

Schlussbericht :

Ökologische Fruchttrocknung für Entwicklungsländer

Entwicklung eines Low-Cost Kondensationstrockners



Autoren:

Akos, Lukacs, Ökozentrum

Andreas, Gschwend, NTB Buchs

Prof. S. Bertsch (Institutsleiter IES, NTB Buchs)

Datum des Berichts:
REPIC Vertragsnummer:
Numéro du projet REPIC:

Land: Burkina Faso	Technologie: Wärmepumpe
Projektdauer: 1.5 Jahre	Projektkategorie: Energieeffizienz

Ausgearbeitet durch:

ökozentrum

Schwengiweg 12, CH-4438 Langenbruck

Tel : +41 62 387 31 11 ; Fax : +41 62 390 16 40, info@oekozentrum.ch, www.oekozentrum.ch

ökozentrum

forschen | entwickeln | bilden

NTB, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs

Werdenstrasse 4, CH-9471 Buchs

Tel: +41 81 755 33 11, Fax : +41 81 755 32 01, office@ntb.ch, www.ntb.ch

Im Auftrag von:

REPIC Plattform

c/o NET Nowak Energie & Technologie AG

Waldweg 8, CH-1717 St. Ursen

Tel: +41(0)26 494 00 30, Fax: +41(0)26 494 00 34, info@repic.ch / www.repic.ch

Unter dem Mandat von:

Staatssekretariat für Wirtschaft SECO

Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit DEZA

Bundesamt für Umwelt BAFU

Bundesamt für Energie BFE

Der oder die Autoren sind allein verantwortlich für Inhalt und Schlussfolgerungen des Berichtes.



Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung.....	5
1	Ziele.....	7
2	Technische Lösung / Angewandte Methodik	9
2.1	Grundlagen.....	9
2.1.1	H-x-Diagramm	9
2.1.2	Trocknungsprozess	9
2.1.3	Anströmung der Früchte.....	10
2.1.4	Wärmepumpe	11
2.1.5	p-h-Diagramm.....	11
2.1.6	Kältekreislauf einer Wärmepumpe	12
3	Resultate	13
3.1	Simulation und Auslegung im Labor der NTB (CH)	13
3.1.1	Verdichter	13
3.1.2	Wärmetauscher	14
3.1.3	Ventilator.....	14
3.1.4	Trocknungsraum.....	15
3.1.5	CAD-Konstruktion.....	16
3.1.6	Betriebsanleitung.....	19
3.2	Messungen	20
3.2.1	Messaufbau	20
3.2.2	Durchgeführte Messungen	21
3.2.3	Vergleich mit Simulation	26
3.2.4	Betrieb des Prototypen	27
3.3	Installation des Kondensationstrockners in Burkina Faso	27
3.3.1	Schulungen am Kondensationstrockner vor Ort.....	28
	Installation, Messdatenerfassung.....	28
3.3.2	28
3.3.3	Versuchsreihen mit dem Prototyp im Feld	29
3.3.4	CO ₂ -Reduktion und Energiekosteneinsparung.....	30
4	Wirkungen	32
5	Zukunftsperspektiven	32
5.1	Optimierung des Kondensationstrockners	32
5.2	Stromversorgung des Kondensationstrockners aus erneuerbaren Energien	32
5.3	Schulungen/Markteinführung Kondensationstrockner	33
5.4	Zusammenfassung der geplanten Tätigkeiten:.....	33
6	Schlussfolgerung.....	34
6.1	Überhitzung des Systems	34
6.1.1	Die Folgen	34
6.1.2	Lösungsansätze.....	34
6.2	Kopplung mit Biogasanlage.....	36
6.2.1	Ausgangslage	36
6.2.2	Optionen für die Stromversorgung des Kondensationstrockners.....	36
7	Referenzen.....	37
7.1	Referenzen zur Entwicklung des Prototyps	37
7.2	Publikationen des Projektes	37

7.3	Dank	37
8	Symbolverzeichnis	38
9	Anhang	39

0 Zusammenfassung

Der Mangoexport ist eine wichtige Einnahmequelle für Burkina Faso. Während der Erntezeit können auf Grund des Überangebotes nicht alle Mangos als Frischware ins Ausland exportiert werden. Große Mengen Mangos werden zur Konservierung vor Ort getrocknet. Momentan werden beinahe ausschließlich Gasöfen zur Fruchttrocknung eingesetzt. Ziel des vorliegenden Projektes ist es, ein Funktionsmuster eines robusten Fruchttrocknungssystems zu bauen, das bezüglich Energieeffizienz und CO₂-Bilanz herkömmlichen Anlagen deutlich überlegen ist. Das System soll später vor Ort mit minimalen Kosten realisiert werden können. Das System soll vor Ort einfach reparierbar sein und von Technikern in Burkina Faso nachgebaut werden können.

Anstelle von Trocknungsverfahren, die auf Gasheizungen beruhen, wird hier der Ansatz einer wärmepumpenbasierten Fruchttrocknung verwendet. Das System soll einerseits einen um 80% geringeren Energiebedarf gegenüber Heizspindel-Elektrotrocknern besitzen und andererseits einen homogenen Temperaturverlauf des Trocknungsprozesses gewährleisten. Dadurch kann der Ausschuss an verbrannten und verfärbten Früchten, von üblicherweise 30% beim konventionellen Gastrockner, vollständig eliminiert werden. Während Wärmepumpen als Trocknungsgeräte in den Industrienationen grundsätzlich bekannt sind, liegt der innovative Ansatz dieses Gerätes im einfachen und preisgünstigen Aufbau. So soll mit vor Ort erhältlichen Baustoffen und Fachkenntnissen die Anlage selbständig nachgebaut werden können.

Durch Simulationen wurden mehrere Systeme und Aufbauvarianten miteinander verglichen. Das ausgewählte System basiert auf einem Prozess mit geschlossenem Luft-Kreislauf. Damit können ungünstige Umgebungseinflüsse, insbesondere hohe Temperatur und Feuchte, vermindert werden. Der Prototyp wurde im Labor in der Schweiz aufgebaut. Es wurden mehrere Trocknungsvorgänge detailliert vermessen und ausgewertet. Das Ergebnis ist ein Fruchttrockner, der eine deutlich bessere Qualität der Trockenfrüchte liefert und im Vergleich zu den heute üblichen Gastrocknern eine Reduktion des CO₂-Ausstosses um fast 50% erreicht. Die hohe Effizienz der Wärmepumpe, auch bei hohen Verdampfungstemperaturen (bis 30°C), soll dazu führen, dass auch die Energiekostenanteil getrockneter Mangos sinkt. Dies obwohl das Gas vom Staat subventioniert ist. Der realisierte Prototyp kann problemlos für Tage und Wochen im Dauerbetrieb eingesetzt werden. Der niedrigere Energieverbrauch und die geringen Materialkosten von unter 2000 Franken für eine Anlage führen zu einem höheren Gewinn für die Plantagenbesitzer.

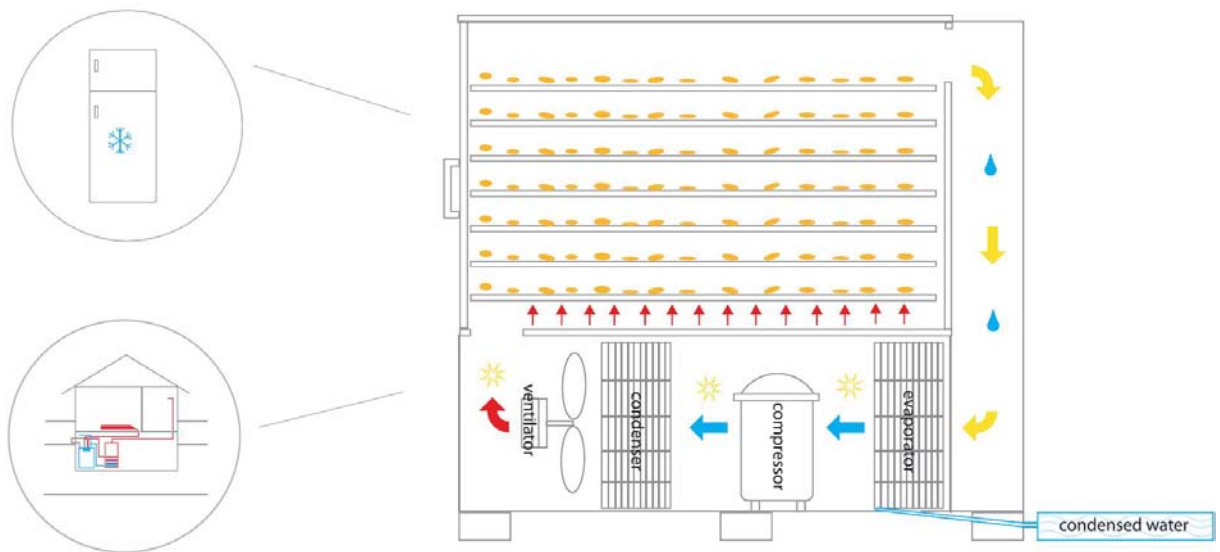
Der Trockner erbrachte im Sommer 2011 in Bobo Dioulasso den angestrebten Funktionsnachweis und lieferte schon bald die ersten getrockneten Mangostücke. Die erhofften Werte bezüglich CO₂- und Energieeinsparung konnten wegen den extremen Umgebungsbedingungen (hohe Luftfeuchte und Temperatur) nicht erreicht werden. Die Umgebungsbedingungen in Bobo Dioulasso konnten im Vorfeld in der Schweiz nicht simuliert werden. Die Qualität der Trockenware ist laut Aussage der Experten von Gebana Afrique erstklassig, was sich in Konsistenz, Geschmack und Farbe widerspiegelt. Inhaltsstoffe werden dank niedrigeren Trocknungstemperaturen geschont. Zusätzlich generiert die Anlage sauberes Kondenswasser, was in Burkina Faso für verschiedene Zwecke benutzt werden kann.

Nach dem positiven Funktionsnachweis des Kondensationstrockners in dieser Machbarkeitsstudie, soll ein Pilotprojekt folgen, das zum Ziel hat durch eine Demonstrationsanlage einen möglichst umweltschonenden und ökonomischen Betrieb der neuen Trocknungsanlagen basierend auf den Gebrauch erneuerbarer Energieressourcen zu präsentieren, sensibilisieren und zu schulen.

Um zukünftig beim Einsatz mehrerer Wärmepumpentrockner das Stromnetz nicht weiter zu belasten, wurden bereits erste, mögliche Stromquellen auf erneuerbarer Basis begutachtet.

Burkina Faso liegt nahe am Äquator und hat durchschnittlich über das ganze Jahr, täglich etwa 8 Stunden Sonneneinstrahlung. Damit wären die Bedingungen für ein Photovoltaik-Inselsystem optimal. Mit Hilfe der Kombination von Biogasgeneratoren, PV-Anlagen und Wärmepumpentrockner wäre eine CO₂ freie Produktion von Mangos in Zukunft vorstellbar. Ein Biogasgenerator zur lokalen Stromerzeugung könnte ebenfalls einen wesentlichen Teil der benötigten Energie für die neuen Trockner generieren. Konventionelle Gastrockner werden weiterhin zur Produktion der Normalqualität der Trockenfrüchte in Betrieb sein. Gleichzeitig liefert die Produktion getrockneter Cashew-Nüsse viel ungenutzte Abwärme. Diese Energieressource wäre zusammen mit der Abwärme des Biogases eine optimale Quelle, um den Verbrauch des Flaschengases weiter zu reduzieren. Erste Ideen sind mit verschiedenen Akteuren in Burkina Faso bereits in Diskussion.

Schnittbild des Kondensationstrockners



Die Kondensationstrocknung ist ein Entfeuchtungsverfahren, das im industriellen wie privaten Bereich häufig angewandt wird. Es beruht auf dem Prinzip der Wärmepumpe, die in gewöhnlichen Haushaltskühlschränken sowie modernen Heizungsanlagen zum Einsatz kommen. Bei dieser Technologie wird der Effekt der Tauwasserbildung an kalten Oberflächen genutzt. Feuchte Luft wird mittels eines Ventilators im Inneren des Wärmepumpenaggregats über die kalten Lamellen des ersten Wärmetauschers geführt, deren Temperatur unter dem Taupunkt der Luft liegen. Hierdurch bildet sich Kondenswasser, welches sich in einem separaten Behälter sammelt. Die abgekühlte und entfeuchtete Luft wird anschließend vom zweiten Wärmetauscher erwärmt und als Trockenluft dem Trocknungsraum abgegeben.

1 Ziele

Das vorliegende Projekt ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur effizienten, kostengünstigen und umweltschonenden Fruchttrocknung in Schwell- und Entwicklungsländern. Lebensmittelrockner sichern die Produktion qualitativ hoch stehender Trockenprodukte und damit die Absatzmöglichkeiten in Industrieländern. Die Unabhängigkeit von sich immer weiter verteuernenden fossilen Energieträgern garantiert den Produzenten ein sicheres Einkommen. Weitgehende Produktion der Anlagen vor Ort erhöht die Wertschöpfung im Entwicklungsland, sichert Arbeitsplätze und Einkommen auch ausserhalb des Agrarbereiches. Der Techno- und Wissenstransfer sorgt für eine möglichst grosse Entwicklungsfreiheit und Unabhängigkeit in den Entwicklungsländern.

Die Strategie des vorliegenden Projektes beruht auf ein schrittweise herantastendes Vorgehen. Während im Vorprojekt (2009-2010) mit einem in der Schweiz erworbenen Kondensationsaggregat erste Erfahrungen vor Ort gesammelt, das Interesse und Akzeptanz der Menschen evaluiert und eine erste technische Machbarkeit für den Selbstbau abgeschätzt wurde, sollte nun der konkrete Funktionsnachweis des vorerst berechneten Trockners erbracht werden.

Die Technologie der Anlage sollte die Reproduzierbarkeit im eigenen Land und den preisgünstigen Erwerb der Komponenten durch lokale Unternehmen ermöglichen.

Mit dem Einsatz des neuen Trockners wurde eine markante Reduktion der CO₂- Emissionen und der Betriebskosten im Vergleich zum Betrieb der konventionellen Gastrockner angestrebt.

Durch die neue Art der Trocknung im Niedertemperaturbereich wurde vom Entwicklungsteam eine höhere Qualität der Trockenware und eine Reduktion von verbrannter Ausschussware angestrebt.

Zur Einbindung der lokalen Partner und Etablierung der neuen Technologie, sollten die Arbeitsschritte mit dem Prototyp in Bobo Dioulasso von einer kontinuierlichen Schulung zur Einführung in die Bedienung, Wartung und Nachbau begleitet werden. In diesem Sinn wurde auch der Nachbau eines eigenen Modells mit Hilfe eines lokal ausgebildeten Kältetechnikers eingeplant.

Das Potential der vorliegenden Trocknungstechnologie ist sehr gross, was das Ökozentrum allein schon durch die Anfragen verschiedener Länder für den Trockner zur Verarbeitung unterschiedlicher Produkte abschätzen kann.

Abweichungen der angestrebten Ziele

Die Entwicklung des Trockners konnte erfolgreich durchgeführt werden. Der Trockner wurde vor Ort aufgebaut und getestet. Die Schulung mit Nachbau eines eigenen Modells erwies sich in dieser Phase des Projektes als nur bedingt sinnvoll. Hauptgrund war, dass am Prototyp noch Optimierungspotenzial besteht, das technische Anpassungen an der Anlage mit sich führen könnte. Die Schulung an einem Trockner, der noch technische Anpassungen erfährt, wurde in der Priorität zurückgestuft. Während der Testphase in Burkina Faso wurden verschiedene Personen am Trockner ausgebildet. Für die Bereiche Kastenbau, Elektronik, Datenerfassung, Bedienung u.a, wurden auf diesem Gebiet erfahrene Personen geschult. Eine breit angelegte Schulung fand hingegen nicht statt. Die Ausgebildeten Personen haben gute Kenntnisse der Anlage, können diese aber noch nicht komplett selbständig bauen. Dies ist zusammen mit entsprechenden Technikern für eine zukünftige Realisierung vorgesehen.

Längerfristige Ziele

Zur nachhaltigen Etablierung dieser viel versprechenden Technologie in Burkina Faso setzte das Ökozentrum bereits in der Vorbereitungsphase dieses Projektes die längerfristigen Ziele fest, die bei erfolgreichem Funktionsnachweis des Prototyps in einem Nachfolgeprojekt angegangen werden könnten. Die lokale Agrarwirtschaft soll durch eine kostengünstige und ökologische Produktion und Verarbeitung heimischer Produkte gefördert werden.

Dabei ist die Vorbereitung zum Start einer multiplizierbaren Produktion in Burkina Faso und die Unterstützung des Vertriebs ein zentrales Thema. Des Weiteren soll eine seriöse Wartung und Kontrolle des entstehenden Produktes durch Unternehmen vor Ort gesichert werden.

Der Start einer Produktion in Burkina Faso ist auf Unterstützung angewiesen. Neben den Schweizer Partner wie das Ökozentrum, NTB und Swisscontact werden Organisationen und Unternehmer vor Ort mit Unterstützung des lokalen Projektpartners evaluiert.

Die Ziele richten sich nach den lokalen Bedürfnissen, die vor allem den ökonomischen Aspekt im Vordergrund haben aber auch nach den globalen Bedürfnissen, bei denen es um den ökologischen Aspekt geht (CO₂- Emissionsreduktion). Dazu sollen verschiedene Energiesysteme auf Basis erneuerbarer Energiequellen für den Betrieb der Kondensationstrockner evaluiert werden, zB. PV und Biogas für den Betrieb eines Generators und Abwärmenutzung.

Neben Mangos werden zur gleichen Zeit auch grosse Mengen an Cashew- Nüssen getrocknet. Die Vorbehandlung des Produktes benötigt viel Energie und erzeugt entsprechend Abwärme. Die verschiedenen Abwärmequellen könnten über angepasste Wärmetauscher für den Betrieb der konventionellen Gastrockner genutzt werden um das Gas aus den Flaschen einzusparen. Als Energiequelle sollten dabei die Schalen der Nüsse genutzt werden, die einen sehr hohen Brennwert aufweisen. Das Ökozentrum ist mit verschiedenen Akteuren vor Ort in Diskussion und Austausch von Ideen.

2 Technische Lösung / Angewandte Methodik

2.1 Grundlagen

Die Auslegung eines Wärmepumpentrockners (Kondensationstrockner) für Früchte erfordert detaillierte Kenntnisse zu den physikalischen Vorgängen bei der Trocknung und in der Wärmepumpe. Für eine optimale Dimensionierung der Komponenten im Wärmepumpentrockner werden die Füsse und Zustände der Luft im Trockner und die Eigenschaften der Wärmepumpe detailliert beschrieben und simuliert. Im folgenden werden die für eine optimale Auslegung benötigten Grundlagen zum Trocknungsprozess von Früchten, zur feuchten Luft und zur Wärmepumpe behandelt.

Dieser Teil des Berichtes basiert auf den Arbeit die im Labor der NTB, Fachhochschule Buchs durchgeführt wurde.

2.1.1 H-x-Diagramm

Prozesse, die in feuchter Luft stattfinden, können in einem h-x-Diagramm dargestellt werden. Auf der x-Achse ist die absolute Luftfeuchtigkeit x in kg/kg aufgetragen. Die roten, diagonalen Linien entsprechen Isenthalpen (h in kJ/kg) und die blauen, beinahe waagrechten Linien entsprechen den Isothermen. Weiters wird im Diagramm die relative Feuchtigkeit (grün) eingezeichnet. Die unterste gekrümmte Linie kennzeichnet 100% relative Luftfeuchtigkeit, also ist sie die Tau-Linie. Unterhalb dieser Linie liegt das Nebelgebiet. Bei normalen Prozessen befinden sich die Prozess-Kurven immer oberhalb der Tau-Linie.

2.1.2 Trocknungsprozess

In Abbildung sind zwei Trocknungsprozesse eingezeichnet. Kurve 1-4 stellt einen geschlossenen Kreislauf mit Wärmepumpe und Kurve 5-7 einen offenen Kreislauf eines Gasofens dar.

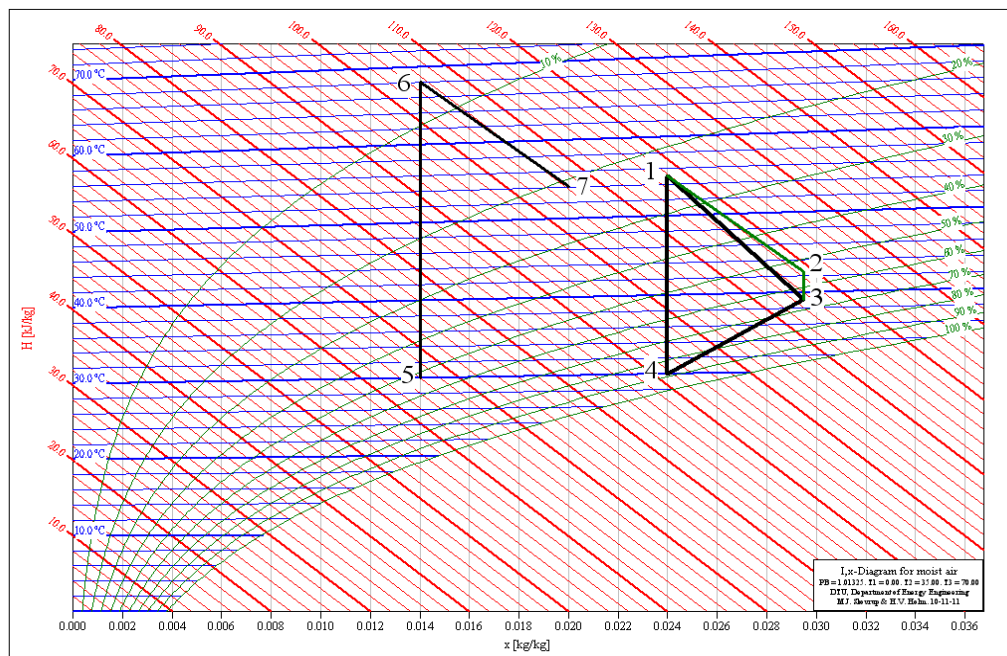


Abbildung1: H-x-Diagramm für Trocknungsprozess

Der Trocknungsprozess mit der Wärmepumpe beginnt im Punkt 1. Dort tritt die warme, trockene Luft in die Trocknungskammer ein. Im Prozess zwischen den Punkt 1 und 2 wird die Luft mit der Feuchte der Früchte angereichert. Somit steigt die absolute und relative Luftfeuchtigkeit an. Die Temperatur nimmt ab und die Enthalpie bleibt dabei fast konstant. Die Linie von Punkt 2 nach 3 zeigt den Wärmeverlust an die Umgebung. Über die grosse Holzoberfläche der Kammer, die nicht maximal gedämmt ist, geht Wärme verloren. Die absolute Feuchtigkeit bleibt dabei konstant, da keine Luft, sondern nur Wärme ausgetauscht wird. In der Kammer erfolgt der Verlust an Wärme und das Trocknen der Früchte parallel, dadurch kann Punkt 2 nicht direkt gemessen werden. Der reale Trocknungsprozess verläuft somit von Punkt 1 nach Punkt 3. Der Verdampfer der Wärmepumpe entzieht der Luft im Anschluss Energie, die Enthalpie sinkt somit. Dadurch steigt die relative Luftfeuchtigkeit im eingezeichneten Fall bis auf ca. 90% an. Da die Luft aber noch weiter abgekühlt wird, beginnt die Luftfeuchtigkeit zu kondensieren, Wassertropfen bilden sich an den Lamellen des Verdampfers. Dieser Prozess wird vereinfacht mit einer Geraden (Punkt 3 nach 4) dargestellt. In Wahrheit ist es aber eine gekrümmte Linie. Die Luft befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf. Alles Wasser, das beim Trocknen der Früchte aufgenommen wird, muss auch wieder am Verdampfer als destilliertes Wasser ausgeschieden werden. Als letztes erfolgt das Aufwärmen (Punkt 4 nach 1) der Luft im Kondensator. Die Energie wird wieder in die Luft gebracht, die Enthalpie steigt. Die absolute Luftfeuchtigkeit ändert sich dabei nicht. Die Lufttemperatur steigt deutlich und die relative Luftfeuchtigkeit sinkt stark. Mit einer hohen Temperatur und tiefen relativen Luftfeuchtigkeit, werden die Früchte optimal getrocknet. Treibendes Potential der Trocknung ist der unterschiedliche Dampfdruck zwischen Umgebungsluft und dem Dampfdruck des Wassers in den Früchten. Der Dampfdruck in der Frucht steigt bei hohen Temperaturen, während die relative Luftfeuchte und somit der Dampfdruck der Luft beim Aufheizen sinkt. Die Temperatur im Trockner kann nicht beliebig erhöht werden ohne die Qualität der getrockneten Früchte zu beeinträchtigen. Es gilt einen Kompromiss zu finden zwischen schneller Trocknung und dem Karamellisieren des Fruchtzuckers bei hohen Temperaturen.

In einem Gasofen wird die Umgebungstemperatur (Punkt 5) mit Hilfe einer Gasflamme aufgeheizt (Punkt 5 nach 6). Da sich auch hier die absolute Luftfeuchtigkeit nicht ändert, steigt die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit sinkt. In der Kammer (Punkt 6 nach 7) passiert der gleiche Vorgang wie beim Trockner mit Wärmepumpe (Punkt 1 nach 2). Die Früchte geben die Feuchtigkeit ab, so steigt die absolute Luftfeuchtigkeit. Am Punkt 7 wird die Luft an die Umgebung abgegeben. Das Problem hierbei ist, dass die für die Trocknung notwendige geringe relative Luftfeuchte nur durch hohe Temperaturen erreicht werden kann, im Gegensatz zum Wärmepumpentrockner in dem die Luftfeuchte durch die Kondensation im Verdampfer aktiv gesenkt wird. Dadurch kann beim letzteren Prozess eine bessere Qualität der Trockenfrucht erreicht werden.

2.1.3 Anströmung der Früchte

Im Trockenraum werden die Früchte auf Netzen ausgelegt. So wird die Frucht von allen Seiten mit Luft angeströmt. Es werden mehrere Lagen Netze übereinander montiert. Die Luftführung innerhalb des Trockenraumes kann auf zwei Arten erreicht werden. Bei der ersten Möglichkeit wird die Luft quer über die Netze geführt (Abbildung a). Da bei den Früchten das Verhältnis von ihrer Höhe zur Länge und Breite gering ist, entsteht eine relativ kleine Fläche die direkt angeströmt wird. Bei der zweiten Möglichkeit wird die Luft von unten nach oben durch die Netze geblasen (Abbildung b). Die Luft hat eine direkte grosse Angriffsfläche. Laut Ede und Hales (1948) kann durch das Durchblasen eine um Faktor 2 grössere Trockenleistung entstehen.

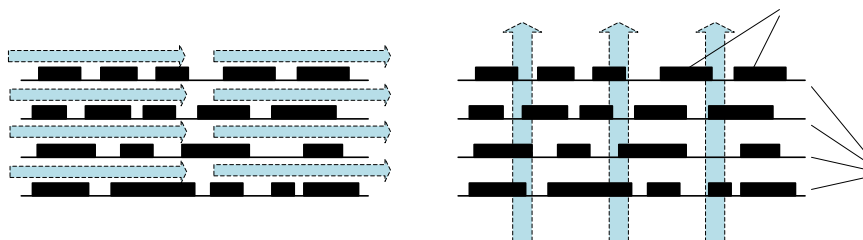


Abbildung 2: Luftströmung im Trockenraum
a) Luftführung über die Netze b) Luftführung durch die Netze

2.1.4 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist eine Maschine, die mit Hilfe von elektrischer Energie Wärmeenergie von einem niedrigeren zu einem höheren Temperaturniveau transportieren kann. Sie wird bis anhin vielfach als Heizung für Häuser verwendet. Dazu wird der Aussenluft, dem Erdreich oder einem Wasserkreislauf Wärme entzogen und über ein Wärmeträgermedium – unter Erhöhung des Temperaturniveaus – in das Heizungswasser transportiert. Das Heizungswasser zirkuliert durch die Bodenheizung oder Radiatoren und heizt den Raum auf. Auch im industriellen Umfeld kommen Wärmepumpen vor, z.B. zur Nutzung der Restwärme (Restwärmeentzug Abluft) bei chemischen Prozessen.

2.1.5 p-h-Diagramm

Das Log.p - h Diagramm eines Kältekreislaufes ist Grundlage für die Dimensionierung der Anlagenkomponenten wie:

- Verdichter
- Verdampfer
- Kondensator
- Drossel / Entspannungsorgan
- Rohrleitungen

Aus dem Diagramm wird u. a. abgelesen:

- Wie viel Energie braucht man, um 1 kg des dargestellten Kältemittels bei einer bestimmten Temperatur bzw. Druck zu verdampfen.
- Wie viel Energie wird zur Verdichtung des Kältemitteldampfes benötigt.
- Welche Endtemperatur hat das Kältemittel nach der Verdichtung und
- welche Energie muß über den Verflüssiger abgeführt werden.
- Welchen Drosseldampfanteil hat das Kältemittel nach der Entspannung.

In einem p-h-Diagramm (Abbildung) können die Zustände von realen Gasen aufgezeichnet werden. Die x-Achse wird durch die spezifische Enthalpie h in kJ/kg gebildet. Auf der y-Achse ist der Druck p [bar] logarithmisch aufgetragen. In der Mitte des Diagramms ist das Zwei-Phasen-Gebiet (Gas und Flüssigkeit) zu sehen, links der Siedelinie ist das Fluid im flüssigen Aggregatzustand und auf der rechten Seite ist das Gasgebiet. Für jedes Fluid sieht das Diagramm etwas anders aus, da sich die Fluideigenschaften unterscheiden. Zwischen Siedelinie und Taulinie herrschen Gas- und Flüssigkeitszustand gleichzeitig vor. Zum Beispiel ist Wasser bei einem Druck von 1 bar (absolut) bis 100°C flüssig. Wird dem Wasser weiter Energie zugeführt, steigt die Enthalpie und es beginnt zu sieden. Der Zustand befindet sich nun also im Zwei-Phasen-Gebiet, d.h. es hat Gasblasen in der Flüssigkeit. Die Temperatur bleibt während der Verdampfung konstant und steigt erst wieder an, wenn schlussendlich die gesamte Flüssigkeit verdampft ist und sich nun im Gas-Bereich befindet.

Im Diagramm werden ebenfalls die Isothermen (Punkte an denen die gleiche Temperatur herrscht), Isochoren (gleiches spezifisches Gewicht, Kehrwert der Dichte) und die Isentrope (gleiche Entropie) eingezeichnet. Die Temperatur ist im flüssigen Zustand praktisch nur von der Enthalpie abhängig, im Zwei-Phasen-Gebiet ist die Temperatur vom Druck abhängig.

2.1.6 Kältekreislauf einer Wärmepumpe

In Abbildung 3 sind zwei verschiedene Kältekreisläufe eingezeichnet. Kreislauf 1a bis 4a bezeichnet unseren Wärmepumpenkreislauf für den Fruchttrockner. Der zweite Kreislauf 1b bis 4b zeigt einen Kühlschrank. Beide Kreisläufe funktionieren genau gleich nach folgendem Prinzip:

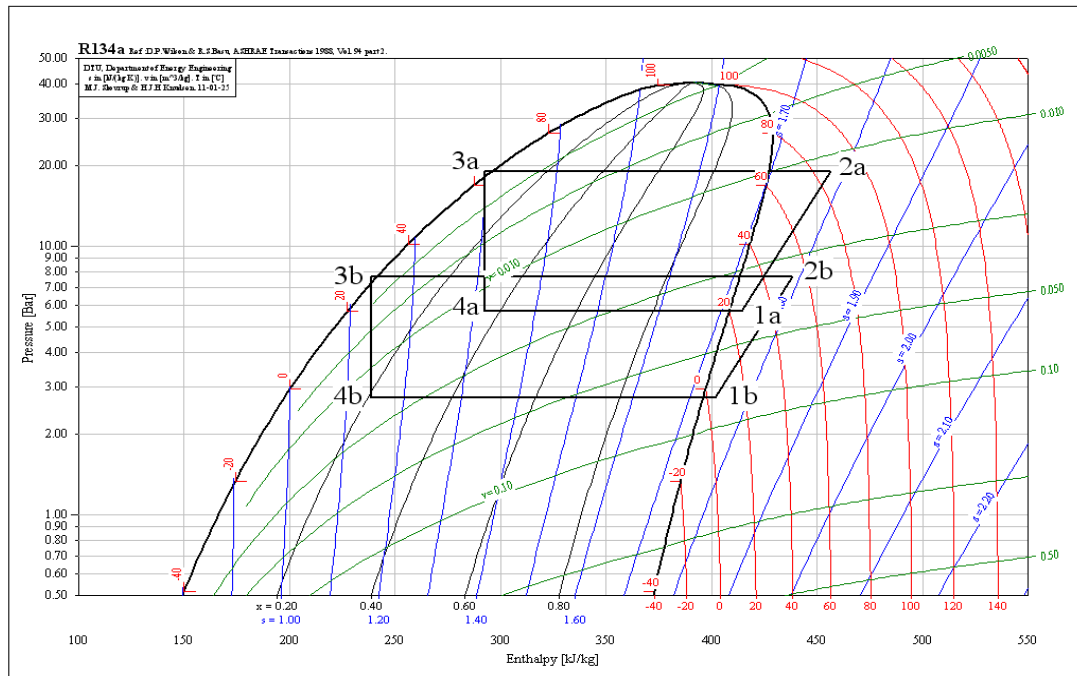


Abbildung 3: p-h-Diagramm von verschiedenen Kältekreisläufen

Der Kompressor (Punkt 1 nach 2) saugt gasförmiges Kältemittel (Sauggas, Punkt 1) aus dem Verdampfer an und verdichtet es. Im anschliessenden Kondensator (Punkt 2 nach 3) wird das Heissgas (Punkt 2) zur Kondensation gebracht. Die freiwerdende Kondensationsenergie wird auf hohem Temperaturniveau an die Luft abgegeben. Im Punkt 3 ist das gesamte Kältemittel flüssig. Das Expansionsventil (Punkt 3 nach 4) erhält den Druckunterschied zwischen Hoch- und Niederdruckseite aufrecht, sodass der Kreislauf weiter funktioniert. Nach dem Expansionsventil auf der Niederdruckseite strömt das zweiphasige Kältemittel in den Verdampfer (Punkt 4 nach 1). Die zur Verdampfung benötigte Energie wird der Luft entzogen, welche sich dadurch abkühlt. Das erneut gasförmige Kältemittel wird nun wieder vom Kompressor angesogen und der Kreislauf ist geschlossen.

Die beiden Kältekreisläufe unterscheiden sich in den Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen. Der Kreislauf b zeigt einen Kühlschrank, die Verdampfungstemperatur liegt bei ca. 0°C damit im Innern des Kühlschranks eine Lagertemperatur von max. 6°C entsteht. Die Kondensation findet bei ca. 30°C, knapp über der Umgebungstemperatur statt. Bei unserem Fruchttrockner sind die Temperaturlevels sehr viel höher. Wir lassen das Kältemittel bei über 60°C kondensieren, damit wir eine hohe Temperatur im Innern der Trocknungskammer erreichen. Auch die Verdampfungstemperatur ist mit 20-25°C sehr hoch. Wir wollen, dass die Luft am Verdampfer auskondensiert, aber nicht unnötig abgekühlt wird. Der Enthalpie-Hub im Verdichter beider Kreise ist praktisch gleich. Aber das spezifische Volumen des Kältemittels ist beim Fruchttrockner viel kleiner, sprich die Dichte viel grösser. Wird ein gleich grosser Verdichter für beide Kreisläufe verwendet, ist die Leistung beim Trockner viel grösser. Der Volumenstrom durch den Verdichter bleibt gleich, da sich aber die Dichte mit der Verdampfungstemperatur ändert, ändern sich auch der Massenstrom und damit die Leistung. Die meisten handelsüblichen Verdichter können nicht für die im Wärmepumpentrockner auftretenden hohen Verdampfungstemperaturen eingesetzt werden, da die Kühlung des Elektromotors bei der höheren Belastung nicht ausreichend gegeben ist.

3 Resultate

3.1 Simulation und Auslegung im Labor der NTB (CH)

Um die Wärmepumpe optimal auszulegen, wurde eine Systemsimulation durchgeführt. Für die Grundlage der Simulation mussten erst die Randbedingungen festgelegt werden. Aus dem Guide de séchage (2005) wurden die wichtigsten Kenngrößen für die Trockner entnommen. Die Trocknungsleistung soll 5 kg/h Kondensationswasserfluss betragen und die Lufttemperatur beim Kammereingang zwischen 60°C und 70°C liegen. Die Umgebungsbedingungen konnten mit Hilfe der Meteonorm (2009) bestimmt werden. Die Umgebungstemperatur beträgt in Burkina Faso zur Erntezeit ca. 30 bis 35°C bei 80% rF.

Das ganze Fruchttrocknersystem wurde mit EES (Engineering Equation Solver) von Klein (1992-2010) modelliert und simuliert. Am Anfang wurden Systeme mit verschiedenen Luftführungen miteinander verglichen. Ein Fruchttrockner kann geschlossen, offen mit vorgetrockneter Luft oder offen mit nachgeschaltetem Verdampfer betrieben werden. Wir haben uns für einen geschlossenen Kreislauf entschieden, da dieser Kreislauf am wenigsten von den Umgebungsbedingungen abhängt und in Burkina Faso den geringsten Energieverbrauch verspricht. Die Wahl des Kältemittels fällt auf R-134a. Es ist das einzige gebräuchliche Kältemittel, das für den geforderten Temperaturbereich eingesetzt werden kann, sowie ungiftig und nicht brennbar ist. Des Weiteren sind auch alle nötigen Komponenten für R-134a erhältlich.

Dieses gängige Kältemittel hat einen GWP (Global Warming Potential), auch Treibhauspotenzial genannt, von 1430 und eine Verweildauer von 13 Jahren.

Diese Tatsache wird nicht ausser Acht gelassen sondern bei einer weiteren Verbreitung der Kondensationstrockner mitberücksichtigt. Kältemittel kann in eigens dafür eingesetzte Rückgewinnungsanlagen durch verschiedene Absorptions- und Verbundfiltersysteme die Reinigung von Öl, Säuren und Feuchtigkeit wieder aufbereitet werden (Recycling).

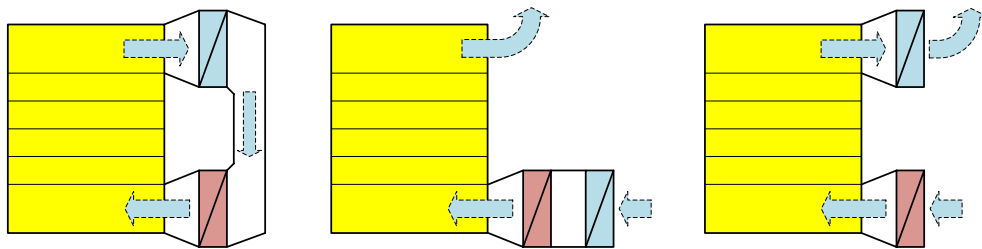


Abbildung 4: Systemvarianten (gelb Trockenkammer, blau Verdampfer, rot Kondensator)
a) geschlossenes System b) System mit vorgetrockneter Luft c) System mit nachgeschaltetem Verdampfer

Die Simulation ist in einzelne Module unterteilt. Die wichtigsten Module sind die Kammer, Verdampfer, Kondensator und Ventilator. Das Hauptprogramm simuliert den Kältekreislauf welches auch ein Modell für den Verdichter enthält. Die Untermodule werden aus dem Hauptprogramm aufgerufen. Der Quellcode der Simulation ist im Anhang enthalten. Unsere Vorgaben sind ein geschlossener Kreislauf, Kondensationsleistung von 5 kg/h, Umgebungsbedingungen von 30°C bei 80% rF, Kammertemperatur 60°C und eine elektrische Leistung von 2 kW. Die Einstellungen wurden variiert und an die erhältlichen Komponenten angepasst.

In den folgenden Abschnitten sind die einzelnen Komponenten kurz erklärt.

3.1.1 Verdichter

Eine zentrale Komponente in einem Kältekreislauf ist der Verdichter. Für dieses Projekt benötigen wir einen Verdichter, der auch mit möglichst hoher Verdampfungstemperatur betrieben werden kann und dabei auch die Kühlung des Motors garantiert. Natürlich muss auch die Leistung im richtigen Bereich liegen. Die elektrische Leistungsaufnahme aus dem Stromnetz am Einsatzort ist auf maximal 1,5 bis 2 kW beschränkt. Der Grossteil von Verdichterhersteller gibt nur wenige Leistungsdaten bekannt, vor allem nicht bei den von uns gewünschten Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen.

Bei der Firma Emerson Copeland wurde mit Rücksprache mit einem Entwicklungsingenieur ein möglicher Verdichter identifiziert. Ein Scrollverdichter für R134a der Reihe ZB19KCE-PFJ eignet sich gut für das vorliegende Projekt. Die Leistung des Verdichters entspricht etwa unserer Vorstellung für den Früchtetrockner. Die Wahl aller weiteren Komponenten ist auf den gewählten Verdichter abgestimmt.

3.1.2 Wärmetauscher

Auch die Wärmetauscher stehen im Zentrum dieses Projektes. Vor allem die Auslegung des Verdampfers gestaltete sich schwierig. Auf der Luftseite soll möglichst viel Feuchtigkeit auskondensieren, damit dieses Wasser aus dem Trockenprozess entfernt werden kann. So wird die relative Luftfeuchtigkeit klein und es können wieder neue Früchte getrocknet werden. Die Leistung auf der Kältemittel-seite ist vom Verdichter gegeben, der Luftvolumenstrom wird so gewählt das die geforderten Temperaturen erreicht werden. Er beträgt ca. 1'000 m³/h. Die Kondensatorleistung ist 7.5 kW und für die Verdampferleistung ergibt die Simulation 6 kW. Die Abmasse der Wärmetauscher sind auf eine Höhe von 400 mm und eine Breite von 800 mm festgelegt worden, um die Transportfähigkeit und Ergonomie des Wärmepumpentrockners zu gewährleisten.

Mehrere Firmen, die Wärmetauscher produzieren, konnten die geforderten Eckdaten nicht liefern. In vielen Fällen stellt auch der Einbezug der Kondensation auf der Luftseite ein erhebliches Problem bei der Auslegung der Komponenten dar. Bei der Firma Walter Roller GmbH&Co konnten wir direkt mit dem Entwicklungsleiter Kontakt aufnehmen. So konnten wir unser Problem kompetent lösen lassen. Das Hauptproblem bei der Auslegung des Verdampfers ist die Kondensation. Wir wollen nur die Luft trocknen, aber nicht zu viel abkühlen. So darf die Oberfläche des Wärmetauschers nicht zu gross gewählt werden. Diese Anforderung ist das genaue Gegenteil der Anforderungen an einen Verdampfer einer "normalen" Wärmepumpe, in dem die Kondensation vermieden werden soll und der Grundsatz "je grösser, desto besser" gilt. Beim Kondensator spielt eine zu grosse Oberfläche keine Rolle, im Gegenteil, ist die Fläche grösser wird das Kältemittel weiter unterkühlt.

	Verdampfer	Kondensator
Oberfläche	10.67 m ²	36.45 m ²
Rohrreihen (Höhe)	10	10
Rohrreihen (Tiefe)	2	4
Stränge	2	2
Rohrdurchmesser	12.4 mm	12.4 mm
Lammellenabstand	3.5 mm	2 mm
Blechpaket (B*H*T)	800*350*70 mm	800*350*210 mm

Tabelle 1: Baugrösse der Wärmetauscher

3.1.3 Ventilator

Der Luftvolumenstrom ist durch die Kondensationsleistung und die Eingangstemperatur an der Kammer auf 1'000 m³/h festgelegt. Die zweite Kenngrösse des Ventilators ist die Druckleistung. Bei unserem Früchtetrockner konnte der Druckabfall über die Netze und Luftkanäle nur geschätzt werden. Deshalb haben wir eine statische Druckdifferenz von 150 Pa festgelegt. Um solch grosse Drücke zu fördern eignet sich ein Radialventilator am besten. Der verwendete Typ ist ein RH31V-4EK.2C.1R von Ziehl-Abegg. Für den Trockenprozess wird der Luftstrom reguliert, um die Trocknungstemperatur einzustellen. Dies geschieht durch Herabsetzen der Spannung. Im Früchtetrockner ist ein Stufentransformator mit Wahlschalter eingebaut. Vom Bedienungspersonal können 5 verschiedene Drehzahlen gewählt werden.

3.1.4 Trocknungsraum

Nach den einzelnen Komponenten ist auch die Grösse des Trocknungsraumes festgelegt worden. Die Früchte geben ihre Feuchtigkeit anfangs schneller ab, je trockener sie aber sind desto langsamer wird auch der Trocknungsprozess. Gemäss Literatur ist die Wasserabgabe auch vom Feuchtkugel-Temperaturunterschied $\Delta T_{\text{WetBulb}}$ abhängig. Je trockener oder heisser die Luft ist, desto besser werden die Früchte getrocknet.

Bei beiden Punkten ist die Temperatur gleich hoch. Punkt P_1 hat die kleinere relative Feuchtigkeit, daher wird der Feuchtkugel-Temperaturunterschied grösser. Je grösser dieser ist desto besser werden Früchte getrocknet.

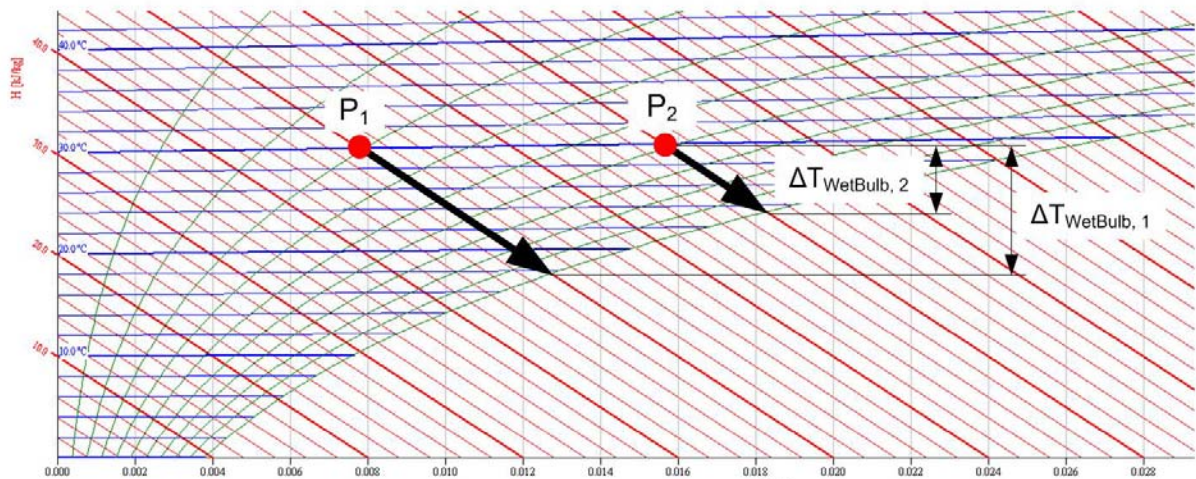


Abbildung 5: Grafik Feuchtkugel-Temperaturunterschied

Damit unterschiedliche Früchte miteinander verglichen werden können, wird ein Trocknungskoeffizient λ aufgestellt. Das verdampfte Wasser ist von dieser Materialkonstante, der Zeit und der Qualität der Trocknungsluft abhängig.

$$\lambda(\chi_{\text{Frucht}}) = \frac{m_{\text{Wasser, verdampf}}}{m_{\text{trockn}} \cdot t \cdot \Delta T_{\text{WetBulb}}} \quad (1)$$

Dieser Koeffizient ist natürlich vom Wassergehalt der Frucht abhängig. Feuchte Früchte geben bei gleicher Bedingung mehr Wasser ab als trockene. Das liegt vor allem am Aufbau der Zellen, Wasser im Innern muss mit sehr grossen Drücken gegen die Kapillarwirkung bis an die Oberfläche der Frucht transportiert werden. Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit des Trocknungskoeffizienten vom Wassergehalt.

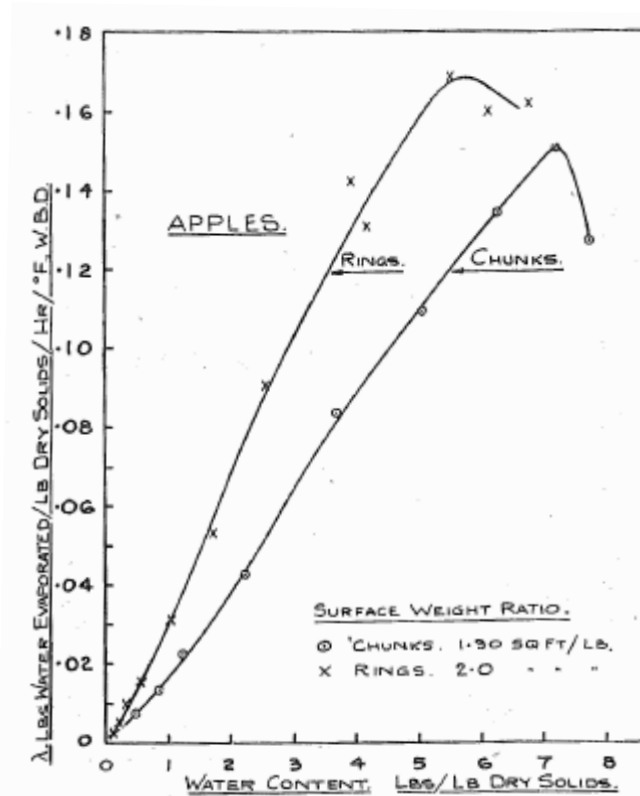


Abbildung 6: Trocknungskoeffizient abhängig vom Wassergehalt für Äpfel (aus *The Physics of Drying*)

In der Literatur findet man Werte für europäische Lebensmittel, wie Äpfel, Birnen, Pflaumen, etc. Für die Mangos haben wir einen durchschnittlichen Wert von $0.12 \cdot 1/h \cdot K$ angenommen. Bei einer konstanten Kondensationsleistung von 5 kg/h und einer $\Delta T_{\text{WetBulb}}$ von 18 K muss immer 2.31 kg Trocken-Mangomasse in der Kammer sein (Berechnung nach Formel (1))

$$\chi = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Frucht}}} \quad (2)$$

Zur Berechnung der Kammergröße wurden folgende Annahmen getroffen. Der Wassergehalt sei am Anfang 0.8 und am Ende 0.3 . Daraus lässt sich die maximale Beladung von 11.6 kg berechnen (feuchte Frucht, Trockenmasse bekannt). Da der Prototyp noch keinen kontinuierlichen Materialfluss (Früchte) zulässt, ist die Trockenkammer für eine grössere Menge Früchte ausgelegt. Weitere Unsicherheiten ist der Koeffizient λ selber und auch die $\Delta T_{\text{WetBulb}}$ ist nicht genau bekannt.

Auch die Fruchtmenge die produziert werden kann, wird durch umstellen und einsetzen der Formel berechnet. Falls 5 kg/h Wasser kondensiert werden kann, dann werden 48 kg Trockenfrucht pro 24 h Tag produziert werden.

3.1.5 CAD-Konstruktion

Die Konstruktion des Prototyps des Kondensationstrockners wurde im CAD vorgenommen. Nachdem die Masse aller Hauptkomponenten bekannt waren, konnte mit dem Aufbau des Technik-Moduls begonnen werden. Aus den Abmassen der Wärmetauscher ergibt sich die Breite des Trockners. Die Konstruktion des Grundmoduls ist somit im Aufbau sehr einfach gehalten. Auf der Abbildung sieht man (von links) den Verdampfer, Verdichter, Kondensator, die Trennwand mit Einströmdüse und den Ventilator. Der ganze Aufbau ist mit Holzplatten und Holzplatten gemacht. Holz ist ein einfacher Werkstoff, der überall verfügbar ist, und welcher auch einfach bearbeitet werden kann. Unterhalb des Verdampfers ist eine Tropfwanne angebracht die das Kondenswasser sammelt und über einen Schlauch abführt.

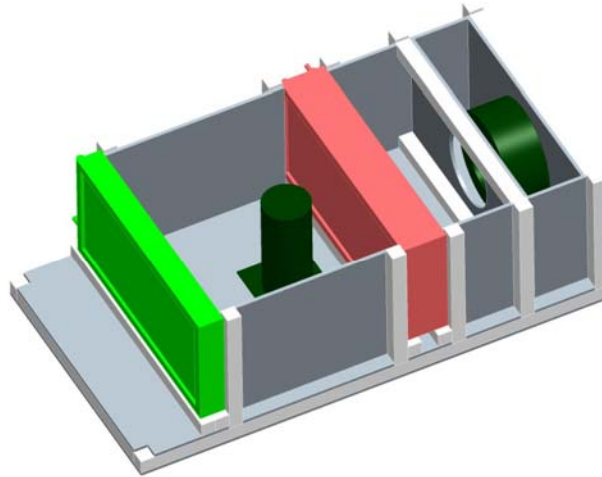


Abbildung 7: Technik Modul des Trockners

Auf die schwere Unterkonstruktion wird der Trockenraum aufgebaut. Der Freiraum links unten ist ein senkrechter Kanal, der die feuchte Luft aus dem Trockenraum zum Verdampfer führt. Die heisse trockene Luft strömt dann direkt vom Ventilator in den Trocknungsraum.

Der Doppelboden des Trocknungsraums ist oben durch eine Lochplatte abgeschlossen damit von vorne bis hinten eine gleichmässige Luft-Anströmung der Früchte erfolgt. Mit dieser gleichmässigen Luftverteilung wird eine homogene Trocknung der Früchte erreicht.

Der Trocknungsraum fasst sieben Roste die mit Früchten belegt werden. Die einzelnen Lagen sind im Abstand von 75 mm angeordnet. An der Wand sind Führungshölzer für die Roste angebracht. Die Roste bestehen aus einem Holzrahmen. Auf diesen Holzrahmen wird ein sehr grobes Netz (z. B: Vogelschutznetz) gespannt. Damit das Netz für Waschwzwecke abgenommen werden kann, ist es am Rand nur durch eine Nagelreihe oder einen Klett befestigt. So kann das Netz einfach eingehängt und auch wieder demontiert werden. Die groben Maschen des Netzes behindern die Luftströmung nicht. Von der Verwendung eines Moskitonetzes (heute üblich) ist abzuraten, da dort die Maschen viel zu klein (Können vom Fruchtsaft verklebt werden) und der daraus resultierende Druckverlust zu gross ist.

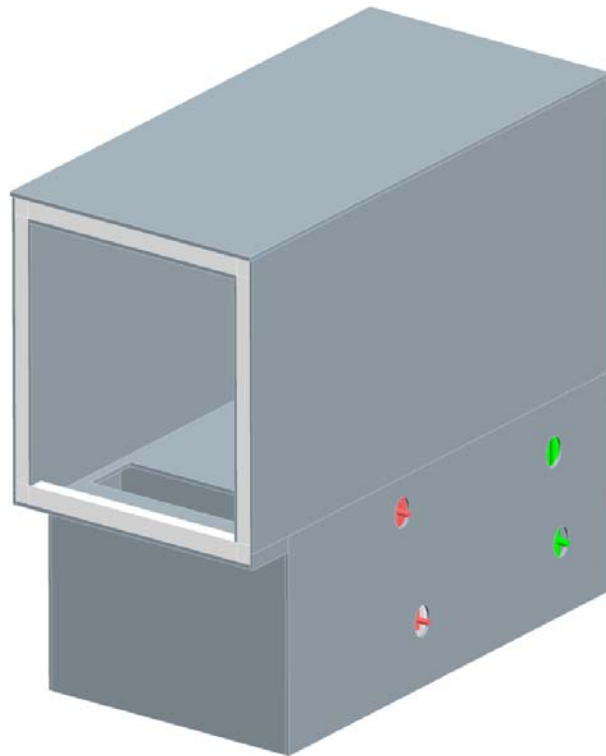


Abbildung 8: Aufbau Fruchttrockner ohne Fronttüre

Der Fruchttrockner ist innen komplett mit einer Holzplatte ausgekleidet (glatte Fläche) damit er einfach zu reinigen ist und die Luft ohne viel Verwirbelung strömen kann. Die äussere Schicht aus Holzplatten dient der Isolation und Optik. Vor allem am Anfang beim Aufstartvorgang ist diese zweite Schicht nützlich, um nicht zu viel Wärme zu verlieren, später im Betrieb muss die zugeführte elektrische Leistung dann sowieso in Form von Wärme abgeführt werden. Dies kann als Wärmeverlust durch die Hülle oder durch Beimischen von frischer Luft erfolgen. Im Prototypen sind mehrere Türen eingebaut, mit denen zwischen Umluft und Frischluftbetrieb gewechselt werden kann, und die auch Zugang für Service und Reinigungszwecke gewährleisten.

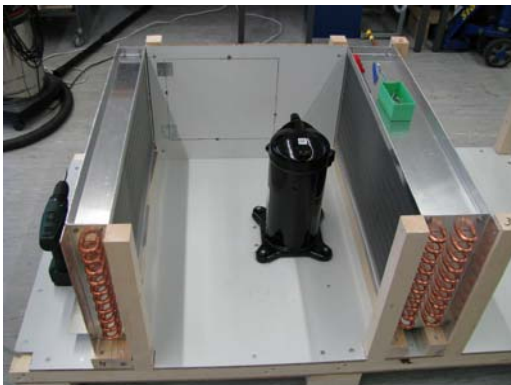


Abbildung 9: Unterkonstruktion mit beiden Wärmetauschern und Verdichter



Abbildung 10: Skelett der Trocknungskammer

3.1.6 Betriebsanleitung

Der Trockner wird mit folgenden Elementen betrieben:

- Betriebsschalter für Verdichter
- Stufenschalter für Ventilator
- Temperaturanzeige der Kammertemperatur
- Druckanzeige für die Verdampfungstemperatur

Bei der Inbetriebnahme des Trockners sind folgende Punkte zu beachten:

1. **Kontrolle** das der Luftweg frei ist
2. **Schliessen** aller Türen
3. **Einschalten** des Ventilators auf Stufe 5
4. **Einschalten** des Verdichters
5. Warten bis der Raum sich langsam aufheizt und die Verdampfungstemperatur auf über 15°C steigt
6. **Ventilator** auf Stufe 1 oder 2 **reduzieren**
7. Warten bis der Raum die gewünschte Temperatur (ca. 60°C) erreicht hat
8. **Bestücken** des Trockners mit Früchten
9. **Regeln** des Ventilators, damit die Lufttemperatur am Einlass des Trocknungsraums auf 55-65°C steigt
Temperatur zu tief -> Lüfter langsamer laufen lassen
Temperatur zu hoch -> Lüfter schneller laufen lassen
Temperatur immer noch zu hoch und Ventilator auf Stufe 5 -> frische Luft beimischen
10. Nach Beendigung des Trocknungsvorgangs
11. **Entnahme** der Früchte
12. **Ausschalten** des Verdichters
13. **Nachlüften** des Trockners, Ventilator Stufe 3, Türe geöffnet (längere Zeit)

Natürlich kann nach dem ersten Trocknungsvorgang (Punkt 1 bis 11) direkt mit der nächsten Ladung weiter gemacht werden (ab Punkt 8). Für den Verdichter ist es am besten wenn er möglichst wenig ein und ausgeschaltet wird. Es ist ein kontinuierlicher Betrieb des Trockners anzustreben.

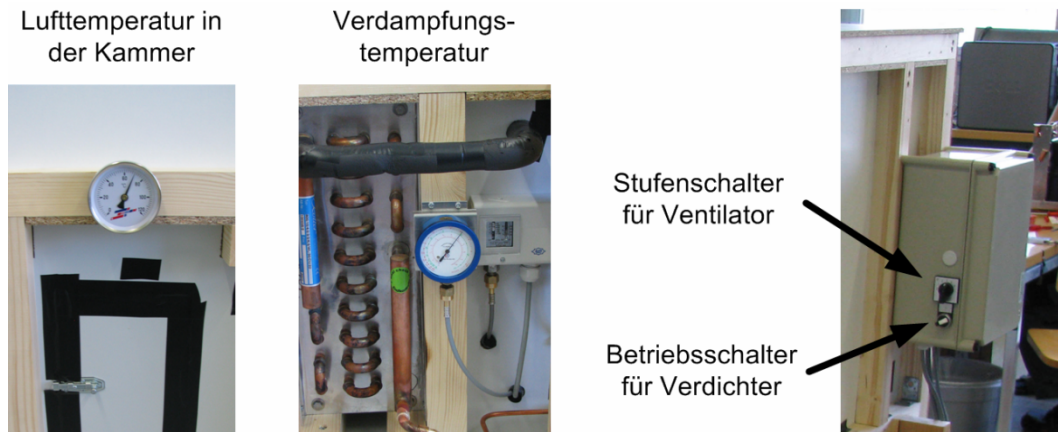


Abbildung 11: Bedien-Elemente des Prototypen

3.2 Messungen

Der aufgebaute Prototyp des Fruchttrockners wurde im Labor ausgemessen und geprüft. Alle relevanten Messwerte wurden mit entsprechenden Messgeräten aufgenommen und alles 5 s abgespeichert. Aus diesen Sensorwerten können Größen berechnet werden, die eine weitere Optimierung erlauben. Die Messdaten wurden in Grafiken dargestellt und interpretiert und anschliessend mit den Simulationsresultaten verglichen.

3.2.1 Messaufbau

Alle Messwerte werden mit einem Datenscanner (CompactRIO) eingelesen.

Temperaturen

Für die Temperaturmessung wurden Thermoelemente vom Typ K verwendet. Die Messunsicherheit beträgt typischerweise $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Für die Temperaturen im Kältemittelkreis wurde je ein Thermoelement verwendet. Hingegen kamen für die Temperaturen im Lüftungsbereich zur Durchschnittsbildung je 2 Sensoren zum Einsatz.

Drücke

Für die Druckmessung wurden die Sensoren „PAA-21Y“ der Firma Keller AG verwendet, welche den Absolutdruck messen. Für den Sauggasdruck mit einem Messbereich von 0-10 bar und für den Heissgasdruck und den Druck des flüssigen Kältemittels jeweils 0-50 bar. Der typische Fehler beträgt $\pm 0,5\%$ des Messbereiches.

Leistung Ventilator und Verdichter

Die elektrische Leistung wurde mit Hilfe von INFRATEK Leistungsumformern gemessen, Typ ITL-100 Power Transmitter. Die Messunsicherheit beträgt typisch $\pm 0,2\%$ des Messwertes bei AC 50/60 Hz.

Kältemittelmassenstrom

Es wurde ein Micro Motion Coriolis Messsystem von EMERSON verwendet. Der Sensortyp ist CMF010 mit der Auswerteeinheit 2400 S. Die Messunsicherheit beträgt typisch $\pm 0,05\%$ des Messwertes. Der Nullpunktfehler ist $\pm 0,002$ kg/h.

Luftstrom

Um die Leistungen, die auf der Luftseite den Wärmetauschern zugebracht und abgeführt werden zu bestimmen, braucht es die Temperaturen im Lüftungskanal und den Volumenstrom der Luft. Diesen Strom haben wir aus der Luftgeschwindigkeit rückgerechnet. Die Luftgeschwindigkeit wurde mit dem Flügelradanemometer „MiniAir6“ von Schiltknecht gemessen. Die typische Messunsicherheit beträgt: $\pm (1,0\% \text{ MW} + 1,5\% \text{ MB})$.

Es wird angenommen dass die Luftgeschwindigkeit über die ganze Wärmetauscherfläche gleich gross ist. So kann der Volumenstrom einfach als Multiplikation von der Fläche mit der Luftgeschwindigkeit berechnet werden. Die Ergebnisse können nur als Anhaltspunkt gewertet werden, weshalb die Auswertung mittels der zuverlässigeren kältemittelseitigen Daten erfolgte. Eine zuverlässige Luftvolumenstrommessung war auf Grund der beengten Platzverhältnisse im Prototypen nicht möglich. Es wird angenommen, dass mit steigender Temperatur sich die Strömung durch die Wärmetauscher ändert. Die berechneten Leistungen auf der Luftseite der Wärmetauscher weichen auf Grund des gewählten Messprinzips zum Teil erheblich vom tatsächlichen Wert ab.

Relative Feuchtigkeit und Temperatur

Die relativen Luftfeuchtigkeiten werden mit dem Sensor HygroFlex HF5 von Rotronic AG gemessen. Die typische Messunsicherheit der Feuchtigkeit beträgt $\pm 0,6\%$ rF und die der Temperatur $\pm 0,2$ K.

Abweichungen der berechneten Grössen

Aus den zeitlichen Messreihen wurden Datenabschnitte herausgenommen, z.B. am 24.03.2011 von 18:51 bis 18:56. Über diese Dauer wurden die Daten gemittelt und die Standardabweichung berechnet. Zusammen mit der Sensorabweichung wurden die Daten mit Hilfe von EES verarbeitet. Die resultierenden Messunsicherheiten der Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Messgrösse	Absolute Abweichung	Relative Abweichung
\dot{Q}_{el}	42 W	2.7%
\dot{Q}_{kond}	57 W	0.8%
\dot{Q}_{verd}	52 W	0.9%
$T_{ü}$	0.946 K	6.9%
η_{isent}	0.035	4.8%
η_{wp}	0.024	2.7%
λ	0.024	2.5%
COP_{heizen}	0.11	2.7%
$\dot{Q}_{Luft,kond}$	3095 W	51.7%
$\dot{Q}_{Luft,verd}$	2536 W	52.5%
\dot{m}_{verd}	1.296 kg/h	157%

Tabelle 2: Abweichungen ausgewählter Ergebnisgrössen

Alle relevanten Ergebnisse können mit einer sehr grossen Genauigkeit bestimmt werden. Auffällig sind aber die grossen relativen Abweichungen bei $\dot{Q}_{Luft,kond}$, $\dot{Q}_{Luft,verd}$ und $\dot{m}_{Kondenswasser}$. Zur Berechnung dieser Grössen wird der Luftstrom verwendet. Da diese Messgrösse selber schon grosse Abweichungen hat, pflanzt sich der Fehler wie erwartet bis ins Ergebnis fort.

3.2.2 Durchgeführte Messungen

Es wurden mehrere Messungen mit dem Früchtetrockner durchgeführt. Mit der ersten Inbetriebnahme haben die Messungen begonnen. Am Anfang wurde zuerst nur der Trockner aufgeheizt, um zu sehen ob alles wie geplant funktioniert. In diesem Versuch erfolgte auch die Befüllung des Systems mit 2.2kg des Kältemittels R134a. Später wurden die Früchte mit Hilfen von nassen Tüchern simuliert. Nach dem erfolgreichen Abschluss dieser Vormessungen wurden Mangos bestellt, geschält und in Scheiben geschnitten (Abbildung 12). Eine Frucht ergibt ca. 4 Scheiben à 1 cm Dicke. Der Rest des Fruchtfleisches wird in möglichst grossen Stücken vom Kern geschnitten. Bei den ersten Messungen wurden diese „Frites“ auch mit getrocknet. Bei den letzten Messungen wurden sie wie in Burkina Faso üblich nicht getrocknet sondern anderweitig weiterverwendet.



Abbildung 12: geschnittene Mangos (Scheiben und Frites)

Messung mit Früchten auf vier Netzen

Die erste grosse Messung mit Mangos wurde vom 24.03. bis zum 25.03.2011 durchgeführt. Es wurden vier Netze mit geschnittenen Früchten belegt. Das Nassgewicht der Mangos hat 16,32 kg betragen. Das getrocknete Gut hatte ein Gewicht von 3,37 kg.

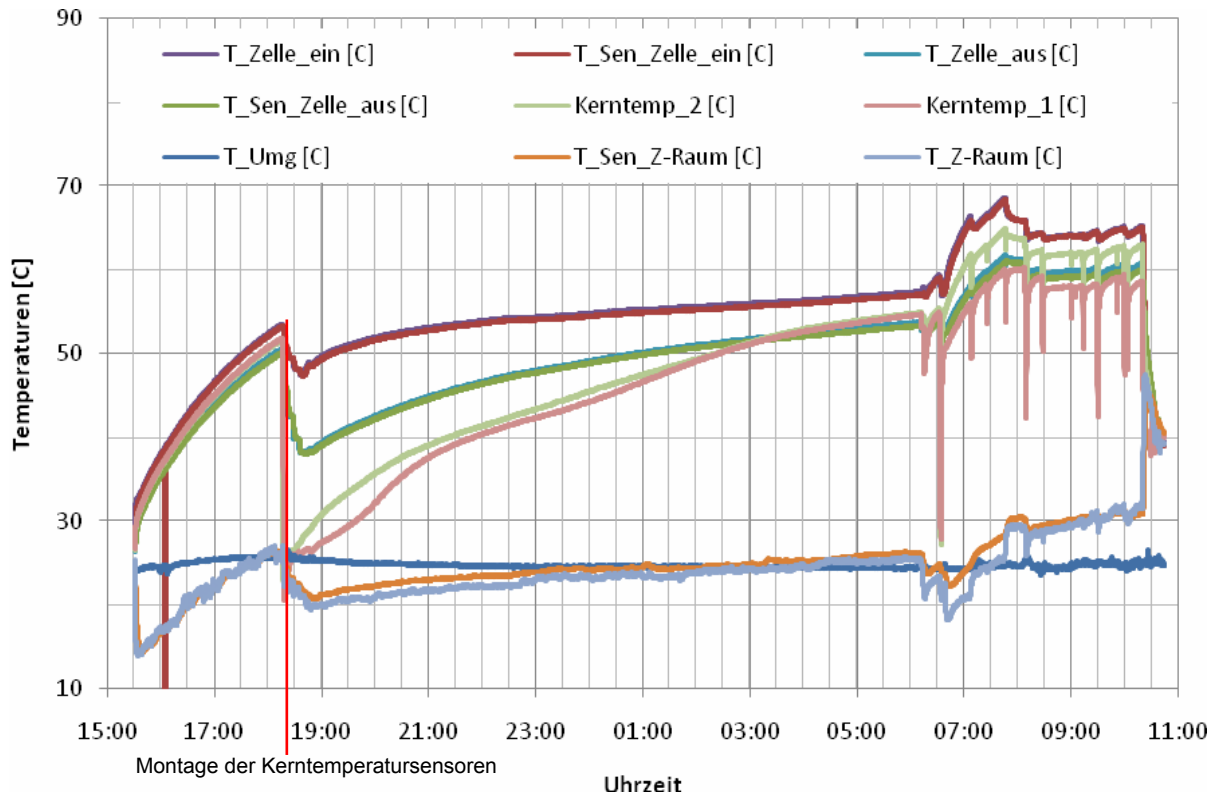


Diagramm 1: Temperaturverlauf bei Messung mit 4 Fruchtnetzen

In Diagramm 1 ist der zeitliche Verlauf der Lüftungstemperaturen ersichtlich. Am Anfang ist der Aufheizvorgang zu sehen (15:30 bis 18:15), anschliessend sind die Netze in den Trockner geschoben worden. Gut zu erkennen ist die Montage der Kerntemperatursensoren. Ab ca. 18:45 steigt die Temperatur langsam an, der Trocknungsprozess beginnt. Am Anfang liegen die Kerntemperaturen bei Umgebungstemperatur. Sie steigen nur langsam an, obwohl die Lufttemperatur in der Kammer bei ca. 55°C liegt. Dieser Temperaturunterschied ist mit der Wasserabgabe der Früchte zu erklären. Solange Wasser auf der Oberfläche verdunstet, wird die Frucht gekühlt. Wenn die Kerntemperatur sich der Kammertemperatur annähert, kann man davon ausgehen, dass der Trocknungsprozess fast abgeschlossen ist. Ab 6:00 Uhr morgens sind Peaks im Diagramm zu sehen. Diese kommen vom Öffnen der Türe, die Kerntemperaturen sinken weil frische Luft an die Früchte kann. Die übrigen Sensoren zeigen das Türöffnen aber nur schwach.

Es kann davon ausgegangen werden, dass nur wenig frische Luft, auch bei geöffneten Türen angesaugt wird. Da die Luft auf der ganzen Fläche von unten einströmt und nur oben hinten abgesaugt wird, ist praktisch immer die gleiche Luft im Umlauf. Am frühen Morgen wurde auch die Drehzahl des Ventilators reduziert. Da weniger Luft zirkuliert aber die gleiche Leistung am Wärmetauscher zur Verfügung steht, wird der Temperaturhub am Kondensator grösser, die Kammertemperatur steigt. Gegen 10:00 Uhr wurden die letzten getrockneten Früchte entnommen und der Trockner abgeschaltet.



Abbildung 13: Kondenswasserbildung auf dem Verdampfer

In Abbildung 13 ist die Kondenswasserbildung auf dem Verdampfer schön zu beobachten. Die warme und feuchte Luft kondensiert an der kalten Oberfläche des Wärmetauschers. Die Tropfen werden in einer Wanne gesammelt und über einen Schlauch aus dem Trockner geleitet. Dieses Wasser kann für Bewässerung etc. verwendet werden. Wir haben ca. 6,32 kg in einem Becken aufgefangen. Der Gewichtsverlust der Früchte ist mit 12,9 kg aber viel grösser. Da es im Labor sehr trocken ist, ist ein Teil des Wassers schon während der Messung wieder verdunstet. Ein anderer Teil ist als direkter Luftverlust aus der Kammer entwichen. Die Qualität der Trockenfrüchte war als "gut" zu bezeichnen. Durch die unbeaufsichtigte Trocknung während der Nacht kam es zu einer "Über Trocknung" der Früchte. Dies bedeutet, dass die tatsächliche Trockenzeit in der Praxis kürzer gestaltet werden kann.

Messung mit Früchten auf sieben Netzen

Die aussagekräftigste Messung wurde vom 31.03.2011 bis zum 01.04.2011 durchgeführt. Der Trockner wurde mit 36,92 kg Mango-Scheiben auf sieben Netzen bestückt. Mit dieser grossen Menge wird vor allem die Leistungsfähigkeit getestet. Für diese Messung wurden alle Spalte um die Türen zugeklebt, damit die Verlustluft auf ein Minimum reduziert wird.

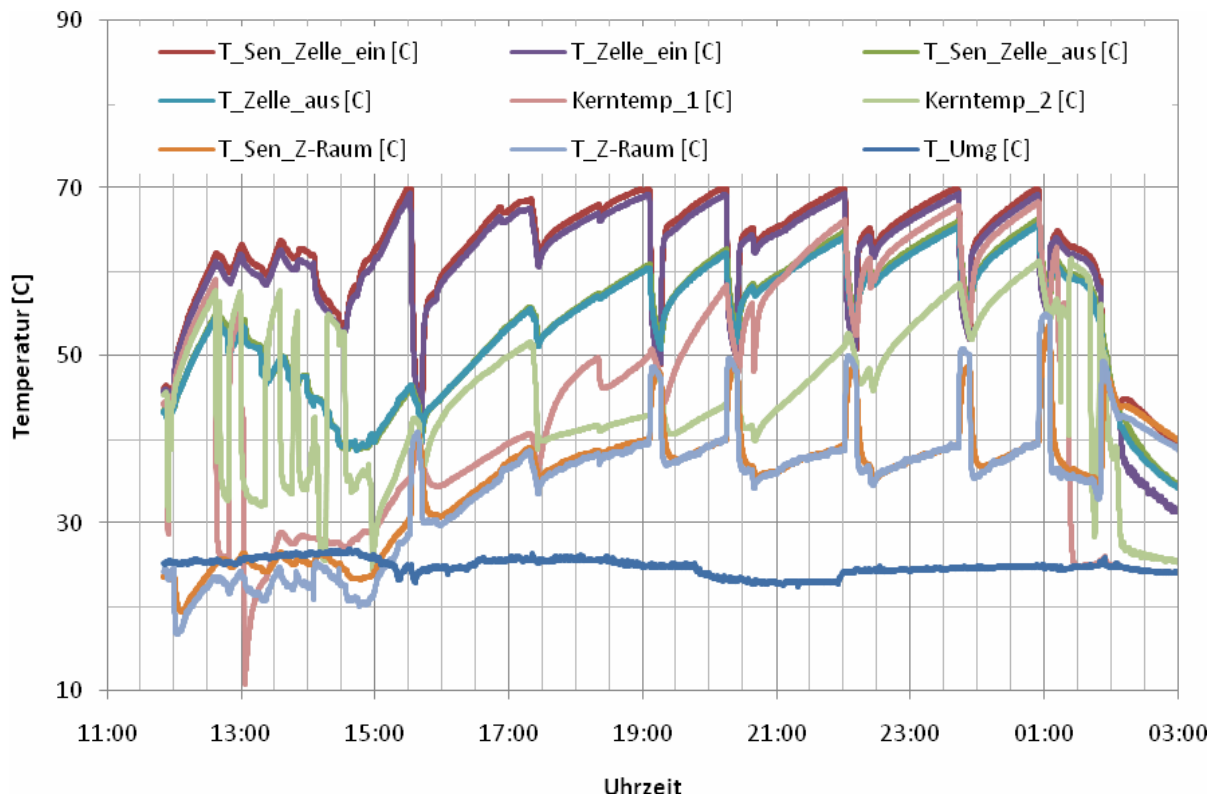


Diagramm 2: Temperaturverlauf bei Messung mit 7 Fruchtnetzen

Der Verlauf der Messung ist in Diagramm 2 dargestellt. Am Anfang wird wieder begonnen den Trockner aufzuheizen. Zwischen 12:30 und 15:00 wurde der Trockner beladen. Da der Ventilator langsam eingestellt war, steigt die Temperatur schnell an. Bei ca. 70°C schaltet der Verdichter sicherheitshalber ab. Anschliessend wurde die Drehzahl erhöht, so dauert es auch länger bis die maximale Temperatur erreicht wird. Da aber alle Ritzen geschlossen sind, wird immer wieder sicherheitshalber abgeschaltet. Die elektrische Leistung die von aussen zugeführt wird, sorgt dafür dass sich der gesamte Trockner aufheizt. Der Wärmeverlust erfolgt nur durch Abstrahlung und Wärmeleitung der Aussenhülle. Während der ganzen Messung wurde immer wieder die Tür geöffnet um den Wassergehalt der Mangos zu kontrollieren. Gegen 1:00 Uhr wurde die Trocknungskammer geleert, die Anlage ausgelüftet und später abgeschaltet. Die Qualität der Früchte in diesem Durchlauf hat sich als sehr gut erwiesen. Es wurden 7.22 kg getrocknete Mangos entnommen.

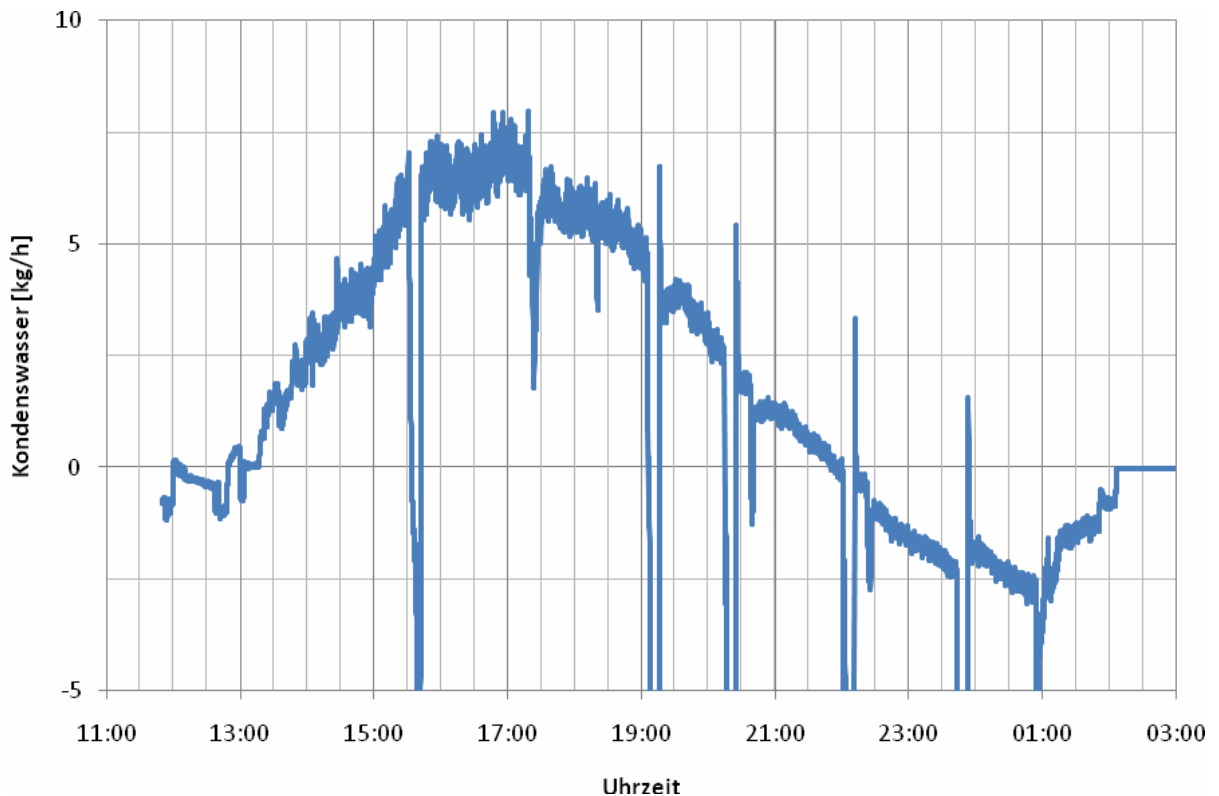


Diagramm 3: Kondenswasseraustritt Messung mit 7 Fruchtnetzen

In Diagramm 3 ist der Verlauf des berechneten Kondenswasseraustrittes zu sehen. Ab 13:00 Uhr beginnt Wasser zu kondensieren, da die ersten Netze in die Kammer geschoben werden. Kurz nachdem alle Netze belegt sind erreicht die Kondensationsleistung ihr Maximum bei ca. 7 kg/h. Mit zunehmender Zeit sinkt die Leistung, da die Früchte immer trockener werden und es länger dauert bis das Wasser aus den Zellen austritt. Am Schluss wird der Verlauf sogar leicht negativ, was auf die sehr geringen relativen Feuchtewerte im Trockner und die damit zusammenhängende hohe Messunsicherheit zurückzuführen ist. Um den Kondenswasserverlauf zu berechnen, wird die Luftgeschwindigkeit (Strömung abhängig), Temperatur und relative Feuchte verwendet. Gegen Ende der Messreihe sinkt die relative Luftfeuchtigkeit auf kleine Werte (10-20% rF), die absolute Abweichung bleibt aber gleich ($\pm 0,6\%$ rF), so steigt die relative Abweichung stark an. Auch die immer noch vorhandene kleine Verlustluftmenge kann die Messergebnisse verfälschen. Die berechnete Kondenswassermenge aus diesem Wasserstrom beträgt 23.1 kg, tatsächlich wurde den Früchten 29.7 kg Wasser entzogen. Auch bei dieser Messung ist nur ein Teil des Kondenswassers in Becken geflossen (19.05 kg). Der Rest ist direkt in die Raumluft entwichen oder wurde vom Holz des Trockners aufgenommen.

3.2.3 Vergleich mit Simulation

Die Simulation wurde mit der Messung vom 31.03.2011 verglichen. Abbildung 14 zeigt den Trocknungsprozess im h-x-Diagramm. Die Simulation kommt sehr nahe an die Messwerte. Die sichtbaren Unterschiede lassen sich einfach erklären.

Bei der Simulation wird angenommen das die Austrittsluft aus dem Verdampfer (Punkt Sim 3) immer eine relative Feuchtigkeit von 95% hat, damit es zur Kondensation kommt. In der Realität (Punkt Mes 3) ist die relative Feuchtigkeit bei ca. 70%. Im Verdampfer kommt nur ein Teil der Luft zur Kondensation. Je näher die Luft bei den Lamellen vorbei strömt, desto mehr wird sie abgekühlt und entfeuchtet. Aber ein Teil der Luft strömt genau zwischen den Lamellen und wird fast nicht beeinflusst. Im Zwischenraum vermischt sich die Luft und es entsteht ein gemittelter Wert. Für weitere Simulationen sollte das Verdampfermodell auf diese Erkenntnisse angepasst werden. Um die Entfeuchtung im Verdampfer zu verbessern, könnte eine andere Finnengeometrie oder längere Finnen in Strömungsrichtung helfen.

Weiter wurde in der Simulation ein etwas zu grosser Verdichter gewählt. Der eingebaute Verdichter hat einen kleinere Leistung darum ist der Temperaturhub bei der Simulation (Sim 1 – Sim 3) grösser als bei der Messung (Mes 1 – Mes 3).

Ein weiterer Unterschied ist das Modell der Kammer. Der aufgebaute Prototyp verliert viel weniger Energie als in der Simulation angenommen wurde. In der Abbildung ist das vom Punkt 1 zu Punkt 2 zu sehen. Bei der Messung verläuft die Linie praktisch parallel zur Isenthalpen. In der Simulation sinkt die Enthalpie von Punkt Sim 1 zu Sim 2. Für ein genaueres Modell kann ein viel kleinerer Energiefluss zur Umgebung angenommen werden.

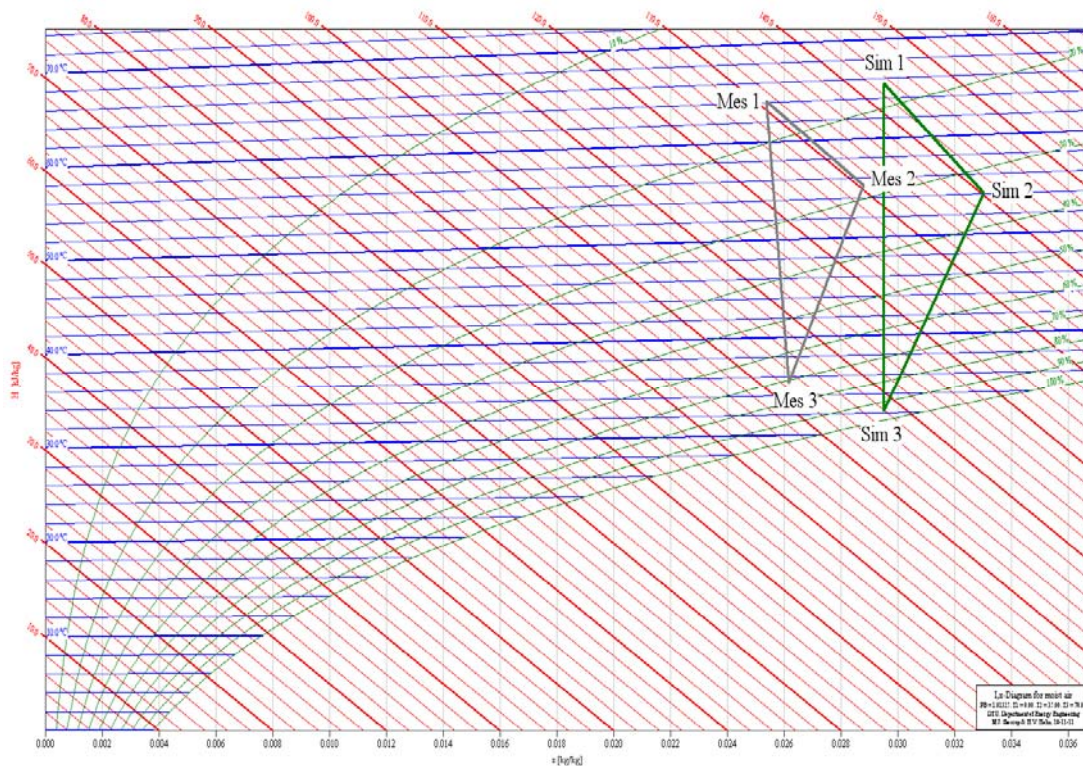


Abbildung 14: H-x-Diagramm Vergleich der Simulation mit Messung

Tabelle 3 zeigt einen Vergleich der wichtigsten Grössen zwischen Simulation und Messung. Hier ist ein weiterer Unterschied zusehen. Die Kondensationstemperatur ist bei der Simulation viel höher. Der real eingebaute Kondensator zeigt eine höhere Effizienz als der simulierte. Der Temperaturabstand zwischen gemessener Luftaustritts und Kondensationstemperatur ist deshalb kleiner. Im Prototyp wurde ein Wärmetauscher mit viel Flächenreserve verwendet, damit der Kondensationsdruck nicht zu hoch ist. Das Druckverhältnis im Verdichter ist klein, die Effizienz wird besser.

Messgrösse	Simulation	Messung 31.03.2011
$T_{Zelle, ein}$	65.4°C	64.1°C
T_{verd}	31.6°C	22.5°C
T_{kond}	71.8°C	64.7°C
P_{wp}	2850 W	1841 W
\dot{Q}_{verd}	14592 W	7456 W
\dot{Q}_{kond}	11742 W	5858 W

Tabelle 3: Vergleich Simulation mit Messung

3.2.4 Betrieb des Prototypen

Die Beschickung des Trockners erfolgt mit mehreren Netzen. Die geschnittenen Mango-Scheiben und Frites werden auf den Netzen verteilt. Die Mangos sollen einen kleinen Abstand zwischen den einzelnen Stücken haben, damit sie nicht zusammen kleben und die Luft zirkulieren kann. Die belegten Netze werden in den Trockner geschoben. Das unterste Netz trocknet am schnellsten. Von Zeit zu Zeit wird durch Öffnen der Tür der Trocknungszustand kontrolliert. Die Sorte der Früchte, der Reifegrad und die Umgebungstemperatur haben einen Einfluss auf den Prozess. Durch den Betrieb des Trockners werden laufend neue Erfahrungen gesammelt. So kann der Prozess immer besser abgeschätzt werden. Bei den Messungen dauerte die maximale Trocknungszeit ca. 14 Stunden. Sobald die Früchte auf einem Netz genügend getrocknet sind, werden sie entfernt. Die restlichen folgen von unten nach oben im zeitlichen Abstand. Sobald die ganze Kammer leer ist wird der Trockner wieder mit neuen Früchten bestückt. Damit der Trockner benutzt werden kann, muss er vor dem eigentlichen Gebrauch aufgeheizt werden. Die Anlage wird bei geschlossenen Türen gestartet, bis sich in der Kammer die gewünschte Temperatur einstellt. Der Vorgang beim Einschalten ist in Kapitel 3.6 beschrieben. Da für diesen Vorgang nur die elektrische Leistung zur Verfügung steht, muss drauf geachtet werden, dass möglichst wenig Energie verloren geht. Verlustquellen sind Abstrahlung und Konvektion an der Wand oder Luftverluste durch die diversen Spalten und Löcher. Während dem Betrieb wird die Kammertemperatur durch Veränderung der Luftgeschwindigkeit manuell geregelt. Der Einfluss der Lüfterdrehzahl (Luftgeschwindigkeit) ist auch in Kapitel 3.6 beschrieben. Die Erfahrung im Feld wird zusätzliche Erkenntnisse liefern. Eventuell muss die Förderleistung des Ventilators angepasst werden.

3.3 Installation des Kondensationstrockners in Burkina Faso

Nach erfolgreicher Entwicklung und erfreulichen Resultaten im Labor der NTB in Buchs erfolgte der Einsatz in Burkina Faso. Trotz einiger Komplikationen beim Transport und entsprechenden Schäden am Material konnte der Trockner schliesslich zusammen mit Technikern vor Ort installiert werden (Abb. 15, 16).



Abbildung 15: Der Unterbau wurde mit einem alten Lastkran an den Bestimmungsort gesetzt.



Abbildung 16: Die robuste Konstruktion lies grösseren Schaden am Trockner vermeiden.

3.3.1 Schulungen am Kondensationstrockner vor Ort

Parallel dazu erfolgten die Instruktion und eine erste Schulungen. Zwei Teams aus vier bis sechs Personen, die für die Zubereitung der Fruchtschnitzel zuständig waren, wurden über die Technik und Funktion des Trockners informiert und bezüglich des Ablaufs des Beladens der Trocknungskammer geschult. Zwei Handwerker erhielten eine Bauanweisung des Trocknungsgehäuses. Drei lokalen Technikern wurde das Wissen über die Grundlagen der Funktion der Wärmepumpe spezifisch für den Trockner vermittelt. Weiter erhielten sie die Instruktionen zur Messdatenerfassung und zum Vorgehen für weitere Trocknungsdurchläufe ohne Instruktionen durch den Projektleiter. Kontinuierlich wurden interessierte, lokale Inhaber und Benutzer konventioneller Gastrockner auf die neue Technik sensibilisiert und über die Handhabung informiert.

3.3.2 Installation, Messdatenerfassung

Zur Messdatenerfassung vor Ort wurden verschiedene einfache Datenlogger (Abbildung 19) innerhalb und ausserhalb des Trockners installiert. Diese kompakten USB-Datenlogger EL-USB-2 von Lascar electronics wurde wegen ihrer Robustheit und einfachen Handhabung für den Einsatz im Feld gewählt. Weiter war es hiermit möglich, die verantwortlichen Techniker in Burkina Faso auf die Erfassung und den Transfer der Daten an die Mitarbeiter des Ökozentrums zu schulen. Dafür wurde die Software in einen der lokalen PC's installiert und für weitere Installationen zur Verfügung gestellt. Danach folgten Anweisungen an zwei der Techniker bezüglich Bedienung und Datentransfer. Falls die Datenerfassung mit lokalem PC nicht klappen würde, wäre es immer noch möglich, die kompakten Logger über den Postweg in die Schweiz zu senden.



Abbildung 17: Der komplette Trockner, zusammgebaut an seinem Bestimmungsort bei Gebana Afrique.



Abbildung 18: Kompakte Datenlogger im Trocknungsraum installiert.



Abbildung 19: USB-Datenlogger EL-USB-2 von Lascar electronics

Zur Interpretation, übersichtlichen Darstellung und ausführlichen Dokumentation der erfassten Daten wurde im Ökozentrum eine Auswertungssoftware entwickelt (Abbildung 20).

3.3.3 Versuchsreihen mit dem Prototyp im Feld

Verschiedene Versuchsreihen wurden durchgeführt. Die Daten wurden mit entsprechender Software eingelesen und verarbeitet. Neben der elektronischen Datenerfassung wurde auch Rapport über die verschiedenen Schritte und Vorkommnisse während den Versuchsreihen geführt. Zusammen mit einem erstellten Diagramm konnten die Versuche somit ausführlich evaluiert werden. Im Diagramm wurden Temperaturen T [°C] und relative Feuchte rF [%] dargestellt. Die Y-Achse stellt den Wert in °C für die Temperaturlinien und % für die Linien der relativen Feuchte dar. In der Legende sind zusätzlich die Positionen der Messgeräte bezeichnet.

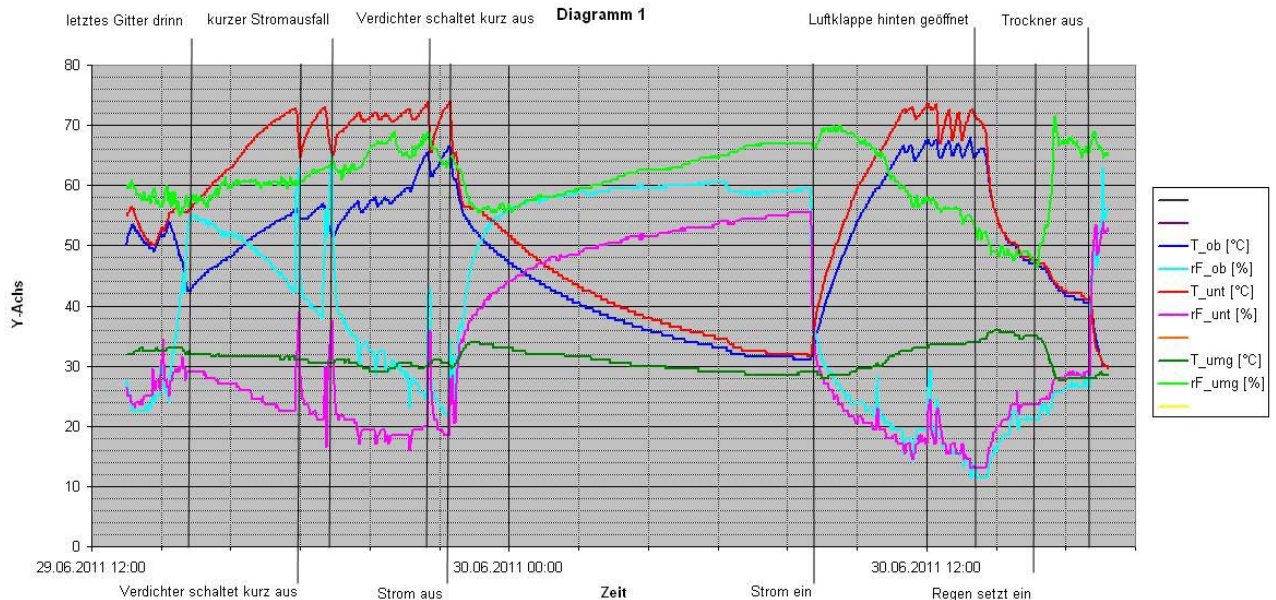


Abbildung 20: Ausgewertete Daten aus dem Feld, im Diagramm dargestellt.

Abbildung 20 zeigt eine Messung aus einem Trocknungsversuch vom 29.06 – 30.06.2011, bei dem die Messgeräte jeweils am oberen Teil der Trocknungskammer ($_ob$) und am unteren Teil ($_unt$) angebracht waren. Weiter wurden auch Daten der Umgebung ($_umg$) erfasst. Markante Merkmale wurden aus dem Rapport im Diagramm dargestellt, um eine schnelle Interpretation zu ermöglichen. In diesem Beispiel eines Trocknungsversuches fiel der Strom über Nacht aus, sodass bei der Trocknung ein Unterbruch entstand. Zu diesem Zeitpunkt stand noch kein Dieselgenerator zur Verfügung. In den weiteren Versuchen wurde ein Dieselgenerator als Backup bei Stromausfall eingesetzt. Im Diagramm sind auch kleinere Stromunterbrüche tagsüber ersichtlich.

Wegen Überhitzung der Anlage schaltete der speziell für diesen Betriebszustand konzipierte Überhitzungsschutz den Verdichter zwei Mal für kurze Zeit aus. Da eine Simulation der vor Ort herrschenden, extremen Umgebungsbedingungen in der Schweiz nicht möglich war, wurde für den Fall von hoher Umgebungstemperatur und gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit ein Überhitzungsschutz eingebaut. Dieser schaltet den Verdichter bei Erreichen von Extremwerten für kurze Zeit aus.

Anhand der Näherung der Temperatur- und Feuchtigkeitslinie der unteren und oberen Datenlogger kann man das Ende der Trocknung erkennen. Zur Kontrolle wurden in regelmäßigen Abständen Stichproben entnommen. Diese wurden von den Trocknungsspezialisten vor Ort auf den aktuellen Trocknungsgrad geprüft. Am Ende der Trocknung bewirkte das Öffnen der hinteren Luftklappe der Anlage einen raschen Temperatursturz und ein stetiges Steigen der relativen Feuchte im Trocknungsraum. Durch Zufuhr der Aussenluft, näherten sich die Werte im Inneren des Trockners den Werten der Umgebung. Zum Schluss des dargestellten Trocknungsversuches ist eine für diese Jahreszeit typische, kurze, aber heftige Regenschauer ersichtlich (Abbildung 20). Dies ist an der schnellen Änderung der Umgebungsdaten, der grünen Linien ersichtlich. In weiteren Versuchen wurden verschiedene Luftklappen (Bypass) zu unterschiedlichen Phasen der Trocknung geöffnet, um vor allem der Überhitzung des Systems entgegen zu wirken. Dies brachte wichtige Erkenntnisse zur weiteren Optimierung der Anlage.



Abbildung 21: Bei kurzen aber heftigen Regenschauer werden die Strassen schnell zu Flüssen.



Abbildung 22: Die grosse Bypassklappe am hinteren Teil des Trockners, zur Luftdurchmischung.

Die Werte der Temperatur- und Druckmessungen des Kältemittelkreislaufes sind direkt aussen an der Anlage ablesbar (Siehe Kapitel 2, Technische Lösung). Änderungen dieser Werte durch äussere Einflüsse und Eingriffe am Prozess wurden im Trocknungsrapport notiert. Das Kondenswasser und das Trockenprodukt wurden zum Schluss jedes Versuchsdurchgangs als Output erfasst und im Trocknungsprotokoll notiert. Die Aufmerksamkeit galt vor allem dem Massenstrom des Kondenswassers, der eine zentrale Rolle bei der Auswertung des Trocknungsverlaufes spielt. Die Trockenware wurde nach beenden des Trocknungsvorganges von den lokalen Spezialisten auf Qualität und Wassergehalt geprüft. Danach wurden die Trockenfrüchte nach Sorte, Reifegrad und Schnittform sortiert, in der entsprechenden Verpackung eingeschweisst und mit Daten und Bemerkungen angeschrieben. Somit war es möglich alle Chargen nach Optik und Geschmack zu beurteilen.



Abbildung 23: Getrocknete Mangos aus dem Kondensationstrockner, gewogen, verpackt und angeschrieben.

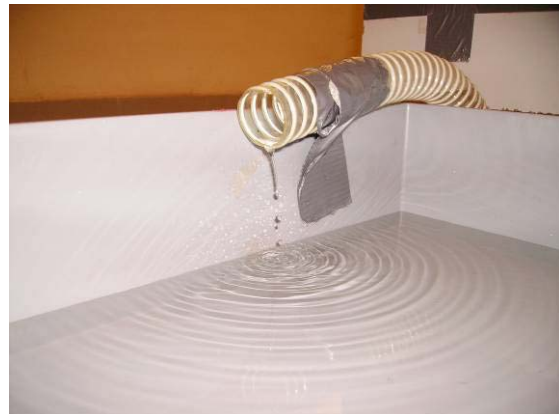


Abbildung 24: Kondensiertes Wasser aus dem Trockner als Nebenprodukt.

Mit jedem Trocknungsversuch gelang eine kleine Optimierung. So war eine Annäherung an die theoretisch ausgelegten Werten und die guten Resultaten aus den Versuchen des Labors an der NTB möglich. Allerdings schienen die Bedingungen vor Ort grösseren Einfluss auf die Anlage zu haben, als im Vorfeld vermutet.

3.3.4 CO₂-Reduktion und Energiekosteneinsparung

Eines der angestrebten Ziele des Projektes war die Reduktion des Energieverbrauches und somit der CO₂- Emission. Mit dem neuen System sind die Betriebskosten und die ermittelten CO₂- Emission nur knapp unter den Werten, die bisher mit dem konventionellen Gastrockner erreicht wurden.

Der Ausgangswert für den Gasverbrauch mit den bestehenden Gastrocknern vor Ort wurden aus dem „Guide de séchage (2005)“ entnommen. Im praktischen Vergleich vor Ort stellte sich dieser Wert als Idealwert ohne Berücksichtigung der Betriebsverluste heraus.

Laut Aussage von Gebana Afrique und Betreibern solcher Gasanlagen tragen die Verluste durch das Anschliessen der Gasflaschen an die Trockner, Leckagen in den Schläuchen, Rohren und Verbindungsstücken, unsachgemässe Handhabung usw. zu einer wesentlichen Erhöhung des Gasverbrauchs bei. Weiter muss ein wesentlicher Teil der Ware als verbrannter Ausschuss durch überhöhte Temperaturen entsorgt werden, was ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit mit sich führt.

Werte	Energiekosten [€/kg Trockenfrüchte]	CO₂-Emission [kg CO ₂ /kg Trockenfrüchte]
Theoretische Werte im konventionellen Betrieb mit Gastrockner (Quelle: Guide de séchage 2005)	0.33	2.1
Theoretische Werte ausgelegt für Prototyp-Kondensationstrockner	0.26	0.98
Praktische Werte im Betrieb mit konventionellem Gastrockner	0.75	4.78
Praktische Werte Prototyp-Kondensationstrockner nach ersten Versuchen vor Ort	0.66	2.46

Mit den Daten aus dem „Guide de séchage (2005)“ und den Kenntnissen über das vor Ort gebräuchliche Gas, wurden die Werte für die konventionellen Gastrockner im Vorfeld ermittelt.

1kg Propangas setzt bei der Verbrennung 3kg CO₂ frei. Mit 7kg Gas werden 50kg frische Mangoschnitze auf 10kg Trockenware gebracht. 40kg abgeführtes Wasser benötigen somit 7kg Gas und setzen somit 21kg CO₂ frei. Mit den Gaspreisen und der Währungsumrechnung vom Sommer 2011 betragen die Energiekosten für ein Kilo Trockenmangos umgerechnet 0.33 €. In der Praxis liegen die Energiekosten deutlich höher. Der Kilopreis beträgt für die Trockenfrüchte laut Aussagen von verschiedenen Trocknungsinstitutionen im Gebiet von Bobo Dioulasso im Durchschnitt bei umgerechnet 0.75 €. Dabei wird auch beachtet, dass bei der Handhabung und dem Anschliessen der Gasflaschen an die Trockner, Gas verloren geht. Auch gibt es in der Praxis mehr verbrannte Ausschussware an Trockenmangos, die den Kilopreis der qualitativ guten Ware steigen lässt. Der CO₂-Ausstoss lässt sich aus den Ausgaben für Gas berechnen.

Der Prototyp des Kondensationstrockners wurde in der Simulation auf eine Trocknungsleistung von 5kg Wasser/h ausgelegt, was zugleich 1.25kg Trockenware/h entspricht. Mit diesem theoretischen Resultat wurden die Werte des Energieverbrauches im Vorfeld ermittelt.

Heutige Diesellgeneratoren erzeugen ca. 0.8kg CO₂/kWh elektrisch. Der aktuelle Strommix in Burkina Faso besteht aus 70% fossiler Energieträger (grösstenteils Diesel) und 30% Wasserkraft.

Vor Ort war es durch die extremen Umgebungsbedingungen nicht möglich, die ausgelegten Werte zu erreichen. Im letzten Trocknungsversuch in Burkina Faso wurde eine Durchschnittliche Trocknungsleistung von 0.5 kg Trockenware pro Stunde erreicht.

Nach ersten Evaluierungen des Einsatzes vor Ort, wurde Optimierungspotenzial an Anlage und Prozess ersichtlich. Diese Optimierungen sollten es ermöglichen die Zielwerte der ursprünglichen Auslegung zu erreichen

4 Wirkungen

Das Projekt wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie mit dem Ziel eines Funktionsnachweises durchgeführt. Die Auswirkungen für die Bauern in Burkina Faso sind zurzeit zwar abschätzbar jedoch noch nicht eindeutig nachweisbar.

Auf folgende Wirkungen zielt das Projekt langfristig ab:

- Förderung der Wirtschaft in Burkina Faso und Einkommenssicherung der Bauernkooperativen
- Erschaffung von neuen Arbeitsplätzen im Bereich der Lebensmitteltrocknung und dazu gehörende Technologie
- Sicherung einer nachhaltigen Produktion von Trockenfrüchten
- Erhöhung der Qualität der Trockenfrüchte
- Reduktion der CO₂-Emission und der Produktionskosten bei der Trocknung von Lebensmitteln durch Einsatz erneuerbarer Energiequellen
- Risikominderung von Betriebsunfällen durch Gasbrand

5 Zukunftsperspektiven

Für den nächsten Schritt ist die praktische Umsetzung der Optimierungsmassnahmen an neuen Trocknern geplant. Darauf folgend soll die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen zur Stromerzeugung für den Kondensationstrockner stattfinden.

5.1 Optimierung des Kondensationstrockners

Mit den in Kapitel 6 beschriebenen Optimierungsmöglichkeiten im Trocknungsablauf soll der in der Simulation berechnete Wert bezüglich Kondenswasserstroms (5kg/h) erreicht werden. Dies erhöht die Produktionsmenge pro Zeit und senkt gleichzeitig die Produktionskosten und die CO₂ Emissionen. Die geplanten Optimierungsschritte sind in Kapitel 6 beschrieben.

5.2 Stromversorgung des Kondensationstrockners aus erneuerbaren Energien

Es werden verschiedene Varianten zur Stromversorgung aus erneuerbaren Energien evaluiert, um zukünftig beim Einsatz mehrerer Kondensationstrockner das Stromnetz nicht weiter zu belasten und auf zuverlässigen und sauberen Strom aus eigener Quelle zurückgreifen zu können. Neben einem Photovoltaik-Inselbetrieb könnte der Einsatz eines Biogasgenerators in diesem Falle eine besonders interessante Lösung darstellen. Während der Erntezeit können bei weitem nicht alle Früchte verwertet werden. Ein beachtlicher Teil davon verfault, bildet klimaschädliches Methan und bietet Insekten eine geeignete Grundlage um sich zu vermehren und den reifen Früchten am Baum zu schaden. Zusammen mit den grossen Mengen an Rüstabfall der verwerteten Früchte kann via Vergärung Biogas hergestellt und damit ein Biogasgenerator betrieben werden. Cashweenüsse werden ebenfalls vor Ort getrocknet, wobei die grosse Menge an Produktionsabfall laut Aussage lokaler Techniker, zur Herstellung von Biogas genutzt werden kann.

5.3 Schulungen/Markteinführung Kondensationstrockner

In Burkina Faso werden im Rahmen eines nationalen Berufsbildungssystems unter anderem Lehrkräfte im Bereich der Kältetechnik von der Organisation Swisscontact ausgebildet. Das Ökozentrum hat Kontakt zu den Kältetechnikern vor Ort aufgebaut, die das nötige Handwerk für den Aufbau des Kondensationstrockners besitzen. Mithilfe des lokalen Projektpartners werden zurzeit Organisationen und Unternehmen evaluiert, um eine Produktion weiterer Anlagen gewährleisten zu können.

Voraussetzung für eine zukünftig selbständig laufende Produktion in Burkina Faso müssen geschulte Handwerker und eine zur Verfügung stehende Infrastruktur und Werkzeug im eigenen Land sein. Eine internationale Organisation wie Swisscontact, die nachhaltige Hilfe zur Selbsthilfe leistet, indem sie kleine und mittlere Unternehmen mit Beratung und Ausbildung unterstützt, könnte die nötige Infrastruktur und das Werkzeug den Handwerkern vermieten oder sie mit Kleinkrediten unterstützen, bis sie mit Eigenkapital die Selbstständigkeit für die Produktion und Wartung der Anlagen erlangen könnten. Vom Ökozentrum wurde bereits, Kontakt zu zwei potenziellen Partnern aus Burkina Faso hergestellt, die Erfahrung mit Einsatz von erneuerbarer Energietechnik und Trocknung vor Ort besitzen. Samconsult International, www.samconsulti.com und Isomet, www.isomet-bf.com sind an zukünftiger Zusammenarbeit bei einer Weiterführung des Projektes interessiert. Dabei würde die Begleitung der nächsten Schritte zur Implementierung der erneuerbaren Energiequellen und zukünftige Beratung bei Bedarf vor Ort im Vordergrund stehen.

Ein sinnvolles Vorgehen für die unabhängige Produktion der Anlagen im eigenen Land, wäre eine vorerst intensive Begleitung des Betriebspersonals vor Ort. Dies könnte z.B. bedeuten, dass die erste Kleinserie durch die Schweizer Partner (Ökozentrum, NTB, Swisscontact) in der Beschaffung der Komponente und in Form von Schulungen zwecks Zusammenbau, Bedienung und Wartung ablaufen würde. Ein kontrollierter, schrittweise durchgeführter Rückzug der internationalen Hilfe sollte die Produzenten vor Ort an das angestrebte Ziel der Selbstständigkeit führen.

5.4 Zusammenfassung der geplanten Tätigkeiten:

- Optimierungen am Kondensationstrockner.
- Allgemeine Optimierungen am Gesamtprozess der jeweiligen Lebensmittelverarbeitung (Schälen, schneiden, mechanische Vortrocknung).
- Ausbildung von lokalen Fachleuten für den Aufbau einer Serienproduktion.
- Evaluierung neuer erneuerbarer Energiequellen für die Stromversorgung des Kondensationstrockners.
- Evaluierung möglicher Kombinationen mit Systemen basierend auf erneuerbarer Energie.
- Ausdehnung auf weitere Länder mit unterschiedlicher Produktpalette (andere Früchte). Bei erfolgreicher Implementierung und Multiplizierung weiterer Anlagen soll das Potenzial für andere Länder mit Bedarf in Afrika, Asien und Lateinamerika evaluiert werden.

6 Schlussfolgerung

Der Kern dieses Projektes bestand aus dem Funktionsnachweis eines, an die Bedingungen von Ländern wie Burkina Faso angepassten, vor Ort reproduzierbaren Lebensmittelrockners auf Wärmepumpenbasis. Die Evaluation bezieht sich deshalb primär auf die Technik der Anlage, den Prozessverlauf des Trocknungsvorganges und der Einführung und Sensibilisierung der lokalen Akteure durch erste, kleinere Schulungen.

6.1 Überhitzung des Systems

Die Herzstücke des Trockners sind ein kleiner Verdichter und für die optimale Luftströmung ein stufenverstellbarer Lüfter. Der Trockner benötigt für beide Komponenten auf höchster Stufe maximal 2kW. Der Trockner wurde für eine Trocknungskapazität von 5kg/h kondensierten Wassers ausgelegt, was rechnerisch eine Produktionskapazität von 1.25 kg Trockenfrüchte pro Stunde erlaubt..

Bei den ersten Trocknungsversuchen mit dem Prototyp vor Ort betrug die Produktion an Trockenfrüchten nur 0.5kg/h. Hauptgrund hierfür war, dass nach einer gewissen Laufzeit die Wärme im geschlossenen System durch den Verdampfer (kalter Wärmetauscher) nicht mehr abgeführt werden konnte. Der Trockner war somit in den ersten 8-10 Stunden am effizientesten, da sich das meiste Wasser der Früchte eher nahe an der Oberfläche befindet. Ausserdem sorgte das Wasser der frischen Früchte auch dafür, dass der Trockner nicht zu warm wurde und somit an den kalten Lammellen des Wärmetauschers kondensierte und aus der Anlage floss.

Nach dieser Zeit veränderten sich die Mangos. Das Wasser befand sich dann in der Mitte der Frucht und die Zellen an der Oberfläche waren durch die Trocknung verschlossen. Dieser Vorgang ist auch bei der konventionellen Gastrocknung zu beobachten und ist nicht bedingt durch die Überhitzung.

Ab diesem Zeitpunkt floss kaum noch Wasser aus der Anlage. Der Trockner konnte die Wärme dadurch auch nicht mehr effizient abführen.

6.1.1 Die Folgen

Diese zweite, kritische Phase des Trocknungsvorganges führte zu einem Hitzestau im Trockner bedingt durch eine zu geringe Wärmeabführung. Somit führte die Erwärmung des kalten Wärmetauschers zu einem Rückgang der Kondensationsleistung. Dies führt zu einer längeren Trocknungszeit und somit zu einem höheren Energieverbrauch pro Trockenprodukt. Die Qualität der getrockneten Früchte wird dabei nicht vermindert.

6.1.2 Lösungsansätze

Abnehmbare Isolation als Aussenwand

Die Wände des Trockners bieten grosse Oberflächen, die als Wärmetauscher genutzt werden können. Eine Abnehmbare Isolationsschicht gegen aussen hält die erwünschte Wärme in der ersten Trocknungsperiode im Inneren der Anlage und kann für die zweite Phase abgenommen werden um die überschüssige Wärme ab zu führen.

Vergrösserung der Trocknungskammer

Der Trocknungsraum soll mit der Menge an frischen Früchten gefüllt werden, die durch die Leistung des Verdichters gerade noch innerhalb von 24 Stunden getrocknet werden kann. Dafür muss noch die optimale Grösse des Trocknungsraumes praktisch ermittelt werden. Die Trocknungsdauer sollte wegen der Schimmelbildung an den Früchten 24 Stunden möglichst nicht überschreiten.

Kontinuierlicher Trocknungsprozess mit neuem Gitterladesystem

Mit den konventionellen Gastrocknern wird zurzeit im Batchbetrieb gearbeitet. Dabei wird eine durch das Fassungsvermögen des Trockners begrenzte Menge an Früchten als Ganzes der Anlage zugeführt und ihr als Ganzes nach Abschluss des Produktionsprozesses entnommen. Das Gegenstück zu dieser chargenweisen Handhabung ist ein kontinuierlicher Prozess.

Dies würde bedeuten, dass der Trockner kontinuierlich mit frischen Früchten nachgerüstet werden könnte im Austausch zur gleichen Menge an bereits trockener Ware. Durch die ständige Zufuhr nasser Produkte könnte somit eine Überhitzung der Anlage vermieden werden. Die grosse Herausforderung hierbei bestand darin, ein System zu entwickeln, das den kontinuierlichen Prozess auf eine technisch simple und robuste Weise gewährleisten würde. Hierfür wurde bereits im Verlauf der Projektdurchführung, eine Fördertechnik entwickelt, gebaut und im Labor des Ökozentrums getestet, die dieser Aufgabe gewachsen war.

Es soll die Möglichkeit bestehen, das unterste, mit Fruchtschnitzeln beladene Gitter aus dem Trockner zu nehmen, sobald diese Früchte den bestimmten Trocknungsgrad erreicht haben. Die Früchte des untersten Gitters werden aufgrund der Luftanströmung von unten, immer als erstes getrocknet sein. Danach sollen alle Gitter um einen Steckplatz nach unten verlagert werden, ohne die grosse Türe der Trocknungskammer zu öffnen, um zu vermeiden, dass Wärme ausströmt und feuchte Luft eindringt. Ein mit frischen Fruchtschnitzeln beladenes Gitter soll nun in den obersten Steckplatz geführt werden können. Für den Austausch des obersten und untersten Gitters ist jeweils nur das kurze Öffnen einer kleinen Klappe notwendig.

Das Prinzip der Fördertechnik beruht auf der Idee einer simplen Kindermurmelpbahn aus Holz. Die Gitter werden mit vier kleinen Rollen am Rahmen versehen und rollen somit auf den Holzschienen der jeweiligen Steckplätze. Durch eine schräge Aussparung in jeder Holzschiene fallen durch betätigen eines simplen Mechanismus alle Gitter um einen Steckplatz nach unten, sobald das unterste Gitter entfernt wurde.



Abbildung 25/26: System der Fördertechnik mit Rahmen für Fruchtgitter

Aus logistischen und organisatorischen Gründen war diese erste, kurzfristige Optimierung vor Ort leider nicht durchführbar.

Zusätzlicher Wärmetauscher in Kombination einer zweiten Nachtrocknungskammer

Nach der ersten, optimal verlaufenden Trocknungsphase (erste 8-10h) ändern sich die Eigenschaften des Trockenguts. Das Wasser befindet sich dann im Zentrum der Frucht und die Zellen an der Oberfläche ziehen sich beim Austrocknen zusammen und erschweren so die Wasserförderung an den Rand. Man könnte ab diesem Zeitpunkt von einem unterschiedlichen Produkt sprechen, das somit anders verarbeitet werden müsste um optimal mit der Trocknung weiter fahren zu können.

Eine viel versprechende Optimierungsmöglichkeit wäre hierbei einen weiteren, kleinen und simplen Wärmetauscher zu installieren um die überschüssige Wärme in eine Nebentrocknungskammer zu führen und dort die halbtrockenen Früchte nur noch durch diese Wärme vor sich hin "schwitzen" zu lassen. In der Zwischenzeit kann die Hauptkammer wieder mit frischen Mangos gefüllt werden, da genug Kälte für die Kondensation und somit das Abführen des Wassers vorhanden ist. Für den zusätzlichen Wärmetauscher würde der Kältemittelkreislauf zwischen dem Verdichter und dem Kondensator (warmer Wärmetauscher) angezapft werden. Dies hat den grossen Vorteil, dass der Verdichter keine höhere Leistung erbringen müsste, da an diesem Arbeitspunkt eine Überhitzung zum Schutz des Verdichters bereits vorhanden ist da das Kältemittel an diesem Punkt komplett gasförmig sein muss.

6.2 Kopplung mit Biogasanlage

6.2.1 Ausgangslage

Die Erschliessung mit Strom ist in Burkina Faso sehr niedrig. Die staatliche Elektrizitätsgesellschaft SONABEL betreibt 29 Thermo- und vier Wasserkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 223 Megawatt. Ein weiterer Teil des Strombedarfs wird durch Importe aus Ghana und der Elfenbeinküste gedeckt. Solarenergie dient der punktuellen Stromversorgung von Krankenhäusern oder Schulen in ländlichen Gebieten.

Das für die bestehenden Fruchttrockner benötigte Gas können sich die Bauern Burkinas für die Trocknung leisten, weil es vom Staat subventioniert wird. Dagegen wird für den Antrieb des Kompressors und des Ventilators im Kondensationstrockner elektrische Energie benötigt.

Um zukünftig beim Einsatz mehrerer Wärmepumpentrockner das Stromnetz nicht weiter zu belasten, wurden mögliche Stromquellen auf erneuerbarer Basis evaluiert.

6.2.2 Optionen für die Stromversorgung des Kondensationstrockners

Der Einsatz eines Biogasgenerators stellt in diesem Falle eine besonders interessante Lösung dar. Während der Erntezeit können bei weitem nicht alle Früchte verwertet werden. Ein beachtlicher Teil davon verfault und bietet Insekten eine geeignete Grundlage um sich zu vermehren und den reifen Früchten zu schaden. Zusammen mit den grossen Mengen an Rüstabfall wie Schale und Kern der zu trocknenden Früchte besteht die Möglichkeit Biogas herzustellen und damit den Biogasgenerator zu speisen. Idealerweise stehen andere biologische Abfallmassen wie z.B. Dung noch vor der Mangosaison zur Verfügung, um den Biogasreaktor zu bestücken, da eine Reaktionszeit von ein bis zwei Wochen benötigt wird. Andernfalls muss diese kurze Zeit durch Netzstrom und Dieselgeneratoren überbrückt werden.

Gebana Afrique kann auf Erfahrung mit Partnern der Biogasherstellung zurückgreifen, während das Ökozentrum Langenbruck in der Vergangenheit ein Entwicklungsprojekt mit Einsatz von Biogasmotoren in Peru unterstützte.

Photovoltaikanlagen sind auch in Entwicklungsländer immer mehr verbreitet und etabliert. Burkina Faso liegt nahe der Äquatoriallinie, was ganzjährlich eine günstige Ausrichtung zur Sonne bietet. Diese umweltfreundliche Technologie soll auch im Zusammenhang dieses Projektes gefördert werden. Eine Kombination einer solchen PV-Anlage mit einem Biogasgenerator könnte einen kontinuierlichen Betrieb der neuen Trockner auf Basis komplett erneuerbarer Energie gewährleisten. In der Regenzeit können kleinere Mengen an Batterien die kurzen Sonnenunterbrüche überbrücken. Während tagsüber die Photovoltaikanlage für die nötige Stromzufuhr sorgt, wird der Energiebedarf der Trocknungsanlagen über Nacht durch den Biogasgenerator gedeckt. Ausserhalb der grossen Trocknungssaison sorgt die Photovoltaikanlage für eine zuverlässige und umweltfreundliche Stromversorgung für weiteren Bedarf.

7 Referenzen

7.1 Referenzen zur Entwicklung des Prototyps

- Bertsch, S., Groll, E.A., 2008, Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U.S. climates, International Journal of Refrigeration, 31 (7), pp.1282-1292.
- Bertsch, S.S. and Groll, E.A., 2005, Air to Water Heat Pump for Low Temperature Climates, 8th International Energy Agency Heat Pump Conference, Las Vegas, NV.
- Chambre de Commerce, d'Industrie et d'Artisanat (CCIA-BF), 2005, Guide de l'entreprise de séchage de mangue au Burkina Faso.
- Ede A.J. and Hales K.C., 1948, The physics of drying in heated air with particular reference to fruit and vegetables, Special report / Department of Scientific and Industrial Research, Food Investigation
- Klein, S.A., 1992-2010, EES - Engineering Equation Solver, Version 8.665, F-Chart Software.
- Meteonorm, 2009, Version 6, METEOTEST, CH-3012 Bern, Switzerland
- Schmid M., 2009, Ökozentrum, Biogas Bagua- Schlussbericht

7.2 Publikationen des Projektes

- Jahresbericht 2011 Ökozentrum, Mai 2012, www.oekozentrum.ch
- Bericht im "ee-news", Januar 2012, www.ee-news.ch
- Bericht im Magazin "Planer + Installateur", April 2012, www.installateur.ch
- Bericht im Magazin "Friscaldo", März 2012, www.friscaldo.ch

7.3 Dank

Die Autoren des vorliegenden Berichtes möchten sich bei den folgenden Personen und Institutionen bedanken: Einen herzlichen Dank an das ganze Mitarbeiter-Team des IES am NTB Buchs für den Einsatz und Unterstützung in der Entwicklung des Prototyps. Des Weiteren möchten wir uns von ganzem Herzen bei Prof. Dr. Michael Arnemann von der HS Karlsruhe für seine wertvollen Tipps bei der Auswahl der Komponenten bedanken. Ein grosses Dankeschön an Michael Sattler vom Ökozentrum für die Unterstützung mit Fachwissen und Erfahrung. Vielen Dank auch an die Firmen Emerson Climate Technologies und Ziehl-Abegg für das Sponsoring von Komponenten des Trocknungsapparates.

8 Symbolverzeichnis

h	Enthalpie	$\frac{kJ}{kg}$
χ	absolute Luftfeuchtigkeit	$\frac{kg}{kg}$
p	Druck	kPa oder bar
$\Delta T_{WetBulb}$	Feuchtkugel-Temperaturunterschied	K
λ	Trocknungskoeffizient	$\frac{1}{kgK}$
$\dot{m}_{Kondenswasser}$	Kondensationsleistung	$\frac{kg}{h}$
χ_{Frucht}	Wassergehalt von Früchten	$\frac{kg}{kg}$
P_{WP}	elektrische Leistung der Wärmepumpe (Verdichter)	W
\dot{Q}_{el}	Verdichterleistung im Kältemittel	W
\dot{Q}_{kond}	Kondensatorleistung	W
\dot{Q}_{verd}	Verdampferleistung	W
$T_{\ddot{u}}$	Überhitzung	K
η_{isent}	isentropische Effizienz	-
η_{wp}	Wärmepumpen Wirkungsgrad	-
λ	Liefergrad	-
COP_{heizen}	COP	-
$\dot{Q}_{Luft,kond}$	Kondensatorleistung luftseitig	W
$\dot{Q}_{Luft,verd}$	Verdampferleistung luftseitig	W
\dot{m}_{km}	Kältemittelmassenstrom	$\frac{kg}{s}$
T	Temperatur	C
rF	relative Luftfeuchtigkeit	-
ψ	Trocknungsleistung	$\frac{kg}{hkW}$

Indices

1	Verdichtereinlass
2	Verdichterauslass
3	Eingang Expansionsventil
4	Ausgang Expansionsventil
Zelle, ein	Eintritt in den Trockenraum
Zelle, aus	Austritt aus dem Trockenraum
ZRaum	Zwischenraum zwischen Verdampfer und Kondensator

9 Anhang

Die folgenden Dokumente sind im Anhang vorhanden, um den Nachbau sowie die Inbetriebnahme und Instandhaltung der Anlage zu gewährleisten.

Stückliste

Konstruktionspläne

Dokumentation des Aufbaus des Kältekreislaufs

Zeichnung der Tropfwanne

Messstellenplan

Datenblatt Verdichter

Datenblatt Verdampfer

Datenblatt Kondensator

Datenblatt Ventilator

Schema Elektrosteuering

Quellcode Simulationsprogramm