



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

**Hochschule Neubrandenburg**  
**Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmitteltechnologie**  
Studiengang Lebensmitteltechnologie  
WS 2018/19

## **Bachelorarbeit**

# Optimierung der Trockenobstherstellung am Beispiel von Äpfeln mittels Infrarotstrahlung

urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2018-0832-9

Verfasser: Franz Hopp

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Heralt Schöne  
Dipl.-Ing. Sebastian Glaß

Studiengang: B.Sc. Lebensmitteltechnologie

Bearbeitungszeitraum: 14.11.2018 bis 16.01.2019

**Abstract**

This paper discusses the possible advantages of the use of infrared radiation in common drying processes by the example of the production of dried apple slices. The main goal was to reach a higher efficiency of the drying process while at the same time keeping the color and the taste as unharmed as possible.

An original testing chamber was built to accomplish these goals under almost realistic circumstances. It consisted of the hull of a usual oven, an integrated air circulation and infrared emitters with a total capacity of 1500 W. Those hang above the product surface. Different analytical methods were used: color measurement and weighing, as well as high temperature sensors inside the oven. In the beginning the specifications of the self-made drying chamber were analyzed to achieve a more detailed overview of different influences like the distance between the emitters and the apple slices or the effect of silvering. The results of the main tests that were conducted afterwards clearly showed that through the use of infrared drying the whole process time can be reduced while accomplishing as well the goal to keep the surface color almost unburned. Further, it can be stated that despite of the short drying time the dried apple slices kept their typical flavor while at the same time having a significant lower moisture content.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	5
2.	Grundlagen der Wissenschaft und Technik .....	6
2.1.	Physikalisches Prinzip der Infrarotstrahlung .....	6
2.2.	Trocknungsvorgang .....	9
2.3.	Prinzip des Trocknungsapparates und Grundlagen der Trocknungsversuche .....	11
3.	Material und Methoden .....	14
3.1.	Konstruktion des Trocknungsapparates .....	14
3.2.	Geräte und Rohstoffe .....	16
3.3.	Versuchsdurchführung der Vor- und Hauptversuche .....	16
3.3.1.	Durchführung der Vorversuche .....	16
3.3.2.	Durchführung der Hauptversuche .....	18
3.4.	Untersuchungsmethoden .....	20
4.	Ergebnisse und Diskussion .....	21
4.1.	Ergebnisse und Diskussion der Vorversuche .....	21
4.1.1.	Parameter des Trocknungsapparates und Überarbeitungen .....	21
4.1.2.	Vorversuche Obsttrocknung: Parameter Distanz, Leistung, Auskleidung .....	26
4.1.3.	Vorversuch Obsttrocknung: Vergleich Schichtdicke .....	29
4.1.4.	Zusammenfassung der Vorversuche .....	31
4.2.	Ergebnisse und Diskussion der Hauptversuche .....	32
4.2.1.	Optimierung des Farberhalts der Apfelchips .....	32
4.2.2.	Vergleich der Infrarottrocknung unterschiedlicher Apfelsorten .....	35
4.2.3.	Inaktivierung der Polyphenoloxidase und Rehydrierungsverhalten .....	40
4.2.4.	Sensorik .....	42
4.2.5.	Wirtschaftliche Betrachtung .....	45
4.2.6.	Zusammenfassung der Hauptversuche .....	47
5.	Empfehlungen bezüglich des industriellen Einsatzes .....	47

6.	Fazit der Arbeit.....	48
7.	Literaturverzeichnis.....	49
8.	Abbildungsverzeichnis .....	50
9.	Tabellenverzeichnis.....	51
10.	Formelverzeichnis .....	51
11.	Anhang .....	52
11.1.	Sensorikbögen.....	52
11.2.	Sensorik: Einfachbeschreibende Prüfung .....	55
	Eigenständigkeitserklärung .....	55

## 1. Einleitung

Der Trocknungsprozess ist eines der ältesten Konservierungsverfahren der Menschheit und die Nutzung von Infrarotstrahlung zur Trocknung von Lebensmitteln rückt aufgrund ihres Potentials bezüglich qualitativer und quantitativer Aspekte zunehmend in den Fokus von Forschungsprojekten. Dieser Umstand wird, unter anderem, durch die stetige technologische Weiterentwicklung und der damit einhergehenden erhöhten Verbreitung und in Folge der leichteren Zugänglichkeit für wissenschaftliche Institutionen, begünstigt. Ein weiterer Faktor ist das verstärkte Interesse der Konsumenten an schonend produzierten Nahrungsmitteln. Die Herausforderung besteht darin, dass der Nährstoffgehalt und das Aussehen größtmöglich der Rohware entsprechen. In Folge des ubiquitären Einsatzes von Trocknungsverfahren in allen Bereichen der Lebensmittelindustrie, sind jegliche evozierten wissenschaftliche Resultate von besonders hoher Relevanz.

Die Vorteile der Infrarottechnologie sind darin begründet, dass sich deren Wirkprinzip grundlegend von dem der Strömungstrocknung unterscheidet. Statt eines auf das Gut einwirkenden, aufgeheizten Luftstroms dringt bei der Infrarottrocknung die namensgebende Strahlung direkt ein und induziert im Inneren durch Dissipationsprozesse eine Aufheizung. Es ist folglich ein erhöhter Wirkungsgrad anzunehmen, da der eingesetzte Energieaufwand in Abhängigkeit von der Zeit geringer sein müsste, sofern die gleichmäßige Aufheizung im Gutsinneren tatsächlich auftritt. Im Unterschied zu der Mikrowellenstrahlung vollzieht sich dies jedoch langsamer, wodurch Probleme wie die Hotspotbildung verringert sind und somit Lebensmittel weniger stark geschädigt werden sollten.

Aufgrund dessen befasst sich diese Arbeit mit der Optimierung der Trockenobstherstellung am Beispiel von Apfelchips, einem Produktionszweig mit besonders langen Prozesszeiten und hoher thermischer Belastung der Produkte. Im Rahmen der Infrarotforschungsprojekte des „Zentrums für Ernährung und Lebensmitteltechnologie Neubrandenburg“ (ZELT), erfolgt die Konstruktion eines Trocknungsovens mit integrierten IR-Strahlungsemittern zur Untersuchung verschiedener Anwendungsgebiete der benannten Entfeuchtungstechnik. Ziel dieser Arbeit ist es, einen präzisen und validierbaren Überblick über die Wirksamkeit der Infrarotstrahlung als Obsttrocknungsmethode bereitzustellen, als auch deren Sinnhaftigkeit und die entsprechenden Voraussetzungen bei der Integration in Trocknungsprozesse genauer zu betrachten.

## 2. Grundlagen der Wissenschaft und Technik

### 2.1. Physikalisches Prinzip der Infrarotstrahlung

Infrarotstrahlung ist ein Teil des elektromagnetischen Spektrums und, im Gegensatz zum sichtbaren Licht, mit dem menschlichen Auge nicht zu erfassen. Der infrarote Bereich schließt direkt oberhalb der Wellenlänge von 780 nm, der Wahrnehmungsgrenze des Menschen, an (Lüders, 2006). Es findet eine Einteilung in folgende drei Wellenlängenbereiche statt: nahes Infrarot (0,78-2,5  $\mu\text{m}$ ), mittleres Infrarot (2,5-25  $\mu\text{m}$ ) und fernes Infrarot (25-1000  $\mu\text{m}$ ) (Zhang, Bhandari, Fang, 2017). Diese Abgrenzung ist bei der Justierung von Infrarotemittern zu beachten, da die Wellenlänge direkt mit der Temperatur des Strahlers korreliert, wie das Planck'sche Strahlungsgesetz aufzeigt. Jenes beschreibt die Stärke der Strahlung eines idealen schwarzen Körpers in Abhängigkeit von dessen Temperatur und ist eines der fundamentalen Prinzipien der Strahlungsforschung, da es verschiedene Annahmen einbezieht und bestätigt (Ginsburg, 1973).

$$(1.1) \quad E_{by}(T, \lambda) = \frac{2\pi hc_0^2}{n^2 \lambda^5 [e^{hc_0/n\lambda kT} - 1]}$$

$E_{by}$  definiert die Strahlungsstromdichte, ausgehend von einem schwarzen Körper. Die verbleibenden Konstanten sind  $h$ , die Planck'sche Konstante ( $6.626 \times 10^{-34}$  Js),  $\lambda$  bezeichnet die Wellenlänge in  $\mu\text{m}$ ,  $n$  steht für den Refraktionsindex des Umgebungsmediums (im Vakuum beträgt dieser 1),  $c$  ist die Lichtgeschwindigkeit,  $T$  die definierende Temperatur und  $k$  die Boltzmann-Konstante mit dem Wert  $1,3806 \times 10^{-23}$  J/K (Pan, Atunglu, 2011; Ginsburg 1973). Planck zeigt hierdurch auf, dass die Materialeigenschaften des emittierenden Körpers für dessen Emission unerheblich sind. Grundlegend für die Erklärung dieses Zusammenhangs innerhalb des Planck'schen Gesetzes ist die Annahme, dass das Absorptions-, Reflexions- und das Durchlassvermögen jedes Körpers den auftretenden Energiefluss bestimmt. Zu beachten ist, dass eine direkte Abhängigkeit zwischen den jeweiligen Vermögen besteht, woraus sich die folgende Formel ergibt (Pan, Atunglu, 2011).

$$(1.2) \quad A + R + D = 1$$

Die resultierenden idealen Körper, je nach absoluter Verteilung, sind in Tabelle 1 erläutert. Allesamt treten in der Realität jedoch in Mischzuständen, den sogenannten grauen Körpern, auf und dienen den theoretischen Vorüberlegungen beim Einsatz von Strahlungssystemen. Hieraus wird die Penetrationstiefe der Strahlung bei dem jeweiligen Produkt determiniert, woraus praktische Überlegungen folgern (Dobrinski, Krakau, Vogel, 2009).

Ein hohes Absorptions- und Transmissionsvermögen sind bei dem Trocknungsgut ideal, um einen möglichst hohen Strahlungseintrag zu bewirken. Anders ist dies bei der Oberfläche des Trocknungsraum, welche als „weißer“ spiegelnder Körper gestaltet sein sollte, wodurch eine ubiquitäre Verteilung der reflektierten Strahlen erzeugt wird. Die Strahlungsquelle ist idealerweise mit dem schwarzen Strahler gleichzusetzen, besitzt somit ein vollendetes Absorptionsvermögen und emittiert, im Einklang mit dem Kirchhoff'schen Gesetz, reine Infrarotstrahlung (Ginsburg, 1973).

Tabelle 1: Körperattribute

Körperart	Absorptionsvermögen	Reflexionsvermögen	Durchlassvermögen
Schwarzer Körper	1	0	0
Weißer Körper	0	1	0
Diathermer Körper	0	0	1

Bosnjakovic postuliert in seinem Buch „Technische Thermodynamik“ den Zusammenhang des Stefan-Boltzmann-Gesetzes mit dem Planck'schen Strahlungssatz. Die Stärke der Emission ist von der Temperatur in der vierten Potenz abhängig (Bosnjakovic, 1988).

$$(1.3) \quad E_s = \sigma * T^4$$

Somit ist auch das Wien'sche Verschiebungsgesetz bei Planck enthalten, welches die namensgebende Verschiebung zu kleineren Wellenlängen bei steigender Temperatur beschreibt. Zudem wird hierüber die maximale Strahlungsintensität bei der größtmöglichen Wellenlänge ermittelt (Pan, Atunglu, 2011; Dobrinski, Krakau, Vogel, 2009).

$$(1.4) \quad \lambda * T = 0,002898 \text{ m} * \text{K}$$

In der Praxis sind diese physikalischen Zusammenhänge allerdings nur bedingt anwendbar, da hierbei die Problematik auftritt, dass sich insbesondere Lebensmittel voneinander stark in ihrer Zusammensetzung und Oberflächenstruktur unterscheiden. Die Literaturangaben für die Penetrationstiefe bei Äpfeln variieren demzufolge auch zwischen Angaben von vier bis acht Millimetern, je nach Wellenlänge der eingesetzten Strahlung und der spezifischen Probenaufbereitung (Grdzlishvili, 2012; Ginsburg, 1973; Pan, Atunglu, 2011). Die Literatur empfiehlt die Anwendung von nahem bis mittlerem Infrarot (Zhang, Bhandari, Fang, 2017), bei welcher die Wassermoleküle ein Maximum an Absorption besitzen, während die Strahldichte bei fernem Infrarot nicht ausreichend ist, um in das Trocknungsgut einzudringen (Abbildung 1). Verglichen mit Mikrowellenstrahlung wirkt der infrarote Bereich stärker auf die Moleküle des Wassers ein (Pan, Atunglu, 2011).

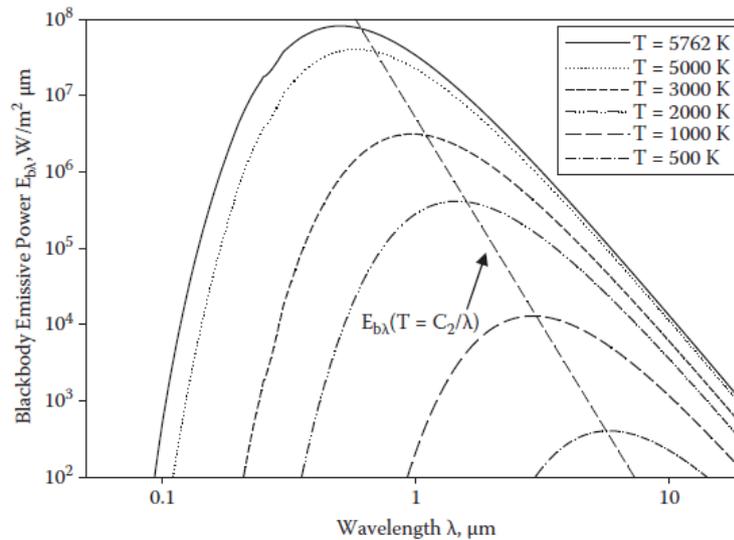


Abbildung 1: Verteilung der Strahldichte gemäß dem Wien'schen Verschiebungsgesetz (Pan, Atunglu, 2011)

Der Abfall der Emissionsstärke bei zunehmender Wellenlänge wird in der Grafik deutlich aufgezeigt, weshalb ein Infrarotsystem möglichst in der Nähe der maximalen Strahlungsstärke agieren sollte. Eine Näherungsformel wird außerdem bereitgestellt, mit welcher die Emittertemperatur bei einer gewünschten Wellenlänge zu ermitteln ist (Pan, Atunglu, 2011; Ginsburg 1973).

$$(1.5) \quad \lambda_{max} = \frac{2898}{T}$$

Die Relevanz des Planck'schen Gesetzes bleibt somit bestehen, da am Emitter nur der einfließende Stromfluss geregelt werden kann, um bestimmte Wellenlängen zu fokussieren, wodurch wiederum verschiedene Eindringtiefen geregelt werden können. Grundlegende Kenntnisse der Strahlungseigenschaften sind deshalb unabdingbar für die Durchführung von Versuchen und die Konstruktion der Versuchsanlage. Abschließend ist festzustellen, dass die Nutzung von Infrarot gleichwohl Vor- und Nachteile aufweist. Im Vergleich zur gängigen Wärmeströmung sind der erhöhte Wärmeübertragungskoeffizient und die verkürzte Prozesszeit zu benennen. Es ist somit möglich, gleichzeitig bei Vakuum, als auch in einem offenen System, den Trocknungsprozess auszuführen, wodurch sich die Anwendungsdiversität erhöht. Die geringe Eindringtiefe ist jedoch zugleich der benachteiligende Faktor und begrenzt wiederum die Einsatzmöglichkeiten des Systems, weshalb eine exakte Einstellung der Emitter obligatorisch ist. Wird diese nicht durchgeführt, ist der gesamte Trocknungsverlauf davon in hohem Maße beeinflusst (Zhang, Bhandari, Fang, 2017).

## 2.2. Trocknungsvorgang

Trocknungsprozesse dienen seit jeher der Senkung des Wassergehaltes unter Zuhilfenahme von thermischer Energie und bezwecken demzufolge die Haltbarmachung von Lebensmitteln, da bei einem verringerten Aw-Wert der mikrobielle Verderb ganz oder teilweise unterbunden wird. Dies hängt damit zusammen, dass der Großteil der Mikroorganismen freies Wasser als Nährmedium zum Überleben zwingend benötigt. Unterschreitet der enthaltene Aw-Wert einen jeweils artspezifischen Wert, kann eben diese in dem Gut nicht länger den vegetativen Zustand aufrechterhalten und stirbt (Ebert, 2016). Ein geringer Endwassergehalt führt jedoch gleichzeitig zu weiteren Vorteilen abseits der reinen Lagerfähigkeit, so auch hinsichtlich sensorischer Aspekte wie dem Bissverhalten und der gewünschten Textur. Die Nutzung von Strahlungsapparaten rückt, aufgrund ihrer im Kapitel 2.1 aufgezeigten Eigenschaften, vermehrt in das Interesse der Großindustrie, um hierdurch finanziell, als auch qualitativ, zu profitieren. Davon ist im Besonderen die Erforschung der Einsatzmöglichkeiten von Infrarotsystemen betroffen, denn trotz der weitverbreiteten Nutzung industrieller Konvektionsanlagen in Entfeuchtungsverfahren, ist die Infrarottrocknung ein zugleich altes, wie ebenso vielversprechendes Verfahren. Die Trocknung von Früchten mittels der Sonne wurde bereits von frühgeschichtlichen Volksgruppen durchgeführt. Eine weitreichende Erforschung erfolgte jedoch erstmals im Zuge der Elektrisierung und Industrialisierung, weshalb die Entschlüsselung des Strahlungscharakters und dessen Eigenschaften erst Anfang des 20. Jahrhunderts gelang. Aufgrund der immensen Energiekosten und der geringeren Effektivität, hervorgerufen durch die schlechte Regulation der Emitter, blieb die Massentauglichkeit der Technologie allerdings der breiten industriellen Anwendung verwehrt. Hieraus resultiert unter anderem das ubiquitäre Vorkommen von Konvektionssystemen. (Pan, Atunglu, 2011; Ginsburg 1973).

Die zugrundeliegenden Vorgänge der Trocknung sind indes bei allen Trocknungsarten identisch: Thermische Energie wird durch eine Strahlungsquelle erzeugt und in den Prozess eingebracht, wirkt auf das Produkt ein, überführt das darin enthaltene Wasser in die Gasphase, woraufhin dieses, dem Partialdruckgefälle entsprechend zur Oberfläche strömt und das Gut verlässt. Für den austretenden Massestrom definiert Grdzelishvili folgende Formel, welche näherungsweise für die Apfelchips funktioniert.

$$(1.6) \quad \text{Feuchteaustritt je m}^2 = \frac{m_A - m_E}{(5 \cdot 60) \cdot A}$$

Folglich endet die Trocknung, sobald das darüber liegende Medium gesättigt ist, oder keine weitere Feuchtigkeit mehr das Gut verlässt, also das mechanisch und physikalisch gebundene Fruchtwasser ausgetreten ist und der Massestrom versiegt (Kraume, 2012; Gnielinski, Mersmann, Thurner, 1993). Daraus erschließen sich drei bestimmende Trocknungsfaktoren, welche in gegenseitiger Abhängigkeit zueinander stehen.

Einerseits existieren die jeweiligen Eigenschaften des zu dehydrierenden Produktes und andererseits des eingesetzten Fluids, in welches der Feuchteaustrag übertritt, und der einwirkende Wärmestrom  $Q$  (Schwister, 2001; Zhang, Bhandari, Fang, 2017). Eigenschaften wie die Materialdichte, Schichtdicke, Wassergehalt und allgemeine stoffliche Zusammensetzung des feuchten Guts determinieren die Art der anzuwendenden Entfeuchtungsparameter (Kraume, 2012; John, 2017). Wie im vorhergehenden Kapitel aufgezeigt, ist für verschiedene Schichtdicken und Stoffe die Nutzung anderer Wellenlängen unabdingbar, um eine ausreichende Dissipation der Strahlen im Inneren des Trocknungsgutes zu generieren. Außerdem ist der Strahlungsprozess unabhängig von einem Zwischenmedium, weshalb es möglich ist, auf dieses zu verzichten. Vakuumtrockner sind jedoch konstruktionsaufwändig und nur bedingt für kontinuierliche Prozesse geeignet. Zudem profitiert der Trocknungsprozess von einem überströmenden Fluid, da dieses mittels Umwälzungseinrichtungen einen Feuchtestau verhindert. Insbesondere bei weit fortgeschrittener Dehydrierung ist dies von großer Bedeutung, da die Produkte meist stark hygroskopisch reagieren und die Feuchtigkeit zurück auf das Gut übertragen wird, sofern kein Abtransport von der Produktoberfläche geschieht. Ferner bildet die zunehmend mit Wasser gesättigte Atmosphäre einen Schildeffekt über dem Produkt, welcher einen Teil der Strahlung absorbiert, ähnlich dem Wirken einer Wolkenschicht auf die eintreffende Sonnenstrahlung. (Goody, Yung, 1989).

Ein weiterer Aspekt bei Trocknungsprozessen im Allgemeinen ist der Geschwindigkeitsabfall im zunehmenden Prozessverlauf. Dieser resultiert aus der Zunahme trockener Zonen und Kapillarverschlüsse innerhalb der Randbereichen hervorgerufen durch die starke Temperaturbelastung, in denen der Feuchteaustrag blockiert wird. Das Prinzip der Infrarotstrahlung impliziert allerdings ein vermindertes Auftreten dieser Symptome, da die Aufheizung gleichzeitig im Gut geschieht, weshalb anzunehmen ist, dass der Trocknungsverlauf über einen längeren Zeitraum, verglichen mit der Konvektionsanwendung, linear stattfindet (Nowak, Lewicki, 2005). Die verschiedenen Einflüsse bedingen die entsprechende optimale Bauart des Trockners für einen schnellen und erfolgreichen Trocknungsprozess.

### 2.3. Prinzip des Trocknungsapparates und Grundlagen der Trocknungsversuche

Zur Anwendung der Infrarottechnologie gibt es vermehrt Forschungsarbeiten und Publikationen, welche als Grundlage für eigene Versuche genommen werden können, da insbesondere Empfehlungen für weiterführende Forschungen aufgestellt werden. Deshalb wird kurz auf die Studienarbeit „Vergleich Infrarot- und Konvektionstrocknung“ eingegangen. Problematisch war bei dieser insbesondere die Nutzung eines mangelhaften Infrarotstrahlers für die Produktion der Untersuchungsmuster (Hopp, 2017).

Der dabei verwendete Sartorius MA 40 ist prinzipiell nur als Schnellfeuchtebestimmer in Laboratorien konzipiert und in der Lage, ein mittleres bis fernes Infrarot zu emittieren (Sartorius, 2002). Dieses wird mittels eines Metallrohrstrahlers erzeugt und dringt nicht sehr weit in die Probe ein, korrelierend mit der Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Wellenlänge nach Wien. Vorteilhaft für die zugrundeliegende Arbeit war allerdings das integrierte gravimetrische Messsystem, mit welchem der Trocknungsverlauf kontinuierlich dokumentiert werden konnte. Gleichwohl ist dieses einzig für eine Probenmessung konzipiert und deshalb limitierend bezüglich des Maximalgewichts der Einwaage. Grammaturen von fünf Gramm benötigten bereits Trocknungszeiten von über einer Stunde. In der Vorarbeit konnte außerdem der, in der Literatur mehrfach benannte, Zeitvorteil nicht nachgewiesen werden. Die Infrarottechnik unterlag in den Vergleichsversuchen deutlich. Der MA 40 besitzt des Weiteren keinerlei Zirkulation, wodurch ein Feuchtigkeitsstau hervorgerufen wird, da der entweichende Wasserstrom am Gut verbleibt und den Trocknungsfortschritt demnach kontinuierlich beeinträchtigt. Die Bestrahlung des Guts erfolgt darüber hinaus nur von oben, die Unterseite ruht hingegen auf einer geschlossenen Oberfläche. So muss die Strahlung einerseits die Probe in Gänze durchdringen, die Feuchtigkeit in der entgegengesetzten Richtung aber auch die gesamte Schichtdicke zum Verlassen passieren (Hopp, 2017). Eine Lösung hierfür wäre der Einsatz eines Gitters als Grundfläche, welche die zwingend benötigte Permeabilität beider Austrittsflächen erzeugt und folglich die Bestrahlungs- und Entwässerungsfläche des Trocknungsgutes verdoppelt, wie in den Grundlagen angesprochen. In der Realität nimmt jedoch mit jeder Reflexion (1 bis 4) die Strahlungsdichte ab, wodurch die verbleibende Strahlung, je nach dem eingesetzten Material und dessen Absorptionsvermögen, ab einer gewissen Anzahl an Reflexionen nicht mehr genug Energie besitzt, das Gut aufzuheizen (Abbildung 2). Somit ist eine zweite Strahlungsquelle nicht einfach durch das Anbringen verspiegelter Wände zu ersetzen; eine verbesserte Wirksamkeit, verglichen mit einem unverspiegelten Apparat, sollte aber nachzuweisen sein.

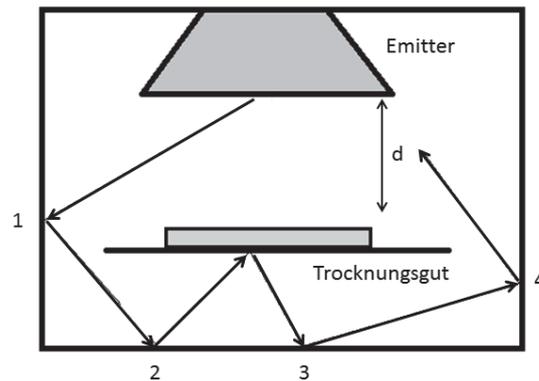


Abbildung 2: Reflexion der Strahlung im Trocknungs-ofen (Hopp, 2018)

Die Grafik zeigt zudem auch die Abhängigkeit der Distanz des Emitters von dem Trocknungsgut auf. Hierauf wurde bei den physikalischen Prinzipien nicht näher eingegangen, da Ginsburg postuliert, dass die Absorption durch ein Zwischenmedium wie Luft nur knapp 2 % beträgt; die Strahlung somit ungehindert hindurchtritt. Trotzdem ist diese Variable für die Konstruktion unentbehrlich, da zwar die Energie als nahezu konstant angenommen werden kann, die Strahlung jedoch über einen größeren Bereich verteilt wird und folglich der spezifische Energieflux mit zunehmender Entfernung abnimmt. (Pan, Atungulu, 2011). In der Formel ausgedrückt, ist  $Q$  die Wärmestrahlung,  $Q_r$  die bei einer Distanz von  $r$  zwischen Emitter und Trocknungsgut auftretende spezifische Strahlung.

$$(1.7) \quad Q = \frac{Q_r}{r^2}$$

Wie folgende Gleichung zeigt, ist jedoch der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ , bei Einsatz eines Fluids wie Luft, von wesentlich größerer Bedeutung für die Zeit  $t$  bis zum Auftreten einer kontinuierlichen Verdampfung, als die Entfernung (Pan, Atunglu, 2011).

$$(1.8) \quad t = 0,45 + 0,0001 \left( \frac{r}{100} \right)^{2,2} + 1,8v^5$$

Die Integration eines Feuchtemessprinzips ist langfristig angedacht und soll gegebenenfalls noch während der Arbeit realisiert werden, stößt jedoch auf verschiedene Probleme. Mechanische Wägesysteme sind recht simpel zu konstruieren, hitzebeständig und ausreichend genau, problematisch ist allerdings die Integration in einen abgeschlossenen Apparat, ohne grundlegende Veränderungen zu bewirken. In der industriellen Anwendung sind gravimetrische Anlagen in mechanischer Ausführung des Weiteren kaum zu verwerten. Optische Sensoren versagen indes an der inhomogenen Trocknung von Naturprodukten, hervorgerufen durch natürliche Feuchtigkeitsreservoirs, welche eine Wellung des Guts erzeugen.

Weitere Möglichkeiten wären verschiedene Fühlsysteme innerhalb der Kammer, diese sind allerdings sehr kostenaufwendig und meist nur für Schüttgüter geeignet, was Anpassungen bedarf (Döscher GmbH, 2018). Die Nutzung eines elektrischen Widerstands scheidet noch immer an den unüberwindbaren Zellkompartimenten, einzig eine Entnahme und Zerkleinerung könnten funktionieren, hintergeht jedoch den Anwendungszweck einer Onlinemessung. Der Umbau eines Fassadenfeuchtemessers wird vorerst nicht weiter verfolgt. Reflexionsphotometrische oder spektroskopische Untersuchungsmethoden sind dem hingegen vielversprechende Systeme, da deren Strahlen in das Gut eindringen und demzufolge während des gesamten Prozesses als Messinstanz für den Wassergehalt fungieren können. Allerdings könnte der Einsatz einer weiteren Infrarotstrahlungsquelle die Messung überlagern, weshalb dem voran eine Untersuchung der tatsächlich emittierten Wellenlänge im Gerät steht (Zhang, Bandhari, Fang, 2017).

Die Wahl von Apfelchips erfolgt aus verschiedenen Gründen. Zum einen ergibt sich hierdurch die Möglichkeit eines Vergleichs mit den vorhergehenden Arbeiten von Dorota Nowak und Franz Hopp. Zudem besitzen Äpfel einen sehr hohen Wasseranteil von knapp 80 % je nach Sorte und sind ganzjährig zu akquirieren (Stoll, 1997). Trocknungserfolge, als auch Veränderungen der Inhaltsstoffe und der Enzymaktivität, sind deshalb einfacher nachzuvollziehen als bei anderen Obstprodukten. Von Interesse sind, ob der in den verschiedenen Vorarbeiten postulierte, Zeitvorteil mittels des ZELT-Ofens nachzuweisen ist und inwiefern sich die Infrarottechnik tatsächlich auf die verschiedenen Attribute wie den Farberhalt, die Rehydrierungsrate und insbesondere auf den Restfeuchtegehalt auswirkt (Nowak, Lewicki, 2005; Pan, Zhu, 2008). Das Verhalten der Rheologie ist interessant zu betrachten, da aus einem guten Bissverhalten auch sensorische Präferenzen abzuleiten sind. Fällt der Wassergehalt unter einen bestimmten Level im Produkt, resultiert ein Bruch mit zeitgleichem Auftreten eines akustischen Signals, dem Knacken. Dies folgt daraus, dass bei einer geringen Restfeuchte die Zellstrukturen an Elastizität einbüßen und die Zellmembranen sich irreversibel von der Zellwand lösen. Die Kompartimente werden spröde und zerbrechen unter mechanischer Energieeinwirkung. Hierfür muss, laut Literatur, ein Wassergehalt von 25 % unterschritten werden (Brockhaus, 2011). Außerdem wird postuliert, dass die enzymatische Bräunung bei derart niedrigen Feuchtegehalten im Produkt reduziert wird. Für diese ist die Polyphenoloxidase verantwortlich, welche jedoch bei einer Temperatur von über 80°C ohnehin ausfällt, was in Abbildung 3 im Vergleich dargestellt ist. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die enzymatische Bräunungsreaktion einzig das Produkt bei 60°C betrifft, welches zudem einen höheren Restfeuchtegehalt nach den Versuchen aufwies.

Es ist von Interesse, ob ein inhibierender Effekt auch bei Temperaturen unter 80°C bei gleichzeitig niedrigem Endwassergehalt auftritt. Dadurch könnten produktschonendere Temperaturen zu ähnlicher Farbstabilität führen.



Abbildung 3: Lagertest (11 Monate) unter Vakuum, enzymatische Bräunung (Hopp, 2018)

Der Trocknungsprozess dauert in moderneren industriellen Konfigurationen für Trockenobst circa vier Stunden (Seeberger, 2017), in älteren Systemen ist die Zeit jedoch dreimal so hoch. Aus derart langen Verfahrenszeiten entfallen hohe Kosten für Energieträger, die auch trotz des größeren Energieaufwands von den Strahlungssystemen ausgeglichen werden können (Schnitzler, 2016; Kraume, 2012). Um die Prozesszeit zusätzlich zu reduzieren, ist eine Erhöhung der Temperatur möglich, wie die zugrundeliegende Arbeit von Correa und Santos zeigt. Demzufolge steigert sich in direkter Abhängigkeit die Trocknungsrate, wobei ein Oberflächenverschluss ausbleibt. Auch diese Zusammenhänge werden in den Versuchen eingehend betrachtet.

### 3. Material und Methoden

#### 3.1. Konstruktion des Trocknungsapparates

Für den speziell konstruierten Trocknungsapparat, dient ein handelsüblicher Kombi-Standherd der Firma „AEG“ als Grundlage. Dieser wurde gänzlich entkernt, da einzig der Ofenraum benötigt wird, wobei die durch die Entfernung der Ofeneinbauten erzeugten Löcher soweit möglich verschlossen wurden. Vorteilhaft ist das große Volumen des Gerätes, wodurch beträchtliche Stückmengen an Probengut gleichzeitig eingebracht werden können. Außerdem erfolgte die Installation eines Lüfters an der Rückwand, durch welchen ein stetiges Umwälzen der Ofenluft vorgesehen ist, indem dieser die gesättigte Atmosphäre ausbringt.

Um eine Abschirmung der heißen Ofenflächen gegenüber versehentlichem Kontakt zu gewährleisten, ist weiterhin die ursprüngliche Außenverkleidung installiert. Dabei geschah jedoch die Entfernung der Dämmwolle einerseits aufgrund von konstruktionsbedingten Zwängen und der Vermeidung von zusätzlichen Isolationseffekten im Infrarotraum. Als Strahlungskörper sind vier Emittter der Firma „RPE“ mit insgesamt 1500 Watt Leistung an der Decke des Trocknungsraums montiert, um die Produkte größtmöglich bestrahlen zu können. Von einem vertikalen Einbau rät der Hersteller zudem ab. Außerdem ermöglicht diese Konstruktion die weitere Nutzung der Rostgitter, wodurch verschiedene Distanzen zu den Emitttern eingestellt werden können. Das Reglerelement HL 16 von der Firma „Horst“, ist integriert vor der Stromversorgung der Strahlungsemitter und ermöglicht eine stufenlose Verstellung der anliegenden Leistung. Zudem ist eine einfache Entnahme der Strahler gewährleistet, wodurch die Emittter auch in zukünftigen Testsystemen erneut montiert werden können. In der Abbildung 4 ist der Trocknungsapparat schematisch dargestellt.

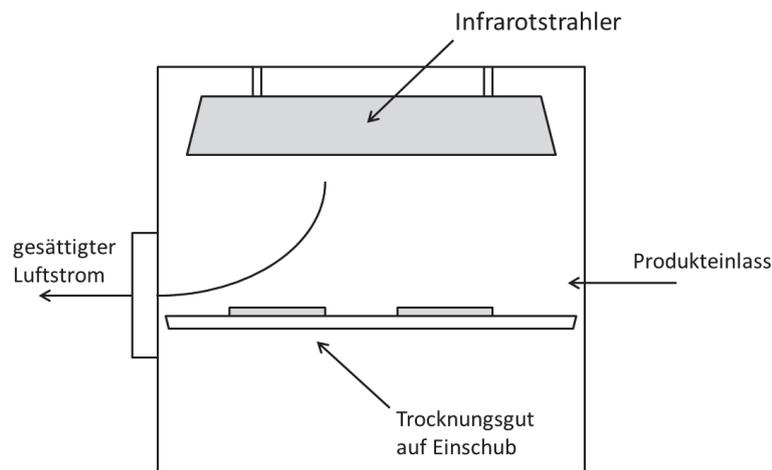


Abbildung 4: IR-Trocknungsapparat (Hopp,/ Taraba, 2018)

Im Rahmen der Versuche ist angedacht, den Trocknungsraum gemäß den Vorüberlegungen in Punkt 2.3. zu verspiegeln, um eine größtmögliche Strahlungsverteilung zu generieren und das Abstrahlen des Ofens nach außen zu unterbinden. Allerdings fungieren die dunklen Wandungen auch als eigene Schwarzstrahler, da die absorbierte Energie von dem Metall gleichermaßen emittiert wird. Eine kontinuierliche Aufnahme der Temperaturen ist durch eingebrachte Fühler des „ELLAB“-Messsystems möglich. Der Erhalt der ursprünglichen Ofenfront lässt außerdem eine visuelle Kontrolle des Trocknungsfortschritts im laufenden Prozess zu. Durch die Nutzung eines ausrangierten Küchenofens, ist bauartbedingt eine komplette Abschirmung gegen die Umgebungsatmosphäre allerdings sehr aufwendig zu realisieren, weshalb Vakuumversuche nicht weiter verfolgt werden.

### 3.2. Geräte und Rohstoffe

Für die Bearbeitung der Einzelversuche und der dazugehörigen Untersuchungsmethoden werden mehrere Laborgeräte zwingend benötigt, sowie Rohware für die zu erstellenden Proben. In der nachfolgenden Tabelle sind die eingesetzten Laborgeräte und Rohstoffe der Vor- und Hauptversuche aufgezeigt.

Tabelle 2: Geräte und Rohstoffe

<b>Rohstoffe</b>	<b>Firma</b>	<b>Sonstiges</b>
Äpfel (unbehandelt)	-	Gala, Braeburn, Granny Smith
Leitungswasser	-	ZELT Neubrandenburg
<b>Geräte</b>	<b>Firma</b>	<b>Sonstiges</b>
Trocknungsgapparat IR	ZELT (Taraba / Hopp)	1500 Watt Leistung
Thermometer	Ebro (Ingolstadt)	-
Waage	Sartorius (Göttingen)	Bestand ZELT
Stoppuhr	-	Bestand ZELT
Farbmessgerät Colorflex	Hunterlab (Murnau)	-
Aw-Wert Messer	Aqua Lab 2	-
Küchenschneidmaschine	-	Bestand ZELT
Luftumwälzungsmesser	Testoterm (Lenzkirch)	-
Wärmebildkamera	Bosch (Stuttgart)	GTC 400C
ELLAB Messfühler	ELLAB (Gyhum)	Ofenfühler
Schnellfeuchtebestimmer	Sartorius (Göttingen)	MA 40
Leistungsmessgerät je kWh	-	240 V / 16 A / 50 Hz
Kernstecher, Schüsseln, etc.	-	Bestand HS Neubrandenburg

### 3.3. Versuchsdurchführung der Vor- und Hauptversuche

#### 3.3.1. Durchführung der Vorversuche

Ziel der Vorversuche ist es, die Funktionsweise des Trocknungsapparats genauer zu betrachten, um aus den gewonnenen Erkenntnissen sinnvolle Untersuchungsparameter für die anschließenden Hauptversuche zu generieren. Angedacht ist dabei die Kontrolle der Trocknungseigenschaften des integrierten Emittersystems und der Leistungsfähigkeit des angebrachten Lüfters. Hierdurch soll geprüft werden, inwiefern der Apparat für die Untersuchungen der Hauptversuche geeignet ist und inwieweit eine Umwälzung der gesättigten Atmosphäre im Inneren der Strahlungskammer gewährleistet ist.

Ein Stress- und Leistungstest erfolgt zu Beginn. Hierfür wird eine definierte Menge an Leitungswasser (500 ml mit 21 °C) eingebracht, um eine maximale Wasserdampfatmosphäre im Gerät zu erzeugen, während die Leistung der Emitter in definierten Intervallen hochgefahren wird. Das genutzte Programm ist in der Tabelle 3 aufgezeigt. Dieser Versuch dient vorrangig der Detektion von konstruktionsbedingten Fehlern, da hieraus Veränderungen an der Bauweise abzuleiten sind. Die Lüftungsstufe wird bei den hohen Leistungen auf das Maximum gestellt, um eine überhitzte Atmosphäre in dem Gerät zu verhindern und dadurch die Emitter zu schonen.

Tabelle 3: Stresstest IR-Trocknungsapparat

<b>Zeit in min ab</b>	<b>Zeit in min bis</b>	<b>Leistung in % / W</b>	<b>Lüftungsstufe</b>
0	10	50 % / 750 W	0,2 m/s
10	20	70 % / 1050 W	0,2 m/s
20	30	90 % / 1350 W	0,3 m/s
30	60	100 % / 1500 W	0,3 m/s

Die anschließenden Trocknungsvorversuche dienen der allgemeinen Vorbereitung auf die Hauptversuche, indem verschiedene Trocknungseinflüsse getestet werden, um sich auf diese Weise den spezifischeren Untersuchungen anzunähern und ein besseres Verständnis über die Wirkweise des Trocknungsofens zu gewinnen. Dafür werden mittels des „ELLAB“ die Temperaturen während der Trocknung des unbeschickten Ofens kontinuierlich aufgezeichnet, weshalb im Inneren vier Messfühler eingebracht werden, welche sich im Abstand von 5, 10, 15 und 20 cm von der Strahlungsquelle befinden.

Für die folgenden Trockenobstversuche werden die rohen Äpfel entkernt, in fünf Millimeter dicke Scheiben geschnitten und anschließend in den Trocknungsofen eingebracht. Folglich ist das Ablageschema wichtig, da eine getaktete Offlinemessung stattfindet, für welche eine Entnahme der Produkte in einem fünfminütigen Intervall durchgeführt wird. Die gravimetrische Differenz zwischen der Einwaage und dem Produktgewicht nach der jeweiligen Zeit gibt hierbei Aufschluss über den Trocknungsfortschritt und erfolgt bis zur Massenkonstanz der Trocknungsgüter oder endet nach Ablauf der 60 Minuten Prozesszeit. Die veränderlichen Parameter sind die Leistung des Emitters, die Schichtdicke der Apfelscheiben und die Distanz des Guts von der Strahlungsquelle. Die Versuche werden jeweils im verspiegelten und unverspiegelten Versuchsstand durchgeführt, da von Interesse ist, inwieweit die Auskleidung praktische Relevanz hat. Aus den Resultaten werden erste Trocknungsprogramme gebildet, welche anschließend auch unverzüglich getestet werden.

### 3.3.2. Durchführung der Hauptversuche

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Vorversuchen, erfolgt die Optimierung der Apfelchiptrocknung unter Einsatz unterschiedlicher Programme, hinsichtlich der eingesetzten Leistung, Sorte und der Prozesszeit.

Während die Vorversuche einzig dazu dienen, den Nutzen des Infrarottrocknungsapparats hinsichtlich der Obsttrocknung zu überprüfen, ist bei den Hauptversuchen von primärem Interesse, inwieweit die, in den theoretischen Grundlagen, benannten Vorteile der Infrarottrocknung tatsächlich auftreten.

Charakteristika für den spezifischen Trocknungserfolg sind der möglichst geringe Restwassergehalt und ein Erhalt der Farbe. Das Auftreten einer bräunenden Maillardreaktion ist somit ein Minderheitskriterium, ebenso wie die Bräunung durch einwirkende Enzyme. Hierbei ist von Interesse, welche Programme den bestmöglichen Erhalt der Inhaltsstoffe garantieren, wie sich unterschiedliche Parameter auf den Trocknungserfolg auswirken und wie Trocknungsprobleme minimiert werden können. Die Probenaufbereitung der Sorte Gala wird in gleicher Weise wie bei den Vorversuchen ausgeführt, aufgrund deren Resultate eine Scheibendicke von drei Millimetern genutzt wird. Für die Optimierung des Farberhalts werden verschiedene Einstellungen im Apparat (Tabelle 4) erneut ausgetestet, welche ein möglichst ideales Ergebnis erzeugen sollen.

Tabelle 4: Programme Farberhalt

	Zeit in min ab	Zeit in min bis	Leistung in % / W
<b>Farberhalt Programm 1 (FP 1)</b>	0	10	90 % / 1350 W
(15 cm Distanz)	10	20	70 % / 1050 W
3 mm Scheibendicke	20	40	50 % / 750 W
<b>Farberhalt Programm 2 (FP 2)</b>	0	20	70 % / 1050 W
(15 cm Distanz)	20	30	60 % / 900 W
3 mm Scheibendicke	30	40	50 % / 750 W
<b>Farberhalt Programm 3 (FP 3)</b>	0	10	90 % / 1350 W
(10 cm Distanz)	10	20	70 % / 1050 W
3 mm Scheibendicke	20	40	50 % / 750 W
<b>Farberhalt Programm 4 (FP 4)</b>	0	10	70 % / 1050 W
(10 cm Distanz)	20	30	60 % / 900 W
3 mm Scheibendicke	30	40	50 % / 750 W

Nach dem Erhalt eines ersten akzeptablen Trocknungsschemas erfolgt ein Vergleich des Trocknungsverhaltens unterschiedlicher Apfelsorten. Für die Versuche kommen die Sorten Gala, Braeburn und Granny Smith zum Einsatz, welche sich sensorisch stark voneinander unterscheiden und somit eine gute Diversität bei der Sortenauswahl bilden.

Während der Untersuchungen wird der Trocknungsapparat gestaffelt beschickt. Die erste Charge trocknet demzufolge fünf Minuten, die zweite zehn und so weiter. Dies hat den Vorteil, dass keine Ungenauigkeiten wie bei den Vorversuchen auftreten, bei welchen jeweils der Ofen geöffnet werden musste, um eine Differenzmessung des Probenguts auszuführen. Die Temperatur kann demnach kontinuierlich und ohne äußere Einflüsse, hervorgerufen durch die Öffnung der Ofentür, über die gesamte Zeit gehalten werden. Für die Ermittlung, inwieweit eine Inaktivierung der Polyphenoloxidase stattfindet, geschieht eine Rehydrierung der Endprodukte. Vollzieht sich im Anschluss erneut eine Bräunungsreaktion im Kontakt mit dem Luftsauerstoff, ist eindeutig festzustellen, dass keine ausreichende Zerstörung des Enzyms vorliegt. Diese Methodik ist simpel und zugleich hoch effektiv. Es wird zudem die Rehydrationsrate erfasst welche angibt wie schnell das Gut erneut Wasser aufnehmen kann. Diese ist insbesondere für die industrielle Anwendung interessant, da getrocknete Produkte zwar energieaufwendig herzustellen sind, gleichwohl jedoch wesentlich geringere Lagerkapazitäten beanspruchen und demzufolge eine gute Feuchtigkeitsaufnahme vorteilhaft ist, um das Trocknungsgut zurück in seinen ursprünglichen Zustand zu versetzen.

Sensorische Veränderungen bezüglich der Geschmacksintensität und Wahrnehmung sind ebenso von Interesse, weshalb zu diesem Zweck ein Panel aus mindestens 15 Personen mit sensorischer Vorkenntnis gebildet wird, um eine einfach beschreibende (DIN 10964) und eine hedonische Skalenprüfung (DIN 10950) durchzuführen. Ausgangspunkt ist die Ermittlung, inwieweit die Akzeptanz der hergestellten Apfelchips gegeben ist, und welche Charakteristika womöglich typisch für die infrarotgetrockneten Apfelchips sind. Anschließend erfolgt eine Betrachtung mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA mit  $\alpha = 0,05$ ), um zu untersuchen, ob eine drastische Abgrenzung der einzelnen Trocknungsprodukte auftritt. Es wird angenommen, dass die sensorischen Unterschiede der einzelnen Sorten hierbei einen deutlichen Effekt haben müssten.

Die fertigen Produkte werden, um einen frühzeitigen Verderb zu unterbinden, unter einer Stickstoff-Kohlenstoffdioxid-Atmosphäre gasdicht verpackt. So werden gegebenenfalls auftretende Oxidationsprozesse aufgehalten und eine erneute Wasseraufnahme zu verhindert.

### 3.4. Untersuchungsmethoden

Ziel dieser Untersuchungen ist die Kontrolle der beschriebenen qualitativen Vorteile des Infrarottrocknungsverfahrens. Hierfür erfolgt zu Beginn die Untersuchung des Apparates mittels des Luftumwälzungsmessers der Firma „testoterm“, mit welchem die Luftzirkulation im Inneren der Kammer zu überprüfen ist. Dieser wird mittig in der Kammer eingebracht und dient der Messung des anliegenden Luftstroms zentral unter den Emittlern.

Für die schnelle Messung des Trocknungserfolges während der Versuche, und somit der Erstellung einer Trocknungskurve, werden die gravimetrischen Differenzen der getrockneten Produkte zum Ausgangsgewicht mittels einer geeichten Laborwaage protokolliert.

Für die schnelle, wenn auch grobe, Untersuchung geschieht im Anschluss die Anwendung des Schnellfeuchtebestimmers „MA 40“ der Firma Sartorius, für validierbare Werte kommt indes die Seesandmethode zum Einsatz, welche im §64 für Lebensmitteluntersuchungen festgehalten ist.

Die Kontrolle des Farberhalts wird mithilfe des „Colorflex CT“ durchgeführt, für welchen der dreidimensionale L\*A\*B\*-Farbraum Anwendung findet, welcher ein universell übertragbares und zugleich konkret definiertes Ergebnis erzeugt, indem jeder Buchstabe hierbei die Ausprägung eines farblichen Charakteristikums exakt beschreibt. Es wird eine Dreifachbestimmung durchgeführt und im Anschluss der Mittelwert gezogen. Daran schließt zudem die Bestimmung des Aw-Werts an, weshalb zu diesem Zweck die Proben mittels eines Labormixers zerkleinert und daraufhin in die Probenschälchen des „Aqua Lab“ eingebracht werden. Das Gerät misst über die sogenannte Taupunktmethode, wodurch Genauigkeiten von +/- 0,003 Aw erreicht werden können (Gerber Instruments, 2006).

Eine Aufnahme der Temperaturen erfolgt mithilfe des „ELLAB“ Messsystems, dessen Hochtemperaturfühler an verschiedenen Stellen in den Ofen eingebracht werden, um eine möglichst ubiquitäre Verteilung an Messzonen zu erzeugen. Die intervallartige Protokollierung und die Ausgabe der Messwerte erfolgen über einen angeschlossenen Drucker. Der Betrachtung der anliegenden Temperaturen im und an den Außenseiten des Gerätes dient eine Wärmebildkamera der Firma „Bosch“, mit deren Hilfe eine schnelle Kontrolle der Temperaturentwicklung des Apparats durchführbar ist, was mithilfe des „ELLAB“ nicht möglich wäre. Durch die unmittelbare visuelle Darstellung der Hitzeentwicklung im Ofen ist genau nachzuvollziehen, ob die Gefahr einer Überhitzung am Kabelgehäuse auftritt.

## **4. Ergebnisse und Diskussion**

### **4.1. Ergebnisse und Diskussion der Vorversuche**

#### **4.1.1. Parameter des Trocknungsapparates und Überarbeitungen**

Ziel dieser Versuche ist es, die Funktionsweise und Leistungsfähigkeit des gebauten Trocknungsapparates zu bestimmen, um hieraus genaue Angaben über die konstruktionsbedingt einfließenden Faktoren zu erzielen.

Ein erster Stresstest nach dem Bau dient der Identifikation bezüglich potentieller Mängel, indem hierfür die Anlage nach dem, in der Tabelle 3 benannten, Programm unter kontinuierlicher Beaufsichtigung hochgefahren wird. Die äußere Ummantelung schützt den Anwender effektiv vor Verbrennungen durch direkten Kontakt, die stufenlose Regulation der Strahler funktioniert unmittelbar und die eingebaute Ofenrückwand, welche als Hitzeschild für den Lüfter agiert, ist ausreichend, sodass der Kunststofflüfter auch bei hohen Temperaturen einwandfrei arbeitet. Der eingewogene halbe Liter Wasser konnte während des Prozesses auf mittlerer Distanz von 20 mm auf eine Menge von 300 ml reduziert werden, dies bei einer gemessenen Wassertemperatur von 80 °C. Es ist somit anzunehmen, dass die Trocknungstechnik für die Hauptversuche akzeptable Temperaturen generiert, allerdings führte ein Ausfall der Emitter zu einer Verzögerung der Versuche. Der Defekt entstand durch eine ungenügende Zirkulation und Kühlung der Emitter, da die Isolierung eines Kabels während des Prozesses schmolz und einen Kurzschluss evozierte.

Hieraus resultieren verschiedene Überlegungen zum weiterführenden Umbau der Anlage, da von einer zu hohen Temperatur und Luftfeuchte, anliegend an den Emittern, auszugehen ist, welche den Kurzschluss induziert haben könnten. Die enge Bauform und die unzureichende Leistung des Lüfters (0,2 bis 0,3 m<sup>2</sup>/s), führten zu einer zu hohen Belastung des Gerätes.

Um solch einen Fehler in weiteren Experimenten zu verhindern, wird die Ofendecke geöffnet, wodurch der Strahler zukünftig nicht mehr mit im Trocknungsraum hängt und somit Überhitzungsprobleme vermindert werden, wie in Abbildung 5 dargestellt ist. Die Ummantelung des Ofens wurde zudem an verschiedenen Stellen mit zusätzlichen Öffnungen versehen, um ein Rückstrahlen der Wandungen auf den Emitter weitestgehend auszuschalten.

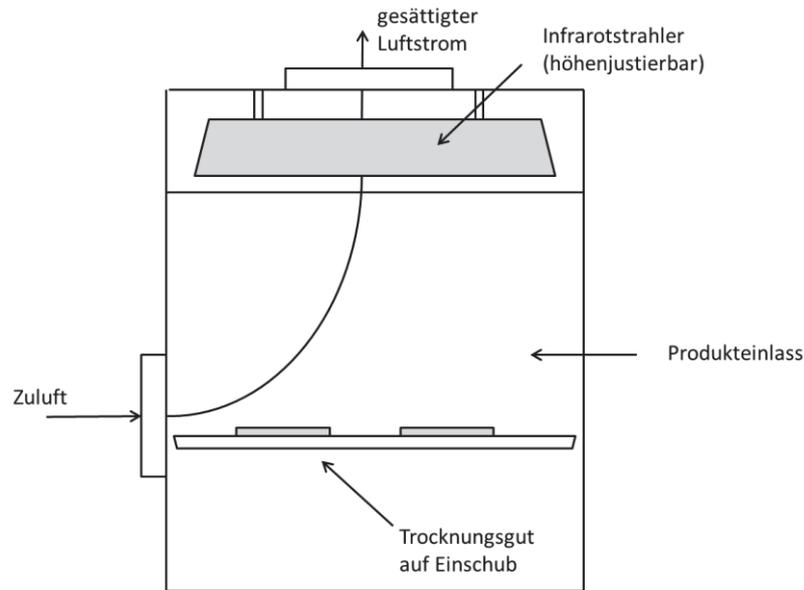


Abbildung 5: IR-Trocknungsapparat nach Umbau (Hopp, Taraba, 2018)

Zwei hinzukommende Lüfter oberhalb der Emitter dienen nun dem kontinuierlichen Abzug der anliegenden gesättigten Luft, wodurch der in den Grundlagen beschriebene Wasserdampfschild abgezogen wird. Eine gerichtete Strömung zum Strahler hingegen ist kontraproduktiv, da sie die Strahlungsleistung herabsetzen würde. Das neue System behält die Vorteile der ursprünglichen Konstruktion bei, der verstärkte Luftstrom ist jedoch zusätzlich hilfreich bei der Trocknung, wie auch von El-Mesery in den Grundlagen postuliert.

Es ist jedoch, gleichwohl der Optimierung und des Konstruktionsfehlers im ersten Versuch, zwingend anzumerken, dass das Strahlungsmodul mehrere Konstruktionsmängel aufweist. So ist letztlich die Abschirmung der Verkabelung nicht ausreichend gegen die Umgebungsfeuchte isoliert, wodurch auch der erste Kurzschluss ausgelöst wurde. Zudem entstehen im Kabelgehäuse, wie die Aufnahmen der Wärmebildkamera in Abbildung 6 beweisen, hohe Temperaturen von 80 bis 90 °C, hervorgerufen durch das Anliegen der Metallflächen des Gehäuses an den eigentlichen Strahlern, wodurch ein Wärmeleitungseffekt entsteht, welcher auch bei ausreichendem Freihängen der Emitter nicht unterdrückt werden kann. Aus diesem Grund erweisen sich die sehr freie Bauform der Ofenummantelung und die zugeschaltete Ablüftung als unabdingbar, um ein Funktionieren des Apparats sicherzustellen. Ein weiteres Problem, das möglicherweise auch die Trocknung beeinflussen wird, ist die ungleichmäßige Befestigung der einzelnen Strahlungsemitter, wodurch auf die einzelnen Trocknungsgüter an verschiedenen Stellen im Apparat unterschiedlich stark die Infrarotstrahlung einwirken könnte. Dies könnte die Standardisierung von Produktchargen zusätzlich erschweren.

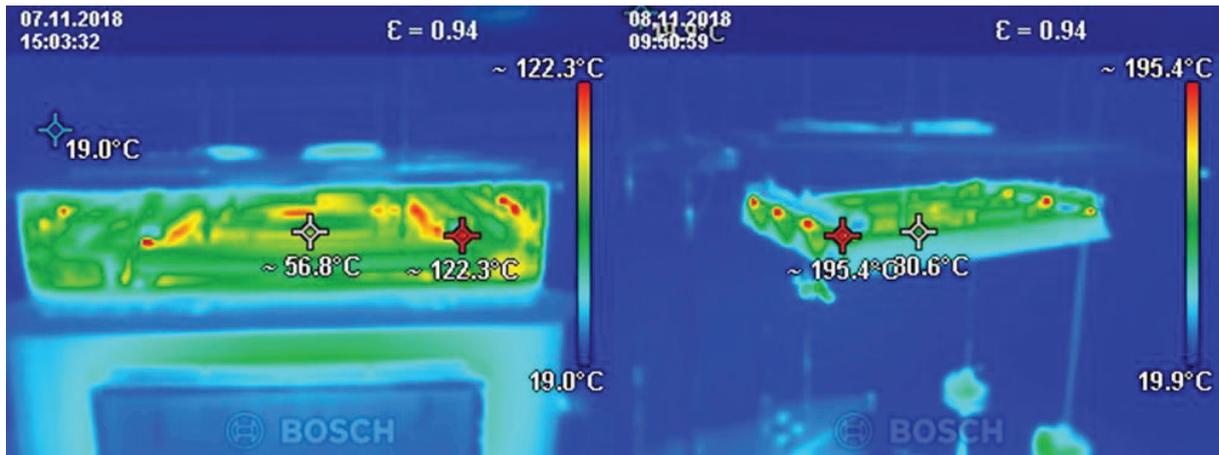


Abbildung 6: Vergleich IR-Emitter Temperaturentwicklung (links eingebaut / rechts frei montiert) (Hopp, Taraba, 2018)

Von einer anderweitigen Bauform, beispielsweise dem Einbau am Boden des Gerätes, ist gleichwohl abzusehen, da hierdurch diese Problematik nicht gelöst wird und zudem Trocknungsgut in das Modul herabfallen kann, wodurch Beschädigungen an jenem verursacht werden könnten.

Um für die verschiedenen Versuchsreihen eine Ausgangslage zu schaffen, erfolgt im Anschluss die Überprüfung der Einflussnahme der Parameter Emitterleistung und der Distanz des Trocknungsguts. Hierbei ist zu beachten, dass, wie in der Gleichung 1.8 postuliert wird, die Distanz des Emitters nicht im gleichen Maße einflussnehmend auf den Trocknungsverlauf ist, wie die Strömungsgeschwindigkeit des anliegenden Fluids. Trotzdem bewirken Absorptionsvorgänge und eine erhöhte Streuung mit zunehmender Distanz eine Abnahme der Strahlungsstärke. Die abgegebene Wellenlänge des Emitters, nach der Formel 1.5, liegt zwischen 10 und 15  $\mu\text{m}$ . Eine exaktere Temperaturermittlung der Strahler ist nicht möglich, weshalb von Werten zwischen 200 °C und 300 °C ausgegangen wird.

Die Betrachtung der Leistungsfähigkeit des Emitters in Abhängigkeit von der Entfernung zum Probegut geschieht jeweils für zehn Minuten, wobei jedoch geringe Ungenauigkeiten durch kurze Abkühlzeiten zwischen den Messreihen aufgetreten sein könnten. Diese bedingen sich aus der stetigen Kontrolle der auftretenden Temperaturen mittels der Wärmebildkamera in und um die Emitterverkabelung, da ein weiterer Ausfall derer unbedingt zu verhindern ist und auf diese Art eine Überlastung des Systems frühzeitig ermittelt werden soll. Die jeweiligen Aufheizzeiten nach dem Versuchsstopp sind somit nicht erfasst, da einzig die im Durchschnitt gemessene Maximaltemperatur für die Auswertung dieses Zusammenhangs Relevanz besitzt. In der Tabelle 5 sind die jeweiligen Temperaturen bei den einzelnen Strahlungsleistungen, welche mit Messfühlern in verschiedenen Distanzen innerhalb des Apparats zum Emitter erfasst wurden, aufgestellt.

Tabelle 5: Einfluss der Parameter Leistung und Distanz

Intensität	Temperatur bei 5 cm	Temperatur bei 10 cm	Temperatur bei 15 cm	Temperatur bei 20 cm
10%	22,29	22,04	22,04	21,84
20%	24,98	24,33	24,37	23,72
30%	28,89	27,69	27,76	26,65
40%	33,45	31,37	31,72	30,14
50%	33,70	31,08	32,02	30,57
60%	41,20	37,13	38,55	36,83
70%	45,43	40,38	42,02	39,99
80%	53,38	46,28	48,88	46,38
90%	51,18	46,65	48,55	45,60
100%	62,55	57,00	59,05	54,78

Es ist deutlich zu erkennen, dass eine Erhöhung der prozentualen Leistung des Emitters gleichermaßen höhere Temperaturen erzeugt, auch wenn diese an den Messpunkten geringer ausfallen, als vorher angenommen. Die Temperaturen unmittelbar unterhalb des Strahlers belaufen sich selbst bei voller Last nur auf 60 bis 65 °C; dies wird unter anderem durch die kontinuierliche Luftströmung hervorgerufen. Aufgrund des dissipativen Effekts in dem entsprechenden Trocknungsgut ist jedoch anzunehmen, dass an diesem höhere Temperaturbereiche zu erwarten sind, was die Ergebnisse des ersten Stresstests zudem bekräftigen, bei welchem eine Verdampfung des Wassers erfolgreich durchgeführt werden konnte. Die beschriebenen Einflüsse der untersuchten Parameter Leistung, Distanz und Temperatur werden in der Abbildung 7 graphisch dargestellt. Der Einbruch bei neunzigprozentiger Auslastung ergibt sich nachträglich wohl aus einer Messabweichung.

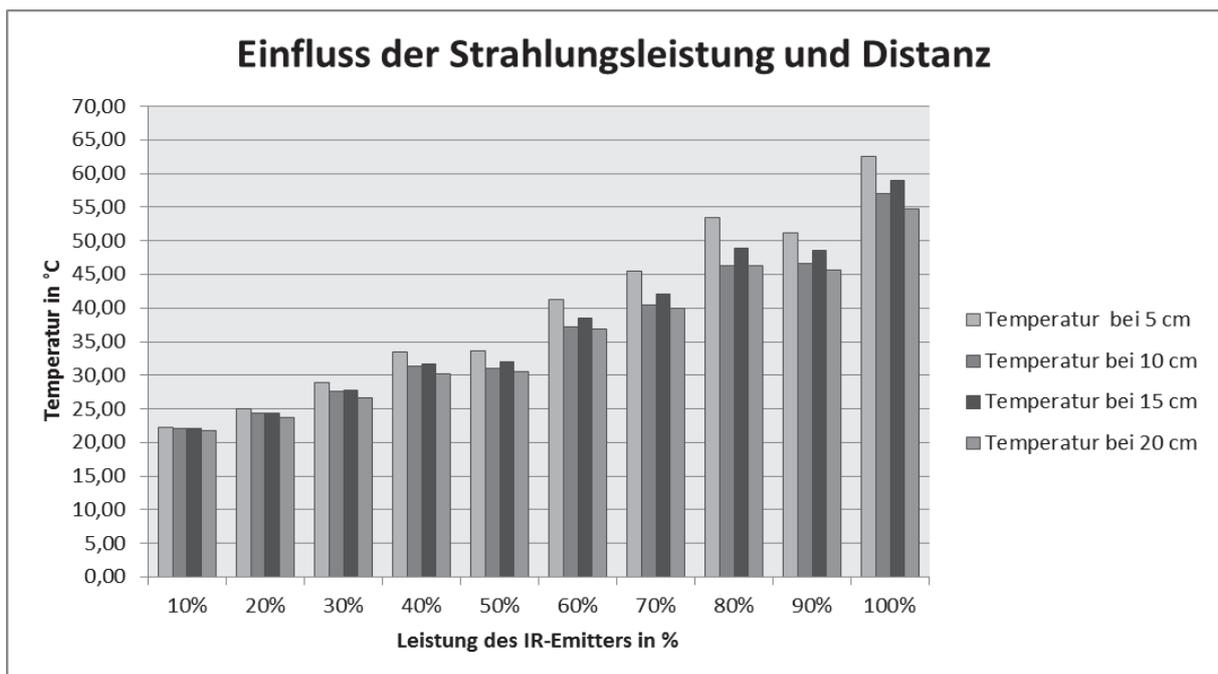


Abbildung 7: Strahlungsleistung IR-Emitter (unverspiegelter Innenraum)

Die Temperaturen nehmen mit größerer Entfernung zu der Strahlungsquelle ab, wobei dieser Effekt bei einer hohen Leistung deutlicher ausfällt. Demnach vermindert sich die Temperatur bei 20 cm Distanz und 90 % der eingebrachten Leistung bereits um 5 °C. Aufgrund der Emissionseigenschaften der dunklen Wandungen nach den Prinzipien des schwarzen Körpers, sollte im Trocknungsraum eine Verteilung der einwirkenden Strahlung auftreten, wodurch das Produkt von allen Seiten bestrahlt werden würde. Dieser Effekt auf den Trocknungsvorgang ist, wie aus den Ergebnissen hervorgeht, allerdings nicht ausreichend. Von Interesse ist im Anschluss, inwieweit die implizierte Strahlungsverteilung bei einer Vollauskleidung des Innenraums mittels einem spiegelnden Materials auftritt, weshalb hierzu eine Vergleichsmessung durchgeführt wird, deren Ergebnisse in der Abbildung 8 aufgeführt sind.

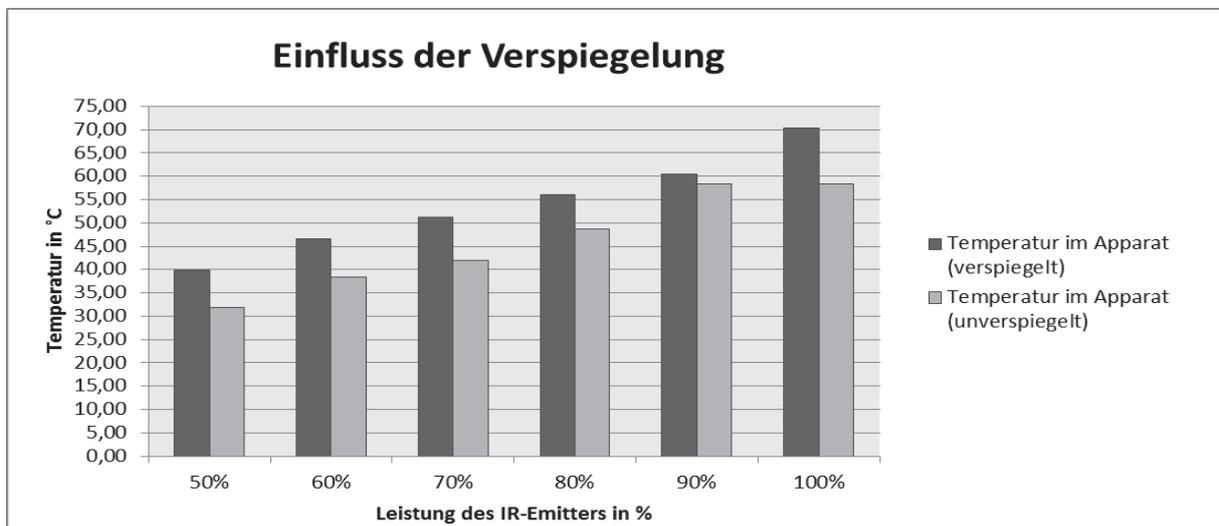


Abbildung 8: Vergleich verspiegelt / unverspiegelt

Es zeigt sich ein deutlicher Vorteil bei den Maximaltemperaturen des verspiegelten Gerätes zu dem unverspiegelten Pendant, da teilweise Unterschiede von 10 °C zwischen den gemittelten Messwerten im Apparat vorliegen. Die Spannweite bei einer neunzigprozentigen Auslastung resultiert aus dem Umstand, dass zwar die höchste gemessene Temperatur statt 60 °C bis zu 72 °C beträgt, ein Temperaturabfall bei 15 cm Abstand jedoch das gemittelte Ergebnis nach unten versetzt und somit auf ein ähnliches Temperaturniveau wie bei dem unausgekleideten Apparat herabsenkt.

Es ist abschließend festzustellen, dass die Auskleidung des Apparatsinneren, wie die Versuche beweisen, sinnvoll ist, um eine höhere interne Temperatur zu erzielen. Dadurch kann die Trocknungszeit reduziert werden. Außerdem ergibt sich eine wirtschaftliche Relevanz, da die geringeren Leistungen und verkürzten Trocknungszeiten sowohl einen verminderten Energiebedarf bewirken, als auch die Effektivität erhöhen.

#### 4.1.2. Vorversuche Obsttrocknung: Parameter Distanz, Leistung, Auskleidung

Für die Vorversuche werden Äpfel der Sorte Gala, wie in der Methodik beschrieben, entkernt und mithilfe der Aufschnittmaschine in 5 mm dicke Scheiben geschnitten. Die Trocknungsverläufe bei den unterschiedlichen Distanzen und Leistungen innerhalb des verspiegelten Apparates sind in der Abbildung 9 aufgezeigt. Die Wahl für die genutzten Leistungen 70 % und 90 %, sowie die Distanzen von 10 cm und 15 cm resultieren einerseits aus bauartbedingten Beschränkungen und praktischen Überlegungen. Eine Distanz von 10 cm kann zu dem Produkt nicht unterschritten werden, da die Emitter zwingend in der freien Umgebungsluft hängen müssen. Dies ist bei weiterem Herabhängen nicht gegeben, da die Ummantelung die Wärme um die Emitter stauen würde, sowie die Belüftung in diesem Abstand nicht ausreichend für den Abtransport der zunehmend gesättigten Atmosphäre ist. Eine Auslastung an der Leistungsgrenze der Strahler führt außerdem zu Temperaturen über 100 °C, was die unerwünschte Maillardreaktion an der Gutsoberfläche hervorruft.

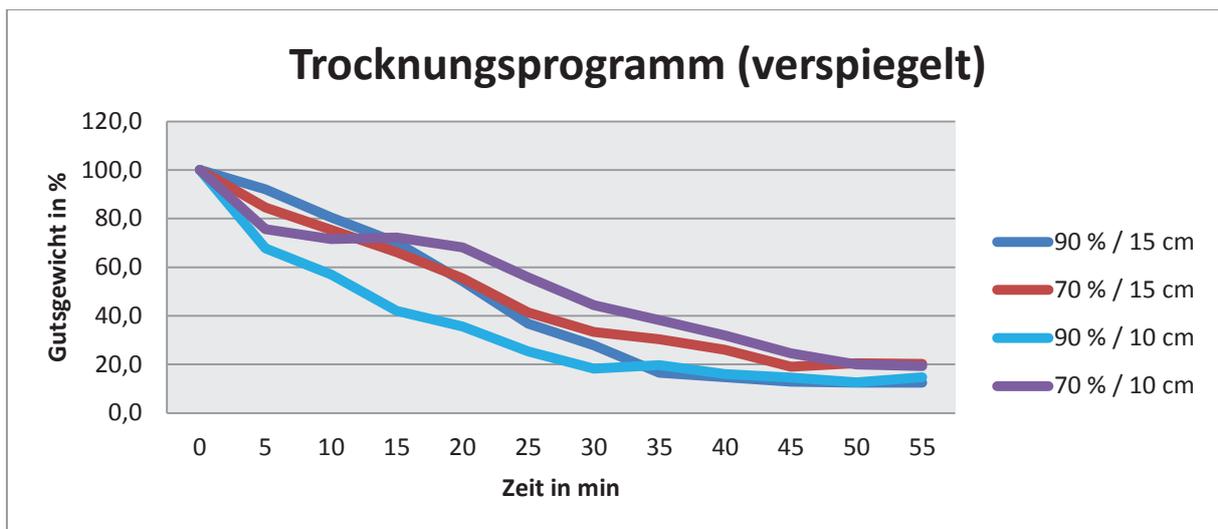


Abbildung 9: Vergleich Trocknungsprogramm (verspiegelt)

Wie in der Abbildung deutlich zu erkennen ist, reicht die Trocknungszeit von 55 Minuten aus, um eine Massenkonstanz des Trocknungsgutes zu erzeugen. Das prozentuale Gutsgewicht reduziert sich, korrelierend mit dem auftretenden Wasserverlust, um circa 80 % bei den einzelnen Apfelchips, was auf eine nahezu vollständige Trocknung hindeutet. Die Trocknungskinetiken indes weisen untereinander deutliche Unterschiede auf: So führt eine höhere Temperatur in Verbindung mit einer geringeren Distanz zu einer verkürzten Prozesszeit und folglich einer höheren Trocknungsgeschwindigkeit.

Dennoch ist zu beachten, dass die Produkte des Versuchs „90 % / 10 cm“ starke Verbrennungsspuren aufweisen, wodurch die Apfelchips die Kriterien des Farb- und Geschmackserhalts nicht erzielen können und somit ausscheiden. Dem gegenüber steht die Trocknung bei 70 % Leistung der Emittereinheit und einem Abstand von 10 cm, welche die vergleichsweise schlechteste Trocknung beschreibt, da sich hierbei die Massenkonstanz erst nach über fünfzig Minuten einstellt und zu Beginn eine längere Stagnation des Trocknungsfortschritts auftritt. Es ist demnach festzustellen, wie in der Tabelle 6 aufgezeigt, dass eine erfolgreiche Trocknung bei einer Scheibendicke von 5 mm einzig bei eingebrachten Leistungen deutlich über 70 % zu erzielen sind.

Tabelle 6: Endgewichte im Vergleich

Programm	90 % / 15 cm	70 % / 15 cm	90 % / 10 cm	70 % / 10 cm	90 zu 50 % / 10 cm
(verspiegelt) Gutsgewicht in %	12,50	20,26	14,67	19,35	18,75
Gutsgewicht in %	27,27	39,62	15,67	30,71	-

Auffällig ist außerdem, dass der Gewichtsverlust bei dem Programm „90 % / 15 cm“ höher ist, als bei der gleichen Leistung und zugleich geringerer Distanz. Dies resultiert möglicherweise aus dem Umstand, dass bei ersterem das Probengut tiefer im Apparat hängt und durch die Strahlungsreflexion der spiegelnden Wände stärker von allen Seiten mit der Wärmestrahlung beaufschlagt wird. Hieraus leitet sich auch ab, dass die Apfelchips bei 15 cm Abstand auch auf der Unterseite eine Temperatureinwirkung aufzeigen, was dementsprechend nicht bei den anderen beiden Probenchargen feststellbar ist.

In der Abbildung 10 sind die Trocknungsverläufe ohne Innenverspiegelung dargestellt.

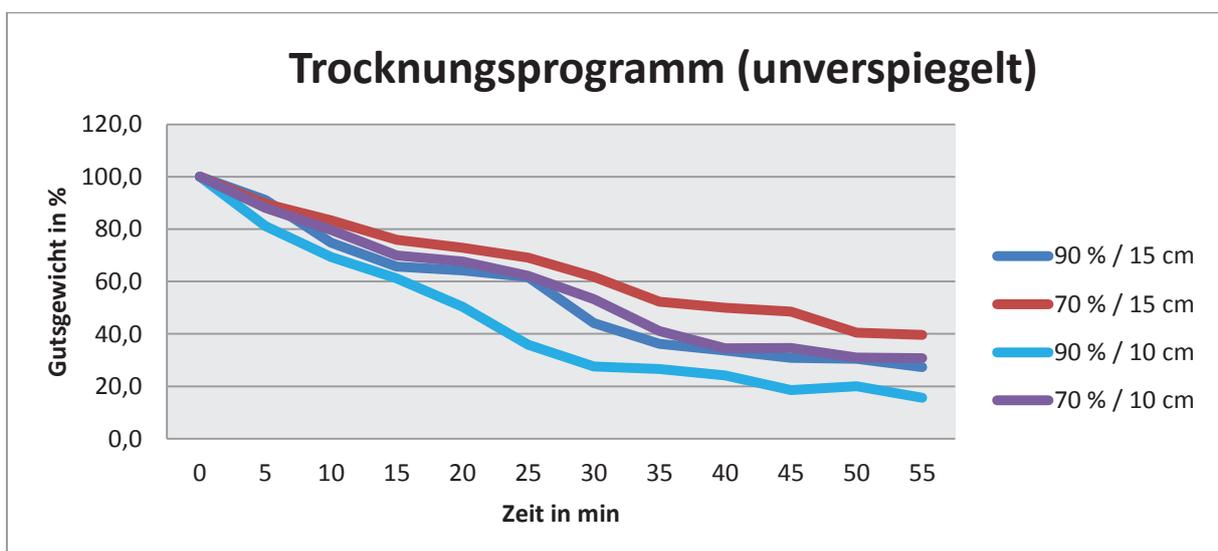


Abbildung 10: Vergleich Trocknungsprogramm (unverspiegelt)

Die Resultate zeigen deutlich, dass die Auskleidung für eine optimierte Trocknung unerlässlich ist. Am drastischsten wird dieser Unterschied bei dem Kurvenverlauf „70 % / 15 cm“ präsent, da hierbei nur eine Verringerung des Gutsgewichts um 60 % (siehe Tabelle 6) auftritt, was signifikant weniger ist als bei den Vergleichswerten im vorhergehenden Versuch. Eine vergleichbare Trocknung, ohne Einfluss der Beschaffenheit der Ofenwandungen, vollzieht sich einzig bei der hohen Leistung in kurzer Distanz (90 % / 10 cm). Auffällig ist allerdings, dass dieser Effekt nicht auf die Trocknung bei 70 % in gleicher Entfernung zutrifft, welche eine verminderte Trocknungskinetik beschreibt. Hierfür ist möglicherweise verantwortlich, dass die entstehenden Temperaturen im Trocknungsapparat einen zusätzlichen Einfluss haben und die einfache Bestrahlung bei 1050 Watt Leistung nicht ausreicht.

Es konnte zudem ein erstes Produktionsprogramm (TP 1) im verspiegelten Trockenofen getestet werden, welches aus den Ergebnissen der Trocknungsverläufe resultiert. Bei diesem wird bei einer Distanz von 10 cm zu der Strahlungsquelle mit einer Leistung von 90 % gestartet, um einen höchstmöglichen Aufheizeffekt an und in dem Gut zu erzeugen. Um Verbrennungen der Produktoberfläche, welche Kapillarverschlüsse und negative sensorische Charakteristika erzeugt, zu verhindern, wird nach 20 Prozessminuten die Leistung auf 70 % herabgeregelt und nach weiteren zehn Minuten die Leistung auf 50 % reduziert. Die hergestellten Apfelchips besitzen eine Restfeuchte von unter 5 % und haben eine leicht gebräunte Oberfläche auf der Strahlungsseite. Es ist demzufolge einem Temperaturprogramm, im Vergleich zu einer starren Trocknungstemperatur, der Vorzug zu gewähren.

Es fällt auf, dass die Trocknung im Apparat nicht homogen auftritt, weshalb eine Überprüfung mithilfe des „ELLAB“ durchgeführt wurde (siehe Abbildung 11).

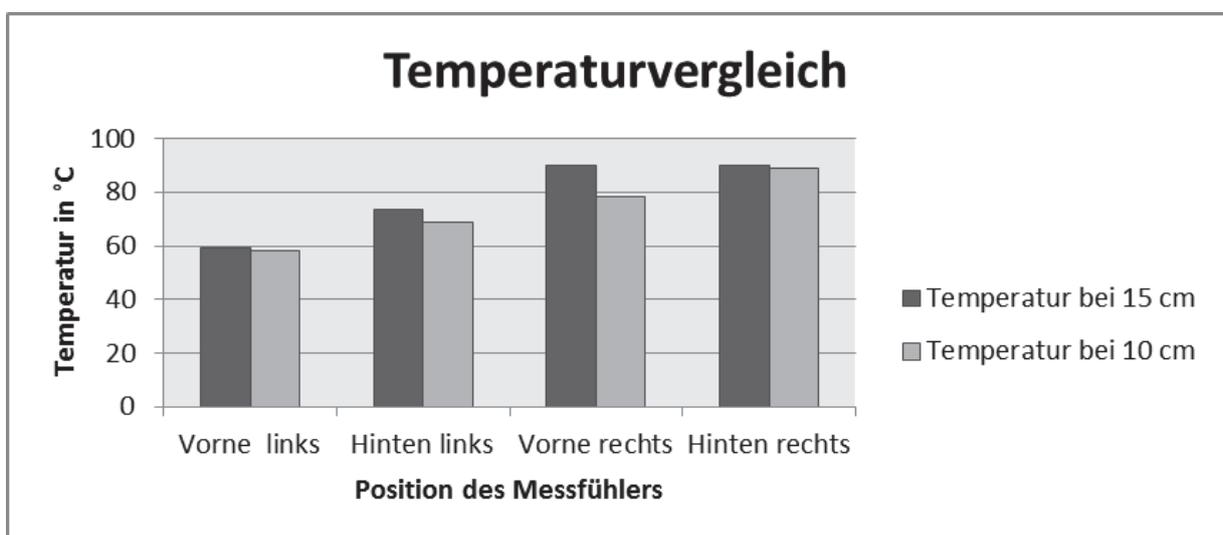


Abbildung 11: Temperaturvergleich planar im Apparat (Vorne = Zur Ofenklappe / Hinten = Rückwand)

An den vier Ecken des Einschubs wird je ein Messfühler positioniert, um die jeweils anliegende Temperatur zu überprüfen. Der Apparat läuft für den Versuch bei 80 % der Leistung, dies einzig, um eine hohe Temperatur zu erzeugen und weiterhin eine Überhitzung auszuschließen. Die Fühler sind in 10 cm, beziehungsweise 15 cm Entfernung angebracht und getestet wird im verspiegelten Zustand über einen Zeitraum von 20 Minuten. Hieraus zeigt sich bei den Messungen, dass es signifikante Abweichungen der anliegenden Temperaturen an den jeweiligen Messpunkten gibt. Der Strahler ist somit nicht in der Lage, über die gesamte Fläche gleichmäßig zu wirken, weshalb dies unbedingt in den Hauptversuchen zu beachten ist. Die Ursachen hierfür können nicht eindeutig ermittelt werden. Es wird vermutet, dass entweder die Strahler nicht ebenmäßig angebracht sind, wodurch es zu Temperaturunterschieden auf der Trocknungsfläche kommt, oder aber die Luftzirkulation an manchen Positionen im Apparatsinneren einen stärkeren Einfluss hat, resultierend aus dem Strömungsverhalten in der Konstruktion.

#### 4.1.3. Vorversuch Obsttrocknung: Vergleich Schichtdicke

Die bisherigen Versuche erfolgten stets bei einer Scheibendicke der geschnittenen Rohware von fünf Millimetern, in Anlehnung an verschiedene Vorarbeiten. Es ist jedoch auch von Interesse, inwieweit sich Trocknungszeiten weiter reduzieren lassen, sofern eine Reduktion dieses Parameters vorgenommen wird. Aus diesem Grund wird eine Untersuchung bei 3 mm Stärke der Apfelscheiben ausgeführt – die Produktvorbereitung ist hierbei identisch mit der vorhergehenden. In der Abbildung 12 sind die verschiedenen Produktionsprogramme aufgezeigt. Alle Versuche geschahen im verspiegelten Gerät.

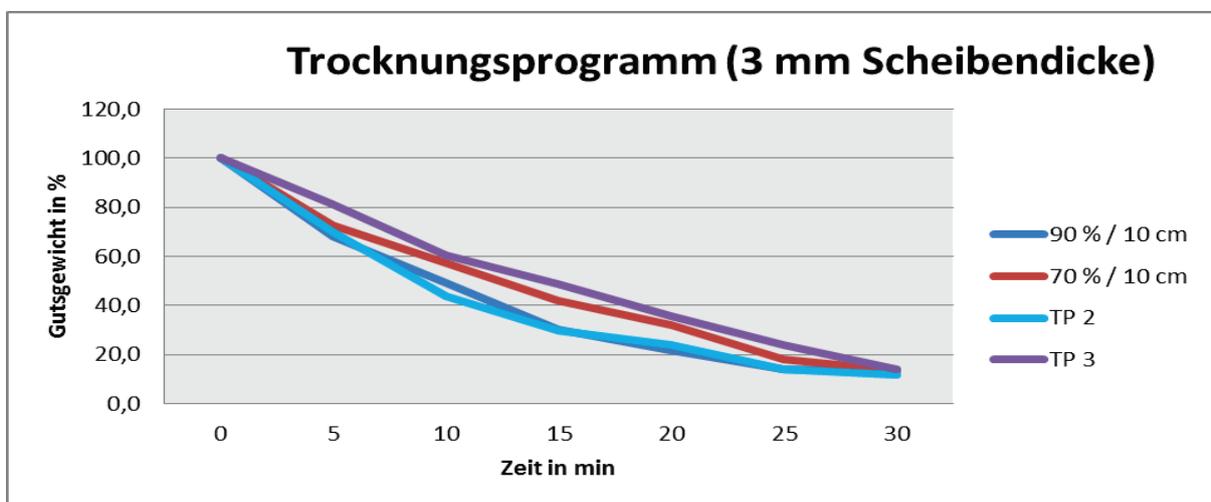


Abbildung 12: Trocknungsprogramm bei 3 mm Scheibendicke der Äpfel

Es ist eindeutig in der Abbildung zu erkennen, dass die verringerte Schichtdicke, korrelierend mit dem geringeren Wassergehalt, der kürzeren Strecke des austretenden Feuchtemassenstroms und der verstärkten Eindringtiefe, eine Beschleunigung des Trocknungsprozesses bewirkt. Allerdings ist hierbei anzumerken, dass die Erzeugnisse bei 90 % Leistung und nur 10 cm Distanz starke Verbrennungscharakteristika aufweisen und deshalb nicht dem erwünschten Erzeugnis entsprechen. Aus diesem Grund wurde auch hierbei ein verbessertes Temperaturprogramm (siehe Tabelle 7) ermittelt, sowie ein Vergleich des Trocknungsfortschritts bei einer anliegenden Leistung von 70 % der 1500 Watt durchgeführt.

Tabelle 7: Trocknungsprogramm 3 mm / 10 cm Distanz (TP 2)

<b>Zeit in min ab</b>	<b>Zeit in min bis</b>	<b>Leistung in % / W</b>	<b>Lüftungsstufe</b>
0	10	90 % / 1350 W	0,5 m/s
10	20	70 % / 1050 W	0,5 m/s
20	30	60 % / 900 W	0,5 m/s

Das erstellte Produktionsprogramm, ist in der Lage, innerhalb einer halben Stunde eine ausreichende Dehydrierung der Apfelchips durchzuführen, was einen zusätzlichen Zeitvorteil gegenüber den Produkten mit fünf Millimetern darstellt. Allerdings ist die endgültige Färbung nicht optimal, da der Farberhalt nicht ausreichend gegeben ist und eine dunkle Bräunung auf der Oberfläche zu verzeichnen ist. In Folge der geringen Restfeuchte ist allerdings das für einen Snack erwünschte Bruchverhalten feststellbar, welches klare Bruchkanten erzeugt.

Dies ist ebenfalls bei dem zweiten Trocknungsprogramm zu verzeichnen, welches in der Tabelle 8 aufgezeigt ist, und durch eine längere Einwirkung bei geringeren Leistungen eine starke Maillardreaktion der Oberfläche ausschließen soll.

Tabelle 8: Optimiertes Trocknungsprogramm 3 mm / 10 cm Distanz (TP 3)

<b>Zeit in min ab</b>	<b>Zeit in min bis</b>	<b>Leistung in % / W</b>	<b>Lüftungsstufe</b>
0	20	70 % / 1050 W	0,5 m/s
20	30	50 % / 750 W	0,5 m/s

Dieses Trocknungsprogramm reduziert zwar die Geschwindigkeit der Trocknung und nimmt diesem dadurch geringfügig die Effizienz, ist jedoch gleichwohl in der Lage, eine ausreichende Entfeuchtung der Apfelchips zu erzeugen. Allerdings tritt auch bei diesen Versuchen eine starke, unregelmäßige Bräunung der Produktoberfläche auf, weshalb hinsichtlich der Farberhaltung Verbesserungen in den Hauptversuchen unumgänglich sind.

#### 4.1.4. Zusammenfassung der Vorversuche

Die Vorversuche sind abschließend als wichtige Grundlage für die weiterführenden Hauptversuche zu benennen, da hierdurch erfolgreich Verbesserungen an dem Trocknungsgerät durchgeführt werden konnten und zudem die Nutzbarkeit als Trocknungsapparat für die Trockenobstherstellung bestätigt wurde. Somit ist nun auch ein Vergleich der erstellten Trocknungsprogramme mit den Ergebnissen der Studienarbeit „Vergleich Konvektions- und Infrarottrocknung (Hopp, 2017)“ möglich, wie die folgende Abbildung zeigt.

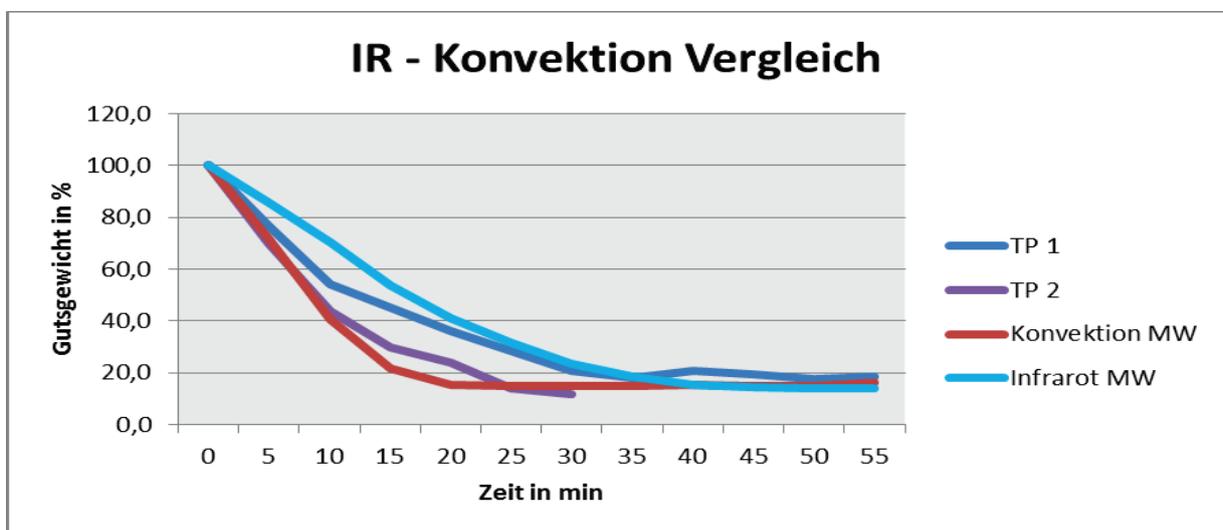


Abbildung 13: Vergleich IR und Konvektion (Hopp, 2017)

Der Infrarotofen beschreibt im Trocknungsprogramm 2 (TP 2) einen steileren Verlauf der Trocknung, als die vergleichbaren Ergebnisse des Sartorius MA 40. Bei diesem wurde ebenfalls eine Scheibendicke von 3 mm eingebracht.

Hierbei ist außerdem zu beachten, dass der Abstand der Strahlungsquelle im Schnellfeuchtebestimmer nur wenige Millimeter beträgt, wohingegen die Abnahme der Strahlungsdichte bei einer Distanz von 10 cm im IR-Apparat wesentlich größer ist. Es ist somit beachtlich, dass die Konstruktion in diesem Maße eine Trocknung bewerkstelligen kann.

Die Kinetik des Trocknungsprozesses bei Nutzung des Konvektomaten indes konnte nicht übertroffen werden; das Trocknungsprogramm 2 verläuft allerdings sehr ähnlich. Das große Volumen und die extrem starke Luftumwälzung, unter anderem das kontinuierliche Einwirken der erwärmten Luft mit 105 °C, erzeugen einen Trocknungseffekt, welcher in diesem Maße nicht mittels des IR-Versuchsstands aufgewogen werden kann.

Trotzdem ist eine sehr schnelle und effiziente Trocknung mittels Infrarot nicht von der Hand zu weisen, vergleicht man die Zeit bis zum Abschluss des Trocknungsvorgangs mit den industrieeüblichen Zeiten (Seeberger, 2018). Die übliche Prozessdauer von vier Stunden, wird bei der Trocknung im Infrarotofen auf unter sechzig Minuten verkürzt. Eine weitere Erkenntnis der Vorversuche ist die Relevanz der Innenauskleidung eines Strahlungsapparats mittels eines reflektierenden Materials. Diese Hypothese, aufgestellt durch Zhongli Pan und Gregory Atunglu, konnte zweifelsfrei durch die Resultate belegt werden, weshalb die Hauptversuche ebenfalls im ausgekleideten Trocknungsofen durchgeführt werden. Außerdem ist die stark hygroskopische Art der Güter zu bemerken, welche bereits innerhalb von 60 Minuten unter Luftsauerstoff genug Wasser aufnehmen, um ihre Bruchenschaften zu verlieren, weshalb diese zwingend im Vakuum oder unter Schutzgas zu verpacken sind.

Im Anschluss an die Vorversuche ist nun von Interesse, inwieweit sich die Strahlungstrocknung optimieren lässt, um die Gutseigenschaften bestmöglich zu erhalten und gleichzeitig den Vorteil der Infrarotstrahlung bezüglich der Trocknungsgeschwindigkeit auszunutzen.

## **4.2. Ergebnisse und Diskussion der Hauptversuche**

### **4.2.1. Optimierung des Farberhalts der Apfelchips**

Wie die Resultate der Vorversuche bereits deutlich aufzeigen, ist eine effiziente Trocknung mithilfe des Infrarottrockenapparats durchführbar. Allerdings konnte hierbei noch kein optimaler Farberhalt bewerkstelligt werden, dieser ist jedoch von hoher Bedeutung bezüglich des erwarteten optischen Produktcharakters. Im Idealfall findet nur eine leichte Bräunung der Oberfläche statt, die typisch gelblich-helle Färbung bleibt aber trotzdem bestehen.

Die Resultate der vier beschriebenen Trocknungsprogramme, angewendet auf die Sorte Gala, (siehe Tabelle 4) entsprechen dieser Vorgabe jedoch teilweise nur sehr bedingt. Inhomogene Strahlungsverteilungen im Inneren des Trocknungsapparats führen zu einer ungleichmäßigen Bräunung der Produkte so sind bei gleichem angewendetem Programm einerseits Farberhalte und zugleich deutliche nichtenzymatische Bräunungen festzustellen, was die Fixierung auf ein starres Leistungsschema verkompliziert. Die entsprechenden Temperaturen wurden mittig unter dem Infrarotemitter an drei Messpunkten aufgenommen, da hieraus zumindest eine recht genaue Annäherung an die tatsächlich wirkenden Temperaturen möglich ist.

Je ein Messfühler des „ELLAB“ wurde direkt im Produkt, frei in Produktnähe und im Produktschatten platziert, die ermittelten Werte sind im folgenden Histogramm aufgezeigt (Abbildung 14).

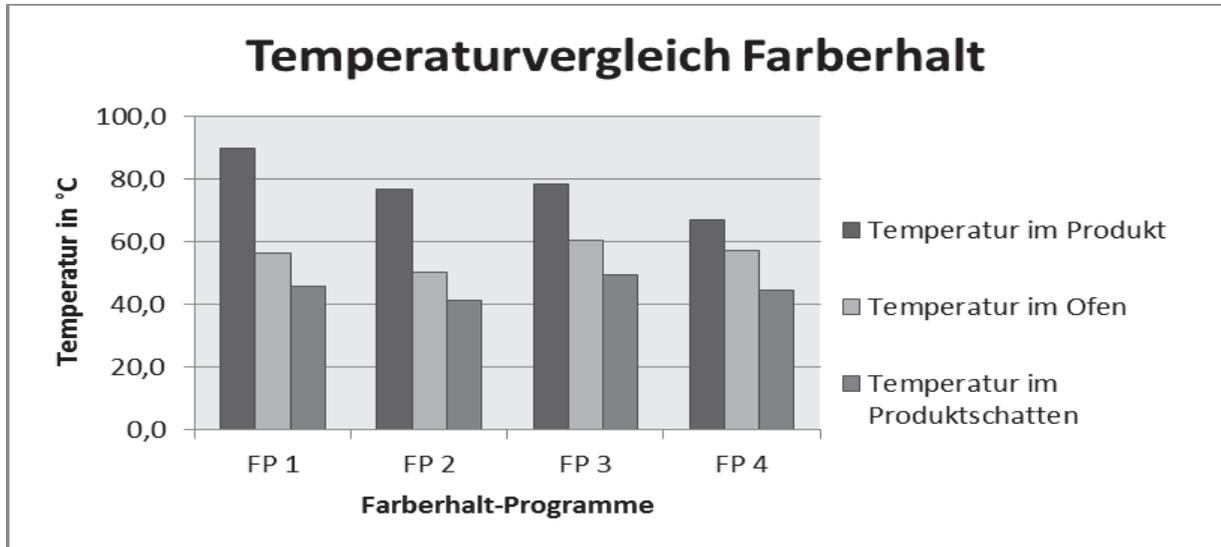


Abbildung 14: Temperaturvergleich Farberhalt Gala

Die Messwerte beweisen nun auch endgültig den Effekt der Strahlungstreueung im Produkt und damit einhergehend die Wärmeentstehung im Inneren des Guts, hervorgerufen durch die Infrarotstrahlen. Demnach erreichen die Temperaturen um das Produkt nur einen Bruchteil der innerhalb der Apfelchips entstehenden Hitze, sowie mehr als an den anliegenden Messfühlern im unmittelbaren Schatten der Äpfel. Auffällig ist außerdem die Diskrepanz zwischen den einzelnen Ergebnissen, da die Höchsttemperaturen auf kürzerer Distanz, vergleichbar mit den Vorversuchen, geringer sind. Auch hierfür ist wohl der Reflektionseffekt der verspiegelten Wandungen verantwortlich.

Bei der Betrachtung der prozentualen Endgewichte in der Tabelle 9 fällt indes auf, dass eine Prozesszeit von maximal 40 Minuten ausreichend für eine vollständige Trocknung ist. Eine Schnellfeuchtebestimmung ergibt zudem Feuchtegehalte von unter 2 % für die Endprodukte.

Tabelle 9: Prozentuale Endgewichte der Apfelchips

Endgutsgewicht in %	FP 1	FP 2	FP 3	FP 4
1	20,97	19,28	22,09	20,00
2	19,18	19,28	20,00	18,82
3	19,51	19,44	19,51	17,05
<b>Mittelwert</b>	19,89	19,33	20,54	18,62

Hervorgehend aus diesen Resultaten wird zusätzlich ein Test bei durchgängig sechzigprozentiger Leistung im Apparat durchgeführt, um jegliche zu starke Temperatureinwirkung, resultierend aus einer zu langsamen Abkühlung der Emitter, auszuschalten. Dies könnte jedoch unvorteilhaft hinsichtlich der Inaktivierung der Polyphenoloxidase sein, weshalb bisher spezifisch für diesen Effekt die hohen Temperaturen zu Beginn des Trocknungsprozesses eingebracht wurden und erst nach mindestens zehn Prozessminuten eine erste Reduktion der eingebrachten Emitterleistung bei den untersuchten Programmen erfolgte. Im Verlauf einer halben Stunde ist dieses Programm jedoch auch in der Lage, den Apfelchips ausreichend Feuchtigkeit zu entziehen. Eine Bräunung tritt auf der bestrahlten Seite nichtsdestotrotz auch bei diesen Apfelchips auf. Im Folgenden sind die einzelnen Produkte der Trocknungsprogramme zum Vergleich aufgezeigt (Abbildung 15).

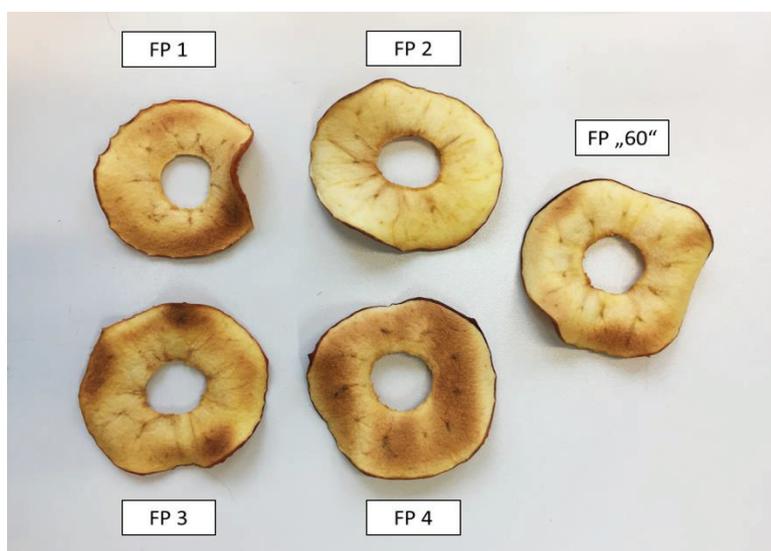


Abbildung 15: Vergleich der Trocknungsergebnisse (Hopp, 2018)

Wie bereits zuvor benannt, ist eine Bräunung der Apfelchips aufgetreten, die Produkte des Farberhalt-Programms 2 und des zusätzlich getesteten FP „60“ weisen jedoch eine sehr gelbliche Färbung auf, welche kaum, beziehungsweise geringere, Bräunungseffekte zeigt. Die kurze Distanz von zehn Zentimetern, bedingt somit, um eine zu starke Temperatureinwirkung zu verhindern, dass mit geringeren Leistungen gearbeitet werden muss, bleibt jedoch auch dann sehr schlecht zu regulieren und scheidet für die weiteren Versuche aus. Eine zusätzliche Überprüfung und exakte Definition der einzelnen Farbattribute erfolgt zusätzlich mit dem „Hunterlab Colorfelx“-Chromatographen in der nachstehenden Tabelle 10. Hierbei geschah eine Dreifachbestimmung, indem verschiedene Apfelchips derselben Charge über der Linse positioniert werden, um anschließend den Mittelwert zu erzeugen.

Tabelle 10: Farbmesswerte L\*a\*b\*-Farbraum

	<b>Rohware</b>	<b>FP 1</b>	<b>FP 2</b>	<b>FP 3</b>	<b>FP 4</b>	<b>FP "60"</b>	<b>Seeberger</b>
<b>L*</b>	80,04	32,05	32,76	33,18	30,10	31,81	69,93
<b>a*</b>	-0,72	+6,22	+4,39	+5,76	+4,95	+4,79	+8,97
<b>b*</b>	+35,34	+16,39	+20,03	+16,99	+14,23	+13,64	+33,26

Es wird hierbei deutlich, was auch die optische Analyse aufzeigt: Die Produkte „FP 2“ erstrecken sich eher in den gelben Teil des Farbraums (b\*) und zeigen optisch eher das erwünschte Resultat, wohingegen die restlichen Erzeugnisse eine bräunliche Färbung zeigen, welche sich geringfügig in den gelblichen Quadranten erstreckt. Demnach ähnelt allerdings keines der Erzeugnisse mehr der hellen, blassen Farbe des Rohapfels, welcher zum Vergleich ebenso untersucht wurde. Außerdem sind die Produkte dunkler, als die zum Vergleich herangezogenen Apfelchips der Firma „Seeberger“ (Hopp, 2017).

#### 4.2.2. Vergleich der Infrarottrocknung unterschiedlicher Apfelsorten

Um die bisherigen Ergebnisse besser in Relation setzen zu können, erfolgt die Betrachtung weiterer Apfelsorten bei der Infrarottrocknung. Hierfür werden die Apfelsorten Gala, Braeburn und Granny Smith miteinander verglichen, welche starke sensorische und physiologische Abweichungen untereinander aufweisen. Das Ausgangsprogramm „FP 2“ wird angewendet, jedoch sind geringfügige Modifikationen im Prozessverlauf erforderlich, da die unterschiedlichen Wassergehalte der Ausgangsware (siehe Tabelle 11: Feuchtegehalte) Einfluss auf den Trocknungsfortschritt nehmen. Ein höherer Feuchtegehalt verzögert unter anderem das Auftreten der bräunenden Maillardreaktion, gleichermaßen benötigt aber auch der Trocknungsprozess bei gleicher Temperatur mehr Zeit.

Tabelle 11: Feuchtegehalte der Rohware

<b>Apfelsorten</b>	<b>Braeburn</b>	<b>Granny Smith</b>	<b>Gala</b>
Ausgangswassergehalt in %	84,92	84,50	80,13

Aus den ermittelten Werten wird dies ersichtlich, da der Wassergehalt der Sorte Gala geringer ist, weshalb folglich während des Trocknungsvorganges weniger Feuchte das Produkt verlassen muss und hierdurch die Prozesszeit geringer ist, als bei den Sorten Braeburn und Granny Smith. Deren Feuchtegehalte liegen beide jeweils bei circa 85 %, woraus auch die ähnlichen Verläufe während der Trocknung resultieren, wie aus der Abbildung 16 hervorgeht.

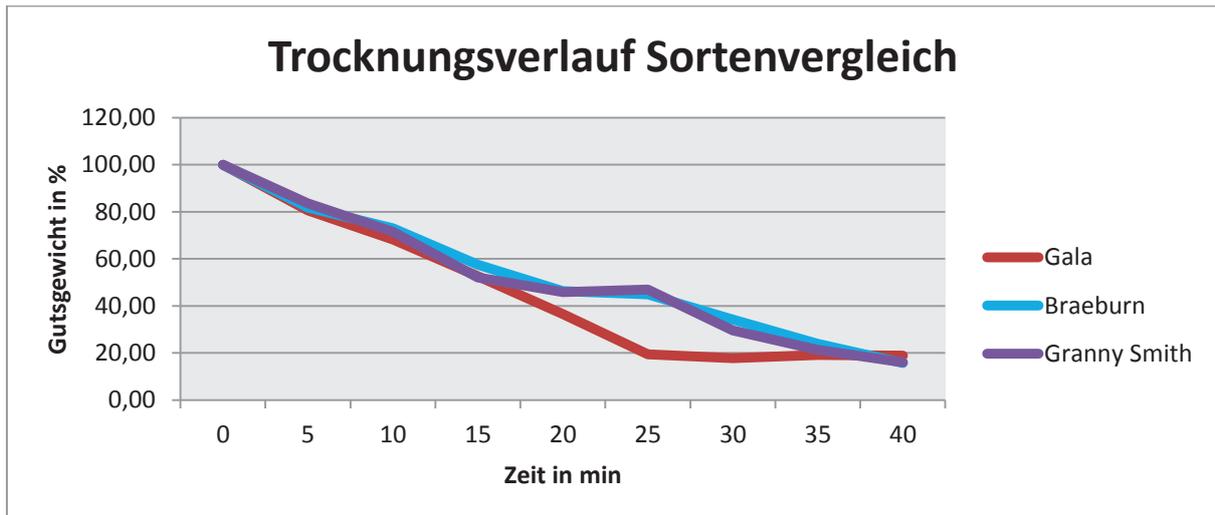


Abbildung 16: Trocknungsverlauf beim Sortenvergleich

Es zeigt sich, dass die Sorte Gala einen nahezu linearen Verlauf (Kapitel 2.2) beschreibt und bereits nach 25 Minuten eine erfolgreiche Trocknung erzielt werden kann, allerdings erfolgt auch bei den Sorten Braeburn und Granny Smith eine vollständige Entfeuchtung innerhalb von 40 Minuten. Auffällig ist des Weiteren das simultane Abspalten dieser zwei Trocknungskurven nach 20 Minuten, also zu dem Zeitpunkt der ersten Regulation der eingebrachten Leistung von 70 % auf 60 %. Dieser Umstand korreliert mit dem verbleibenden Restwassergehalt in den Äpfeln. Während bei der Sorte Gala genug Wasser ausgetreten ist, wodurch sich die Temperatur in den trockenen Bereichen zusätzlich erhöht, da die Energie nicht mehr länger für die Sublimation benötigt wird, kommt es bei den anderen beiden Trocknungsgütern zu einer erneuten Reduktion der internen Temperaturen (Abbildung 17).

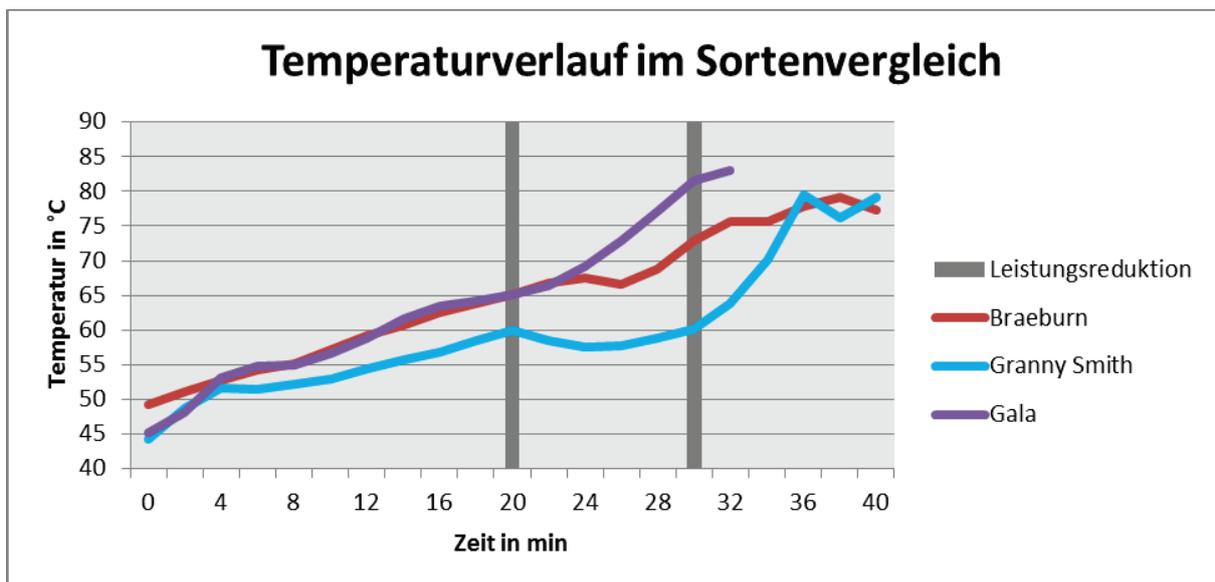


Abbildung 17: Temperaturverlauf im Gutsinneren

Das ist insbesondere bei der Temperaturmessung des Granny Smith auffällig. Bei diesem ist eine besonders lange Aufheizphase nach der Adaption der eingebrachten Leistung nötig. Diese Verzögerung bedingt die zusätzlichen Anpassungen, welche zu Anfang beschrieben worden sind. Demzufolge ist es vorteilhaft, die drei einzelnen Temperaturbereiche während der Herstellung von Apfelchips der Sorten Granny Smith, Braeburn oder ähnlichen Produkten mit hohem Feuchtegehalt und entsprechender Zusammensetzung, jeweils fünf Minuten länger zu halten, da dies den auftretenden Temperatursturz weitestgehend verhindert und die notwendige Prozesszeit verkürzt. In der Tabelle 12 ist dieses Temperaturprogramm aufgezeigt, sowie ein weiteres, bei welchem stets mit einer 10 % höheren Leistung im Vergleich zu dem ursprünglichen Programm der Trocknungsvorgang vollzogen wird.

Tabelle 12: Modifizierte Trocknungsprogramme (FP 2)

Programm	Zeit in min ab	Zeit in min bis	Leistung in % / W	Lüftungsstufe
FP 2 b	0	25	70 % / 1050 W	0,5 m/s
	25	35	60 % / 900 W	0,5 m/s
	35	45	50 % / 750 W	0,5 m/s
FP 2 c	0	15	80 % / 1200 W	0,5 m/s
	15	25	70 % / 1050 W	0,5 m/s
	25	35	60 % / 900 W	0,5 m/s
	35	45	50 % / 750 W	0,5 m/s

Im Nachfolgenden sind die Kurvenverläufe dargestellt, wobei sich ergibt, dass beide modifizierten Programme (FP 2 b und c) den Temperaturabfall unterbinden (Abbildung 18).

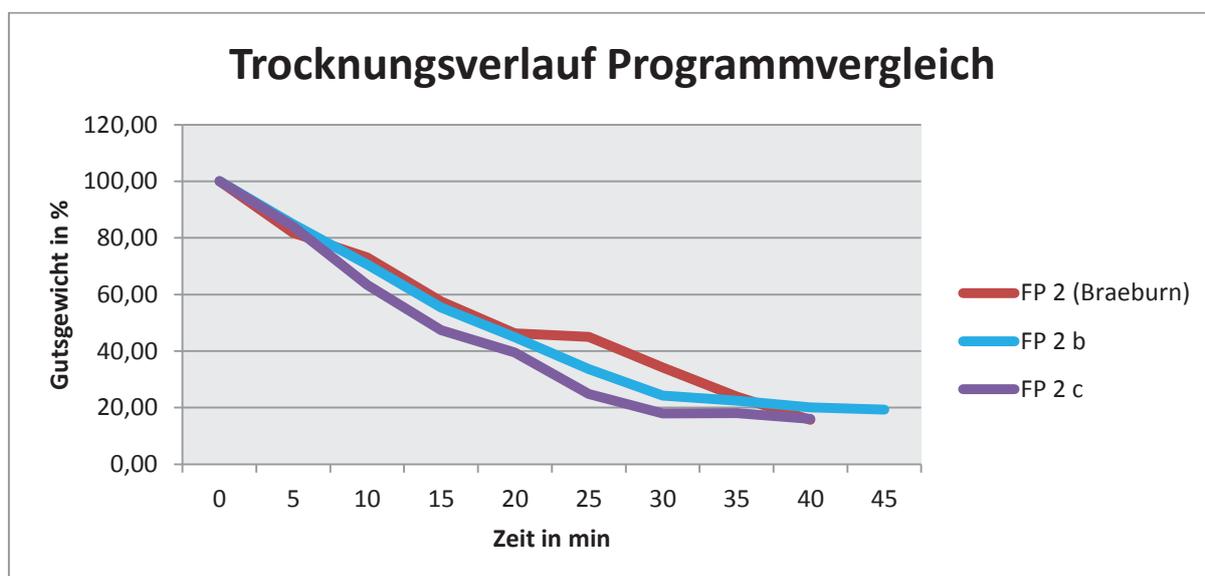


Abbildung 18: Trocknungsverlauf im Programmvergleich FP 2

Das neue Programm FP 2 c führt in Folge der höheren Startleistung und der resultierenden Temperaturerhöhung von 5 °C am und im Produkt zu einer steileren Trocknungskinetik der Apfelchips. Demnach kann die Problematik, dass das ursprüngliche Entfeuchtungsprogramm, insbesondere bei der Sorte Braeburn, teilweise keine zufriedenstellende Trocknung ergab oder der erhöhte Zeitbedarf bei feuchteren Gütern, in dem spezifischen Fall durch Anpassungen auf Basis des Grundprogramms ausgeschaltet werden. Allerdings ist gleichwohl zu beachten, dass die unregelmäßige Strahlung des Emitters ein Problem für die Standardisierung darstellt, da insbesondere bei den Produkten des Granny Smith teilweise das Programm FP 2 c nicht zufriedenstellende Erzeugnisse generierte und deshalb der Variante FP 2 b der Vorzug gewährt wurde.

In Tabelle 13 ist zudem der gemittelte Feuchteaustritt N über die ganzheitliche Fläche nach der Formel 1.6 von Grdzlishvili aufgezeigt. Hierfür wurden die Mittelwerte aus den Anfangs- und Endgewichten gebildet, sowie eine Messung der durchschnittlichen Scheibenfläche vorgenommen.

Tabelle 13: Durchschnittlicher Feuchteaustritt im Sortenvergleich

Sorte	Gala	Braeburn	Granny Smith	Konvektion (Gala)
<b>Anfangsgewicht</b>	7,53	12,80	10,10	-
<b>Endgewicht</b>	1,30	1,67	1,80	-
<b>Gemittelte Fläche in cm<sup>2</sup></b>	0,25	0,35	0,35	0,26
<b>Feuchteaustritt N in g/m<sup>2</sup>*s</b>	0,083	0,105	0,078	0,02
<b>N über beide Flächen</b>	0,041	0,053	0,039	0,01

Es zeigt sich, dass es nur zu geringen Abweichungen kommt, der Feuchteaustritt über die Fläche ist jedoch bei allen Produkten recht hoch, sofern man hierfür den ermittelten Austritt über die Fläche bei dem Konvektomaten miteinbezieht (Hopp, 2017). Es ist zu schlussfolgern, dass die IR-Anlage eine hohe Effizienz bei der Obsttrocknung aufzeigt. Dies ergibt sich womöglich nur zum Teil aus der reinen Infrarotstrahlungsanwendung, als auch aus dem Einsatz des Gitterbodens, durch welchen ein Austritt der Feuchtigkeit in beide Richtungen gewährleistet wird und dem anliegenden Luftstrom.

Die Überprüfung des Aw-Wertes (Abbildung 19) ergibt für alle Produkte, einschließlich der gekauften Apfelchips von „Seeberger“, einen völlig unkritischen Wert von unter 0,4. Demnach sind die Produkte vor mikrobiellem Befall im getrockneten Zustand ausreichend geschützt, wobei allerdings hierdurch das hygroskopische Verhalten der Güter bestätigt wird, was ein unverzügliches Verpacken unter Luftabschluss bedingt.

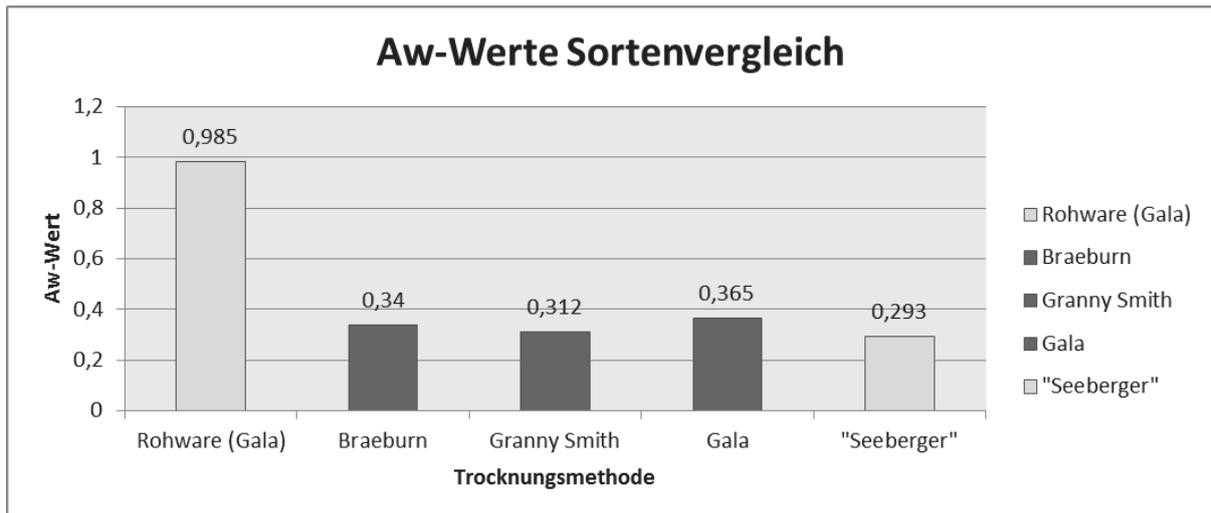


Abbildung 19: Aw-Werte im Sortenvergleich

Das abschließende Kriterium der hergestellten Apfelchips ist der Grad der Bräunung und der vorliegende Farberhalt der Produkte. Auf der Abbildung 20 sind die einzelnen Endergebnisse der Trocknung aufgezeigt. Der Braeburn ist hierbei am deutlichsten von einer Verfärbung betroffen, die Oberfläche weist eine gelblich-braune Farbe auf, allerdings ist keine Verbrennung aufgetreten und die Farbe ist gleichmäßig. Bei den Apfelchips der Sorte Gala tritt eine gelbliche Farbe auf, dunkle Stellen sind einzig an den Erhebungen des Kerngehäuses entstanden, welches aufgrund seiner Struktur natürlicherweise weniger Wasser bindet und somit zeitlich eher in den kritischen Temperaturbereich eintritt.



Abbildung 20: Vergleich der Endprodukte des Sortenvergleichs (Hopp, 2018)

Ein optimales Trocknungsergebnis erzielen die Apfelchips der Sorte Granny Smith, welche eine helle und gleichmäßige Farbe aufweisen, die entsprechend nahe an die natürliche Färbung der Apfelchips herankommt. Dies bestätigen die Werte des Chromatographen in der nachstehenden Tabelle 14 zusätzlich, bei welchem der Granny Smith eine hohe Helligkeit aufweist und außerdem nahezu nicht in den roten Bereich ausstreut, wie es auch bei Rohware zu erkennen ist.

Unregelmäßigkeiten bei der Färbung sind allerdings nicht in Gänze auszuschließen und verdeutlichen auch den Charakter des Naturproduktes. Einflüsse, wie die Ausprägung des Kerngehäuses, die jeweiligen Wassergehalte an unterschiedlichen Positionen innerhalb des Apfelmehls und auch die Sorte und Reife der Äpfel, führen zu unterschiedlichen und inhomogenen Chipsfärbungen an der Oberfläche.

Tabelle 14: Farbmesswerte des Sortenvergleichs

	<b>Rohware</b>	<b>Braeburn</b>	<b>Granny Smith</b>	<b>Gala</b>	<b>Seeberger</b>
<b>L*</b>	80,04	34,52	49,80	32,76	69,93
<b>a*</b>	-0,72	+2,89	+1,47	+4,39	+8,97
<b>b*</b>	+35,34	+13,92	+12,50	+20,03	+33,26

Zusätzlich wird auch bei dieser Farbmessung das Ergebnis für die Apfelchips von „Seeberger“ für einen Vergleich herangezogen. Hierbei zeigt sich, dass diese Produkte eine hellere, aber zugleich auch bräunlichere Färbung besitzen, als die selbstproduzierten Chips. Dies erschließt sich aus den hohen Werten von a\* und b\*, welche aufzeigen, dass die Lokalisation des Messpunktes weit in den roten und gelben Bereich hineinragt. Abschließend geht aus den Resultaten eindeutig hervor, dass verschiedene Sorten jeweils anders auf die Trocknung reagieren. Dies betrifft gleichermaßen die Trocknungskinetik, wie die äußerlichen Attribute. Im Folgenden ist von Interesse, ob ein Nachdunkeln der Farbe im Anschluss an eine Rehydratation der Apfelchips erfolgt.

#### 4.2.3. Inaktivierung der Polyphenoloxidase und Rehydrierungsverhalten

Um optisch einwandfreie Apfelchips zu produzieren, ist es unerlässlich, die Polyphenoloxidase zu deaktivieren. Ein Sortenvergleich zeigt sich in Abbildung 21.

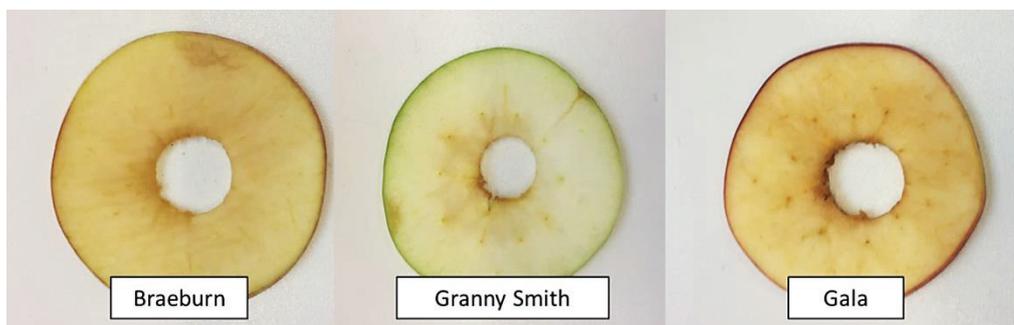


Abbildung 21: Vergleich der Polyphenoloxidaseaktivität der rohen Äpfel (Hopp, 2018)

Im rohen Zustand, ist insbesondere die Sorte Gala von diesen Prozessen betroffen, vergleicht man deren Bräunung innerhalb von 20 Minuten im Schnittbild bei direktem Kontakt mit der Umgebungsluft. Zu beachten ist, dass die sehr geringen Restfeuchten und die hohe Prozesstemperatur ein Nachbräunen im finalen Produkt bei allen drei eingesetzten Sorten verhindern, da die enzymatische Wirkung unter diesen extremen Bedingungen nicht einsetzt. Es ist allerdings von Interesse, ob eine Reaktivierung stattfindet, sofern eine Rehydrierung der Produkte vorgenommen wird. Hierzu werden die getrockneten Apfelchips in Leitungswasser für vier Minuten eingetaucht, anschließend mit Papier an der Oberfläche entfuchtet und für dreißig Minuten der Umgebungsluft ausgesetzt. Anschließend ergibt die simple visuelle Kontrolle, ob eine erneute Enzymaktivität vorzufinden ist. In der Abbildung 22 sind die einzelnen Rehydrierungsraten erfasst, als Grundlage dienen die Temperaturprogramme der Farberhaltungsmessungen. Theoretisch müsste durch den ausbleibenden Kapillarverschluss eine gute Wiederbefeuchtung der Apfelchips möglich sein. Aus diesem Grund werden die ermittelten Werte mit der bestmöglichen Trocknungsvariante hinsichtlich der Rehydration verglichen, der Gefriertrocknung (Pan, Atunglu, 2011). Die hierbei resultierenden Kapillaren im Zuge der Sublimationstrocknung sind ideal für einen erneuten Feuchteintritt und bewirken eine sehr starke Hygroskopie. Aufgrund der Wirkungsweise der Infrarotstrahlung sollten zumindest die Kapillaren an der Guts Oberfläche intakt bleiben, wodurch das Wasser auch hierbei besser in das Produkt eindringen kann. Als Referenz für die herkömmliche Konvektionstrocknung dienen die Apfelchips der Firma „Seeberger“, die Rehydrierungsraten sind im nachstehenden Histogramm abgebildet (Abbildung 22).

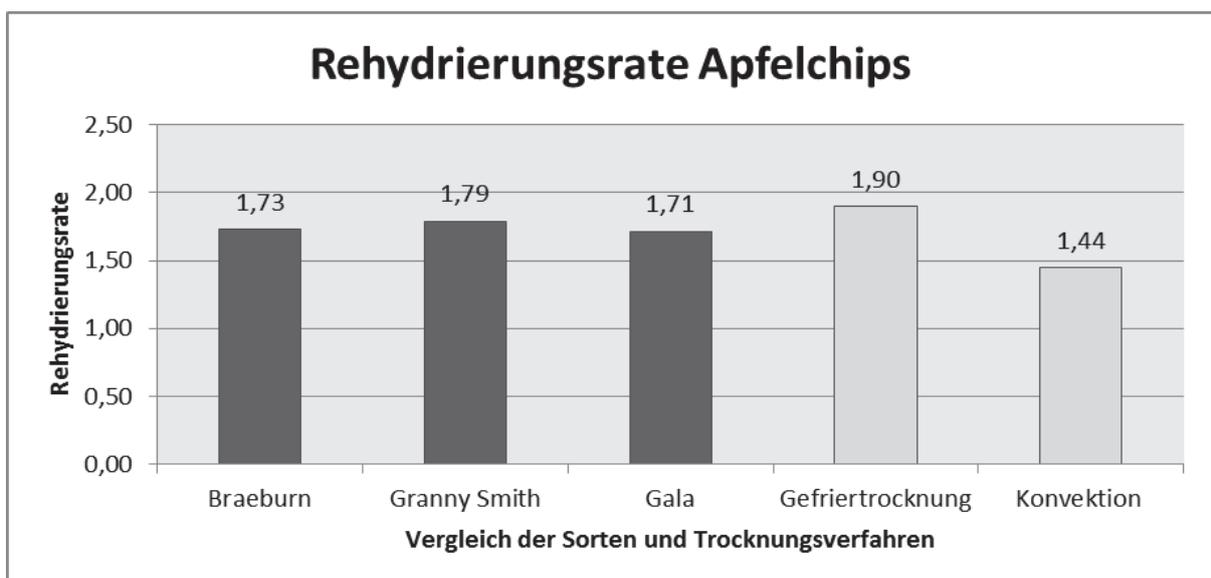


Abbildung 22: Rehydrierungsrate der Apfelchips im Sorten- und Verfahrensvergleich

Im Vergleich zeigt sich, dass ein drastischer Unterschied sowohl zwischen den eingesetzten Sorten, als auch den Trocknungsverfahren, ausbleibt. Die Gefriertrocknung besticht bei einer vierminütigen Befeuchtungszeit mit einer Rehydrationsrate von 1,9.

Dementgegen stehen allerdings die Produkte der Infrarotstrahlung, welche sich im Bereich um 1,7 bewegen und somit einen Vorteil gegenüber den konvektionsgetrockneten Apfelchips von „Seeberger“ haben. Alle zeigen außerdem nach der beschriebenen Einwirkzeit unter Luftsauerstoff keine oder nur geringfügige Spuren erneuter enzymatischer Bräunung, dies bedingt sich wahrscheinlich aus dem Umstand, dass die Temperaturen im Inneren der Apfelchips bei zunehmendem Wasserverlust ansteigen und die 80 °C Denaturierungstemperatur demzufolge überschreiten (siehe Abbildung 17). Aus diesem Grund geschieht während des Verfahrens auch die Regulierung der eingebrachten Leistung, da hierdurch die Verbrennungsgefahr deutlich ansteigt. Demnach führt die Trocknung auch bei moderater Bestrahlung zu einer weitestgehenden Inaktivierung des Enzyms und beeinträchtigt somit nur in geringem Maße die Lagerfähigkeit der Produkte. Dennoch ist demzufolge der Ausschluss von Sauerstoff und die Nutzung inerter Verbundfolien obligatorisch, um einen erneuten Wassereintrag und eine Bräunung zu verhindern, welche für die Kundenpräferenz maßgeblich nicht auftreten darf.

Für weiterführende Versuche kommt deshalb auch die Einbringung von Konservierungsmitteln wie Zitronen- und Ascorbinsäure in Betracht. Die Ascorbinsäure wirkt antioxidativ, was die durch Sauerstoff induzierte Bräunung unterdrückt, und stabilisiert zudem den Farberhalt. Dies wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet, da hierbei im Fokus der Versuche der Erhalt eines reinen Naturprodukts steht.

#### **4.2.4. Sensorik**

Im Rahmen der Sensorik erfolgt die Betrachtung der drei Apfelchipsorten der Hauptversuche. Infolgedessen werden die Trocknungsprodukte von einem sensorisch geschulten Panel, bestehend aus 16 Personen, untersucht. Als Vergleichsprobe dient zudem das Produkt der Firma „Seeberger“, insbesondere hinsichtlich der geschmacklichen Attribute. Die Darreichung geschieht in blinder Form, um vorhergehende ablehnende Emotionen der Probanden zu unterbinden und eine unbefangene Beschreibung zu gewährleisten. Zu diesem Zweck ist jede Apfelprobe durch eine zufällige dreistellige Zahl verschlüsselt.

Aus der einfachbeschreibenden Prüfung geht hervor, dass trotz aller Bestrebungen zur Generierung gleichmäßiger Chargen, Unterschiede zwischen den Apfelingen auftreten. Demnach war nicht bei allen Apfelchips eine gleiche Konsistenz gegeben, sodass insbesondere daraus Abweichungen bei Beschreibung und Präferenz resultieren.

Es wird jedoch ersichtlich, dass insbesondere ein Erhalt der Farbe und des sortentypischen Apfelgeschmacks bei den erzeugten Apfelchips gewährleistet ist, allerdings trifft dies nur bedingt auf den olfaktorischen Eindruck zu. Der Geruch der Äpfel wurde vermehrt als „schwach“ oder „neutral“ beschrieben. Zudem ist der Erhalt der trockenen Beschaffenheit der Apfelchips kaum gewährleistet. Die schnelle Wasseraufnahme unter Einwirkung der Umgebungsluft führt zu einem raschen Erweichen der Chips. Insbesondere späte Sensorikteilnehmer waren von diesem Problem betroffen, was die Ergebnisse beeinflusst hat. Im Anschluss geschieht die Betrachtung der Skalenbewertung in der Abbildung 23 sind die Ergebnisse der Beliebtheitsprüfung als Histogramm dargestellt. Die errechneten Mittelwerte stehen oberhalb der einzelnen Säulen, sind jedoch nicht repräsentativ.

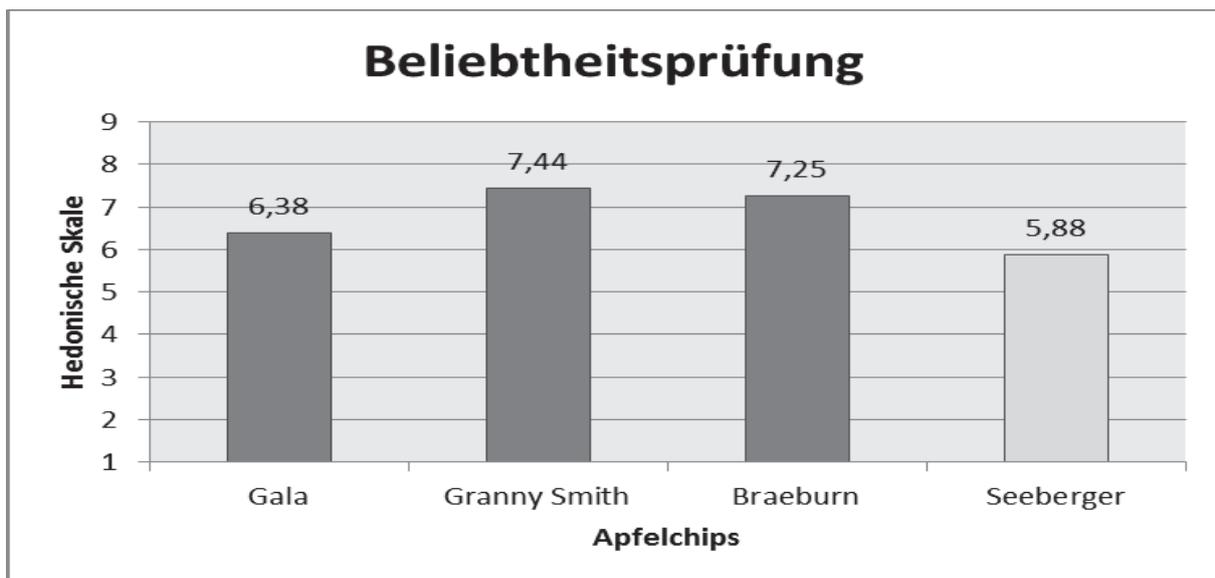


Abbildung 23: Beliebtheitsprüfung

Positiv wurden von den Probanden der apfelartige und fruchtige Geschmack, die geringe Dicke und die allgemeine Optik bei den hergestellten Produkten benannt, welche deshalb sehr ansprechend wirken würden. Allerdings ist der schwache Geruch ein Minderheitskriterium, wie es ebenso auf die teils zähe Textur der Äpfel zutrifft. Zu beachten ist darüber hinaus, dass in den Bewertungen je nach Teilnehmer die sensorischen Vorlieben schwanken. So wurde beispielweise von manchen der süße Geschmack des Gala lobend hervorgehoben, wohingegen dieser anderen zu intensiv war.

Problematisch ist bei der Betrachtung, dass die jeweiligen Bewertungsbereiche stark schwanken und demzufolge eine simple Kontrolle über den Mittelwert unzureichend ist. In dem nachstehenden Diagramm sind die einzelnen Spannweiten für eine bessere Verständlichkeit aufgezeigt. Hierbei zeigt sich dann auch deutlich, dass die Bewertung für das Produkt von „Seeberger“ selbst bei Auslassen eines Ausreißers nahezu über die komplette Skala schwankt, wohingegen sich die erzeugten Apfelchips eher am oberen Ende einfinden.

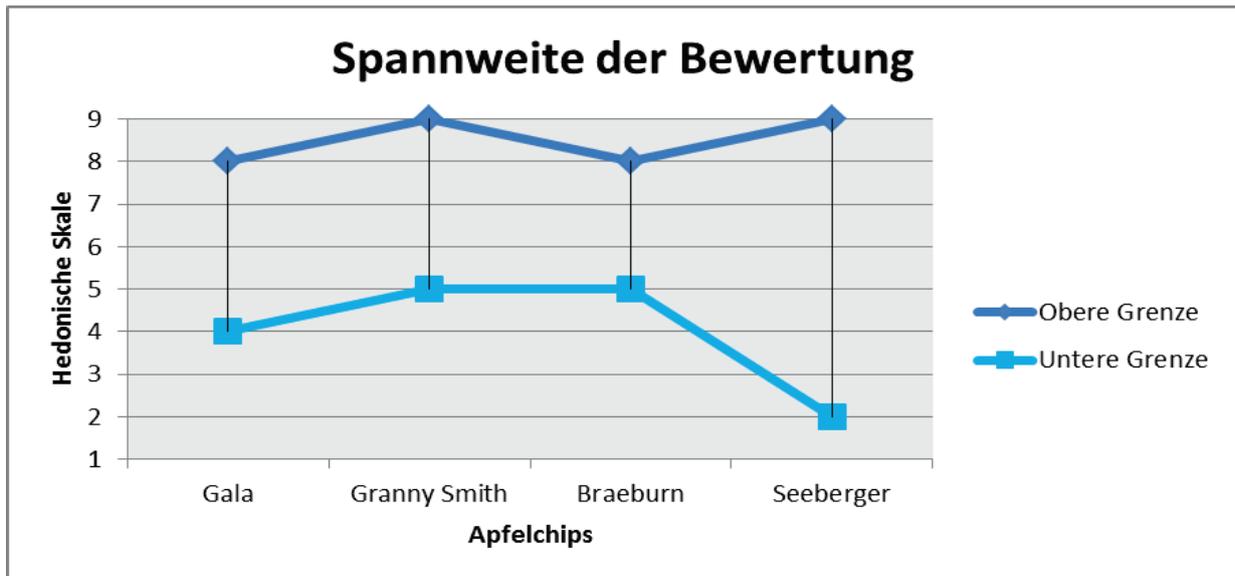


Abbildung 24: Spannweite der Bewertung

Aus dieser Spannweite resultiert auch die Problematik, dass der P-Wert von 0,039673625, welcher bei der Varianzanalyse ermittelt werden konnte, zwar einen deutlichen Unterschied zwischen den Gruppen impliziert, in einer nachfolgenden Überprüfung mithilfe des Tukey-Tests jedoch nicht mehr auffindbar war (Abbildung 25).

Kontrast	Pr > Diff	Signifikant	Untergrenze (95%)	Obergrenze (95%)
Granny Smith gegen Seeberger	0,059	Nein		██████████
Granny Smith gegen Gala	0,306	Nein	█	██████████
Granny Smith gegen Braeburn	0,990	Nein	██████	██████
Braeburn gegen Seeberger	0,117	Nein	█	██████████
Braeburn gegen Gala	0,478	Nein	█	██████████
Gala gegen Seeberger	0,843	Nein	██████	██████████

Abbildung 25: Tukey-Test Streuung der einzelnen Gruppen

Es zeigt sich, dass insbesondere die Untergrenze des  $\alpha$ -Werts bei Granny Smith / „Seeberger“ kaum noch geschnitten wird, dies allerdings dennoch ausreicht um eine Unterteilung in signifikant unterschiedliche Gruppen zu verhindern.

Es ist somit mithilfe der ANOVA keine signifikante Abgrenzung der einzelnen Apfelchips möglich, die geringe Panelzahl untergräbt allerdings auch eine statistische Validität. Abschließend ist festzuhalten, dass die eigenen Produkte einen guten Farb- und Geschmackserhalt aufzeigen und in einer, wenn auch in geringem Maße repräsentativen, sensorischen Verkostung mit dem derzeitigen Produkt des Marktführers „Seeberger“ mithalten, beziehungsweise diesen sogar gegebenenfalls übertrumpfen können. Eine konkrete Abgrenzung der einzelnen Apfelchips voneinander trat jedoch nicht auf.

#### 4.2.5. Wirtschaftliche Betrachtung

Final erfolgt eine Betrachtung der wirtschaftlichen Relevanz des konstruierten Trocknungsapparats, sofern hypothetisch von einer Nutzung als tatsächlichem Obsttrockner ausgegangen wird.

Es ist mithilfe des IR-Apparats möglich, zeitgleich 12 Apfelscheiben mit einem mittleren Gewicht von je 12 g bei einer Scheibendicke von drei Millimetern, mittig unter dem Strahler positioniert einzubringen. Demnach befinden sich bei jedem Trocknungsprozess 144 g Rohäpfel im Inneren. Bei einem Gewichtsverlust von 80 %, welcher durchschnittlich während der Versuche auftrat, ergibt dies ein Produktgewicht von 28,8 g. Demzufolge werden 2,1 Durchläufe benötigt, um eine Apfelchippackung mit 60 g Einwaage zu erzeugen, die vergleichbar ist mit den handelsüblichen Mengen. Für ein ganzes Kilogramm werden indes 34 Trocknungsprozesse benötigt, eine Aufstellung des ermittelten Strombedarfs ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 15: Strompreisermittlung je kg

Leistung / Programm	80%	70%	60%	50%	FP 2	FP 2 b
<b>Stromverbrauch in kWh</b>	1,100	0,900	0,700	0,600	0,700	0,800
<b>Aufheizzeit 10 Min in kWh</b>	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
<b>Lüfter in kWh</b>	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
<b>Gesamtverbrauch</b>	1,205	1,005	0,805	0,705	0,805	0,905
<b>Strompreis in € je kWh (2017)</b>	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290	0,290
<b>Strompreis in € je 28,8 g</b>	0,349	0,291	0,233	0,204	0,233	0,262
<b>Strompreis in € je kg</b>	12,231	10,201	8,171	7,156	8,171	9,186

Das meistgenutzte Trocknungsprogramm „FP 2“ generiert Energiekosten von circa 8 € bei der Herstellung von einem Kilogramm getrockneten Apfelchips. Hinzu kommen die jeweils benötigten fünf Kilogramm an Äpfeln, welche für ein Kilogramm Trockenobst benötigt werden.

Bei einem durchschnittlichen Kilogrammverkaufspreis von 1,99 € ergeben sich zusätzlich variable Kosten von 9,95 € für ein Kilogramm getrockneter Äpfel. Demzufolge kostet die Herstellung eines Kilogramms Apfelchips bei Verwendung des Programms „FP 2“ insgesamt knapp 18,50 €. Hierbei unterschlagen werden anderweitig fixe Kosten bei der industriellen Produktion, wie Gehälter, Investitionskosten, maschinelle Abschreibungen und weitere. Auch wird die Produktaufbereitung nicht näher betrachtet, da diese für jede Trocknungsart identisch ist. Es ist unumgänglich, die Äpfel vorhergehend zu reinigen, entkernen und anschließend in Scheiben zu schneiden. Außerdem ist es nicht möglich, spezifischer auf Logistik und Speditionskosten, als auch auf die Aufwendungen für die Verpackung des Produktes näher einzugehen.

Trotzdem wird bei der anschließenden Betrachtung der Verkaufspreise vergleichbarer Produkte im Einzelhandel deutlich, dass die Preise der Konkurrenz, unter Annahme von beispielhaften Margen für die Produkte, niedriger sind. Demzufolge ist hierbei nur geringer Spielraum für weitere Kosten (Tabelle 16). Die aufgezeigten Werte dienen nur einer groben Orientierung des Preissegments und sind nicht belastbar.

Tabelle 16: Vergleich Kilogrammpreis

Produkt	Funny Frisch	Topfruits	Seeberger	BloZentrale
<b>Bruttopreis in €</b>	1,99	2,90	3,32	7,89
<b>Menge in kg</b>	0,06	0,10	0,10	0,20
<b>Bruttopreis in € je kg</b>	33,17	29,00	33,20	39,45
<b>Mehwertsteuer</b>	5,30	4,63	5,30	6,30
<b>Nettopreis in € je kg</b>	27,87	24,37	27,90	33,15
<b>30 % Einzelhandelsaufschlag</b>	6,43	5,62	6,44	7,65
<b>Einkaufspreis</b>	21,44	18,75	21,46	25,50
<b>10 % Logistik</b>	1,95	1,70	1,95	2,32
<b>Listenverkaufspreis in € je kg</b>	19,49	17,04	19,51	23,18
<b>10 % Gewinn</b>	1,77	1,55	1,77	2,11
<b>Herstellungskosten</b>	17,72	15,49	17,74	21,08

Demzufolge ist eine wirtschaftliche Rentabilität bei Einsatz einer Infrarotstrahlungsquelle nicht auszuschließen, da insbesondere mit großen Produktionsmengen die fixen Kosten bei realen Anlagen für das Einzelprodukt zusätzlich fallen und Mengenrabatte für die Rohware zu akquirieren sein sollten. Es ist zudem zu beachten, dass der bestehenden Marktkonkurrenz extreme Möglichkeiten zur Prozessoptimierung zu Verfügung stehen, wodurch die variablen Kostenstellen zusätzlich gesenkt werden können.

#### **4.2.6. Zusammenfassung der Hauptversuche**

Die Ergebnisse der Hauptversuche zeigen deutlich, dass es mithilfe der Infrarottrocknung möglich ist, einen guten Farberhalt und zugleich eine schnelle Trocknung durchzuführen. Verbrennungsmale und Anzeichen der Maillardreaktion sind stark reduziert, der Erhalt der Ausgangsfarbe ist sehr gut möglich. Gleichwohl ist der Aw-Wert niedrig genug, um ein unbedenkliches Trocknungsprodukt zu erhalten und die Produkte haben eine vergleichsweise hohe Rehydrierungsrate. Ein erfolgreiches Trocknungsprogramm (FP 2) konnte durch die Versuche generiert werden, es zeigt sich jedoch gleichwohl, dass dieses für unterschiedliche Apfelsorten Anpassungen bedarf. Für die Sorten Granny Smith und Braeburn konnte somit je ein Prozessschema festgelegt werden, allerdings führen die entsprechenden Schwankungen der Rohware bezüglich des Wassergehalts zu einer ungleichmäßigeren Trocknung. Gegebenenfalls muss bei den entsprechenden Trocknungsgütern eine weiterführende Optimierung stattfinden, wobei dies insbesondere auch von dem eingesetzten Strahler abhängt. Dessen ungleichmäßige Temperaturentwicklung erschwert den Prozess zusätzlich. Bei der Sensorik wurde ermittelt, dass der Geschmacks- und Farberhalt von dem eingesetzten Panel positiv hervorgehoben wurde und in einem direkten Vergleich mit Produkten der Firma „Seeberger“ wurde eine Präferenz für die Apfelchips deutlich, welche im Rahmen dieser Arbeit hergestellt wurden.

### **5. Empfehlungen bezüglich des industriellen Einsatzes**

Der Trocknungsapparat weist insbesondere hinsichtlich der Emitter noch Verbesserungspotential auf. Wie durch die Versuche mehrmals belegt werden konnte, ist deren Strahlung nicht gleichmäßig genug. Allerdings ist in der Industrie ein diskontinuierliches Verfahren ohnehin kaum anwendbar. Als effektivste Methodik bietet sich deshalb ein Trocknungstunnel an, in welchem die Produkte unter den Emittern hindurchgeführt werden. Zudem wäre hierbei eine Onlinemessung durchführbar, indem je eine Wiegung der Apfelchips durch ein, unter dem Förderband eingebrachtes, gravimetrisches Messsystem vor, zwischen und hinter dem Strahlungsbereich erfolgt. Eine Regulation der Temperaturprogramme wäre durch die jeweils anliegende Strahlungsleistung und Bandgeschwindigkeit möglich. Relevant ist zudem die Innenauskleidung mittels eines spiegelnden Materials, wie die Versuche beweisen. Der hohe Energieverbrauch könnte auf diese Art reduziert werden, da geringere Leistungen benötigt werden.

## 6. Fazit der Arbeit

Die abschließende Betrachtung der Vor- und Hauptversuche zeigt ein deutliches Ergebnis bezüglich der zugrundeliegenden Arbeitshypothesen. Wie im Grundlagenteil aufgezeigt, wurde angenommen, dass die Infrarottrocknung aufgrund ihres Strahlungscharakters verglichen mit der Konvektionsmethode qualitative und quantitative Effekte zeigen müsste.

Besonders das Wirken bezüglich der Prozessgeschwindigkeit und dem Erhalt der gutseigenen Charakteristika wurde dabei in den Fokus gerückt, da die produktschonendere Trocknungsmethode hierbei ihre Vorzüge haben sollte.

Diese These ist durch die Arbeit belegt worden, denn es konnte im Rahmen der Versuche bewiesen werden, dass die erwünschten Endfeuchtegehalte mittels Infraroteinsatz sehr schnell erreicht werden können. Mithilfe des Trocknungsapparats ist eine Reduzierung des Feuchtegehalts in Apfelchips mit einer Scheibendicke von 3 mm in deutlich unter einer Stunde möglich. Außerdem wurde der Erhalt der Farbe erfolgreich bewerkstelligt, sowie die jeweiligen sortentypischen Geschmäcke. Allerdings war eine vollständige Ausschaltung der Polyphenoloxidase nicht möglich, weshalb die Nutzung von Antioxidantien hierbei sinnvoll wäre. Im Rahmen der Versuche konnten zusätzlich die Einflüsse verschiedener Prozessfaktoren genauer betrachtet werden. Dies hat insbesondere hinsichtlich der Einflussnahme auf die Trocknungsgeschwindigkeit und die Produktqualität Bedeutung.

Der hergestellte Trocknungsapparat eignet sich gut für exemplarische Untersuchungen der Infrarotstrahlung und die Herstellung von verschiedenen Trocknungsgütern, zeigt jedoch bezüglich der Strahlereinheit Defizite, welche fortführend durch den Einsatz eines anderen Emitters behoben werden sollten. Zunächst ist allerdings eine Verkleidung des Versuchsofens angedacht.

Zusammenfassend ist demnach festzuhalten, dass die Infrarottrocknung eine sehr vielversprechende Trocknungsmethode ist, welche tatsächlich Vorteile gegenüber der Konvektionstrocknung zeigt. Die eingangs angestrebte Optimierung der Apfelchipherstellung konnte aus diesem Grund erfolgreich durchgeführt werden.

## 7. Literaturverzeichnis

1. Bosnjakovic, Fran; Knoche, Karl F.: Technische Thermodynamik. 7. Auflage. Steinkopff Verlag Darmstadt, 1988
2. Der Brockhaus Ernährung: Gesund essen - bewusst leben. Brockhaus Mannheim Verlag, 2011
3. DIN: DIN 10950 2012-10, Sensorische Analyse. Beuth Verlag Berlin, 2012
4. DIN: DIN 10964-11, Einfach beschreibende Prüfung. Beuth Verlag Berlin, 2014
5. Dobrinski, Paul; Krakau, Gunter; Vogel, Anselm: Physik für Ingenieure. 12. Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2009
6. Döschel GmbH: MoistureScan. Hamburg, 2018)
7. Ebert, Marco: Skript Physik der Produkte. Neubrandenburg, 2016
8. El-Mesery, Hany; Mwithiga, Gikuru: Performance of a convective, infrared and combined conveyer-belt dryer. 1. Auflage. Springer, 2014
9. GerberInstruments: Anleitung Aqua Lab CX 3. GerberInstruments AG Effretikon, 2006
10. Ginsburg, Abram S: Infrarottechnik und Lebensmittelproduktion. 1. Auflage. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1973
11. Gnielinski, Volker; Mersmann, Alfons; Thurner, Franz: Verdampfung, Kristallisation, Trocknung. 1. Auflage. Vieweg Verlag. Wiesbaden, 1993
12. Goody, Richard M.; Yung, Yuk. Atmospheric Radiation: Theoretical Basis. Oxford University Press, New York, 1989
13. Grdzlishvili, Gulnara: Near Infrared drying of apple slices. 1. Auflage. Prag: Technische Universität Prag, 2012
14. Hopp, Franz: Vergleichstrockenversuche Infrarot und Konvektion. HS Neubrandenburg, 2017
15. John, Thomas: Skript Verfahrenstechnik (MVT + TVT). Neubrandenburg, 2017
16. Kraume, Matthias: Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. 2. Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2012
17. Lüders, Klaus; Pohl, Robert O.: Einführung in die Physik. 12. Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006
18. Nowak, Dorota; Lewicki, Piotr: Quality of Infrared Dried Apple Slices. 1. Auflage. Warschau: Agricultural University, 2005
19. Pan, Zhongli; Atungulu, Griffiths G.: Infrared Heating for food and agricultural processing. 1. Auflage. CRC Press Boca Raton, 2011

20. Pan, Zhongli; Zhu, Yi: Processing and quality characteristics of apple slices. 1. Auflage. Kalifornien: Department of Food Science, 2008
21. Santos, Emílio d. S.; Correa, Paulo C.: Mathematic Modelling of Dehydration of Fuji and Gala. 1. Auflage. Campinas, 2011
22. Sartorius AG: Betriebsanleitung Sartorius MA 40. Göttingen, 2002
23. Schwister, Karl: Taschenbuch der Verfahrenstechnik. 1 Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien, 2001
24. Zhang, Min; Bhandari, Bhesh; Fang, Zhogxiang: Drying of Vegetables. 1. Auflage, CRC Press Boca Raton, 2017

## 8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der Strahldichte gemäß Wien (Pan, Atunglu, 2011) .....	8
Abbildung 2: Reflexion der Strahlung im Trocknungsofen (Hopp, 2018) .....	12
Abbildung 3: Lagertest unter Vakuum, enzymatische Bräunung (Hopp, 2018).....	14
Abbildung 4: IR-Trocknungsapparat (Hopp,/ Taraba, 2018).....	15
Abbildung 5: IR-Trocknungsapparat nach Umbau (Hopp, Taraba, 2018).....	22
Abbildung 6: Vergleich IR-Emitter Temperaturentwicklung (Hopp, Taraba, 2018).....	23
Abbildung 7: Strahlungsleistung IR-Emitter (unverspiegelter Innenraum).....	24
Abbildung 8: Vergleich verspiegelt / unverspiegelt.....	25
Abbildung 9: Vergleich Trocknungsprogramm (verspiegelt) .....	26
Abbildung 10: Vergleich Trocknungsprogramm (unverspiegelt) .....	27
Abbildung 11: Temperaturvergleich planar im Apparat .....	28
Abbildung 12: Trocknungsprogramm bei 3 mm Scheibendicke der Äpfel .....	29
Abbildung 13: Vergleich IR und Konvektion (Hopp, 2017) .....	31
Abbildung 14: Temperaturvergleich Farberhalt Gala .....	33
Abbildung 15: Vergleich der Trocknungsergebnisse (Hopp, 2018) .....	34
Abbildung 16: Trocknungsverlauf beim Sortenvergleich .....	36
Abbildung 17: Temperaturverlauf im Gutsinneren .....	36
Abbildung 18: Trocknungsverlauf im Programmvergleich FP 2 .....	37
Abbildung 19: Aw-Werte im Sortenvergleich .....	39
Abbildung 20: Vergleich der Endprodukte des Sortenvergleichs (Hopp, 2018) .....	39
Abbildung 21: Vergleich der Polyphenoloxidaseaktivität der rohen Äpfel (Hopp, 2018) .....	40
Abbildung 22: Rehydrierungsrate der Apfelchips im Sorten- und Verfahrensvergleich.....	41

Abbildung 23: Beliebtheitsprüfung .....	43
Abbildung 24: Spannweite der Bewertung .....	44
Abbildung 25: Tukey-Test Streuung der einzelnen Gruppen .....	44

## 9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Körperattribute .....	7
Tabelle 2: Geräte und Rohstoffe .....	16
Tabelle 3: Stresstest IR-Trocknungsapparat .....	17
Tabelle 4: Programme Farberhalt .....	18
Tabelle 5: Einfluss der Parameter Leistung und Distanz .....	24
Tabelle 6: Endgewichte im Vergleich .....	27
Tabelle 7: Trocknungsprogramm 3 mm / 10 cm Distanz (TP 2) .....	30
Tabelle 8: Optimiertes Trocknungsprogramm 3 mm / 10 cm Distanz (TP 3) .....	30
Tabelle 9: Prozentuale Endgewichte der Apfelchips .....	33
Tabelle 10: Farbmesswerte L*a*b*-Farbraum .....	35
Tabelle 11: Feuchtegehalte der Rohware .....	35
Tabelle 12: Modifizierte Trocknungsprogramme (FP 2) .....	37
Tabelle 13: Durchschnittlicher Feuchteaustritt im Sortenvergleich .....	38
Tabelle 14: Farbmesswerte des Sortenvergleichs .....	40
Tabelle 15: Strompreisermittlung je kg .....	45
Tabelle 16: Vergleich Kilogrammpreis .....	46
Tabelle 17: Einfachbeschreibende Prüfung .....	55

## 10. Formelverzeichnis

(1.1) $E_{by}(T, \lambda) = \frac{2\pi hc_0^2}{n^2 \lambda^5 [e^{hc_0/n\lambda kT} - 1]}$ .....	6
(1.2) $A + R + D = 1$ .....	6
(1.3) $E_s = \sigma * T^4$ .....	7
(1.4) $\lambda * T = 0,002898 \text{ m} * \text{K}$ .....	7
(1.5) $\lambda_{max} = \frac{2898}{T}$ .....	8
(1.6) Feuchteaustritt je $m^2 = \frac{mA - mE}{(5*60)*A}$ .....	9
(1.7) $Q = \frac{Q_r}{r^2}$ .....	12
(1.8) $t = 0,45 + 0,0001 \left(\frac{r}{100}\right)^{2,2} + 1,8v^5$ .....	12

## 11. Anhang

### 11.1. Sensorikbögen

Prüfverfahren:

**Beliebtheitsprüfung  
(Hedonische Prüfung) - Einzelprotokoll -**

Name:

Datum:

Prüfgut

Proben-Nr.

-----  
 -----  
 -----  
 -----  
 -----

Prüfanleitung:

Die Proben sind nacheinander zu verkosten und entsprechend der Prädikatskala 9-1 einzuordnen.

Die Beurteilung ist durch Ankreuzen (x) zu kennzeichnen. Im Bereich „Bemerkungen“ sind die Entscheidungen zu begründen.

Note	Prädikat\Prüfnummer	820	747	313	591
9	Gefällt außerordentlich				
8	Gefällt sehr				
7	Gefällt einigermaßen				
6	Gefällt geringfügig				
5	Weder gefällt/missfällt				
4	Missfällt geringfügig				
3	Missfällt einigermaßen				
2	Missfällt sehr				
1	Missfällt außerordentlich				

Bemerkungen

Apfelchip 820: Skalennote:	
Apfelchip 747: Skalennote:	
Apfelchip 313: Skalennote:	
Apfelchip 591: Skalennote:	

**Prüfverfahren:  
Einfach beschreibende Prüfung**

- Einzelprotokoll -

Name:

Prüfer - Nr.:

Prüfgut:

Datum:

Prüfanleitung

Beschreiben Sie bei dem Ihnen vorliegenden Prüfgut die vorgegebenen Merkmale

	Apfelchip 820	Apfelchip 747
Aussehen/Farbe		
Aussehen/Form		
Geruch		
Geschmack		
Textur/Konsistenz		
Summe der Beschreibungen		

	Apfelchip 313	Apfelchip 591
Aussehen/Farbe		
Aussehen/Form		
Geruch		
Geschmack		
Textur/Konsistenz		
Summe der Beschreibungen		

## 11.2. Sensorik: Einfachbeschreibende Prüfung

Tabelle 17: Einfachbeschreibende Prüfung

Attribute / Apfelchip	Gala	Granny Smith	Seeberger	Braeburn
<b>Aussehen Farbe</b>	bräunlich (8)	blass (6)	bräunlich (10)	bräunlich (6)
	gebräunte Schale (2)	bräunlich (3)	fleckig (3)	fleckig (2)
	gelblich (12)	fleckig (1)	gelblich (4)	gelblich (3)
	gleichmäßig (2)	gelblich (9)	hell (1)	hell (2)
	hell (4)	grünliche Schale (10)	karamellig (3)	ungleichmäßig (3)
	natürlich (1)	hell (10)		
	rote Schale (6)			
<b>Aussehen Textur</b>	glatt (5)	glatt (5)	dick (2)	glatt (1)
	gleichmäßig (3)	gleichmäßig (2)	ungleichmäßig (5)	gleichmäßig (2)
	wellig (11)	scharfkantig (1)	wellig (6)	wellig (5)
		ungleichmäßig (8)		
<b>Geruch</b>	apfelig (4)	apfelig (4)	apfelig (3)	apfelig (3)
	fad (4)	fruchtig (6)	brennig (2)	fad (6)
	fruchtig (4)	gärig (1)	fad (6)	karamellig (1)
	neutral (3)	neutral (7)	karamellig (1)	Röstaroma (1)
	karamellig (3)	karamellig (2)	säuerlich (1)	säuerlich (2)
	süßlich (5)	süßlich (3)	süßlich (5)	süßlich (6)
			verbrannt (4)	
<b>Geschmack</b>	apfelig (9)	apfelig (8)	apfelig (5)	apfelig (5)
	karamellig (2)	fad (3)	bitter (2)	brennig (1)
	neutral (2)	fruchtig (9)	neutral (4)	fruchtig (6)
	säuerlich (4)	intensiv (3)	säuerlich (5)	säuerlich (8)
	süßlich (13)	säuerlich (9)	süßlich (5)	süßlich (4)
		süßlich (9)	verbrannt (3)	karamellig (1)
<b>Textur</b>	knusprig (7)	knusprig (7)	knusprig (6)	knackig (5)
	kurzer Biss (8)	kurzer Biss (6)	trocken (4)	knusprig (5)
	trocken (3)	trocken (2)	zäh (10)	trocken (2)
	zäh (5)	zäh (3)		zäh (6)

### Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbst angefertigt und nur die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel für die Erstellung genutzt habe. Textstellen wurden durch die Benennung der Quelle gekennzeichnet. Ich erkläre weiterhin, dass die abgegebene digitale Version mit der eingereichten schriftlichen Arbeit übereinstimmt.

Neubrandenburg, den \_\_\_\_\_

Franz Hopp: \_\_\_\_\_