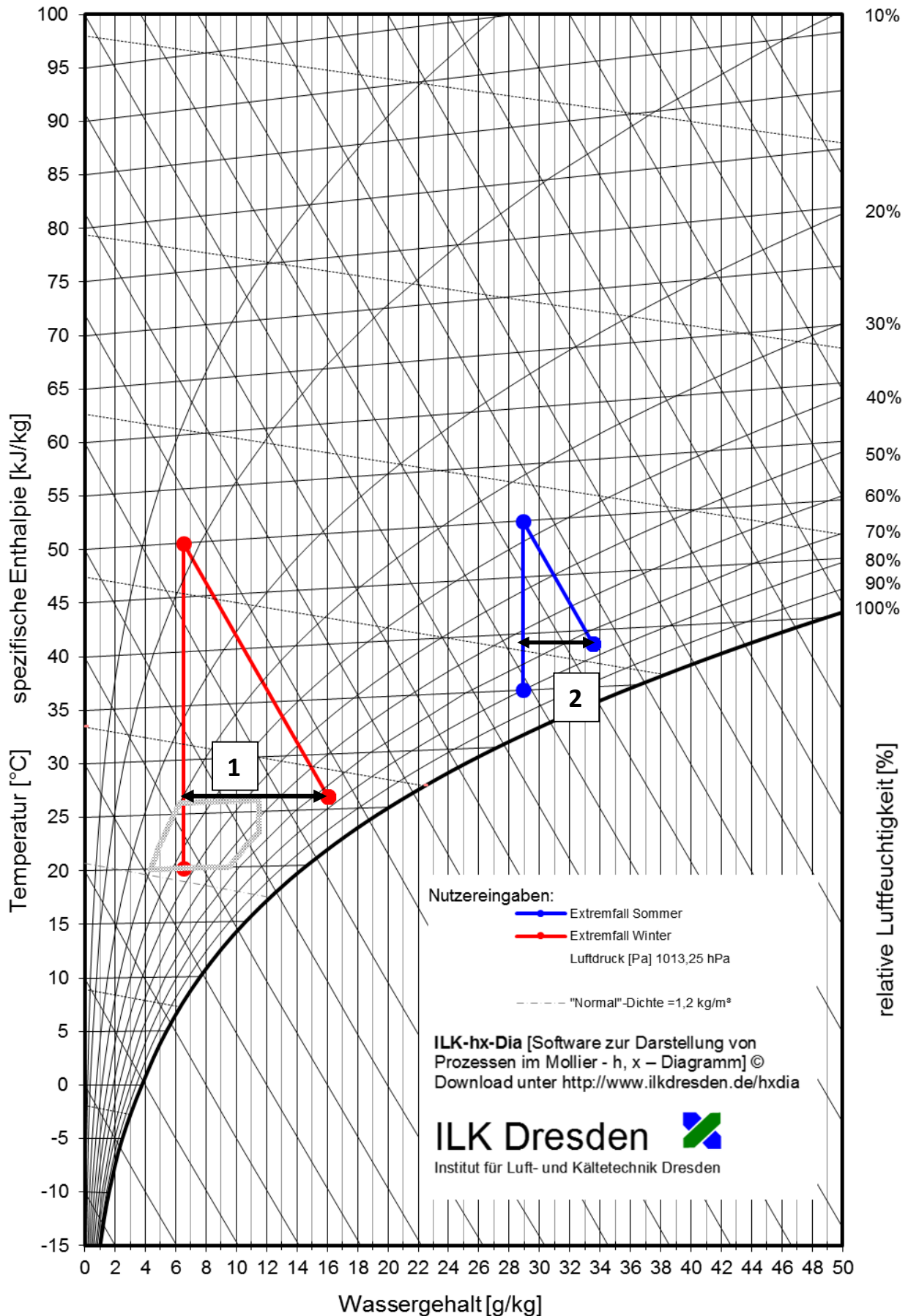


Abbildung 8: Mollier-Diagramm mit den Trocknungsvorgängen bei Extrembedingungen im Winter und Sommer (ILK Dresden, 2014)

3.3 Der allgemeine Aufbau eines Trockners

Im Allgemeinen besteht ein Trockner aus mehreren Einzelkomponenten. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Abluft bzw. die aus dem Trockengut verdampfte Flüssigkeit einen besonderen Wert, z.B. ein wiederverwertbares Lösungsmittel, zur Weiterverarbeitung besitzt. Folgende Komponenten bestimmen im Allgemeinen den Aufbau eines Trockners (Kröll, 1978):

- a) Filter zur Reinigung der Zuluft
- b) Entfeuchtung der Zuluft
- c) Gebläse zur Erzeugung des Volumenstroms
- d) Heizung zum Energieeintrag
- e) Beschickungsvorrichtung
- f) Einrichtung zur Rückgewinnung oder zum Abluft auslassen
- g) Mess- und Regelgeräte

Jedoch sind nicht immer alle diese Komponenten zwangsweise notwendig.

3.4 Bisheriger Stand der Trocknungsanlage auf der Beispielfarm

Im Moment wird das Gut hauptsächlich in abgehängten Netzen getrocknet. In Abbildung 9 ist eine solche Trocknung dargestellt. Die Blätter müssen dabei auf einer sehr großen Fläche, sehr flach ausgebreitet werden. Ist die Blätterschicht zu dick, kann die Feuchte nur noch sehr langsam durch die Blätterschicht dringen, was zu einer sehr langsamen Trocknung bis hin zum Stillstand der Trocknung und Schimmelbildung führt. Bildet sich Schimmel auf dem Gut, kann dieses nicht weiter verwendet werden und muss daher entsorgt werden. Auch das feuchte Klima in den Sommermonaten behindert die Trocknung stark, wodurch einige Chargen nach der Trocknung nicht verwertbar sind. Ein sehr geringer Teil der Ernte wird mit einem Dörrgerät, wie es im Haushalt verwendet wird und in Abbildung 10 dargestellt ist, getrocknet. Dieses fasst aber nur ein äußerst begrenztes Volumen und ist für eine Trocknung in diesem Maßstab daher nicht geeignet.



Abbildung 9: Moringatrocknung durch Ausbreitung auf Netzen (Sinkala, 2014)



Abbildung 10: Trocknung durch Küchendörrgerät (Sinkala, 2014)

3.5 Versuche zur Trocknung

3.5.1 Untersuchung der Trocknungsmöglichkeiten

Es soll untersucht werden, ob eine Trocknung in einer Wirbelschicht, wie in Abbildung 11 zu sehen, vorstellbar ist. Die Vorteile einer solchen Trocknung sind die ständige Durchmischung und die komplette Ausnutzung der gesamten Oberfläche des zu trocknenden Gutes zur Stoffübertragung. Dadurch ergibt sich eine sehr schnelle Trocknungsgeschwindigkeit, die die Konstruktion eines sehr kleineren Trockners zulässt, welcher mehrmals täglich bestückt werden könnte, was zu einer Einsparung an Material beim Bau des Trockners führt.

Durchführung des Versuchs in der Wirbelschicht:

In eine Wirbelschicht werden frische Moringablätter gefüllt. Der Luftvolumenstrom durch die Wirbelschicht wird dann kontinuierlich erhöht, bis eine Durchmischung der Blätter stattfindet.



Abbildung 11: Wirbelschicht mit Lufterhitzungseinheit

Ergebnis:

Die Blätter durchmischen sich kaum. Der Volumenstrom, der nötig ist um eine Verwirbelung der Blätter zu garantieren, ist an der Anlage nicht mehr messbar. Es ist wahrscheinlich, dass die Zwischenräume zwischen den Blättern so groß sind, dass der Luftmassenstrom einen einfachen Weg durch die Blätter sucht, wodurch sich eine Art Kurzschlussstrom bildet. Das Gut trocknet dann stellenweise schneller als der Rest.

Durchführung des Versuchs mit einem Gitter am Ausgang der Wirbelschicht:

Es soll die Trocknungsdauer der Blätter bei Durchströmung mit einer gleichbleibenden Temperatur untersucht werden. Dazu wird über dem Ausgang der Wirbelschicht ein Gitter angebracht, auf dem die Blätter verteilt werden können. Die Blätter müssen vor dem Versuch gewogen werden. Es ist darauf zu achten, dass kein Material während des Versuches verloren geht. Die Blätter werden dann 30 Minuten lang einem Luftstrom von 0,2m/s einer Soll-Temperatur von 50°C ausgesetzt, danach gewogen und weitere 30 Minuten getrocknet. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis sich nur noch wenig am Gewicht verändert.

Ergebnis:

Wie in den Büchern (Krischer, et al., 1978; Kröll, 1978; Kröll, et al., 1989) beschrieben, erhöht sich die Trocknungsdauer des Gutes, je trockener das Gut wird. Dies ist den verschiedenen Bindungstypen des Wassers im Gut zuzuschreiben. In Tabelle 6 sind die Messwerte der Trocknung auf der Wirbelschicht aufgezeigt.

Tabelle 6: Versuch Trocknung auf der Wirbelschicht

Wiederholungen	Masse in [g]
1.	2,3302
2.	1,5388
3.	1,3005
4.	1,0939

Die pro Zeitabschnitt verdampfte Wassermasse, also die Trocknungsgeschwindigkeit, sinkt je trockener das Gut wird.

Bewertung:

Die Temperatur an der Wirbelschicht kann nicht konstant eingestellt werden. Während des Versuchs schwankt die Temperatur um bis zu 15°C, was die Ergebnisse verfälscht. Die Blätter sind außerdem teilweise so klein, dass sie während der Trocknung durch das Gitter rutschen. Der Versuch muss dann unterbrochen werden, da es zu einer Verfälschung der Messwerte kommt. Es ist also noch ein weiterer

Versuch nötig, bei dem die Blätter bei einer konstanten Temperatur und ohne Verluste getrocknet werden können.

3.5.2 Trocknungsversuch im Analyseofen

In einem Analyseofen zur Bestimmung der Feuchtigkeit wird eine konstante Temperatur von 50°C eingestellt. Dadurch werden ähnliche Bedingungen wie im Trockner simuliert. Da die Luft im Ofen zwar verwirbelt aber nicht ausgetauscht wird, steigt die Feuchtigkeit der sich im Ofen befindenden Luft an. Um dennoch eine relevante Messung durchführen zu können, wird das Luftvolumen manuell durch Öffnen des Ofens- getauscht. Damit kein Material beim ständigen Transport vom Ofen auf die Waage verloren geht, wodurch das Versuchsergebnis verfälscht würde, wird das Gut auf einer Glasschale getrocknet.

Der Ofen wird auf 50°C eingestellt, der Ventilator des Ofens wird auf eine niedrige Stufe gestellt, somit ist die Luftbewegung gering genug, um das Gut nicht von der Glasschale zu wehen. Das Gewicht des Gutes wird vor dem Versuch gemessen. Während des Versuches wird dann, alle 10 Minuten, das Gewicht des Gutes festgestellt, wodurch sich die Trocknungsgeschwindigkeit ermitteln lässt. Ändert sich die Masse des Gutes nur noch marginal, wird das Gut als trocken angenommen. Zur Feststellung der Restfeuchte im Gut, wird das Gut abschließend bei 105°C nach Norm DIN EN 12880 untersucht.

3.5.3 Ergebnisse des Versuchs

Im Diagramm in Abbildung 12 ist die Gesamtmasse des untersuchten Gutes vor dem Versuch und nach jeweils 10 Minuten im Trockner aufgetragen. Außerdem ist die Trocknungsgeschwindigkeit aufgezeigt.

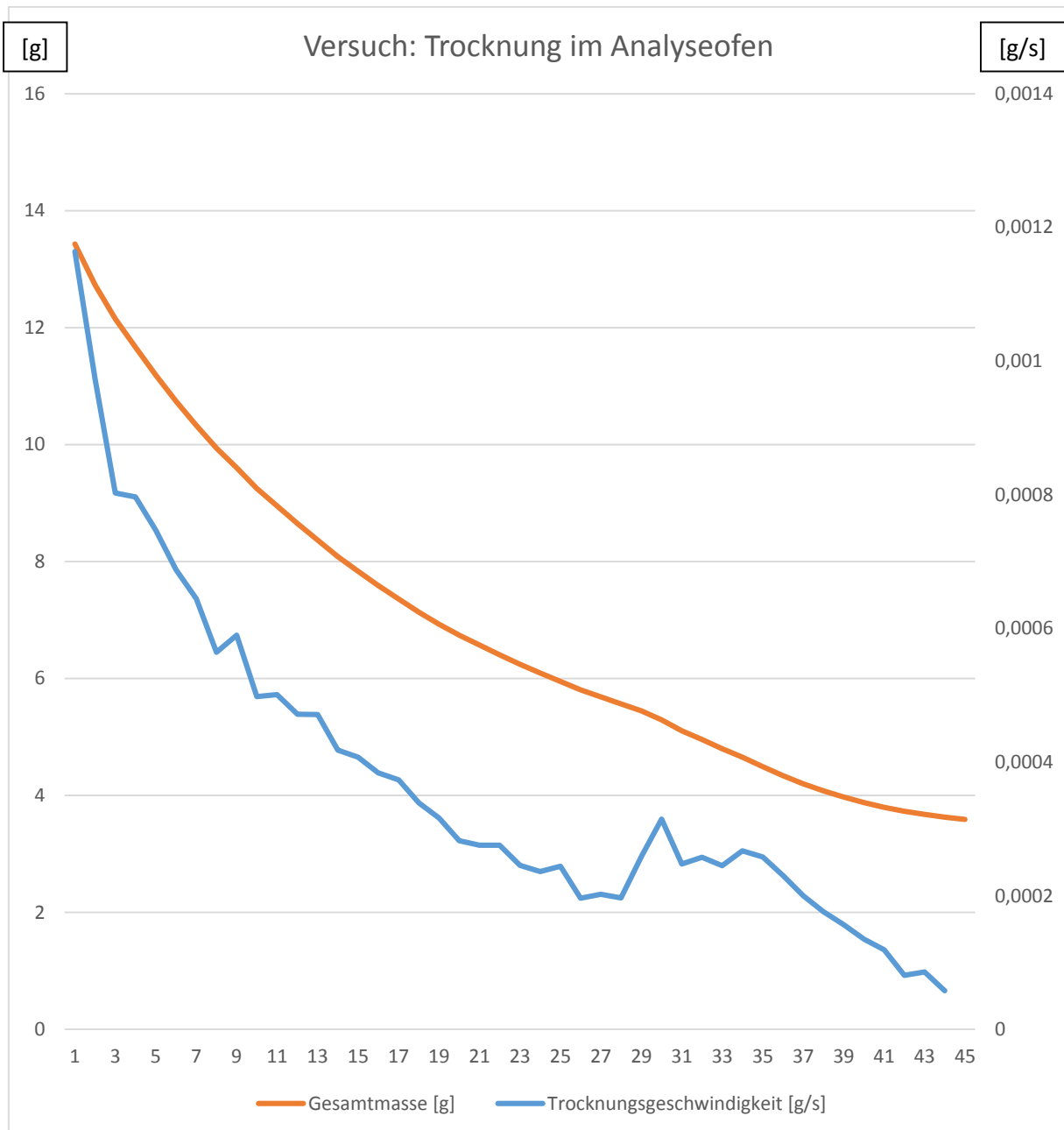


Abbildung 12: Ergebnis des Trocknungsversuchs zum Feststellen der Trocknungsgeschwindigkeit

Die sofort rasch abnehmende Trocknungsgeschwindigkeit ist ein Zeichen, dass der erste Knickpunkt bereits überschritten ist, was in Abbildung 13 qualitativ aufgezeigt ist. Die Kapillaren können nicht mehr schnell genug Flüssigkeit an die Oberfläche transportieren, die dann gleichmäßig verdampft wird. Aber auch der fehlende Luftaustausch im Analyseofen kann dazu beitragen, dass die Trocknungsgeschwindigkeit schnell sinkt.

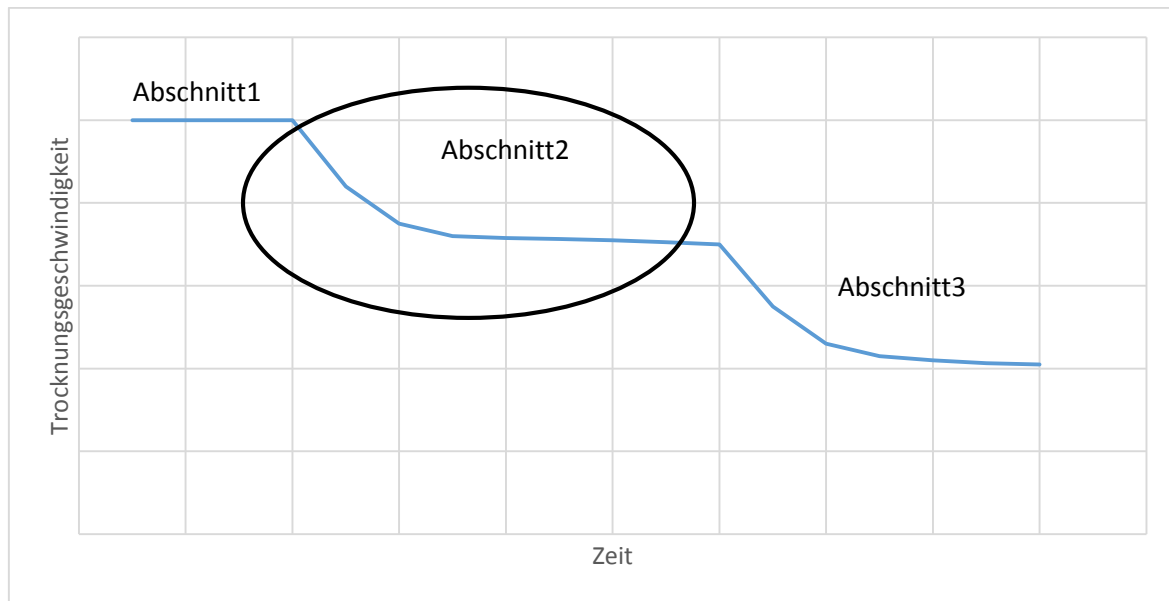


Abbildung 13: Schematischer Trocknungsverlauf mit Abgrenzung der Moringatrocknung

In Abbildung 14 sind die beiden Zustände der Blätter vor und nach der Trocknung zu sehen. Die Form der Blätter ändert sich deutlich. Aus sehr flachen Blättern werden stark gewellte Blätter.

Zu Beginn der Trocknung sind die Blätter sehr eben. Durch die Trocknung wölben sich die Blätter, was teilweise zu einer besseren Durchlüftung führen kann. Sichtbar wird die Bewegung des Gutes in Abbildung 12, zwischen Messung 27 und 35. Zu dieser Zeit steigt die Trocknungsgeschwindigkeit wieder an, was auf eine größere Oberfläche und das Freilegen von weniger stark getrocknetem Gut hindeutet. Es ist also wahrscheinlich, dass durch die Deformierung der Blätter eine Änderung der Durchlüftungswege im Gut stattfindet, wodurch Teile des Gutes, die noch nicht oder weniger stark getrocknet sind, freigelegt werden und dadurch die Trocknungsgeschwindigkeit beschleunigt wird.



Abbildung 14: Vergleich von frischen und getrockneten Moringablättern

3.5.4 Bewertung des Versuchs

Dadurch, dass es mit dem Analyseofen nicht möglich ist, einen offenen Prozess darzustellen wie es die Trocknung im Normalfall ist, wird ein manueller Luftaustausch durch Öffnen des Ofens und einfachem Fächern bewerkstelligt. Da kein entsprechendes Messgerät zur Messung der Feuchtigkeit im Ofen vorhanden ist, kann die Feuchtebelastung der Luft nicht festgestellt werden. Es ist also möglich, dass die Luft zeitweise gesättigt ist und dem Gut in dieser Zeit keine weitere Feuchtigkeit entzogen wird.

Das luftundurchlässige Glas, auf dem der Versuch durchgeführt wird, verhindert eine beidseitige Trocknung wie sie in dem realen Trockner gewährleistet werden soll. Die Trocknungsgeschwindigkeit wird dementsprechend im realen Trockner deutlich höher, da die von der Luft umströmte Fläche am Gut durch die Verwendung von einem Gitterrost deutlich steigt. Auch das Messen beansprucht Zeit, die mit berücksichtigt werden sollte.

Die Gesamtdauer des Versuches beträgt 440min. Diese Zeit entspricht der Trocknungsdauer. Da ein Messvorgang etwa 1min 30sec dauert können 67min von der Trocknungsdauer abgezogen werden. Es ergibt sich eine Trocknungsdauer von 373min, was etwa 6h 13min entspricht. Wird nun noch berücksichtigt, dass die Trocknung im Versuch einseitig stattfindet, im realen Trockner jedoch von oben wie von unten Luft am Gut vorbeiströmt, verringert sich die Trocknungszeit weiter. Aus Formel (3.16) kann entnommen werden, dass die Trocknungsgeschwindigkeit direkt proportional zur Oberfläche des Trocknungsgutes ist. Wird also ein Gitter für die Trocknung hergenommen, welches ein Flächenverhältnis von offener zu geschlossener Fläche von 75% aufweist, kann mit einer 75% höheren Trocknungsgeschwindigkeit gerechnet werden. In diesem Fall beträgt die Trocknungsdauer dann etwa 213min also 3h 33 min.

4. Analyse des geplanten Gebäudes

Das Trocknungsgebäude, welches von Herrn Prof. Sinkala geplant ist, ist in drei Räumlichkeiten unterteilt, von denen jeder Teil einem bestimmten Zweck dient. Im ersten Abschnitt des Gebäudes werden die Blätter vorbereitet. Dabei werden die Blätter von den Ästen entfernt und gesäubert. Zum Dörren werden die Blätter anschließend in den zweiten Abschnitt des Gebäudes gebracht, in dem der Trockner installiert ist. Sobald die Blätter getrocknet sind, werden sie in den dritten Teil des Gebäudes transportiert, wo sie entweder zu Pulver weiterverarbeitet oder direkt verpackt werden. Außerdem kann das Trockengut im hintersten Teil des Trockenhauses gelagert werden.

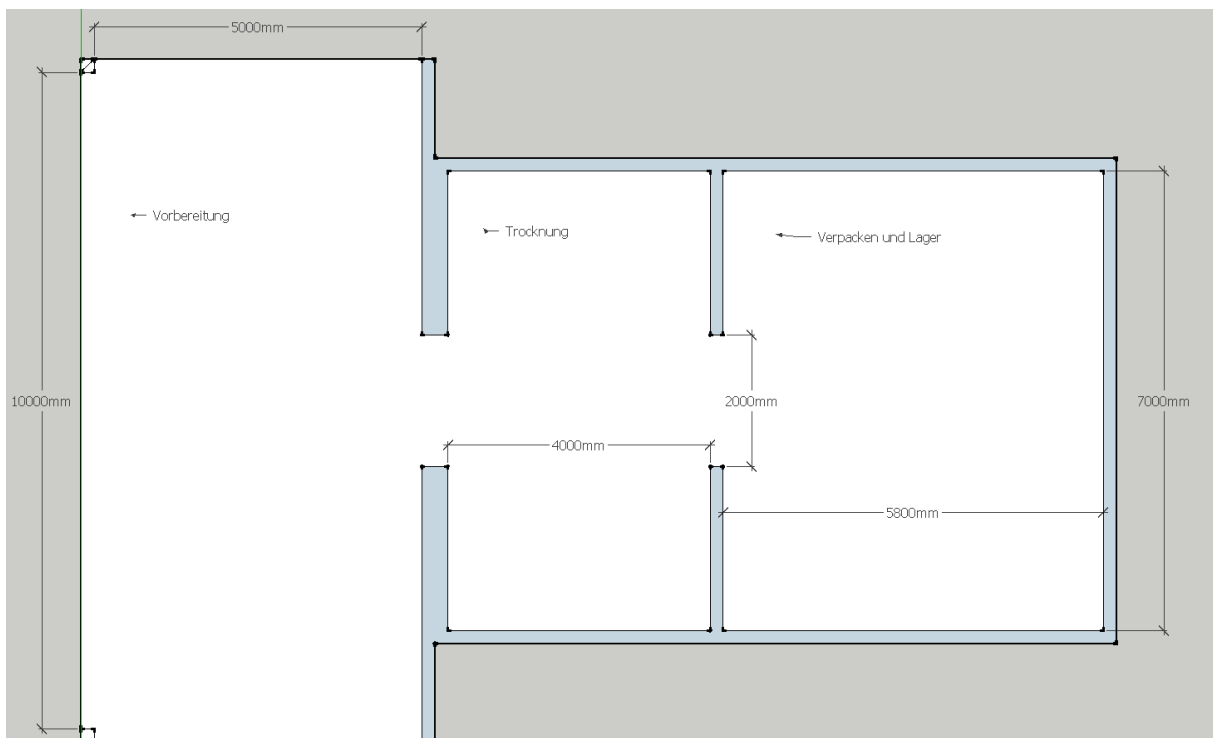


Abbildung 15: Geplantes Trocknungsgebäude (Sinkala, 2014)

5. Analyse der Bereitstellung von Bio- und Solarenergie

In diesem Abschnitt werden die Stoffe betrachtet, die bei einem durchschnittlichen Kleinbauern in Sambia und der Farm von Herrn Prof. Sinkala anfallen. Es wird analysiert, ob diese Energiegewinnung geeignet sein und nicht in Konkurrenz zu Lebensmittelproduktion stehen. Darunter zählen alle biogenen Restprodukte. Neben

den Reststoffen werden das Klima und die Verfügbarkeit der Solarstrahlung untersucht.

Die Analyse der Reststoffe spaltet sich in zwei Erzeugertypen auf, zum einen die Farm von Prof. Sinkala, dessen Farm in dieser Arbeit als Beispiel verwendet wird. Zum anderen wird eine durchschnittliche kleinbäuerliche Farm in Sambia. Nötig macht diese Aufspaltung der Unterschied der Größe und der Anzahl des Viehs der beiden Farmtypen. Um für die ländliche Bevölkerung ein Konzept zu erstellen, muss die Ausgangslage dieser berücksichtigt werden.

5.1 Die Farm eines durchschnittlichen Kleinbauern

5.1.1 Betrachtung der tierischen Reststoffe

Als tierische Reststoffe werden die Exkremente von Nutztieren bis hin zur Tierkörperverwertung, meist in der Landwirtschaft, bezeichnet. (Landesuntersuchungsamt Rheinland-Pfalz, n.d.) Im Folgenden werden rein die Exkremente der Nutztiere eines durchschnittlichen Landwirtes in Sambia betrachtet. Aus Tabellenwerken werden dazu Faustzahlen für die tägliche Produktion an Exkrementen pro Tier bestimmt. Auch die Methanerträge der Exkremente können aus Tabellen ermittelt werden. In Tabelle 7 sind die Erträge einer kleinen Farm aufgetragen. Aus Mangel an Informationen über Ziegenmist, wird dieser im Folgenden dem Schafmist gleich gesetzt.

Tabelle 7: Methanertrag Ermittlung durchschnittliche kleinbäuerliche Farm in Sambia

Gattung	Rind	Ziege	Schwein	Schaf
Anzahl (Lubungu, 2013)	7	6	5	6
Mist pro Tier [kg/d] (KTBL, 2013)	21	6,6	4,9	6,3
Gesamter Mist'ertrag [kg/d]	147	37,8	24,5	37,8

Jahresausbeute [t/a]	53,7	13,8	8,9	13,8
Methanertrag [m ³ /t] (BGB, 2014)	53	59	45	59
Methanertrag [m ³ /a]	2846	814	402	814

Der Gesamtertrag an Biogas, der aus den tierischen Reststoffen gewonnen werden kann beträgt 4876m³. Dabei wird jedoch nicht betrachtet, dass die Tiere bei den betrachteten Landwirten nicht in Stallungen, sondern auf Weiden gehalten werden. Der Dung muss dadurch zuerst eingesammelt werden. Da nicht alles an Exkrementen aufgefunden wird und beim Einsammeln auch Material verloren geht, können sehr hohe Verluste entstehen. Um diese Verluste in die Rechnung zu integrieren, muss ein Ertragsminderungsfaktor eingeführt werden. Es wird dazu der Verlustfaktor l eingeführt, dabei wird angenommen, dass sich der Faktor zwischen 0,5 und 0,75 bewegt.

$$m_{\text{Methan,real}} = m_{\text{Methan,theoretisch}} \cdot (1 - l) \quad (5.0)$$

Für eine durchschnittliche Farm ergibt sich also ein jährlicher Methanertrag, aus tierischen Reststoffen, von etwa 1219m³ bis 2438m³.

5.1.2 Betrachtung der pflanzlichen Reststoffe

Aus der Moringaproduktion fallen verschiedene Reststoffe an, die zu einer weiteren Verwendung als Nahrungsmittel oder zum Verkauf nicht geeignet sind. Dazu zählen die Äste, Zweige und Samenhüllen. Es wird dabei angenommen, dass es sich bei diesem Material um ein ligninhaltiges Gut handelt, wie es auch bei Ästen und Zweigen anderer Pflanzen der Fall ist. Ligninhaltige Güter können nur äußerst langsam durch eine Fermentation umgewandelt werden, wodurch eine sehr langsame und geringe Biogasproduktion stattfindet. (Goldbrunner, 2014) Es ist deshalb nicht sinnvoll dieses Material in einer Biogasanlage zu vergären. Weiter konnte eine genauere Untersuchung des Materials nicht vorgenommen werden, da die Reststoffe im

gegebenen Zeitrahmen nicht zu erhalten waren. Auch die Mengen an Material, die bei der Produktion von getrocknetem Moringablättern anfallen, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden.

5.2 Die Farm von Herrn Prof. Sinkala

5.2.1 Betrachtung der tierischen Reststoffe

Auf der Farm von Prof. Sinkala leben 150 Ziegen, die zum kürzen des Grases und zum Entfernen von konkurrierenden Pflanzen eingesetzt werden. Sie bieten zudem eine zusätzliche Einnahmequelle. Die Exkrememente dieser Ziegen stellen eine gute Quelle für tierische Reststoffe dar. Eine weitere Möglichkeit zur Gewinnung tierischer Reststoffe bieten 15 Rinder, die auf einer benachbarten Weide gehalten werden. Die mögliche Methanproduktion aus den Reststoffen wird in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Methanertrag Ermittlung Farm Prof. Sinkala

Gattung	Ziege	Rind
Anzahl	150	15
Mist pro Tier [kg/d] (KTBL, 2013)	6,6	21
Gesamter Mistertag [kg/d]	990	315
Jahresausbeute [t/a]	361	115
Methanertrag [m ³ /t] (BGB, 2014)	59	53
Methanertrag [m ³ /a]	21299	6095

Der jährlich mögliche Methanertrag liegt etwa bei 27394 m³. Auch hier werden die Tiere im Freien gehalten, wodurch der Verlustfaktor berücksichtigt werden muss.

Es ergibt sich ein realer Methanertrag zwischen 13697 und 6849m³.

5.2.2 Betrachtung der pflanzlichen Reststoffe

Auf der Farm von Herrn Sinkala fallen, genau wie auf der durchschnittlichen Farm, Reststoffe aus der Moringaproduktion an. Auch hier können diese nicht mittels Fermentation zu Biogas umgesetzt werden.

Außerdem produziert Herr Prof. Sinkala Jatrophaöl, bei dessen Produktion ein Presskuchen aus Jatropha abfällt. In diesem Presskuchen sind noch etwa 7% Jatrophaöl enthalten. (Becker, 2008) Presskuchen aus Jatropha kann in einer Biogasanlage verwertet werden, dabei kann Jatropha einen Anteil von bis zu 30% des Substrates stellen. (Rümping, 2008) Da jedoch nicht bekannt ist wie viel Jatropha auf der Farm von Herrn Sinkala angebaut wird, bzw. wie viel Presskuchen als Restprodukt übrig bleibt, kann dieser Reststoff im Weiteren nicht berücksichtigt werden.

5.3 Energieertrag der tierischer Reststoffe

Die chemisch gebundene Energie des Methans kann durch eine thermische Umwandlung nutzbar gemacht werden. Dabei wird die Energie komplett in Wärme umgewandelt oder über ein BHKW zu Wärme und einem Teil elektrischer Energie gewandelt. Mit der Methanmenge und der spezifischen Enthalpie des Gases kann der Energieinhalt ermittelt werden.

$$E = V_M \cdot h_{VM} \quad (5.1)$$

Die freigesetzte Energie durch die Verbrennung des Methans wird grob zu 10kWh/m³ angenommen. (Goldbrunner, 2014)

Wird ein BHKW mit dieser Energie betrieben, muss zuerst überlegt werden, wie lange das BHKW täglich betrieben werden soll. Wird es täglich für eine gewöhnliche Arbeitszeit von 8h betrieben, folgt daraus eine jährliche Arbeitszeit von etwa 2000h.

$$P = \frac{E}{t} \quad (5.2)$$

Aus der errechneten Energie und den Betriebsstunden pro Jahr kann somit die Leistung ausgerechnet werden. Jedoch muss auch noch der Wirkungsgrad des BHKW mit einbezogen werden.

$$P_{inst.} = P \cdot \eta_{el} \quad (5.3)$$

Um das BHKW auf diese Weise zu betreiben, muss ein Speicher integriert werden, der das erzeugte Biogas während des Stillstandes des BHKWs auffängt und zu Betriebszeiten wieder abgibt. (Goldbrunner, 2014)

Ein BHKW ist nur dann rentabel, wenn der produzierte Strom auch eingespeist werden kann. Läuft das BHKW und wird der Strom nicht eingespeist aber auch nicht selbst verbraucht, wird nur die Restwärme für die Trocknung genutzt. Da ein BHKW entsprechend teuer ist, kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich das BHKW amortisiert. Es muss also eine Einspeisevergütung etabliert sein, die eine Einspeisung ins Netz ermöglicht und diese entsprechend hoch vergütet.

In Sambia ist, laut Herrn Prof. Sinkala, derzeit noch keine Einspeisevergütung verfügbar, was eine Anschaffung eines BHKWs nicht sinnvoll erscheinen lässt.

5.4 Analyse des Klimas in Sambia

Sambia befindet sich in einem der sonnenreichsten Gebiete der Erde, weshalb die Nutzung von Sonnenenergie zur Trocknung untersucht werden soll. Die schwarze Kennzeichnung in Abbildung 16 zeigt die Lage Sambias auf der Weltkarte und die Sonneneinstrahlung in kWh/m².

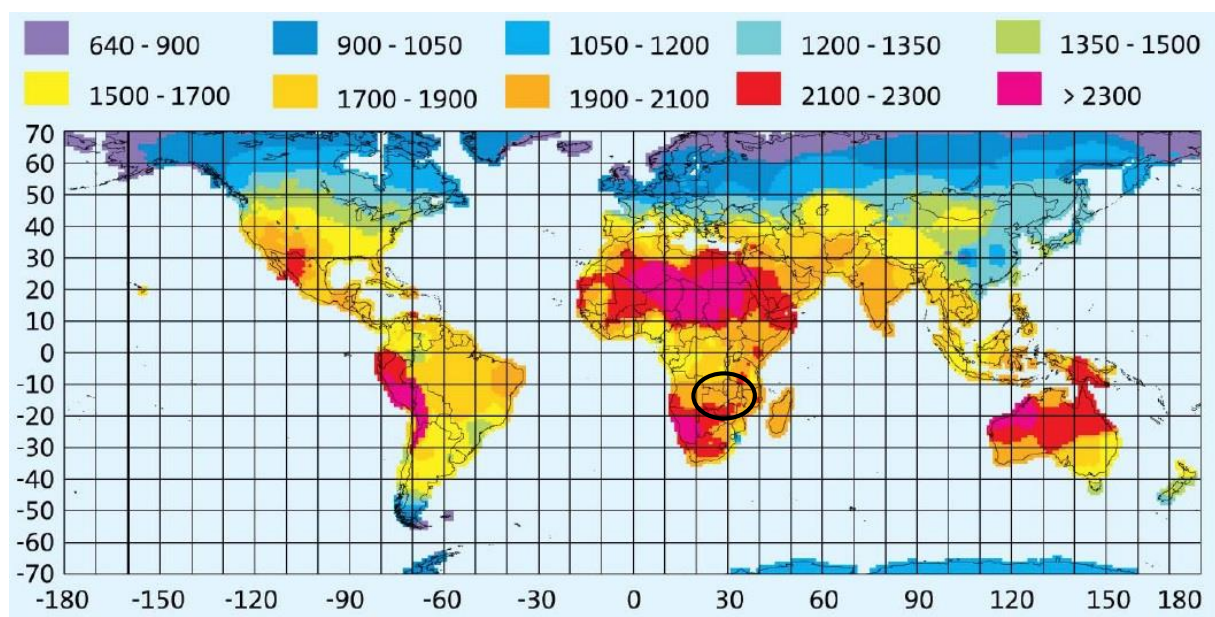


Abbildung 16: Solare Einstrahlungswerte weltweit (Zörner, 2014)

Das Klima teilt sich in Sommer- und Winterzeit, bzw. Regen- und Trockenzeit, auf.

Wobei der Sommer in Sambia dadurch gekennzeichnet ist, dass die Temperaturminima und –maxima steigen und sich die Anzahl der Regentage erhöht. Das Maximum der Regentage wird etwa im Dezember mit ca. 12 Regentagen erreicht. Dabei steigt auch die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit auf einen Wert von bis zu 79%. Im Winter sinken die Temperaturen auf Minimalwerte von bis zu 7°C, der Niederschlag entfällt im Winter komplett, was zu einer Trockenzeit führt. Die Dürre sorgt für eine niedrige Luftfeuchtigkeit von teilweise nur 40%. Für den Trocknungsprozess ist die niedrige Luftfeuchtigkeit sehr vorteilhaft. Je trockener die Luft, desto niedriger ist der Partialdruck des Wasserdampfes im Luft-Wasserdampf-Gemisch. Die höhere Differenz des Wasserdampfpartialdruckes führt dann zu einer schnelleren Verdunstung. (Soika, 2014) Tabelle 9 zeigt eine Auflistung der durchschnittlichen Wetterdaten in Lusaka.

Tabelle 9: Klimataabelle Lusaka (Wetterkontor GmbH, 2014)

	Temperatur °C		Niederschlag		relative	Sonne	Wasser
	max. Ø	min. Ø	mmTage		Feuchte	h/Tag	°C
Jan	26,9	17,3	224	13	79	5,8	-
Feb	27	17	173	12	78	6	-
Mär	27	15,9	90	9	76	6,7	-
Apr	27	13,8	19	4	69	7,8	-
Mai	26,5	10,5	3	1	62	8,8	-
Jun	23,9	7,9	1	0	59	8,9	-
Jul	24,2	7,3	0	0	54	9,3	-
Aug	26,7	9,3	1	0	45	9,8	-
Sep	29,8	12,8	1	0	40	9,9	-
Okt	31,5	16	17	2	42	9,5	-
Nov	30,1	17,2	85	6	56	7,5	-
Dez	27,6	17,6	196	13	73	5,7	-
Jahr	27,4	13,6	810	60	61	8	-

In Kapitel 3 in Abbildung 8 sind die Trocknungsprozesse der beiden Extrembedingungen in Sommer und Winter dargestellt.

Vergleicht man die beiden schwarzen Pfeile 1 und 2 in Abbildung 8 erkennt man, dass die Aufnahmefähigkeit des Trocknungsmediums im Winter deutlich höher ist als im Sommer. In Zahlen ausgedrückt kann der Luftstrom durch den Trockner im Sommer 4,6g/kg Wasser aufnehmen, im Winter hingegen 9,3g/kg. Im Sommer halbiert sich also die Aufnahmefähigkeit der Luft, was bedeutet, dass bei gleichbleibendem Volumenstrom auch die Trocknungszeit stark ansteigt.

Um das volle Trocknungspotenzial ausnutzen zu können, soll die Temperatur im Trockner möglichst nahe an der maximal für das Trocknungsgut zulässigen Temperatur sein. Die klimatischen Verhältnisse haben daher großen Einfluss auf den Trocknungsprozess.

5.5 Analyse der Solarenergiegewinnung

Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, bietet sich durch die hohen solaren Einstrahlungswerte eine Nutzung der Sonnenenergie zu Trocknung an. Gerade in Gebieten, in denen eine Anbindung an das Stromnetz fehlt, kann dadurch eine Trocknung ermöglicht werden. Um die Energie der Sonne für die Trocknung nutzbar zu machen, können verschiedene Arten von solarer Energiegewinnung verwendet werden.

Die einfachste und schon am längsten angewandte Methode der Gewinnung von Sonnenenergie für die Trocknung ist das Ausbreiten des Gutes in der Sonne. Meist wird das Gut dabei einfach im Freien auf den Boden gelegt. Die Sonnenstrahlung erwärmt das Gut dabei, während der Wind zusätzlich für die Konvektion über das Gut sorgt. (Kröll, et al., 1989)

Neben der direkten Solartrocknung in der Sonne, kann die Energie der Sonne auch über Kollektoren in Wärme umgewandelt werden. Meist wird die Wärme dabei auf ein Fluid übertragen und kann dadurch transportiert werden.

Die einfachste Bauweise eines Solarkollektors ist ein so genannter unverglaster- oder Schwimmbadkollektor. Dabei handelt es sich um einen, meist aus EPDM oder anderen Kunststoffen gefertigten Absorber der von Sole durchströmt wird. Der Absorber ist dabei nicht isoliert, was einerseits zu erhöhten Verlusten durch Konvektion und Strahlung führt, andererseits Reflektionen von einer potentiellen Verglasung verhindert. Diese Art von Kollektor ist sehr günstig in der Anschaffung, aber wegen der fehlenden Isolierung nur für niedrige Temperaturen geeignet.

Aufwändiger im Aufbau und deswegen auch teurer in der Anschaffung sind abgedeckte Kollektoren bzw. Plattenkollektoren. Der Absorber besteht dabei aus Metall, meist Kupfer oder Aluminium. Er ist in einen isolierten Rahmen eingearbeitet, der mit einer reflexionsarmen Glasscheibe an der Oberseite versehen ist. Die Isolation

erlaubt dabei höhere Temperaturen zu erzeugen, jedoch sinkt auch bei diesen Kollektoren der Wirkungsgrad mit zunehmender Solltemperatur der Sole.

Die effektivsten Kollektoren sind Vakuum-Röhren-Kollektoren. Es handelt sich hierbei um Absorber, die sich in einer unter Vakuum stehenden Glashülle befinden, wodurch die Wärmedämmung maximiert wird. Bei dieser Art der Kollektoren können die höchsten Temperaturen erreicht werden. Sie arbeiten am verlustärmsten. Bei sehr niedrigen Temperaturhuben ist jedoch die Effektivität niedriger als die von nicht abgedeckten Kollektoren, dieser Effekt wird durch die Reflektion der Glasröhren verursacht, der bei andere Kollektoren nicht vorhanden ist.

Eine andere Art der Solarenergiegewinnung ist die Verwendung eines Luftkollektors. Dessen Aufbau ist ähnlich dem des Plattenkollektors, jedoch wird der Kollektor mit Luft statt Sole durchströmt. (Zörner, 2014) (Solar, n.d.)

In Abbildung 17 ist der Wirkungsgrad der verschiedenen Kollektortypen zum Temperaturhub der Kollektoren dargestellt. Dabei ist die Kurve des Solar-Luft-Kollektors ähnlich der des Flachkollektors, da die Bauweise sehr ähnlich ist. Es ist zu erkennen, dass die Solar-Luft-Kollektoren einen sehr guten Wirkungsgrad bei dem geringen Temperaturhub von 20-30°C, der für die Trocknung benötigt wird, erreichen.

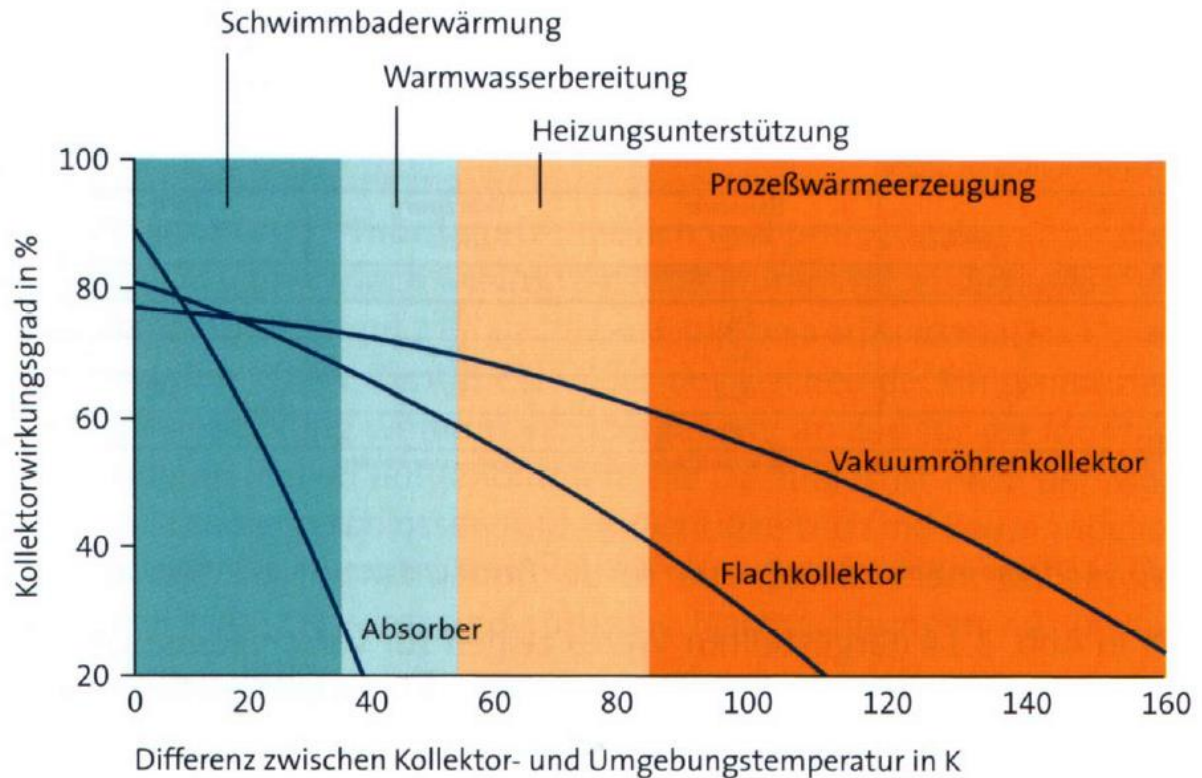


Abbildung 17: Wirkungsgrad im Vergleich zu Temperaturhub verschiedener Kollektortypen (Zörner, 2014)

5.6 Auswahl der Solarkollektoren

Da die Trocknung von Moringablättern einen eher geringen Temperaturhub von 20-30K benötigt und als Trocknungsmedium Luft verwendet wird, bietet sich der Solar-Luft-Kollektor an. Durch die direkte Verwendung von Luft als Trägermedium der Energie und Trocknungsmedium im Trockner wird ein Wärmeübertrager eingespart. Da jeder Wärmeübertrager einen Wirkungsgrad besitzt, der unter 1 liegt, werden somit Verluste durch eine Wärmübertragung verhindert. Auch eine Energiequelle für eine Fluidpumpe wird eingespart, was die Effizienz weiter steigert.

6. Entwicklung des Trockners

6.1 Auswahl des Trocknungsverfahrens

Aus den vier grundlegenden Trocknungsverfahren, Konvektionstrocknung, Strahlungstrocknung, elektrische Trocknung und Kontaktstrocknung wird sich in diesem Fall für die Konvektionstrocknung entschieden. (Krischer, et al., 1978)

Für Lebensmittel aller Art haben sich im Lauf der Zeit Konvektionstrockner als die beste Wahl erwiesen. Dabei wird die für die Trocknung benötigte Energie rein durch das Trocknungsmedium eingebracht. Durch das Einbringen der Energie mit dem Volumenstrom des Trocknungsmittels kann gezielt eine bestimmte Temperatur im Gut erreicht und beibehalten werden. Zudem erwärmt sich das Gut sehr gleichmäßig im Gegensatz zur Kontaktstrocknung, bei der die Kontaktstellen höhere Temperaturen erreichen als der Rest des Gutes. All das führt zu einer schonenden Trocknung, wodurch die Farbe, die Inhaltsstoffe und der Geschmack des Lebensmittels erhalten bleiben. (Straub, 2002)

Da die Blätter satzweise, in diesem Fall einmal am Tag, geerntet werden, wird ein Trockner mit Satzbetrieb gewählt.

Um den Aufbau des Trockners möglichst einfach und kostengünstig verwirklichen zu können, soll ein satzweise zu bestückender Hordentrockner verwendet werden. Der Aufbau ist ähnlich wie der eines im Haushalt üblichen Dörrgerätes. In einem, außer an Luft-Eintritt und –Austritt, luftdicht verschließbaren Schrank befinden sich Gittereinsätze, auf denen das zu trocknende Gut verteilt wird. Die erwärmte Luft strömt von unten oder der Seite durch das Gut hindurch oder über das Gut hinweg. Die benötigte Energie zur Trocknung wird durch die erwärmte Luft in den Trockner eingetragen und an das Gut abgegeben. Die Luft wird dabei abgekühlt und mit Feuchte beladen, danach wieder aus dem Trockner entlassen. (Kröll, 1978)

6.2 Planung des Trockners

6.2.1 Größe und Aufbau des Trockners

Die Größe des Trockners hängt maßgeblich von der Menge des zu trocknenden Materials ab. Wie in Kapitel 2.6 bereits erwähnt, werden pro Tag etwa 120kg Moringablätter geerntet.

Um eine gleichmäßige Durchlüftung des Trocknungsgutes zu gewährleisten, wird angenommen, dass circa 2 - 3kg Gut pro m² im Trockner verteilt werden soll. Die Höhe des Gutes beträgt, dann etwa 20 - 30mm. Mit der Formel:

$$A_T = \frac{m_1}{t_i} \cdot \frac{t'}{B_1} \quad (6.0)$$

mit:	A_T	= benötigte Trocknungsfläche [m ²]
	m_1	= zu trocknende Masse [kg]
	t_i	= Betriebsdauer [h]
	t'	= Zeit für Beladung, Trocknung, Entladung [h]
	B_1	= Masse pro Flächeneinheit [kg/m ²]

kann die benötigte Trocknungsfläche bestimmt werden. (Kröll, 1978) Da es sich um einen Satztrockner handelt und die zu trocknende Masse die gesamte Tagesproduktion ist, die Betriebsdauer also etwa der Gesamtdauer entspricht, können t_i und t' gleichgesetzt werden. Die benötigte Fläche für das Trocknungsgut im Trockner beträgt also etwa 40m² - 60m². Die Grundfläche des Trockners wird vom Gebäude bestimmt. Es wird eine Breite des Trockners von 1,5m und eine Länge von 3m gewählt. Zusätzlich werden die Luftverteiler und die Luftreinigung an die Seiten des Trockners angebracht, wodurch sich eine gesamte Länge von etwa 3,75m ergibt. Der Trockner kann somit in die dafür vorgesehene Nische installiert werden. Der Trockner wird durch eine Zwischenwand in zwei Bereiche unterteilt, um die Abmessungen der einzelnen Horden zu verkleinern und sie dadurch stabiler gegen Verwindung zu machen, außerdem wird dadurch die Handhabung vereinfacht. Die Maße einer Horde sind 1,5m x 1,5m, was einer Fläche von 2,25m² entspricht. Um eine Trocknungsfläche von 60m² zu erreichen müssen 28 Horden im Trockner installiert werden. Damit ein entsprechend großer Volumenstrom bei einer geringen Geschwindigkeit durch den Trockner strömen kann wird eine Höhe von 1,5m gewählt. Dabei ist berücksichtigt, dass der Abstand zwischen den Horden nicht zu groß ist. Ein

großer Abstand hätte zur Folge, dass sogenannte Kurzschluss-Strömungen entstehen könnten, was bedeutet, dass Anteile der Luft durch den Trockner strömen ohne Feuchtigkeit aufzunehmen und Wärme abzugeben. In dem Luftverteiler ist ein Prallblech angebracht, welches den schnell strömenden, eintretenden Luftstrom verteilt.

Abbildung 18 zeigt schematisch den Trockner mit den einzelnen Komponenten:

1. Lufteinlass mit Filtersystem
2. Luftverteiler mit Prallblech
3. Isolierte Tür mit Schließsystem
4. Isolierte Wand und Bodenelemente
5. Horde mit Boden aus Lochblech
6. Führungsschienen für die Horde
7. Lochblech zur Vergleichmäßigung der Luft an Ein- und Auslass
8. Luftauslass an die Umgebung

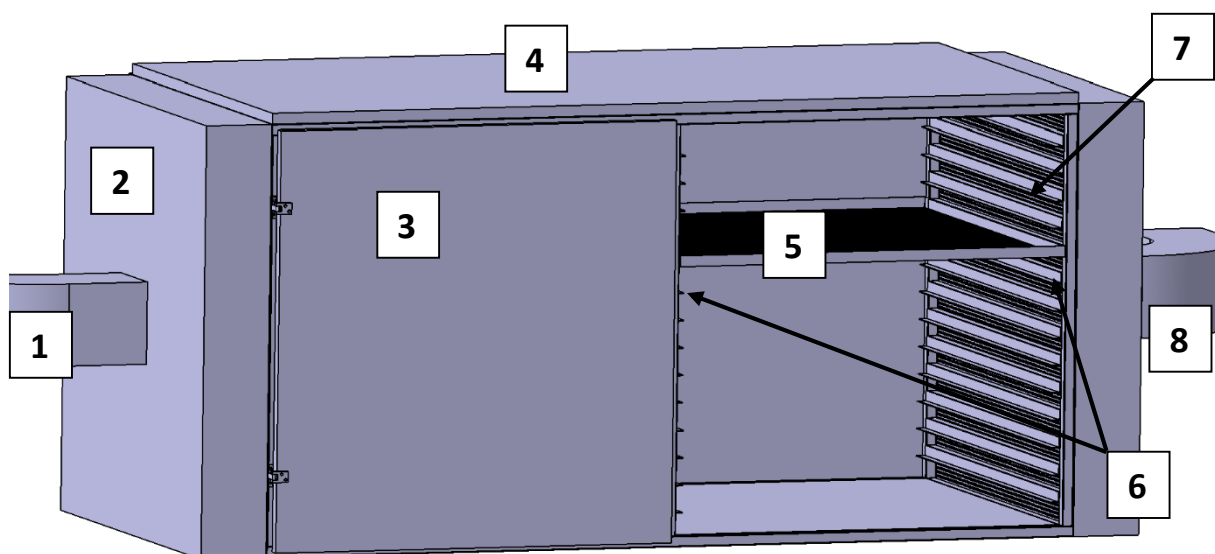


Abbildung 18: Schematische CAD Zeichnung des Trockners

6.2.2 Luftführung im Trockner

Damit das Gut möglichst gleichmäßig getrocknet wird, muss der Luftstrom so verteilt werden, dass er sich auf dem Weg durch oder um das Gut nicht zu stark mit Feuchtigkeit belädt. Das Gut wird von dem Trocknungsmedium umströmt. Dabei kann

der Luftstrom um das Gut oder durch das Gut geführt werden. Im Gegensatz zur Durchströmung tritt bei der Überströmung ein deutlich geringerer Druckverlust auf. Zudem ist der Weg der Luft besser vorherzubestimmen. Bei einer Durchströmung wählt das Trocknungsmedium den Weg des einfachsten Widerstandes, wodurch Teile des Gutes schneller getrocknet werden als andere. Dieser Umstand wird durch die Überströmung vermieden. Weiterhin soll das Gut eine Temperatur von 50°C nicht überschreiten, um die Inhaltsstoffe zu schonen und zu erhalten, wie bereits in Kapitel 2 beschrieben. (Kröll, et al., 1989) Damit ein Auskondensieren des Dampfes im Trockner vermieden wird, muss der Luftvolumenstrom so gewählt werden, dass eine vollständige Beladung der Luft bis zum Sättigungsdampfdruck vermieden wird. Jedoch muss auch beachtet werden, dass der Dampfmassenstrom, den das Trocknungsmedium abführen muss, zu Beginn der Trocknung am höchsten ist und danach stetig absinkt. Sollte sich die Luft also bis zum Sättigungszustand beladen, wird dies nur für sehr kurze Zeit der Fall sein. (Kröll, et al., 1989) (Päßler, 2009)

Vor dem Einlass der Luft ist ein Filter angebracht, der das Eindringen von Staub- und Schmutzpartikeln verhindert. Danach wird ein Verteiler angebracht. Ein Prallblech leitet den Luftstrom nach Oben und Unten um, sodass er am Lochblech gleichmäßig auf alle Ebenen des Trockners verteilt werden kann.

Da der Energieverbrauch annähernd proportional zum Volumenstrom steigt, welcher, bei gleichbleibender durchströmter Fläche, direkt proportional zur Geschwindigkeit ist, sollte der Volumenstrom, energetisch gesehen, möglichst gering gehalten werden. Dadurch steigt jedoch die Verweilzeit der Luft um das Gut, wodurch die Dampfbeladung steigt und die Temperatur des Gutes sinkt, die Trocknung deswegen verlangsamt wird. Auf der anderen Seite darf der Volumenstrom nicht zu gering gewählt werden. Es kann sonst zu einem Auskondensieren des Dampfes an den Wänden des Trockners kommen.

Die Luftführung im Trockner wird deshalb wie in Abbildung 19 gewählt.

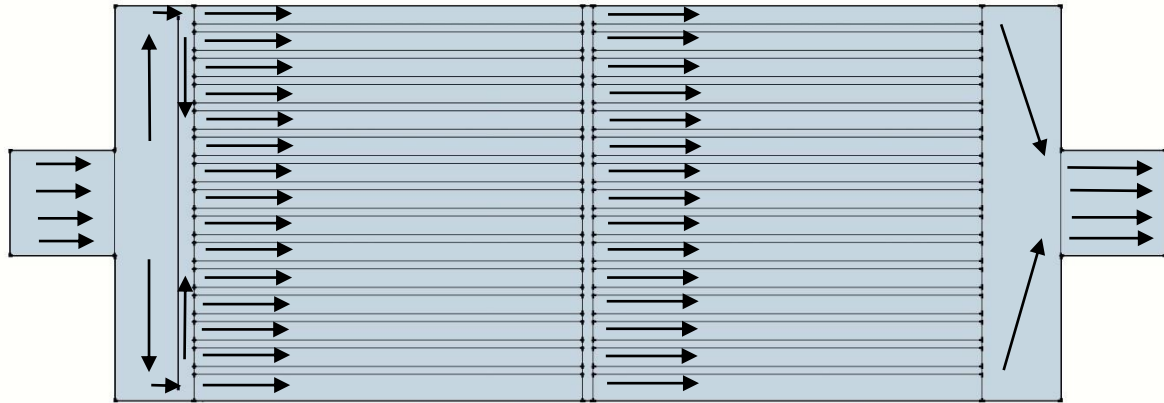


Abbildung 19: Querschnitt durch den Trockner mit Strömungspfeilen

6.2.3 Auswahl der Materialien für den Trockner

Die Temperatur des Luftvolumenstromes muss bis zum Austritt auf einem Niveau gehalten werden, dass ein Auskondensieren des Wassers im Trockner unterbunden wird. Vor Allem aber soll der Großteil der Wärme an das Gut abgegeben werden und nicht an die Umgebung verloren gehen. Es können für die Hülle des Trockners somit nur Baustoffe verwendet werden, die einen niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten besitzen. Dabei muss die Verfügbarkeit vor Ort geklärt werden.

Es ist vorstellbar Sandwichplatten aus Polyurethan-Schaum und Metall zu verwenden, wie in Abbildung 20 dargestellt. Diese sind leicht zu verbauen, da sie mit einem Nut und Feder System ausgestattet sind und einen niedrigen Wärmeleitwert besitzen. Eine weitere Option ist Holz, das sehr günstig und verfügbar ist, jedoch ist hier nicht sichergestellt, ob die Feuchtigkeit das Holz schädigt. Auch könnte es bei einem organischen Stoff wie Holz zu Problemen mit der Hygiene kommen.

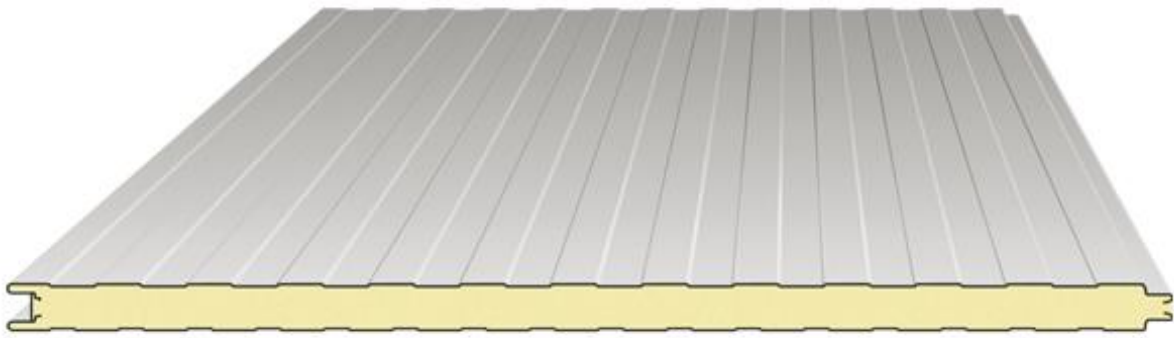


Abbildung 20: Sandwichpaneele aus Metall und Polyurethan (HNB Nordblech GmbH, 2015)

Für die Grundkonstruktion werden vierkant Stahlrohre verwendet, die einfach verschweißt oder verschraubt werden können, sowie L-Profile um die einzelnen Horden als Schubläden in den Trockner zu integrieren. Die Wände des Trockners werden auf die Stahlrohre verschraubt, zusätzlich müssen sie mit Dichtmasse verklebt werden, die verhindert, dass unkontrolliert Luft aus dem Trockner strömt.

Die Horden werden aus Lochblech oder Gitter gefertigt. Damit wird ein größerer Teil des Gutes dem Trocknungsmedium ausgesetzt, wodurch die Trocknungsgeschwindigkeit steigt. Die Ränder der Horde werden aus vollem Material gefertigt, sie stabilisieren die Horde. Abbildung 21 zeigt, wie eine Horde beispielsweise aufgebaut sein könnte.

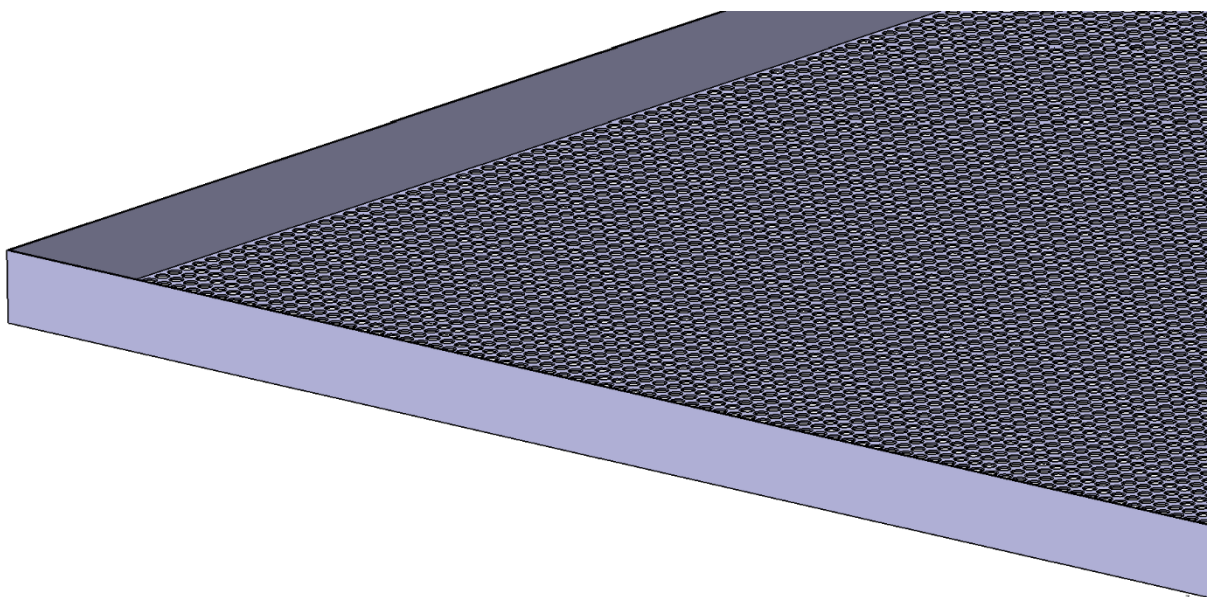


Abbildung 21: CAD-Zeichnung einer Horde im Trockner

Um den Trockner öffnen zu können, werden Türen mit Scharnieren an der Vorderseite des Trockners angebracht. Sie bestehen aus dem gleichen Material wie die Wände. Ein Dichtgummi sorgt für die luftdichte Verschließbarkeit. Zudem presst eine Verriegelung die Türen an den Trockner.

Die Verrohrung der Anlage sollte, um Kosten zu sparen, mit Wickelfalzrohren ausgeführt werden, wie eines in Abbildung 22 dargestellt ist. Diese Rohre halten die Temperatur, die zur Trocknung benötigt wird, dauerhaft aus. Auch die einfache Montage spricht für dieses System.



Abbildung 22: Wickelfalzrohr zu Luftverteilung (Extreme-House OHG, 2014)

Die Wickelfalzrohre können gegebenenfalls auch noch mit einer Isolierung, wie Abbildung 23 zeigt, ergänzt werden. Das Isoliermaterial wird dazu über das Rohr gezogen und mit Aluminiumklebeband verklebt. Der Wärmeverlust im Verteilsystem kann damit stark reduziert werden.



*Abbildung 23: Aufsteckbare Isolierung für Wickelfalzrohre
(CVB s.r.o Ventilatoren und Klimaanlage, 2015)*

6.3 Planung und Bau eines Versuchstrockners

Zur genaueren Untersuchung des Trocknungsvorgangs in dem Trockner wird ein Versuchstrockner gebaut, dargestellt in Abbildung 24, der deutlich kleiner als der entworfene Trockner ist, jedoch den gleichen Aufbau besitzt. Zu beachten ist dabei, dass die Verteilung des Trocknungsgutes, die Luftmenge und die Lufttemperatur entsprechend dem entworfenen Trockner sind.

Mit diesem Trockner sollen durch Versuchsreihen aussagekräftigere Versuchsergebnisse erzielt werden, als sie mit den Versuchen in Kapitel 3.5 dargestellt sind. Mit diesen Ergebnissen werden sich dann die Trocknungsdauer und der Energieverbrauch des realen Trockners genauer vorherbestimmen lassen.

Im Rahmen dieser Arbeit können diese Versuche jedoch nicht mehr stattfinden. Die Zeit reicht für die langwierigen Versuche nicht aus.



Abbildung 24: Versuchstrockner

Der Trockner (Abbildung 24) ist aus 0,5mm starkem, verzinktem Blech gebaut. Die einzelnen Blechteile sind dabei durch Punktschweißen miteinander verbunden. Wie in Abbildung 24 zu sehen, ist die Öffnung des Trockners aus Plexiglas. Mit zwei Verschlusseinheiten kann die Klappe nach unten geöffnet werden. Ein Prallblech verteilt den Luftstrom gleichmäßig im Trockner. Silikon an den punktgeschweißten Verbindungen stellt die Luftdichtheit des Trockners sicher. Um auch die Öffnungsklappe an der Front luftdicht zu verschließen, ist ein selbstklebendes Dichtband auf der Klappe angebracht.

In Abbildung 25 ist der Innenaufbau dargestellt.

1. Lufteinlass
2. Prallblech
3. Horde

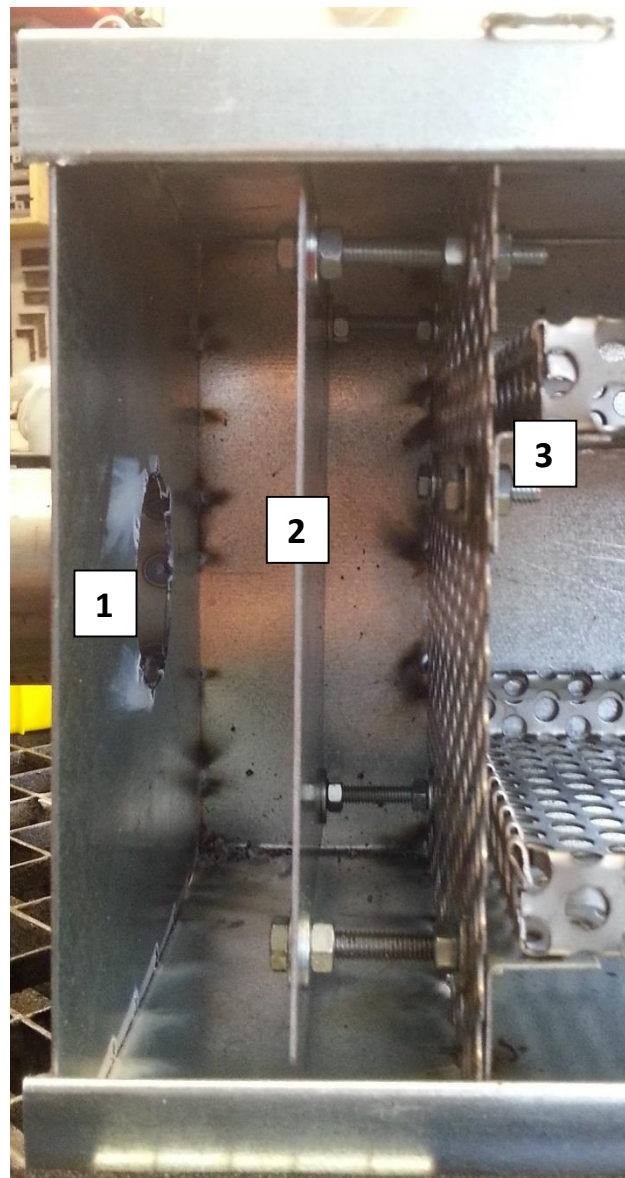


Abbildung 25 Innenaufbau des Versuchstrockners

Die Seitenwände des Trockners werden mit einer Isolation bedeckt, die die Wärmeverluste aus dem Trockner an die Umgebung reduziert.

7. Energieversorgung des Trockners

Die Betrachtung zweier unterschiedlicher Farmtypen macht es notwendig auch in der Energieversorgung eine Trennung dieser Farmen vorzunehmen.

Die benötigte Energie des Trockners wird, wie in Kapitel 3.2.5 bereits beschreiben, durch die zu erwärmende Luft und den Energieverbrauch der Luftbeförderung errechnet. Dazu ist es wichtig zu wissen wie groß der Volumenstrom durch den Trockner angenommen werden soll. Dieser hängt sehr stark von der Beladung der Luft ab. Tina Päßler (Päßler, 2009) beschreibt dabei die maximale Beladung zu 25%. Sollte die Luft höhere Feuchtigkeit aufweisen, komme es zu Verfärbungen. Bei der Trocknung von Moringablättern spielt eine Verfärbung der Blätter nur eine unwesentliche Rolle. Im Rahmen eigener Versuche kam es beim untersuchten Gut auch bei höherer Feuchtigkeit des Trocknungsmediums nicht zu Verfärbungen. Dennoch sollte eine dauerhafte relative Feuchtigkeit der Trocknungsluft über 75% vermieden werden, da es zur Auskondensation des Dampfes im Trockner kommen kann.

Die Tatsache, dass sich das Trocknungsgut bereits am Beginn des Trocknungsvorgangs nach dem ersten Knickpunkt befindet, lässt darauf schließen, dass auch bei einer Beladung bis zur Sättigung dieser Zustand nur von kurzer Dauer ist. In Kapitel 3.5.2 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Die Trocknungsgeschwindigkeit, also auch die Beladung der Luft, nimmt zu Beginn der Trocknung am stärksten ab, wodurch die Beladung der Luft zu diesem Zeitpunkt am stärksten sinkt.

Betrachtet man die Werte des Versuches in Kapitel 3.5.2, mit der Anfangstrocknungsgeschwindigkeit von $0,00116383\text{g/s}$ bei einer Masse von $13,4303\text{kg}$, kann man diese leicht auf eine anfallende Gutsmenge von 120kg übertragen. Man erhält dabei eine Trocknungsgeschwindigkeit von $10,3988\text{g/s}$. Auf diese Weise kann man mit der gegebenen Aufnahmefähigkeit der Luft aus dem Mollier-Diagramm (Abbildung 8) den benötigten Luftstrom errechnen. Aus den bereits aufgezeigten Extrembedingungen bedarf es, bei einer maximalen Beladung der Luft von 75% relativer Feuchte, im Winter eines Massenstromes von $1,1181\text{kg/s}$. Im Vergleich dazu im Sommer $2,2606\text{kg/s}$. Dieser Bedarf sinkt bis zum Ende der Trocknung immer weiter ab, zu sehen in Tabelle 14.

Weiter muss nun berücksichtigt werden, dass im Verlauf der Trocknung der Dampfpartialdruck über der Gutoberfläche des Gutes stark sinkt. Es kann jedoch nur Feuchtigkeit an das Trocknungsmedium abgegeben werden, wenn der

Dampfpartialdruck über dem Gut höher als der Partialdruck im Trocknungsmedium ist. Deshalb ist am Ende der Trocknung eine geringere Beladung der Trocknungsluft nötig.

Würde man die Anlage mit dem eigentlich benötigten Anfangsmassenstrom auslegen, wäre eine Wärmequelle mit sehr großer Leistung nötig, die nach kurzer Zeit einen viel zu großen Luftmassenstrom durch den Trockner treibt und somit, nach Formel (3.2.7), auch einen sehr geringen Nutzungsgrad aufweist. Sinnvoller dagegen ist, den anfänglichen Sättigungszustand der Trocknungsluft in Kauf zu nehmen und einen kleineren Wärmeerzeuger einzusetzen. Die Trocknungsdauer steigt dadurch zwar etwas an, der Nutzungsgrad der gesamten Anlage steigt jedoch. Zum einen wird deutlich weniger Energie zur Erwärmung des Luftmassenstroms benötigt, zum anderen sinkt der Energiebedarf des Ventilators.

Es wird angenommen, dass bei dem entwickelten Trockner bereits ein Volumenstrom von 0,6m³/s ausreichen wird, um in annehmbarer Zeit ein Trocknen des Gutes auf eine Restfeuchte von 7% zu gewährleisten. Dabei wird die zu Beginn der Trocknung etwas langsamere Trocknungsgeschwindigkeit, die durch die stärkere Beladung des Trocknungsmediums entsteht, zu Gunsten des Nutzungsgrades der Anlage in Kauf genommen.

Die für den festgelegten Volumenstrom benötigte Leistung des Wärmeerzeugers kann nun mit der allgemein bekannten Formel

$$P_H = \dot{m}_L \cdot c_{p,L} \cdot (T_{out} - T_{amb}) \quad (7.0)$$

mit:

P_H	= Leistung des Wärmeerzeugers [W]
$\dot{m}_L$	= Massenstrom der Luft [kg/s]
T_{out}	= Temperatur der erwärmten Luft [°C]
T_{amb}	= Temperatur der Umgebungsluft [°C]

bestimmt werden. Dabei werden wieder die beiden Extremfälle für Winter und Sommer betrachtet:

Winter:

Im Winter, der Trockenzeit wird bei einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung des Trocknungsmediums von 30K eine Wärmeerzeugerleistung von ca. 21,6kW benötigt. Die Trocknungszeit wird dabei auf etwa 4h geschätzt, wodurch eine Energiemenge von 86,2kWh benötigt wird.

Sommer:

Im Sommer, der Regenzeit reduziert sich die Leistung auf 14,4kW, da die benötigte durchschnittliche Temperaturerhöhung auf 20K sinkt. Es wird wegen der deutlich höheren Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft jedoch eine Trocknungszeit von 7h angenommen. Daraus ergibt sich eine Energiemenge von etwa 100,7kWh.

7.1 Auslegung der Solar-Luft-Kollektoren

Als bekannter und bewährter Hersteller von Solar-Luft-Kollektoren hat sich Grammersolar herausgestellt. Dieser Hersteller beschäftigt sich auch mit Solaranlagen zur Trocknung. Das Konzept JUMBOSOLAR bietet dabei eine Zusammenstellung von Kollektoren, Regelung und Ventilatoren. Mit dem Diagramm in Abbildung 26 kann die benötigte Länge der Kollektoren für die angestrebte Temperaturerhöhung ermittelt werden.

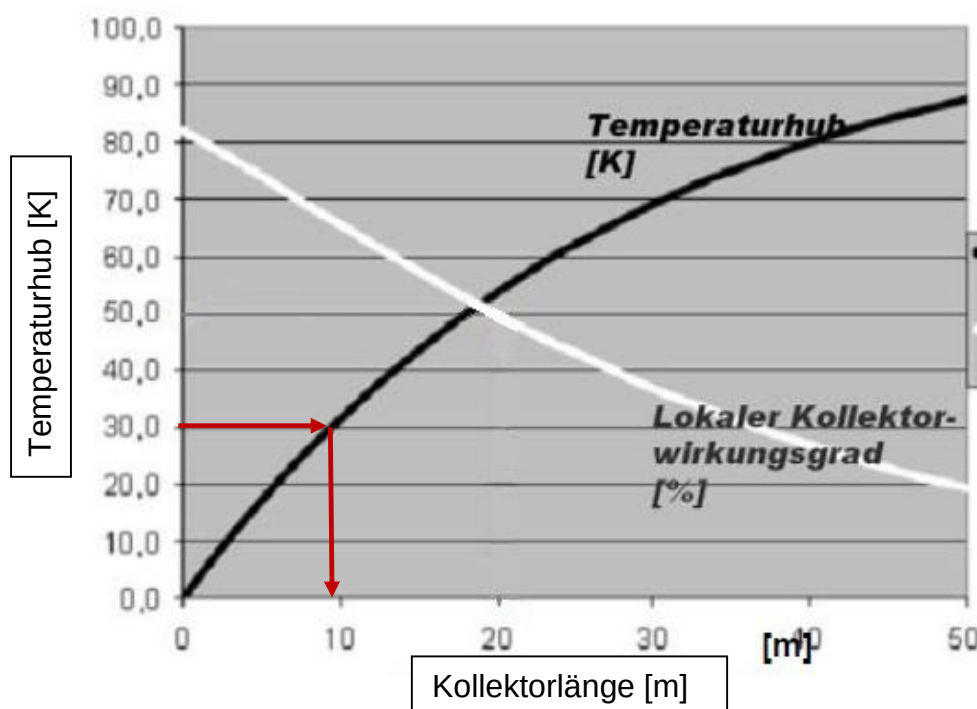


Abbildung 26: Diagramm zur Auslegung von Solar-Luft-Kollektoren (Solar, n.d.)

Das Diagramm bezieht sich auf eine Einstrahlung von 1000 W/m^2 und einen Durchfluss von $600 \text{ m}^3/\text{h}$. Eingezeichnet sind die Pfeile für einen Temperaturhub von 30K, woraus

sich eine Kollektorlänge von etwa 10m ergibt. Da der Temperaturhub nur in den seltensten Fällen 30K beträgt, werden für einen Gesamtvolumenstrom von $0,6\text{m}^3/\text{s}$ etwa 3 Reihen je 10m Länge benötigt. Die GLK Kollektoren haben eine Länge von 2,5m und eine Breite von etwa 1m, wie der Zeichnung in Abbildung 27 entnommen werden kann. Es werden also pro Reihe 4 Kollektoren benötigt, woraus sich bei dem Gesamtvolumenstrom von $0,6\text{m}^3/\text{s}$ eine benötigte Gesamtfläche von 30m^2 ergibt.

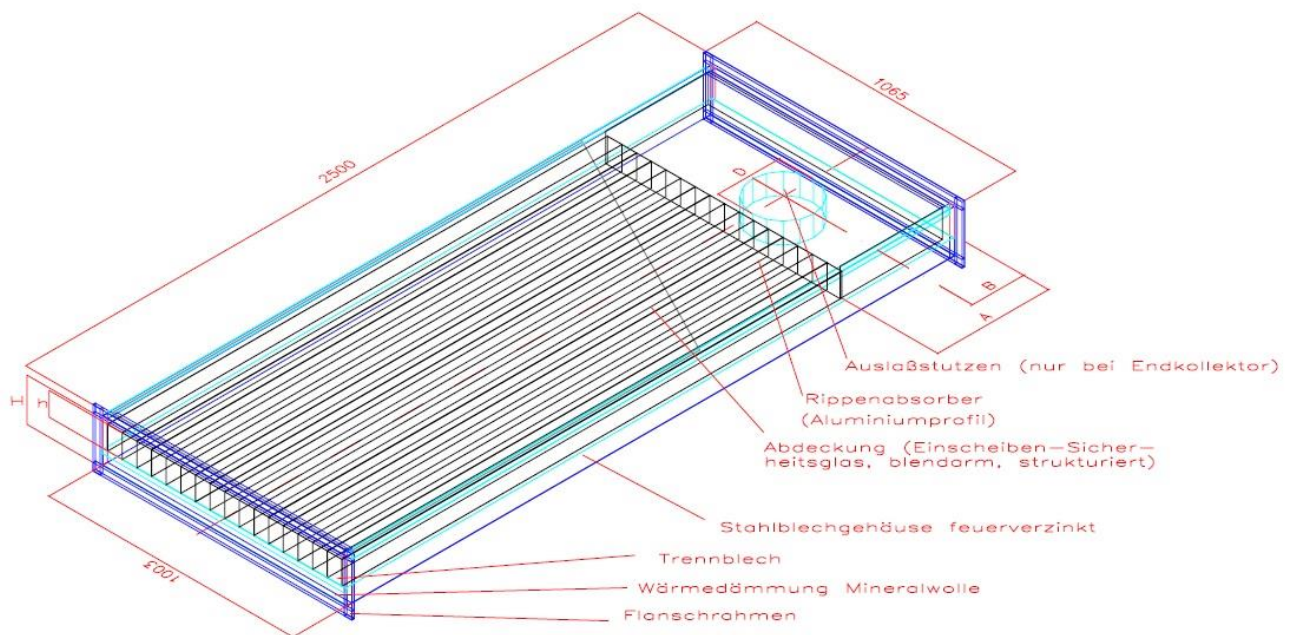


Abbildung 27: Solar-Luft-Kollektor (Solar, n.d.)

Die Kollektoren werden vom Hersteller mit einer Peakleistung von 1675W pro GLK Kollektor angegeben. In Summe stellt das Kollektorfeld somit eine Peakleistung von über 20kW bereit. Diese ist etwas unter der Maximalleistung bei den Extrembedingungen im Winter, welche jedoch äußerst selten vorkommen. Die Leistung sollte also ausreichen um den Trockner zu betreiben.

Simulation der Kollektoren

Mit Matlab Simulink und dem Blocksatz Carnot wird ein Simulationsmodell entwickelt. Problematisch dabei ist, dass ein Luftkollektor im Datensatz von Carnot nicht vorhanden ist, also eine eigene Konfiguration eines Kollektors vorgenommen werden muss. Dabei wird ein einfacher Flachkollektor mit den Parametern von Luft betrieben. Getestet werden die Kollektoren in zwei unterschiedlichen Betriebsarten. Zum einen mit einem fest eingestelltem Massenstrom von $1,5\text{kg}/\text{s}$, zum anderen durch einen

variablen Massenstrom, der auf eine festgelegte Solltemperatur von 50°C geregelt ist. Die Kollektorgröße beträgt 30m² und die Kollektoren werden als horizontal aufgestellt angenommen. Die Simulation wird mit den Wetterdaten von Lusaka aus Meteonorm durchgeführt.

Dabei ergibt sich bei dem fest eingestellten Massenstrom ein jährlicher Ertrag von 43050kWh, wodurch bei der maximal benötigten Trocknungsleistung von 21,6kW eine Trocknungszeit von 1993h ermöglicht wird, was bei einer maximalen Trocknungszeit von 7h eine Trocknung an 284 Tagen ermöglicht. Diese Betrachtung ist aber kritisch zu sehen, da die Leistung der Anlage nur selten 21,6kW erreicht und die Trocknung nur selten 50°C erreicht. Die Trocknungszeiten sind daher oft deutlich länger.

Bei der geregelten Variante wird ein jährlicher Ertrag von 30443kWh bereitgestellt. Bei der maximal benötigten Trocknungsleistung wird hier eine Trocknungszeit von 1409h ermöglicht, was wiederum bei 7h Trocknungszeit eine Trocknung an 201 Tagen zulässt. Durch diese Art der Regelung werden aber Zeiten nicht berücksichtigt, an denen eine Trocknung bei beispielsweise 40°C eigentlich noch möglich wäre. Es könnte also möglich sein, an mehr als 201 Tagen zu trocknen.

7.2 Auslegung der Biogasanlage

Die Biogasanlage wird mit einer niedrigen Faulraumbelastung betrieben, um den Prozess stabil zu halten und Fehlerquellen vorzubeugen. Die Faulraumbelastung beschreibt wie viel organische Trockensubstanz dem Fermenter je Kubikmeter am Tag zugeführt wird. Ein stabiler Prozess wird etwa bei 2 kg oTS/m³ d angenommen. (Goldbrunner, 2014)

Die organische Trockensubstanz der einzelnen Reststoffe muss aus der Frischmasse der tierischen Reststoffe berechnet werden. Umrechnungsfaktoren finden sich in Tabellenwerken. (KTBL, 2013), (Archea Service, n.d.)

Wie am Anfang des Kapitels 7 beschrieben, werden für einen Trocknungsvorgang maximal 100,7kWh Energie benötigt. Auf ein Jahr gerechnet werden also 36756kWh für die Trocknung verbraucht. Diese Energiemenge wird nun für die Auslegung einer Biogasanlage verwendet. Die volumetrische Energiedichte von Methan ist etwa 9,97kWh/m³ (KTBL, 2013). Es folgt also ein Bedarf von 3686,66m³ Methan jährlich für

die Trocknung. Aus dem EEG (Goldbrunner, 2014) kann die Methanausbeute in m³/t in Erfahrung gebracht werden. Für Ziegen ist dieser Wert 59m³/t. Die Masse an Ziegenmist folgt damit zu 62,5t. Da eine Ziege etwa 6,3kg Dung pro Tag produziert, werden die Exkreme von 28 Ziegen benötigt. Da aber noch der Verlustfaktor mit berücksichtigt werden muss, der hier zu 75% angenommen wird, bedarf es den Dung von 112 Ziegen. Die Gesamtmenge an Exkrementen beläuft sich auf 176,4kg/d. Aus Sicherheitsgründen wird eine etwas größere Menge von 200kg/d, also der Mist von etwa 32 Ziegen angenommen. Dadurch ist sichergestellt, dass jederzeit eine ausreichende Menge Biogas zur Verfügung steht. Die letztendlich benötigte Anzahl an Ziegen beträgt 128. In Tabelle 10 sind die Eigenschaften des Schafmists zur Gasproduktion aufgetragen. Dieser wird auf Grund mangelnder Informationen dem Ziegenmist gleich gesetzt. Die Rinder werden nicht berücksichtigt, da allein der Ziegenmist für die nötige Biogasproduktion ausreicht.

Tabelle 10: Schafmist (Archea Service, n.d.)

Substrat	Trocken- substanz TS [%]	Organische Trocken- substanz oTS [%TS]	Spez. Gasertrag [l/kg oTS]	Methan- Anteil [%]	Gasertrag [m ³ /t FM]
Schafmist	30	80	450	55,00	108

Aus Tabelle 10 berechnet sich der organische Trockensubstanz Betrag zu 48kg oTS/d. Die Größe des Fermenters wird über die folgende Formel berechnet (Goldbrunner, 2014):

$$V_R = \frac{\dot{m}_{oTS}}{B_R} \quad (7.0)$$

mit: V_R = Fermentervolumen [m³]
 $\dot{m}_{oTS}$ = Massenstrom organische Trockensubstanz [kg oTS/d]
 B_R = Faulraumbelastung [kg oTS/m³ d]

Das Volumen des Fermenters beträgt somit 24m³. Mit der Formel (Goldbrunner, 2014):

$$d_R = \sqrt[3]{\frac{V_R \cdot 12}{\pi}} \quad (7.1)$$

wird der Durchmesser des Fermenters d_R bestimmt. Die Höhe h_R berechnet sich zu (Goldbrunner, 2014):

$$h_R = \frac{d_R}{3} + 0,5 \quad (7.2)$$

Die Addition von 0,5 dient als Sicherheit, um ein Überlaufen des Fermenters zu vermeiden.

Die Auslegung des Fermenters ergibt einen Durchmesser von 4,5m und eine Höhe von 2m.

Auslegung des Speichers:

Da bei der Vergärung von Biomasse nicht nur Methan, sondern auch CO₂ und andere Stoffe freigesetzt werden, muss der Biogasertrag zur Ermittlung der Speichergröße für die einzelnen Reststoffe betrachtet werden.

Gattung	Ziege
Gesamtertrag [kg/d]	200
Jahresausbeute [t]	73
Biogasertrag [m ³ /t FM]	108
Biogasertrag [m ³ /a]	7884
Biogasertrag [m ³ /h]	0,9

Wird angenommen, dass der Speicher bei einem Trocknungsvorgang von 7h komplett geleert wird, kann mit der stündlichen Biogasproduktion des Fermenters und der Ruhezeit t_{off} des Trockners das Speichervolumen berechnet werden.

$$V_{SP} = t_{off} * V_{Gas/h} \quad (7.3)$$

Es wird mindestens ein Volumen von 15,3m³ benötigt. Der Speicher wird jedoch größer ausgelegt, damit bei einem verspäteten Start der Trocknung oder bei einem Ausfall das entstehende Gas zwischengespeichert werden kann.

Das Gas wird mit einer Folienhaube gespeichert, diese befindet sich direkt über dem Fermenter, besitzt also auch denselben Durchmesser. (Goldbrunner, 2014)

$$V_{SP} = \frac{\pi \cdot h}{6} \cdot \left(3 \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 + h^2 \right) \quad (7.4)$$

Mit: h = Höhe des Speichers [m]
 d = Durchmesser des Speichers [m]
 V_{SP} = Volumen Speicher [m³]

Formel (7.4) beschreibt das Speichervolumen eines Folienspeichers, der die Form eines Kugelsegments besitzt. Die Maximale Größe des Speichers ist erreicht, wenn der Speicher die Form einer Halbkugel annimmt, also die Höhe dem Radius des Fermenters entspricht. In diesem Fall können knapp 24m³ Biogas gespeichert werden.

(Goldbrunner, 2014)

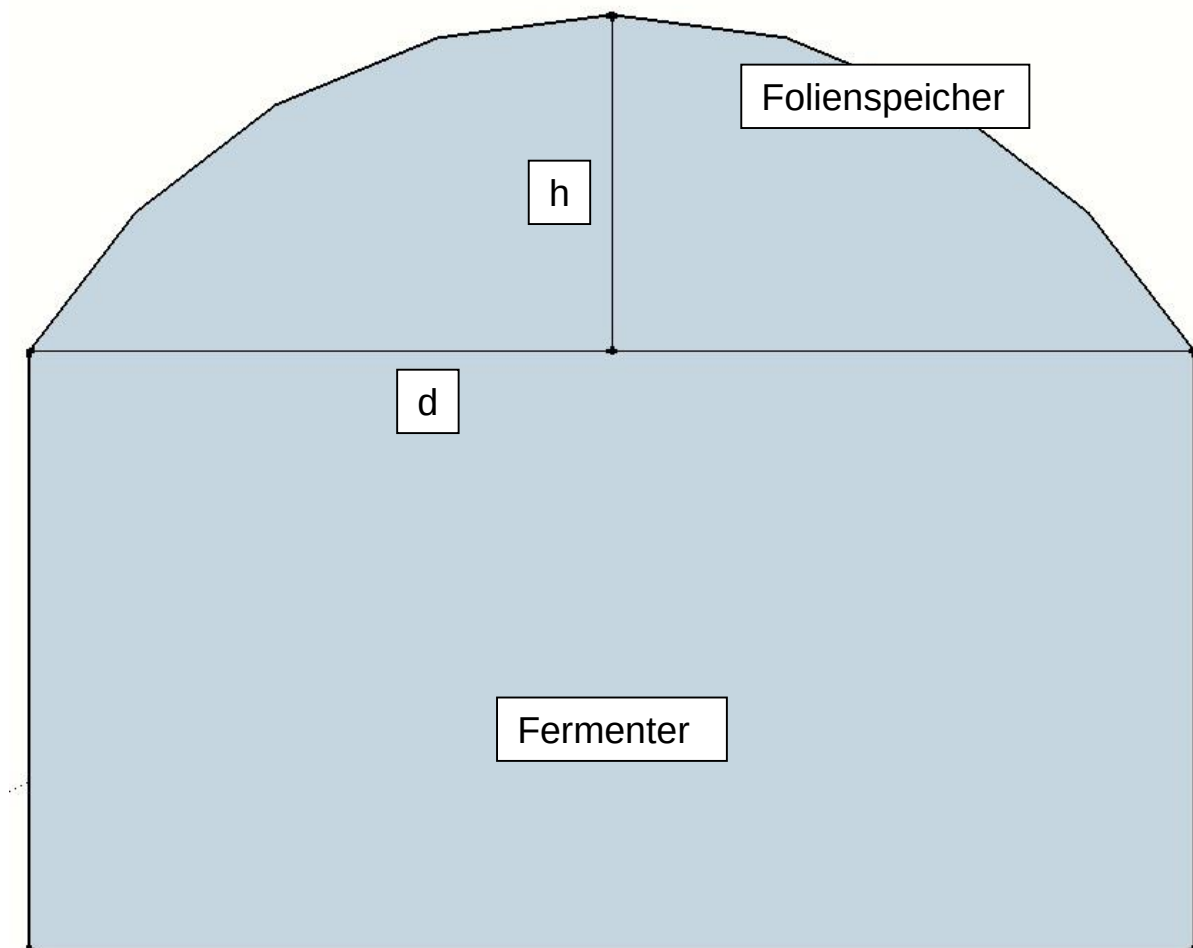


Abbildung 28: Volldurchmischer Fermenter mit Folienspeicher

7.3 Thermische Umwandlung des Biogases

Die chemisch gebundene Energie im Biogas wird über einen Gasbrenner in thermische Energie umgewandelt. Ein Wärmeübertrager, im Luftstrom der Trocknungsluft, in Abbildung 28 dargestellt, überträgt die Energie an die Trocknungsluft.



Abbildung 29: Luft-Wärmetauscher zum Einbringen der Energie in das Trocknungsmedium (Nordluft GmbH und Co. KG, 2014)

Die Grafik zeigt ein Heizregister von Nordluft GmbH und Co. KG., welches in den Luftstrom eingebracht wird. Dieses ist ab einer Leistung von 20kW erhältlich. An dem Anschluss unten im Bild, wird der Gasbrenner installiert.

7.4 Auslegung des Ventilators

Zur Bestimmung des Leistungsbedarfes der Luftförderung ist die Kenntnis des Druckverlustes unumgänglich. Dieser errechnet sich wie bereits in Kapitel 3.2.5 beschrieben aus den einzelnen Druckverlusten vom Eintritt der Luft bis zum Austritt.

Für ein verzinktes Rohr wird der Rauigkeitswert k zu 0,1 angenommen. (schweizerfn, 2014). Daraus kann mit dem Rohrdurchmesser von 315mm und der Abbildung 7 der Rohrreibungsbeiwert λ ermittelt werden. Mit einer angenommenen

Rohrlänge von 6m und einer Luftdichte von $1,2\text{kg/m}^3$, bei der festgelegten Luftmenge von $0,6\text{m}^3/\text{s}$, beträgt der Druckverlust in den Rohren etwa 13Pa. Der Wärmeübertrager von Nordluft kann mit einem Überschlagswert von 100Pa angenommen werden (Nordluft GmbH und Co. KG, 2014). Der Druckverlust im Trockner wird in der folgenden Tabelle kurz überschlagen. (Hakenesch, 2014)

Tabelle 11: Überschlagsrechnung Druckverlust Trockner

Berechnung Druckverlust Trockner				Massenstrom: 0,6 m3/s		delta_p
				Dichte: 1,2kg/m^2		
C entspricht Zeta	delta_p = C*(roh/2)*v^2					
<u>1. Durchmesser 315 mm auf Gesamtfläche, Betrachtung als Diffusor</u>				A1	77931,1328 mm^2	v1 7,69910533 m/s
				A2	2250000 mm^2	v2 0,26666667 m/s
C=(1-A1/A2)_2						
0,931927539						
33,1446867						
<u>2. Gesamtfläche auf Prallblech, Betrachtung als Blende</u>				A1	2250000 mm^2	
				A2	300000 mm^2	
C=exp(8,94941-47,8557*A2/A1+169,798*(A2/A1)^2-349,829*(A2/A1)^3+353,634*(A2/A1)^4-140,833*(A2/A1)^5)						
129,5268158						
5,52647747						
<u>3. Gesamtfläche auf Lochblech, Betrachtung als Blende</u>				A1	2250000 mm^2	
				A2	1687500 mm^2	
C=exp(8,94941-47,8557*A2/A1+169,798*(A2/A1)^2-349,829*(A2/A1)^3+353,634*(A2/A1)^4-140,833*(A2/A1)^5)						
0,580757138						
0,02477897						
<u>4. Gesamtfläche auf 14 Horden, Betrachtung als Düse</u>				A1	2250000 mm^2	
				A2	1620000 mm^2	
C=1,5*(1-AK/AK)	AK=0,614+0,133*A2/A1-0,261*(A2/A1)^2+0,511*(A2/A1)^3				AK	0,38372787
2,409020192						
0,00334507						
5. Überströmung des Gutes						
Dh = (4*A)/U = 0,13740m						
Ersatzdurchmesser Dh:	0,137 m					
v =	0,37037037 m/s					
Re=(v*Dh)/nū	2788,936569	nū = 18,2476 * 0,000001				
Länge =	3 m					
aus Moody-Diagramm:						
Lambda =	0,045					
Anzahl Luftdurchgänge	15					
Mit Formel delta_p Rohr:						1,21654501
<u>5. Verengung 14 Horden auf Gesamtfläche, Betrachtung als Diffusor</u>				A1	1620000 mm^2	
				A2	2250000 mm^2	
C=(1-A1/A2)_2						
0,0784						
0,00334507						
<u>6. Gesamtfläche auf Lochblech, Betrachtung als Blende</u>						
C=exp(8,94941-47,8557*A2/A1+169,798*(A2/A1)^2-349,829*(A2/A1)^3+353,634*(A2/A1)^4-140,833*(A2/A1)^5)						
0,580757138						
0,02477897						
<u>7. Gesamtdurchmesser auf Ausgangsrohr, Betrachtung als Düse</u>				A1	2250000 mm^2	
				A2	77931,1328 mm^2	
C=1,5*(1-AK/AK)	AK=0,614+0,133*A2/A1-0,261*(A2/A1)^2+0,511*(A2/A1)^3				AK	0,61827225
0,926115669						
32,9379833						
Gesamtdruckverlust:						72,8819406

Die Überschlagsrechnung zum Druckverlust im Trockner ergibt einen Wert von etwa 73Pa. Es stellt sich also ein Gesamtdruckverlust von etwa 186Pa ein.

Aus der Formel (3.23) wird mit einem Wirkungsgrad von 60% eine Leistung an der Ventilatorwelle von 186W berechnet.

7.5 Nutzungsprofile der beiden Farmtypen

7.5.1 Farm von Herrn Prof. Sinkala

Bei der Farm von Herrn Prof. Sinkala wird der Trockner aus kommerzieller Sicht betrieben. Die geernteten Moringablätter werden nach dem Trocknen, zermahlen oder nicht zermahlen, verpackt und verkauft. Die Trocknung muss daher sehr zuverlässig funktionieren, um zugesagte Aufträge fertigstellen zu können und die Kapazität des Trockners möglichst gut auszulasten. Qualität und Aussehen des Gutes spielen bei der Preisfindung eine große Rolle, daher wird auch Augenmerk auf eine möglichst gleichmäßige Trocknung gelegt. Bei der Energieversorgung des Trockners muss daher auf die Einhaltung der maximal erlaubten Temperatur, die maximale Endfeuchte des Gutes und die Trocknungszeit geachtet werden.

7.5.2 Farm eines durchschnittlichen Landwirtes

Im Gegensatz zur Farm von Herrn Prof. Sinkala, wird der Trockner bei dieser Art von Farm nicht zur Produktion von Moringa zum ausschließlichen Verkauf verwendet, sondern hauptsächlich zur Eigenproduktion von haltbaren Nahrungsmitteln. Dabei liegt das Hauptaugenmerk darauf, ohne Anbindung an das Stromnetz und ohne Verwendung von fossilen Energieträgern eine Möglichkeit zur Trocknung von Moringa zu bieten. Aber auch die Qualität der Nahrungsmittel muss gewährleistet sein, wobei das Einhalten der maximalen Trocknungstemperatur eine wichtige Rolle spielt. Weniger wichtig hingegen sind dabei das Aussehen des Gutes und die Trocknungsgeschwindigkeit. Nach Möglichkeit sollte der Trockner auch andere Produkte, die in der Produktion gerade nicht zu verkaufen sind, trocknen können.

7.6 Konzepte für die Farm eines durchschnittlichen Landwirtes

7.6.1 Trocknung durch die Verwendung von Solar-Luft-Kollektoren

Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben stehen der ländlichen Bevölkerung deutlich weniger biogene Reststoffe als der Farm von Herrn Prof. Sinkala zur Verfügung. Wird die Masse des Trocknungsgutes beider Farmen als gleich angenommen, reicht die

Menge des jährlich erzeugten Biogases nicht aus, um die gesamte Masse an Moringablättern zu trocknen.

Der Trockner wird hier rein mittels Sonnenenergie betrieben. Bei den Kollektoren handelt es sich um Solar-Luft-Kollektoren, die die Solarstrahlung in Wärme umwandeln und an die die Kollektoren durchströmende Luft abgeben. Für die Stromversorgung der Kollektoren ist eine Photovoltaik-Anlage sinnvoll, da eine Netzanbindung nicht vorhanden ist und die Stromversorgung nur dann benötigt wird, wenn auch den Solar-Luft-Kollektoren solare Strahlung zur Verfügung steht. Ein Ausgleich von Schwankungen der Solarenergie ist hier nicht möglich. Bei ungenügender Sonneneinstrahlung verzögert sich die Trocknung. Vor einem Trocknungsvorgang sollte durch Wetterbeobachtung eine relativ hohe Sonnendauer angenommen werden können. Kann das Gut unvorhergesehen nicht an einem Tag trocknen, muss es am nächsten Tag fertig getrocknet werden. Der Anlagenplan ist schematisch in Abbildung 30 dargestellt.

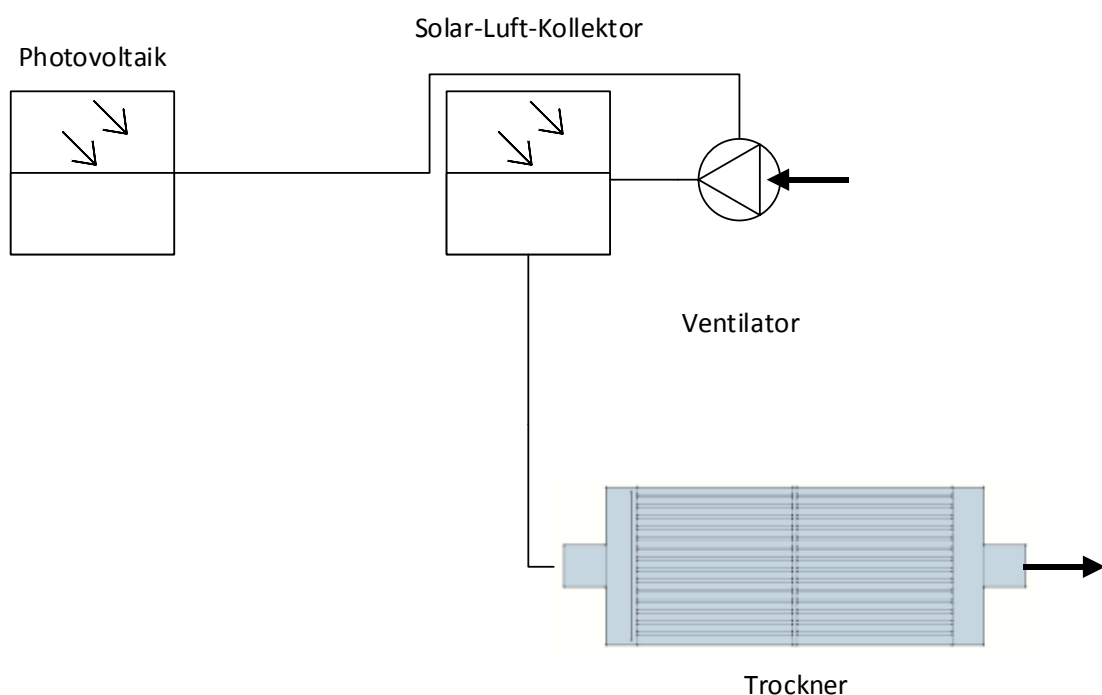


Abbildung 30: Trocknung durch Solar-Luft-Kollektoren (ländliche Bevölkerung)

Bewertung:

Der große Vorteil dieser Anlage ist die einfache Regelung. Die Anlage startet und stoppt automatisch. Es ist keine Bedienung, also auch kein Arbeitsaufwand damit

verbunden. Sobald genug Solarstrahlung vorhanden ist, treibt die Photovoltaik-Anlage einen Ventilator an, der den benötigten Massenstrom durch die Kollektoren und in den Trockner fördert. Hierdurch ergibt sich aber auch ein gravierender Nachteil. Die Blätter dürfen nicht über 50°C erhitzt werden. Dieser Tatsache zur Folge wird der Massenstrom so eingestellt, dass bei besten Wetterbedingungen eine Temperatur von 50°C des Trocknungsmediums erreicht wird. Sind die Bedingungen etwas schlechter, werden die 50°C nicht mehr erreicht, was zu einer Verlangsamung der Trocknung und diskontinuierlichen Trocknungstemperaturen führt.

7.6.2 Trocknung durch die Verwendung von Solar-Luft-Kollektoren und Biogas

Zur Erhöhung der Verfügbarkeit der Anlage wird zu den Solar-Luft-Kollektoren eine Biogasanlage installiert. Über einen Brenner und einen Wärmetauscher wird mittels Ventilator die Trocknungsluft erwärmt. Dieser Brenner kommt dann zum Einsatz, wenn die solare Trocknung, wetterbedingt, unterbrochen wird oder dringend eine Trocknung durchgeführt werden muss, obwohl keine Sonnenstrahlung zur Verfügung steht. Die Ventilatoren werden über eine Photovoltaikanlage und einen Batterie-Speicher betrieben, da keine entsprechende Infrastruktur für die Stromversorgung vorhanden ist. Wird das Biogas nicht für die Trocknung verwendet, kann es auch zum Kochen und zur Versorgung mit künstlichem Licht verwendet werden. Abbildung 31 zeigt schematisch das Anlagenkonzept.

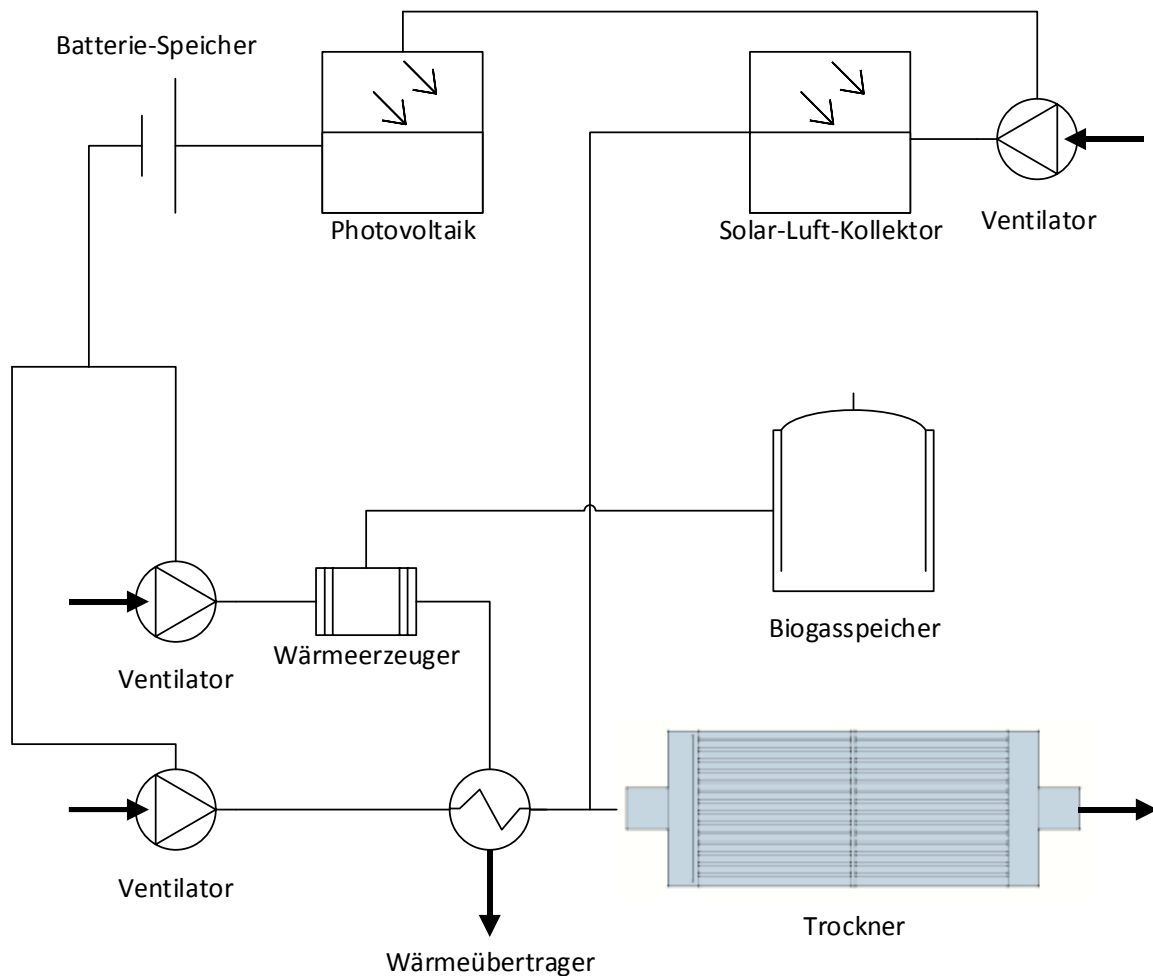


Abbildung 31: Trocknung durch Kombination Solar-Luft-Kollektoren und Biogas (ländliche Bevölkerung)

Bewertung:

Zur Installation der Solar-Luft-Kollektoren wird zusätzlich der Bau einer Biogasanlage notwendig. Dieser Umstand erhöht den technischen Aufwand der Anlage sehr. Die zusätzlichen Ventilatoren benötigen außerdem eine größere Photovoltaik-Anlage und einen Batteriespeicher, da die Anlage zu Zeiten betrieben werden soll, an denen keine Sonne zur Verfügung steht. Die Kombination von Biogasanlage und Solaranlage bedarf einer Regelung, die zu Bedienungsfehler führen kann.

7.7 Konzepte für die Farm von Herrn Prof. Sinkala

7.7.1 Trocknung durch die Verwendung von Biogas und Strom aus dem Netz

Die relativ große Menge an Biogas, die auf dieser Farm produziert werden kann, macht es möglich die Trocknung allein mit Biogas zu betreiben, wie in Abbildung 32 zu sehen. Dies ist sehr vorteilhaft, da im Gegensatz zur Solarenergiegewinnung keine zeitliche Beschränkung auftritt. Auch ist die Biogasgewinnung nahezu frei von Fluktuationen, die benötigte Energiemenge steht daher jederzeit zur Verfügung.

Die Umgebungsluft wird dabei von einem Ventilator über einen Wärmeübertrager in den Trockner geleitet. Ein zweiter Ventilator versorgt einen Gasbrenner (Wärmeerzeuger) mit Luft und transportiert das Rauchgas zum Wärmeübertrager, in dem die Wärme an den Strom des Trocknungsmediums abgegeben wird. Die elektrische Versorgung findet durch das Stromnetz statt. Im Biogasspeicher befindet sich das produzierte Biogas der Biogasanlage. Um Stromausfällen vorzubeugen, wird ein Backup-Speicher in die Stromversorgung installiert.

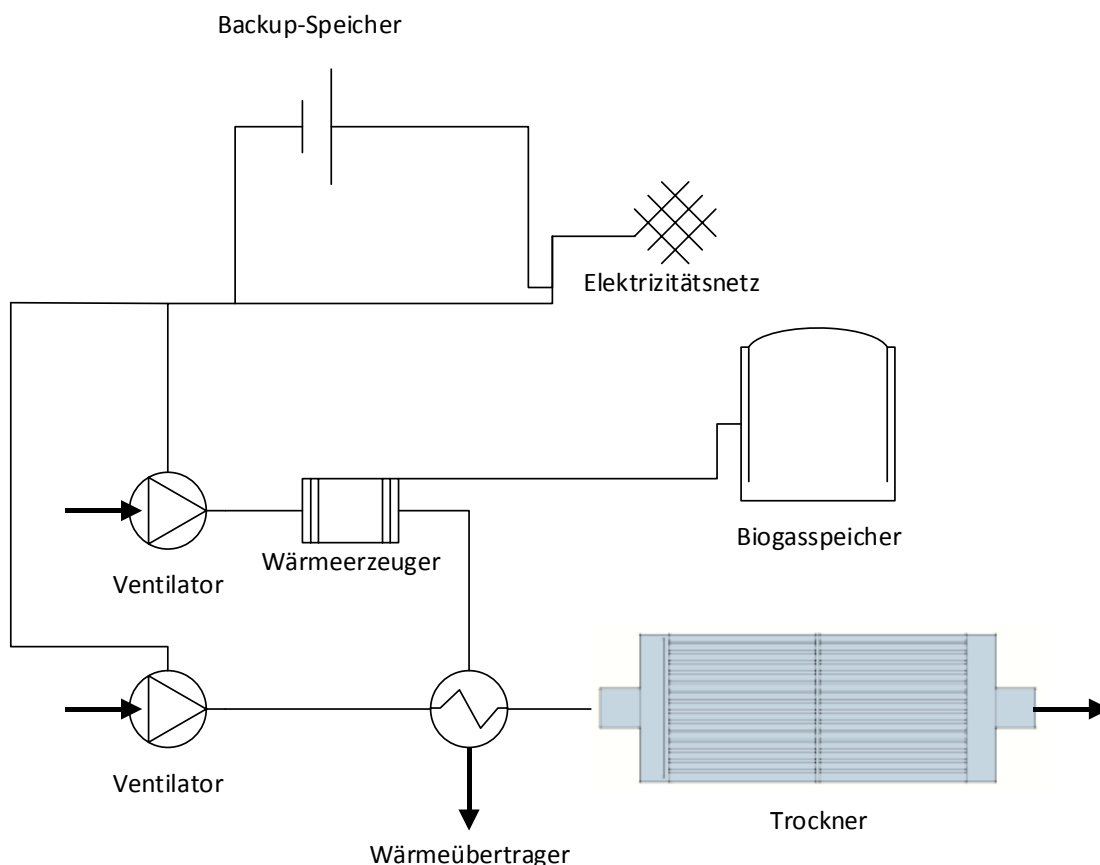


Abbildung 32: Trocknung mit Biogas und Netzstrom (Farm Prof. Sinkala)

Bewertung:

Die Möglichkeit, die Stromversorgung der Anlage mit elektrischer Energie aus dem Netz zu realisieren, bietet eine technisch wenig aufwändige Konstruktion. Eine eigene Stromversorgung durch, beispielsweise einen Generator, wird umgangen. Das oft instabile Netz kann durch das Backup-System ausgeglichen werden. Die gesicherte Energieversorgung bietet eine dauerhafte Trocknungsmöglichkeit und eine hohe Verfügbarkeit der Anlage. So wird Ausschussware vermieden, die durch mangelhafte Trocknung im Moment noch vorkommt. Es kann also die volle Kapazität der Plantage ausgenutzt werden.

7.7.2 Trocknung durch die Verwendung von Biogas und Solarstrom

Wie in Abbildung 33 zu sehen, können als Alternative zum Bezug von Strom aus dem lokalen Stromnetz die Ventilatoren mit einer Photovoltaik-Anlage betrieben werden. Auch hier ist ein Backup-System notwendig, welches die Fluktuationen der solaren Einstrahlung ausgleichen kann.

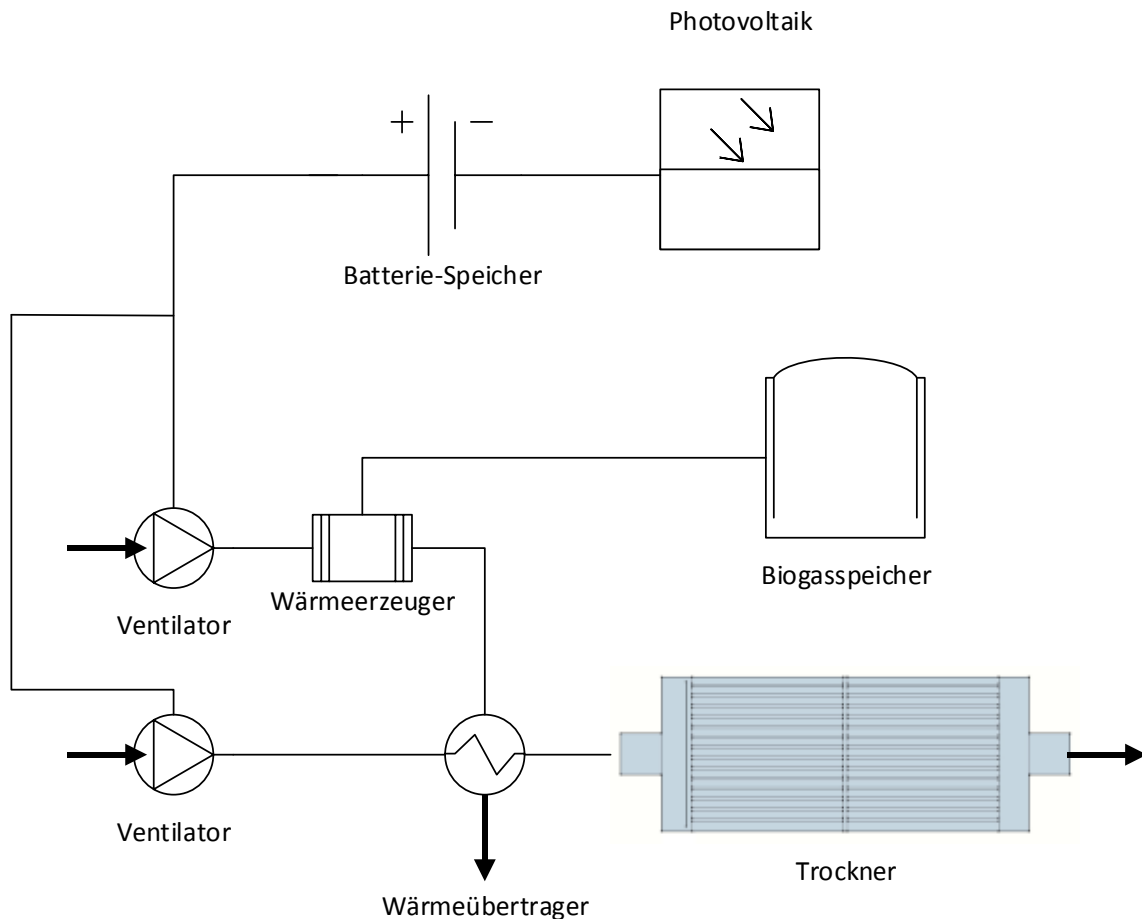


Abbildung 33: Trocknung mit Biogas und Solarstrom (Farm Prof. Sinkala)

Bewertung:

Die zusätzliche Installation der Photovoltaik-Paneele macht die Anlage technisch aufwändiger, bringt aber Vorteile durch die Unabhängigkeit des Systems vom Stromnetz. Das Backup-System muss sehr groß ausgelegt werden, da auch bei mehrtägiger Bewölkung die Stromversorgung nicht zusammenbrechen darf. Regelungstechnisch ist das Konzept wenig aufwändig. Die zusätzlich installierte Photovoltaikanlage arbeitet nach der Inbetriebnahme eigenständig.

7.7.3 Trocknung mittels solarer Wärmeerzeugung und Biogas-Unterstützung

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die hohe Sonneneinstrahlung in Sambia zur Trocknung zu verwenden. Dabei wird ein Solar-Luft-Kollektor verwendet. Mit einer Photovoltaik-Anlage wird der Ventilator, der die Luft durch die Kollektoren fördert, betrieben. Zum Ausgleich der solaren Schwankungen wird Biogas eingesetzt. Wird mit

Biogas geheizt, werden Die Ventilatoren mit elektrischer Energie aus dem Stromnetz gespeist. In Abbildung 34 ist der Aufbau dieser Anlage schematisch dargestellt.

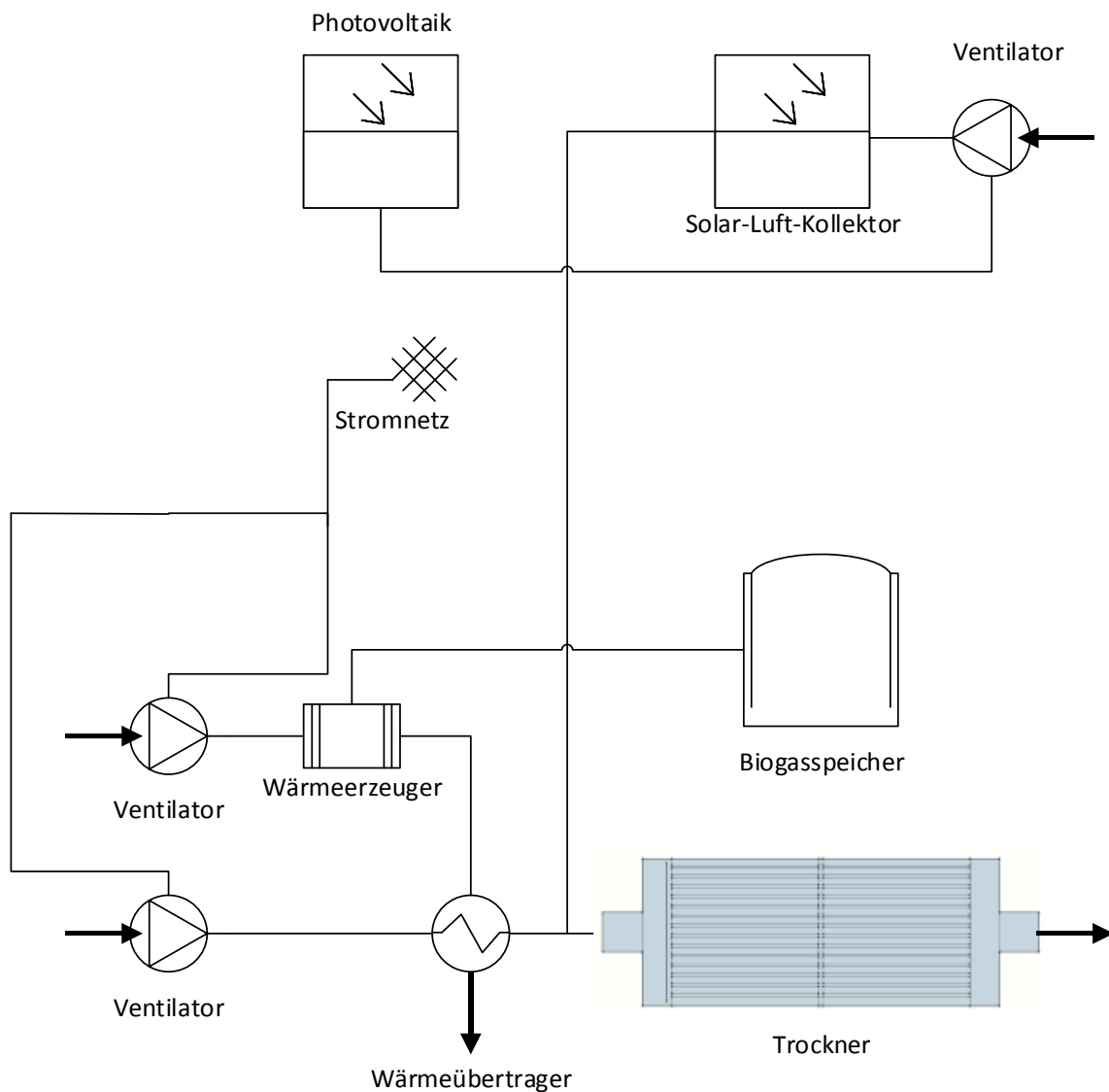


Abbildung 34: Trocknung mit Solar-Luft-Kollektoren und Biogas (Farm Prof. Sinkala)

Bewertung:

Die solarthermische Energiegewinnung ermöglicht den Bau einer kleineren Biogasanlage als bei der reinen Trocknung durch Biogas. Die Sonne reicht an den meisten Tagen für eine Trocknung des Gutes aus. Der Speicher der Biogasanlage muss dann jedoch groß genug sein, um eine Versorgung des Trockners bei einer mehrtägigen Bewölkung ausgleichen zu können.

Die Abbildung 35 zeigt die Temperaturen in °C am Ausgang und Eingang des Trockners, linke Achse, und den Massenstrom in kg/s durch den Trockner, rechte Achse. Deutlich zu erkennen sind die Tage ohne oder mit geringem Massenstrom, an denen keine oder nur wenig Sonnenenergie abgegriffen werden kann.

Die hohen Ansprüche an die Qualität des Gutes und die Trocknungsgeschwindigkeit, führen bei diesem Konzept zu einem großen Regelungsaufwand. Der Massenstrom, der von den Solar-Luft-Kollektoren stammt und durch den Trockner getrieben wird, muss ständig erfasst werden und gegebenenfalls durch einen zweiten Luftmassenstrom automatisiert, von dem Wärmeerzeuger der Biogasverbrennung, ergänzt werden.

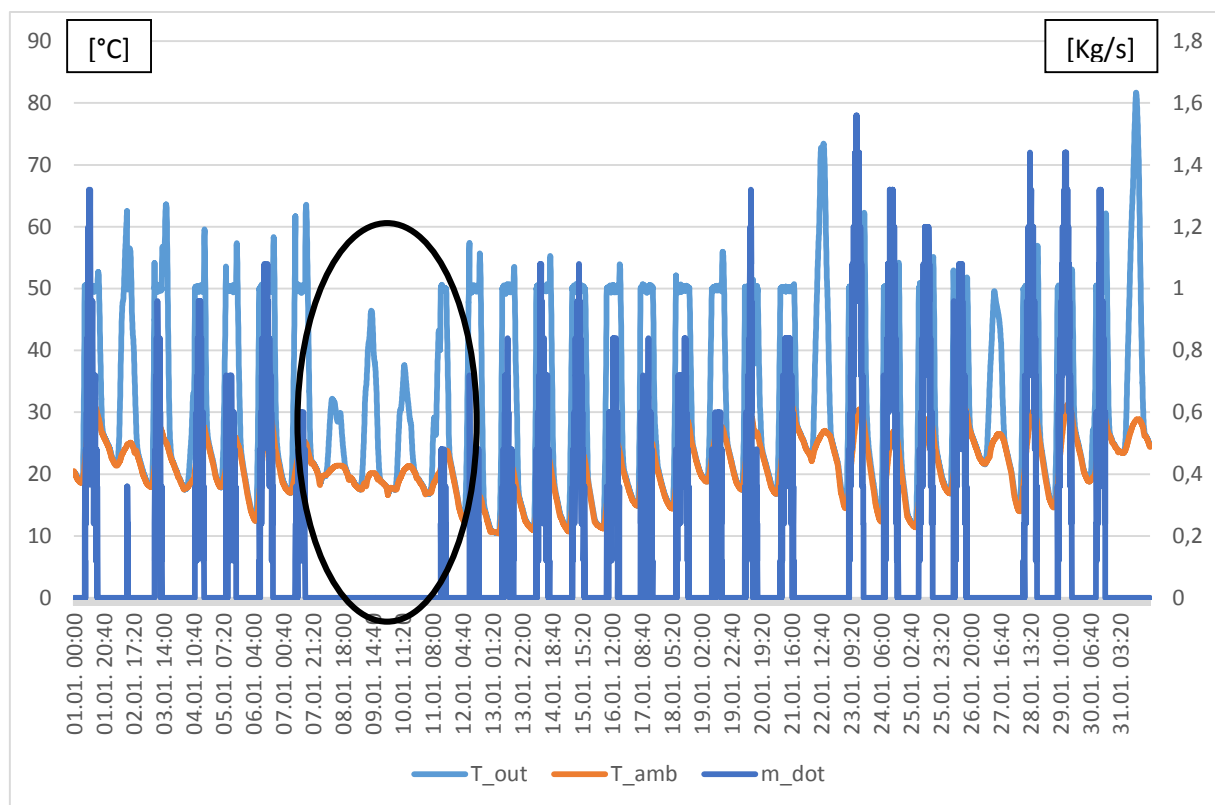


Abbildung 35: Energieversorgung durch Solar, Ausfallzeiten, aus Simulation mit Simulink

8. Regelung der Trocknungsanlage

Sowohl die Versorgung des Trockners mit Wärme aus Biogas als auch die mit solarer Wärme muss geregelt werden. Dazu sind teils mehrere Alternativen vorstellbar, welche im Folgenden näher betrachtet werden.

8.1 Regelungarten der solaren Versorgung

8.1.1 Regelungsart 1

Die Trocknung wird so geregelt, dass das Trocknungsmedium beim Eintritt in den Trockner eine Temperatur von 50°C besitzt. Durch die ungleichmäßige Solarstrahlung wird jedoch auch eine ungleichmäßige Leistung von den Solar-Luft-Kollektoren bereitgestellt. Um dennoch eine gleichbleibende Temperatur zu realisieren, wird der Volumenstrom verändert. Wird der Volumenstrom bei gleichbleibender solarer Einstrahlung erhöht, reduziert sich die Temperatur des Luftstromes. Wird er hingegen verringert, erhöht sich die Temperatur. Dies kann durch die Formel (3.1) nachvollzogen werden. Ist jedoch zu wenig Solarstrahlung vorhanden, um eine Trocknung zu ermöglichen, wird je nach Bedarf eine zweite Wärmequelle benötigt, die den Differenzvolumenstrom zwischen Soll- und Ist-Volumenstrom ausgleicht.

Im Diagramm in Abbildung 36 wird diese Tatsache deutlich sichtbar.

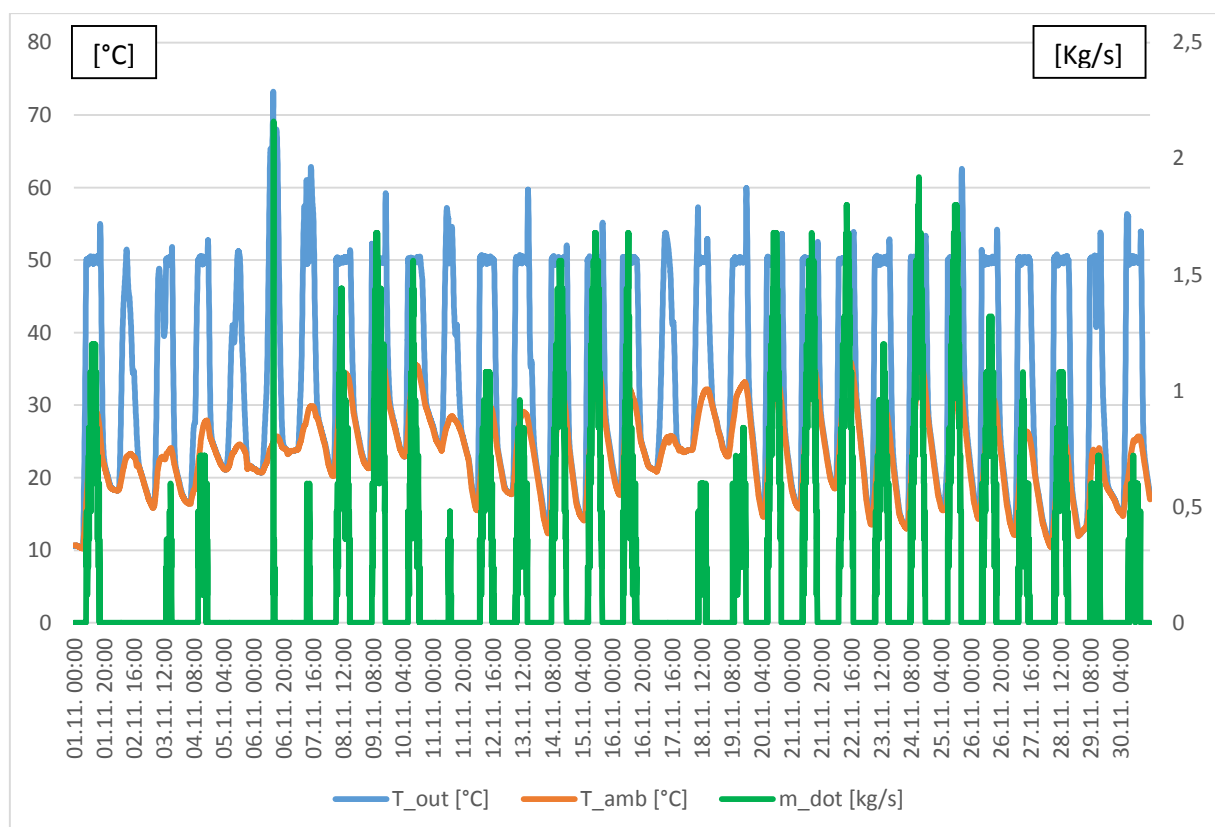


Abbildung 36: Temperaturen und Solarstrahlung Solar-Luft-Kollektor, mit geregelter Massenstrom

Die Abbildung 36 stammt aus einer Simulation, in der ein Solar-Luft-Kollektor in Matlab Simulink mit dem Blockset Carnot aufgebaut ist und mit den Wetterdaten von Lusaka gespeist wird. Die Auslegung der Kollektoren ist dabei nach den Auslegungskriterien

von Grammer Solar (Solar, n.d.) durchgeführt, woraus sich eine Kollektorlänge von 10m bei einem Volumenstrom von 600m³/h und einer Temperaturspreizung von 30K ergibt. Ein ausreichender Massenstrom wird erreicht, wenn drei solcher Kollektorreihen parallel geschaltet werden. In diesem Beispiel in Abbildung 36 wird der Monat November betrachtet. Eine Regelung verändert den Luftmassenstrom so, dass, sobald die Einstrahlung hoch genug ist, der Ventilator anläuft und den Massenstrom so einstellt, dass eine Temperatur am Ausgang der Kollektoren von 50°C erreicht wird.

Die grüne Kurve in Abbildung 36 zeigt den Massenstrom der durch die Kollektoren und somit auch durch den Trockner getrieben wird. Zu erkennen ist die große Schwankung des Massenstroms, der durch die Regelung so angepasst wird, dass die Temperatur des Trocknungsmediums so lange und oft wie möglich 50°C erreicht und nicht überschreitet. Die Trocknung wird dadurch sehr unkontinuierlich, da die Trocknungsgeschwindigkeit stark vom Massenstrom des Trocknungsmediums abhängig ist.

8.1.2 Regelungsart 2

Eine weitere Option, die Solaranlage zu regeln, ist, den Massenstrom durch die Solarkollektoren auf einen konstanten Wert zu stellen. Die Temperatur des Trocknungsmediums schwankt dann je nach aktueller Solarstrahlung. Soll jedoch eine konstante Temperatur beibehalten werden, wird eine sekundäre Energieversorgung notwendig, die die Temperatur des Massenstroms auf das gewünschte Temperaturniveau anhebt.

Abbildung 37 zeigt beispielhaft, wie sich eine solche Anlagenregelung auswirkt. Die Daten sind mit Matlab Simulink über das Blockset Carnot erstellt. Es wurde ein Flachkollektor verwendet, der mit Luft anstelle von Wasser arbeitet und ein Massenstrom von 1,5kg/s eingestellt. Die Temperatur der Luft aus der Solaranlage erreicht die gewünschten 50°C nur selten. Eine Verringerung des Massenstroms würde zu einer Erhöhung der Temperatur führen, jedoch ist dann nicht sichergestellt, dass die Temperatur des Trocknungsmediums nicht über 50°C steigt, was zu einer Minderung der Qualität des Gutes führen würde.

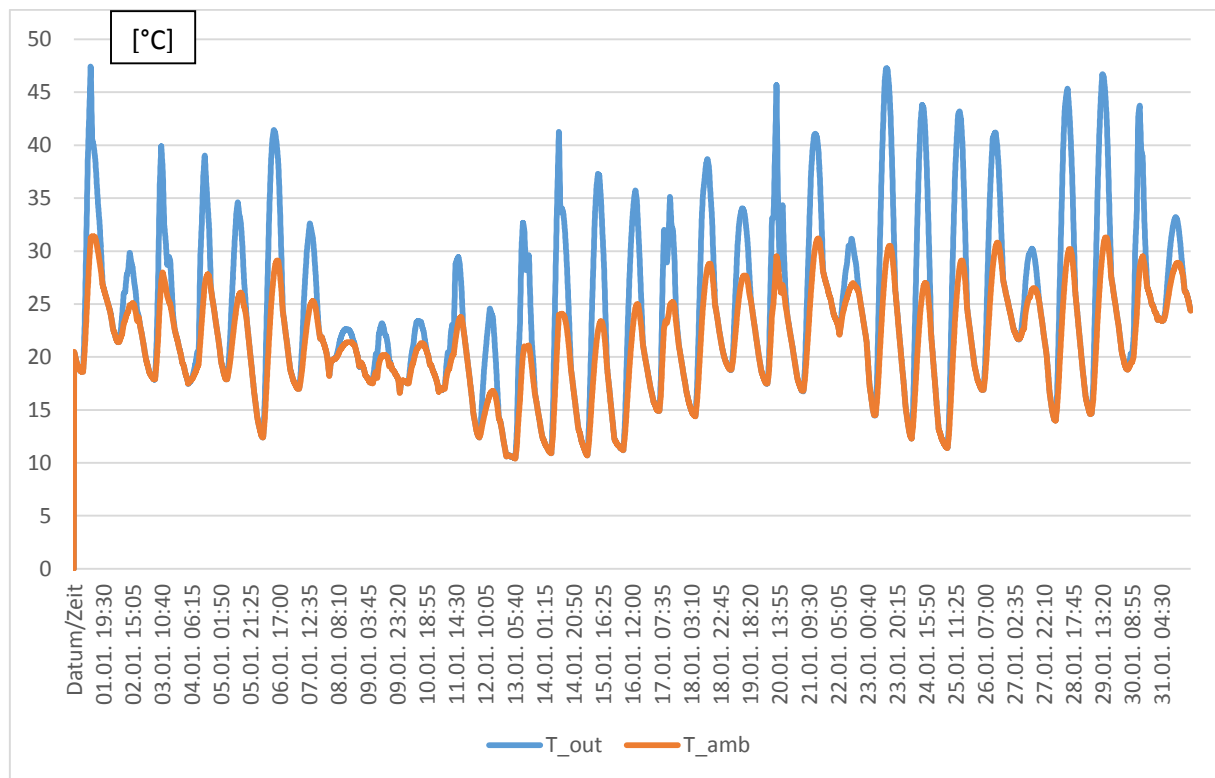


Abbildung 37: Temperaturen an Solar-Luft-Kollektoren mit kontinuierlichem Massenstrom

Die blaue Kurve im Diagramm zeigt die Temperatur der Luft am Austritt der Solar-Luft-Kollektoren. Deutlich zu erkennen ist, dass die Temperatur am Austritt die gewünschten 50°C nicht vollständig erreicht. Die orange Kurve zeigt die Umgebungstemperatur, also auch die Temperatur des in die Solar-Luft-Kollektoren eintretenden Luftmassenstroms.

8.2 Regelung der Biogasversorgung

Bei einer Versorgung des Trockners mit Wärme aus Biogas, wird eine Speicherung des Biogases für die Zeit benötigt, in der die Trocknungsanlage still steht. Das Biogas wird stetig produziert und für den Trocknungsprozess im Speicher vorgehalten. Während des Trocknerbetriebes wird dann das Biogas aus dem Speicher verbraucht. Der Gasbrenner zur Umwandlung der chemisch gebundenen Energie im Biogas in Wärme, bedarf einer Temperaturregelung. Diese erfasst die Umgebungstemperatur und passt damit die Leistungsabgabe des Brenners an die Austrittstemperatur des Trocknungsmediums an.

9. Wirtschaftliche Betrachtung der Konzepte

Unterschiedliche Nutzungsprofile, sowie verschiedene technische Voraussetzungen, der beiden zu analysierenden Farmtypen, führen zu verschiedenen wirtschaftlichen Betrachtungsweisen. Bei der Farm eines durchschnittlichen Landwirtes, die, wie bereits in Kapitel 7 beschrieben, hauptsächlich eine Eigenversorgung mit haltbaren Nahrungsmitteln anstrebt und nur zusätzlich Wahre verkaufen will, spielt die dauerhafte Verfügbarkeit des Trockners, also die durchgehende Energieversorgung zur möglichst schnellen Trocknung, eine weniger wichtige Rolle. Es muss eher darauf geachtet werden, eine Energieversorgung zu wählen, bei welcher der Nutzen im Vergleich zu den Kosten sehr hoch ist. Bei der Farm von Herrn Prof. Sinkala dagegen ist, bedingt durch die kommerzielle Betriebsweise, die Verfügbarkeit der Trocknung sehr wichtig, um die Anlage durch hohe Mengen an absetzbaren Gut möglichst schnell zu amortisieren und Gewinn zu erwirtschaften.

Aus Mangel an Informationen, über die Kosten der benötigten Materialien und Anlagenteilen in Sambia, aber auch von den genauen Verkaufspreisen von Moringa auf den örtlichen Märkten in der Region Lusaka, wird im Folgenden nur eine sehr grobe Abschätzung der Wirtschaftlichkeit, der in Kapitel 7 beschriebenen Konzepte aufgeführt.

9.1 Kosten zum Bau des Trockners

In Tabelle 12 werden die Kosten der einzelnen Trocknerkomponenten grob zusammengestellt. Die Preise sind alle von deutschen Händlern, somit können die Kosten in Sambia deutlich davon abweichen.

Tabelle 12: Zusammenstellung der Trocknerkosten

Material	Menge	Kosten	Quelle
Vierkant Stahlrohr 40x40	33m	225€	(Franz Huisgen, 2014)
Sandwich Paneele 4mm	24,15m ²	651€	(Lücht & Palm Shop, 2014)

Lochblech 10-14	2 x 3,125m ²	150€	(PERFOLINEA, 2014)
Lochblech 4-6	34m ²	918€	(PERFOLINEA, 2014)
Prallblech	1,95m ²	79€	(Blechking, 2015)
Montageteile (eigene Annahme)		150€	
Gesamtpreis:		2.173€	

Der Gesamtpreis für den Trockner beträgt 2.173€. Da angenommen wird, dass der Trockner für die Farm von Herrn Prof. Sinkala genauso groß ist, wie der eines Kleinbauern, unterscheidet sich auch der Preis des Trockners nicht.

9.2 Kosten der Konzepte für einen Kleinbauern

Zu 7.6.1:

Durch den einfachen technischen Aufbau dieses Konzeptes können die Materialkosten gering gehalten werden. Dabei ist das Konzept auf das Nutzungsprofil des Verbrauchers angepasst. Besonders durch die entfallende Regelung, welche teure Sensoren, Aktoren und eine Regelungseinheit einspart, kann eine günstige Bauweise umgesetzt werden.

Der Preis für den Trockner beträgt, wie in Kapitel 9.1 beschreiben 2.173€.

Das Solar-Luft-Kollektor-Konzept Jumbo Solar von Grammer Solar, bei dem alle Komponenten, außer der Photovoltaik Paneele, enthalten sind, kostet, mit 20m² Fläche, 6.695€. Da 30m² benötigt werden, wird angenommen, dass eine passende Solaranlage etwa 10.000€ kostet.

Für die Photovoltaik Anlage bedarf es eines Paneels, das nach Multiplikation mit dem Performance Ratio Faktor, die Leistung von 186W zur Verfügung stellt. Als Faustformel wird hier der Faktor zu 0,8 angenommen. (Weitz, 2014) Es kann also ein

240Wp Modul verwendet werden. Ein solches Modul ist für einen Preis von 167€ zu erwerben (Sauerländer Solarmarkt, 2015)

Zusammen ergibt sich ein Preis von etwa 12.340€.

Zu 7.6.2

Im Vergleich zu Konzept 7.2.1 ist der technische Aufwand deutlich höher, wodurch auch der Preis für die Anlage steigt. Da das Biogas nur selten zur Trocknung benötigt wird, bringt der Bau einer Biogasanlage wenig Nutzen im Vergleich zu dem hohen Aufwand. Zusätzliche Kosten entstehen durch die Vergrößerung der Photovoltaikanlage, die zum Betreiben der Anlage, wegen der fehlenden Netzanbindung an das Stromnetz installiert werden muss. Es kann daher mit mehr als einer Verdoppelung der Kosten im Vergleich zur Konzept 7.2.1 gerechnet werden. Für das Nutzungsprofil eines durchschnittlichen Landwirtes ist diese Art der Anlage unrentabel.

Zu der Solaranlage muss eine Biogasanlage installiert werden. Da keine genauen Preise in dieser kleinen Kategorie von Biogasanlagen zu finden sind, wird der Preis dieser Anlage zu 10.000€ geschätzt. (Baumann, 2014)

Der Gesamtpreis der Anlage beläuft sich auf 22.340€.

9.3 Kosten der Konzepte für die Farm von Herrn Prof. Sinkala

Zu 7.7.1

In diesem Konzept liefert die Biogasanlage eine dauerhafte, schwankungsfrei Energieversorgung, wodurch eine kontinuierliche Trocknung des vorhandenen Guts gewährleistet werden kann. Die Versorgung mit elektrischer Energie aus dem Netz ist, im Vergleich zu einer Versorgung mit Solar- oder Biogasstrom, sehr preiswert, da der Strompreis, verglichen mit Strompreisen anderer Länder sehr günstig ist. Der Strompreis in Lusaka beträgt etwa 0,016 Euro pro kWh. (Lusaka Times, 2014) (Lexas Information Network, 2014)

Eine Biogasanlage in dieser Größe ist zu klein, um sie bei einem der Biogashersteller erwerben zu können. Es wird deshalb angenommen, dass die Anlage etwa 15.000€ kostet. (Baumann, 2014)

Ein Backup-Speicher wird hier nur für kurzzeitige Netzausfälle installiert. Eine große Autobatterie mit 130Ah sollte dafür genügen. Diese kostet etwa 181€ (autobatteriebilliger.de, 2015)

Ein geeigneter Ventilator kostet circa 370€. (growland.net, 2015)

Bei einer Leistung des Ventilators von 186W und einer täglichen maximalen Laufzeit von 7h, bedarf es einer täglichen Menge an elektrischer Energie von 1302Wh. Daraus ergibt sich ein Jährlicher Energiebedarf für den Ventilator von 475,23kWh. Bei dem Strompreis von 0,016€/kWh, kostet die Energieversorgung des Ventilators etwa 6€ pro Jahr.

Zusammen mit dem Trockner belaufen sich die Kosten auf etwa 17.730€.

Zu 7.7.2

Wie in Konzept 7.7.1 versorgt eine Biogasanlage den Trockner mit der benötigten Energie. Jedoch wird hier für die Versorgung der Anlage nicht der Strom aus dem Netz verwendet, sondern mittels Photovoltaikanlage selbst erzeugt. Erhöhungen des Stromtarifs werden damit umgangen. Jedoch ist eine Installation einer Photovoltaikanlage und eines Speichersystems notwendig. Beide Einheiten sind angesichts des niedrigen Strompreises nicht empfehlenswert, da eine Amortisation innerhalb der Lebensdauer nicht vorstellbar ist.

Bei einer Leistung des Ventilators von 186W und einer täglichen Laufzeit maximal 7h, bedarf es einer täglichen Menge an elektrischer Energie von 1302Wh. Sollte die Photovoltaikanlage eine Woche ausfallen, muss der Speicher 9114Wh bereitstellen. Batteriespeicher sollten zur Vermeidung von Tiefenentladung und zum Erhalt der Lebensdauer nie vollständig entladen werden. Wird angenommen, dass der Speicher dauerhaft 30% seiner Ladung behält, muss ein Speicher mit 11848Wh installiert werden. Ein 10000Wh Speicher kostet in Deutschland etwa 15.000€ (TST Photovoltaik Shop, 2015). Auch die Ladung des Speichers muss nach einer Entladung sichergestellt werden. Dazu muss die Photovoltaikanlage so ausgelegt werden, dass

nach spätestens zwei Tagen mit entsprechender Solarstrahlung, der Speicher wieder voll ist. Wird ein Modul mit einer Leistung von 180Wp installiert und ein Performance Ratio Faktor von 80% angenommen, wird an einem Tag mit 7h Sonnendauer etwa 1000Wh Elektrizität erzeugt. Es müssen also mindestens 5 Paneele von diesem Modultypen installiert werden. Bei einem Modulpreis von 106€ (SecondSol, 2015) beträgt der Gesamtpreis für die Anlage 530€.

Die Gesamtkosten der Anlage belaufen sich damit auf etwa 32.703€.

Zu 7.7.3

Die Kombination von einer solarthermischen Anlage, in diesem Fall ein Solar-Luft-Kollektor-Feld, ermöglicht es eine kleinere Biogasanlage zu installieren. Aus wirtschaftlicher Sicht spart dieses Konzept jedoch nur wenig ein. Es muss eine anspruchsvollere Regelung mit deutlich mehr Sensoren und Aktoren verbaut werden. Zudem werden die Nutzungszeiten der Biogasanlage reduziert und ein großer Biogasspeicher wird benötigt, der bei mehrtägigem Stillstand der Solaranlage die Trocknung betreiben kann.

Solar-Luft-Kollektor-Konzept Jumbo Solar von Grammer Solar mit 20m² Fläche kostet 6695€. Da 30m² benötigt werden, wird angenommen, dass eine passende Solaranlage etwa 10000€ kostet.

Die zusätzliche Biogasanlage fällt deutlich kleiner aus als bei einer reinen Biogasversorgung wie in Kapitel 7.7.1. Es wird also angenommen, dass die Biogasanlage nur noch Investitionskosten von etwa 6.000€ verursachen. Es wird jedoch ein großer separater Speicher benötigt, der die Schwankungen der Solarstrahlung ausgleichen kann. Dabei kostet ein Speicher je m³ etwa 17-25€ (Baur, 2013). Wenn eine Bereitstellung von Biogas für eine Woche angenommen wird, Methan eine Energiedichte von 10kWh/m³ besitzt und maximal 100kWh pro Trocknungsvorgang benötigt werden, wird angenommen, dass ein Speicher von 80m³ benötigt wird. Der Speicher kostet also mindestens 1.360€.

Zudem kommt eine Regelungseinheit mit Sensoren und Aktoren. Eine Pauschale von 1.000€ sollte dafür ausreichen.

Es ergeben sich zusammen mit dem Trockner Kosten von etwa 20.533€.

9.4. Verkaufserlös

Der Marktpreis von Moringapulver in Sambia ist nicht in Erfahrung zu bringen, jedoch ist durch den Bezug von Moringapulver aus Botswana bekannt, dass dort, auf den lokalen Märkten, der Preis für 1kg Moringapulver etwa 3 – 4€ beträgt. Wird das Produkt für etwa 2€ verkauft, bietet sich ein jährlicher Umsatz von 21.600€, bei Verkauf der gesamten produzierten Ware.

10. Auswahl der Konzepte

In Tabelle 13 werden die Kosten der einzelnen Konzepte für die Farm von Herrn Prof. Sinkala mit den Erlösen des Verkaufs verglichen und abgeschätzt wie lange die Amortisation ohne Zinsen und Arbeitskosten dauern würde.

Tabelle 13: Kostenvergleich der Konzepte für Herrn Prof. Sinkala

Konzept	Kosten	Einnahmen	Amortisation
7.3.1	17.730€	21.600€	<1a
7.3.2	32.703€	21.600€	ca. 1,5a
7.3.3	20.533€	21.600€	ca. 1a

Die Einnahmen des Kleinbauern können nicht abgeschätzt werden, da nicht bekannt ist, wie groß der Eigenverbrauch als Nahrungsmittel ist. Außerdem ist es schwer abzuschätzen, wie groß die Gesamtmenge einer Jahresproduktion ist, da die Fluktuationen in der Energiegewinnung durch die Solar-Luft-Kollektoren nicht bekannt sind.

Für die relativ große Farm von Prof. Sinkala empfiehlt es sich den Trockner ausschließlich mit Biogas zu betreiben. Es werden dadurch Schwankungen in der Energiebereitstellung vermieden, wodurch eine kontinuierliche Produktion gewährleistet wird. Außerdem ist keine zusätzliche Installation von weiteren technischen Anlagenteilen notwendig, was zu Fehlervermeidung und Kosteneinsparung beiträgt. Die Versorgung mit elektrischer Energie sollte durch das

Netz erfolgen. Die Strompreise sind relativ niedrig und es wird nur eine vergleichsweise geringe Menge elektrischer Energie benötigt. Eine Installation einer Photovoltaikanlage würde technisch zwar Sinn ergeben, jedoch kann durch die niedrigen Strompreise nicht angenommen werden, dass eine Amortisation eintritt. Auch der Preis dieser Anlage ist niedriger als bei den anderen Konzepten. Die Kosten werden durch den Verkauf des Produktes in kurzer Zeit wieder erwirtschaftet.

Für eine durchschnittliche Farm in Sambia kann dieses Konzept jedoch nicht aufgegriffen werden. Die Menge an Reststoffen reicht nicht aus um genügend Energie für eine Trocknung bereitstellen zu können, die rein auf Biogas basiert. Die aus solarer Sicht gesehen günstige Lage, aber auch das unterschiedliche Nutzungsprofil im Vergleich zur Farm von Herrn Prof. Sinkala machen es jedoch möglich, die Trocknung mit Solarenergie zu betreiben. Eine Unterstützung durch eine Biogasanlage kann dabei nicht empfohlen werden, da der technische Aufwand und die damit verbundenen Kosten die Möglichkeiten eines Kleinbauern deutlich überschreiten. Die Mehrproduktion durch die dauerhafte Bereitstellung an Energie zur Trocknung durch die Biogasanlage steht in keinem Verhältnis zu den Kosten, die durch den Bau der Biogasanlage entstehen.

11. Schlussfolgerungen und Ausblick

Es ist also für die Farm von Herrn Prof. Sinkala in jedem Fall ratsam eine Trocknungsanlage zu installieren, auch wenn in dieser Arbeit die Kosten nur sehr ungenau abgeschätzt werden können. Der Betrieb einer Biogasanlage ist dank der großen Anzahl an Vieh durchaus möglich, jedoch durch die Art der Haltung mit viel Aufwand verbunden. Die Trocknung mit einem Trockner verhindert Verluste, die bisweilen durch mangelnde Trocknung vorkommen. Auch wird ein Auslegen der Blätter auf großen Flächen nicht mehr nötig, wodurch ein großer Arbeitsaufwand vermieden wird.

Dem durchschnittlichen, ländlichen Farmer bietet der Trockner gute Möglichkeiten, qualitativ hochwertige, haltbare Nahrungsmittel herzustellen. Hier kann der Trockner für die Produktion verschiedener Güter benutzt werden, falls diese gerade in zu großer Menge zum frischen Verzehr zur Verfügung stehen. Der Trockner ermöglicht dem

Farmer haltbare Produkte herzustellen, die im Gegensatz zu Frischware, länger zu verkaufen sind und sich somit leichter auf Märkten verkaufen lassen, wodurch ein größeres Einkommen entsteht. Ob und wie der Bau eines Trockners finanziert werden kann ist vorerst fraglich.

Um genauere Aussagen über die Trocknung machen zu können fehlen einige wichtige Informationen, die bislang noch nicht in Erfahrung gebracht oder durch fehlende Untersuchungsmöglichkeiten nicht genauer betrachtet werden konnten. Unter diesem Vorbehalt werden im Folgenden das weitere Vorgehen und mögliche nächste Schritte betrachtet.

11.1 Weitere Analyse der Reststoffe

Die tatsächlich zur Verfügung stehende Menge an tierischen Reststoffen kann in der Theorie nur durch Faustzahlen festgelegt werden. Die Menge an Biogas, die aus den Reststoffen gewonnen werden kann, ist also nur ein Anhaltswert. Wird der Bereitstellung von Wärme aus Biogas weiter nachgegangen, ist eine genauere Betrachtung der Reststoffe unumgänglich. Dazu müssen Proben des Dungs auf ihre Inhaltsstoffe untersucht werden, wodurch die Biogasausbeute genauer abgeschätzt werden kann. Außerdem muss die tatsächlich zur Verfügung stehende Menge an tierischen Reststoffen ermittelt werden, was nur durch eine Versuchsreihe, bei der die Exkrememente auf den Weiden gesammelt und gewogen werden, verlässlich geschehen kann.

Auch andere Reststoffe müssen auf die Verfügbarkeit und die Biogastauglichkeit untersucht werden. Vor allem die Zweige und Äste des Moringabaumes bieten sich hier an, da sie zusammen mit den Blättern geerntet werden. In diesem Zusammenhang kann auch die direkte thermische Umwandlung von Reststoffen, wie cellulosehaltiger Stoffe, untersucht werden.

11.2 Weitere Untersuchung der Trocknung

Um die Trocknung genauer zu untersuchen, reicht es nicht aus einzelne Versuche durchzuführen. Relevante Ergebnisse müssen durch Versuchsreihen von

Trocknungen ermittelt werden. Dabei sollte auch eine Versuchsreihe zum Feststellen des durchschnittlichen Wassergehaltes von Moringablättern durchgeführt werden. Mit dem bereits erstellten Versuchstrockner können diese beiden Untersuchungen durchgeführt werden.

Ein wichtiger Punkt der zudem untersucht werden sollte, ist der Umluft Betrieb der Anlage. Da die Beladung der Luft fortwährend sinkt, kann die Umluft in eventuell die Umluft ein mit Frischluft vermischt und anschließend vom Wärmeerzeuger aufgeheizt werden. Dadurch ließe sich ein kleinerer Temperaturhub erzielen und Energie einsparen, was zu einem kleineren Wärmeerzeuger führen kann.

Ein weiterer Versuch, der mit dem Versuchstrockner durchgeführt werden sollte, ist eine Trocknung, bei der das Gut im Trockner zu gewissen Zeiten manuell durchmischt wird. Die Durchmischung kann zu einer schnelleren Trocknung führen, wodurch Energie eingespart wird und ein kleinerer, kostengünstigerer Energieerzeuger installiert werden könnte.

Die Größe des Trockners für die ländliche Bevölkerung könnte anders ausfallen als die der Farm von Prof. Sinkala. Dabei sollte weiter untersucht werden, welche Mengen an Gütern bei einem Kleinbauern zur Trocknung anfallen. Auch wäre es sinnvoll zu untersuchen, ob ein Zusammenschluss mehrerer Kleinbauern möglich ist, oder ob, z.B. die Wege zwischen den Farmstandorten zu groß sind. Aus diesen Erkenntnissen können dann das Fassungsvermögen und die Größe des Trockners angepasst werden.

Die Wirtschaftlichkeit des Trockners wird maßgeblich durch dessen Energieverbrauch beeinflusst. Es ist zu untersuchen, ob durch eine Vortrocknung des Gutes, durch das Ausbreiten auf den Netzen, wie es bisher zur Trocknung getan wird, Energie eingespart und die Trocknungszeit im Trockner verkürzt werden kann.

11.3 Weitere Betrachtung der Energiebereitstellung

Deutlich wurde, dass der Energiebedarf je nach Nutzungsbedingungen sehr unterschiedlich ist. Bei dem ausgewählten Konzept für die relativ große Farm von Herrn Prof. Sinkala wird ein Konzept gewählt, bei dem kontinuierlich Energie bereitgestellt werden kann. Diese ständige Verfügbarkeit ist jedoch sehr teuer und nur

rentabel, wenn dementsprechend viel produziert und verkauft werden kann. Für eine kleine Farm ist der Preis dieser hohen Verfügbarkeit zu teuer, aber auch die Bereitstellung von ausreichend tierischen Reststoffen ist nicht gegeben. Die Wahl für diese Farm ist deshalb eine einfach regelbare Solar-Luft-Kollektor Anlage, dabei ist nur bei genügender solarer Einstrahlung eine Trocknung garantiert. Es wäre für den weiteren Verlauf sinnvoll, die Trocknung bei den verschiedenen Temperatur- und Feuchtebedingungen und der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung mittels einer Simulation zu untersuchen. Dadurch kann die Masse an Trocknungsgut besser abgeschätzt werden, die durch die solare Trocknung bearbeitet werden kann.

11.4 Weitere wirtschaftliche Betrachtungen

Eine Umsetzung des Trockners ist nur möglich, wenn dessen Kosten von einem Bauern in Sambia bezahlt werden können. Die genaue Bestimmung der Kosten des Trockners macht eine genauere Betrachtung der Verfügbarkeit und des Preises der einzelnen benötigten Materialien und Komponenten vor Ort unumgänglich. Weiter muss auch der Markt für Moringa Produkte vor Ort analysiert werden, wodurch die Absatzmenge und der Preis der Produkte ermittelt werden kann. Besonders wichtig ist es, gerade für die ländliche Bevölkerung, herauszufinden welche weiteren Trocknungsgüter bereitstehen und ob sie im Trockner getrocknet werden könnten. Dadurch können Einnahmenquellen generiert werden, die die Wirtschaftlichkeit des Trockners deutlich verbessern.

Die Einführung einer Einspeisevergütung in Sambia, wird von der dortigen Regierung gerade besprochen. Sollte es in absehbarer Zeit zu einer Einführung einer Einspeisevergütung kommen, könnte ein Konzept mit einem BHKW sinnvoll sein. Die Nutzung der elektrischen Energie und der Abwärme verbessert die Wirtschaftlichkeit deutlich.

Literaturverzeichnis

Anwar, F., et al. 2007. *Moringa oleifera: A Food Plant with Multiple Medicinal Uses*. Pakistan : Wiley Inter Science, 2007.

Archea Service. n.d.. *Gaserträge und Nährstoffgehalte - NawaRo*. Eindhoven (NL) : ARCHEA Service GmbH, n.d.

autobatteriebilliger.de. 2015. [www.autobatteriebilliger.de](https://www.autobatteriebilliger.de/Banner-Energy-Bull-96051-130Ah?gclid=CKz9uJ3_-clCFQPHtAod9W0AIQ). [Online] 2015. [Zitat vom: 04. Januar 2015.] https://www.autobatterienbilliger.de/Banner-Energy-Bull-96051-130Ah?gclid=CKz9uJ3_-clCFQPHtAod9W0AIQ.

Barta, C. 2011. *-Moringa oleifera-*. Venlo, Niederlande : Das Neue Licht Verlag, 2011.

Baumann, C. 2014. *biogas-zu-hause*. [Online] BIOGAS-ZU-HAUSE, 2014. [Zitat vom: 19. November 2014.] <http://www.biogas-zu-hause.de/liste.html>.

Baur, F. 2013. *Bereitstellungspotenziale für eine flexible Stromerzeugung*. Berlin : IZES gGmbH, 2013.

Becker, K. 2008. *Die Wunderpflanze Jatropha?* Hohenheim : Jatro Solutions, 2008.

BGB. 2014. *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014)*. 2014.

Biologie-schule.de. 2014. *Biologie-Schule*. [Online] 2014. [Zitat vom: 3. November 2014.] <http://www.biologie-schule.de/photosynthese-fotosynthese.php>.

Blechking. 2015. *Blechking*. [Online] Blechking, 2015. [Zitat vom: 8. Januar 2015.] <http://blechking.de/blechselektor/#content>.

Blume, R. 2002. *chemieunterricht.de*. [Online] 2002. [Zitat vom: 15. Oktober 2014.] http://www.chemieunterricht.de/dc2/wsu-bclm/kap_02c.htm.

Bschorer, S. 2013. *Strömungsmechanik*. Technische Hochschule Ingolstadt : Bschorer, S., 2013.

CHEMIE.DE Information Service GmbH. 2014. *www.chemie.de*. [Online] 2014. <http://www.chemie.de/lexikon/Materialfeuchte.html>.

CVB s.r.o Ventilatoren und Klimaanlage. 2015. *Ventilator-Shop*. [Online] 2015. [Zitat vom: 4. Januar 2015.] http://www.ventilator-shop.com/go_image.php?pid=4678.

Dechema. 2010. *"Technische Chemie"*. Idstein : Dechema, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2010.

Deutsche/ Europäische Norm. 2001. *DIN EN 12880*. Berlin : Beuth Verlag, 2001.

Extreme-House OHG. 2014. *extreme-house*. [Online] 2014. [Zitat vom: 10. Dezember 2014.] http://www.extreme-house.de/images/product_images/original_images/1448_0.jpg.

Fahey, J. 2005. *Moringa oleifera: A Review of the Medical Evidence for Its Nutritional, Therapeutic and Prohylactic Properties. Part1*. Maryland, USA : Jed W. Fahey, 2005.

Franz Huisgen. 2014. *stahlshop*. [Online] 2014. [Zitat vom: 08. Januar 2014.] <http://www.stahlshop.de/stahl-produkte/stahl-rohre/stahl-rohre-vierkantrohr/vierkantrohr-40-x-40-x-2-0-detail>.

Fuglie, L. n.d.. *The Moringa Tree*. Daka, Senegal : Fuglie, L, n.d.

Goldbrunner, M. 2014. *Skript Anlagentechnik Biogas*. Ingolstadt : Goldbrunner, M., 2014.

growland.net. 2015. Growland. [Online] 2015. [Zitat vom: 04. Januar 2015.]
<http://www.growland.net/S-P-Halbradialer-Rohrventilator-TD-2000-315>.

Hakenesch, P. 2014. *Fluidmechanik*. 23 : Dezember, 2014.

HAW-Hamburg. n.d.. haw-hamburg. [Online] n.d. [Zitat vom: 17. Dezember 2014.]
<http://www.mp.haw-hamburg.de/pers/Gheorghiu/Vorlesungen/TTS/Skript/4/Nikuradse.jpg>.

HNB Nordblech GmbH. 2015. isopanele.com. [Online] 2015. [Zitat vom: 10. Dezember 2014.]
http://isopanele.com/wp-content/uploads/2013/02/NB_ISO_Wand_SB_grau.jpg.

ILK Dresden. 2014. *Software zur Darstellung von Prozessen im Mollier - h,x - Diagramm*. [Excel]
Dresden : ILK Dresden, 2014.

Kaltschmitt, Martin, Hartmann, Hans und Hofbauer, Hermann. 2009. *Energie aus Biomasse*.
Leipzig/Hamburg, Straubing, Wien : Springer-Verlag, 2009.

Kreller, M., et al. 2009. *Luftfeuchtigkeit*. Dresden : Technische Universität Dresden, 2009.

Krischer, O. und Kast, W. 1978. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Berlin
Heidelberg New York : Springer-Verlag, 1978.

Kröll, K. 1978. *Trockner und Trocknungsverfahren*. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 1978.

Kröll, K. und Kast, W. 1989. *Trocknen und Trockner in der Produktion*. Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo : Springer-Verlag, 1989.

KTBL. 2013. *Faustzahlen Biogas*. Darmstadt : Kuratorium für Technik und Bauwesen in der
Landwirtschaft e.V., 2013.

Landesuntersuchungsamt Rheinland-Pfalz. n.d.. lua.rlp. *Landesuntersuchungsamt Rheinland-Pfalz*.
[Online] n.d. [Zitat vom: 17. Dezember 2014.] <http://lua.rlp.de/tiergesundheits/tierische-nebenprodukte/?print=1&cHash=3cc3aff4494df2e696f104560986a5fc>.

Lexas Information Network. 2014. lexa.biz. [Online] 2014. [Zitat vom: 27. Dezember 2014.]
<http://www.lexa.biz/wechselkurse/sambia.aspx>.

Lubungu, M. 2013. *Smallholder Livestock Production and Challenges in Zambia*. Lusaka, Zambia :
Indaba Agricultural Policy Research Institute, 2013.

Lücht & Palm Shop. 2014. Luecht-Palm. [Online] 2014. [Zitat vom: 08. Januar 2015.]
<http://www.luecht-palm.de/index.php?cl=details&cnid=0f4f08358666c54b4fde3d83d2b7ef04&anid=a8003fa6b7af17e61bc0f7c99c4f5aa3&listtype=list&&>.

Lüdicke, C. 2014. Dem Winter trotzen. *natur & heilen*. Dezember 2014, S. 29-30.

Lusaka Times. 2014. www.lusakatimes.com. [Online] 10. Juni 2014.
<http://www.lusakatimes.com/2014/06/10/zesco-tariff-increase-minimal-every-ordinary-person-kapata/>.

Nordluft GmbH und Co. KG. 2014. Nordluft. <http://www.nordluft.com>. [Online] 2014. [Zitat vom: 25. 12 2014.] <http://www.nordluft.com/index.php?id=108>.

Päßler, T. 2009. *Entwicklung einer Konvektionstrocknungsanlage mit Lufttrocknung durch solarthermisch regenerierte Flüssigsorptionsmittel.* Stuttgart : HfT - Hochschule für Technik Stuttgart, 2009.

PERFOLINEA. 2014. Shopmetal. [Online] PERFOLINEA, 2014. [Zitat vom: 8. Januar 2015.] <http://www.shopmetal.de/lochbleche/?s=3>.

Rümping, T. 2008. *Reisebericht Busunu-Projekt.* Busunu : Rümping, T., 2008.

Sauerländer Solarmarkt. 2015. sauerlander-solarmarkt.de. [Online] 2015. [Zitat vom: 04. Januar 2015.] <http://sauerlaender-solarmarkt.de/pv-module/Sunrise/Sunrise-SR-P660240-240-Wp-poly.html>.

Schelle, R. und Sander, K. *Energetische Betrachtung von Trocknungsverfahren.* Stuttgart : Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.

schweizer-fn. 2014. schweizer-fn. [Online] 25. September 2014. [Zitat vom: 20. Dezember 2014.] <http://www.schweizer-fn.de/stroemung/rauhigkeit/rauhigkeit.php>.

SecondSol. 2015. Secondsol. [Online] 2015. [Zitat vom: 03. Januar 2015.] http://www.secondsol.de/handelsplatz/marktplatz_anzeige,1629,180-Wp-Mono.htm.

Sinkala, T. 2014. 13. Oktober 2014.

Sinkala, T. 2014. *Thomro Moringa World 23Sept2014.* Lusaka : Thomro Investments Limited, 2014.

Soika, A. 2014. *Klimatisierungstechnik.* Technische Hochschule Ingolstadt : Soika, A., 2014.

Soika, Armin. 2013. *Thermodynamik 2.* Technische Hochschule Ingolstadt : Soika, A., 2013.

Solar, Grammer. n.d.. *JumboSolar - GLK, Technisches Handbuch.* Amberg : Grammer Solar, n.d.

Spektrum Akademischer Verlag. 2001. Spektrum der Wissenschaft. *spektrum.de.* [Online] 2001. [Zitat vom: 5. November 2014.] <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/blatt/1631>.

Straub, F. 2002. *Nutzung von Abwärme aus einem Dampf-Heizkraftwerk zur energieoptimierten Trocknung.* München : Technische Universität München, 2002.

TST Photovoltaik Shop. 2015. Photovoltaik-Shop. [Online] 2015. [Zitat vom: 03. Januar 2015.] <http://www.photovoltaik-shop.com/alpha-ess-3-kw-mit-einer-speicherkapazitat-von-10-kwh.html?destination=node/255>.

Universität Jena. n.d.. *Vesuch 2.7. Trocknung.* Jena : Universität Jena, n.d.

Weitz, P. 2014. *Photovoltaik.* Technische Hochschule Ingolstadt : Weitz, P., 2014.

Wetterkontor GmbH. 2014. wetterkontor. [Online] 2014. [Zitat vom: 22. November 2014.] <http://www.wetterkontor.de/de/klima/klima2.asp?land=ZM&stat=67665>.

wikimedia. 2014. wikimedia. [Online] 2014. [Zitat vom: 30. Oktober 2014.] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7a/Leaf_Tissue_Structure_de.svg/2000px-Lf_Tissue_Structure_de.svg.png.

wikimedia. 2014. wikimedia. [Online] 2014. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f1/Moringa_oleifera_Blanco1.125.png.

Zörner, W. 2014. *Solarthermie.* Technische Hochschule Ingolstadt : Zörner, W., 2014.

Anhang:

Tabelle 14: Datenerfassung und Auswertung Versuch im Analyseofen

Messungsnummer:	Gewicht in g:	Trocknesubstanz:	Wassergehalt in g:	Wassergehalt in %:	Zeit:	Trocknungsgeschwindigkeit in g/s:
1	13,4303	3,3605	10,0698	74,97822089	09:49	0,00116383
2	12,732	3,3605	9,3715	73,60587496	09:59	0,000973
3	12,1482	3,3605	8,7877	72,33746563	10:09	0,0008025
4	11,6667	3,3605	8,3062	71,19579658	10:19	0,00079683
5	11,1886	3,3605	7,8281	69,96496434	10:29	0,000747
6	10,7404	3,3605	7,3799	68,71159361	10:39	0,00068767
7	10,3278	3,3605	6,9673	67,46160847	10:49	0,0006445
8	9,9411	3,3605	6,5806	66,19589381	10:59	0,00056433
9	9,6025	3,3605	6,242	65,00390523	11:09	0,00059
10	9,2485	3,3605	5,888	63,66437801	11:19	0,00049783
11	8,9498	3,3605	5,5893	62,4516749	11:29	0,00050083
12	8,6493	3,3605	5,2888	61,14714486	11:39	0,0004715
13	8,3664	3,3605	5,0059	59,83338114	11:49	0,00047133
14	8,0836	3,3605	4,7231	58,42817557	11:59	0,00041767
15	7,833	3,3605	4,4725	57,09817439	12:09	0,00040717

16		7,58 87	3,3605	4,2282	55,7170 5299	12:1 9	0,000384
17		7,35 83	3,3605	3,9978	54,3304 8394	12:2 9	0,0003735
18		7,13 42	3,3605	3,7737	52,8959 0984	12:3 9	0,00033917
19		6,93 07	3,3605	3,5702	51,5128 342	12:4 9	0,00031617
20		6,74 1	3,3605	3,3805	50,1483 4594	12:5 9	0,00028233
21		6,57 16	3,3605	3,2111	48,8632 9052	13:0 9	0,0002755
22		6,40 63	3,3605	3,0458	47,5438 2405	13:1 9	0,00027567
23		6,24 09	3,3605	2,8804	46,1535 9964	13:2 9	0,0002455
24		6,09 36	3,3605	2,7331	44,8519 7584	13:3 9	0,00023633
25		5,95 18	3,3605	2,5913	43,5380 8932	13:4 9	0,000244
26		5,80 54	3,3605	2,4449	42,1142 3847	13:5 9	0,00019633
27		5,68 76	3,3605	2,3271	40,9153 2457	14:0 9	0,00020217
28		5,56 63	3,3605	2,2058	39,6277 5991	14:1 9	0,00019667
29		5,44 83	3,3605	2,0878	38,3202 0997	14:2 9	0,000259
30		5,29 29	3,3605	1,9324	36,5092 8602	14:3 9	0,0003145
31		5,10 42	3,3605	1,7437	34,1620 6262	14:4 9	0,00024767
32		4,95 56	3,3605	1,5951	32,1878 2791	14:5 9	0,0002575
33		4,80 11	3,3605	1,4406	30,0056 2371	15:0 9	0,00024517

34		4,65 4	3,3605	1,2935	27,7932 9609	15:1 9	0,00026717
35		4,49 37	3,3605	1,1332	25,2175 2676	15:2 9	0,00025817
36		4,33 88	3,3605	0,9783	22,5477 0904	15:3 9	0,0002305
37		4,20 05	3,3605	0,84	19,9976 1933	15:4 9	0,00020017
38		4,08 04	3,3605	0,7199	17,6428 7815	15:5 9	0,00017617
39		3,97 47	3,3605	0,6142	15,4527 3857	16:0 9	0,000157
40		3,88 05	3,3605	0,52	13,4003 3501	16:1 9	0,00013517
41		3,79 94	3,3605	0,4389	11,5518 2397	16:2 9	0,00011917
42		3,72 79	3,3605	0,3674	9,85541 4577	16:3 9	8,1167E-05
43		3,67 92	3,3605	0,3187	8,66220 9176	16:4 9	8,6167E-05
44		3,62 75	3,3605	0,267	7,36044 1075	16:5 9	5,7833E-05
45		3,59 28	3,3605	0,2323	6,46570 9196	17:0 9	
Ermittlung des Restwassers:							
Versuchsnummer	Masse [g]:	Trockensubstanz	Wassergehalt in g:	Wassergehalt in %:	Zeit	Es wird jeweils alle 15 min gewogen, Temperatur 105°C	
1		3,59 28				17:2 0	
2		3,37 53				17:3 5	

3		3,36 95				17:5 0	
4		3,36 26				18:0 5	
5		3,36 15				18:2 0	