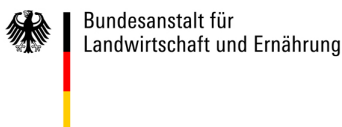




SUS Organic

Verarbeitungs- und Qualitätsleitfaden
für biologische Lebensmittel

Unterstützt von



Autoren und Zugehörigkeiten

Meridian Fruchthandelsgesellschaft mbH
Dr. Albert Esper, info@meridian-frucht.de
Altdorf, Deutschland

Schwedische Universität für Agrarwissenschaften
Prof. Dr. Girma Gebresenbet, girma.gebresenbet@slu.se
Dr. Techane Bosona, techane.bosona@slu.se
Uppsala, Schweden

SINTEF Energy Research
Dr. Michael Bantle¹⁾, michael.bantle@sintef.no
Dr. Ingrid Camilla Claußen¹⁾, IngridCamilla.C.Claussen@sintef.no
Dr. Ignat Tolstorebrov²⁾, ignat.tolstorebrov@ntnu.no
¹⁾Trondheim, Norwegen
²⁾Norwegische Universität für Wissenschaft und Technik, Trondheim, Norwegen

Universität Kassel, Fachgebiet Agrar- und Biosystemtechnik
Dr. habil. Barbara Sturm, barbara.sturm@uni-kassel.de
MSc. Gardis von Gersdorff, g.gersdorff@uni-kassel.de
MSc. Luna Shrestha, sthaluna@gmail.com
MSc. Rosalizan Md. Saleh, rosalizansaleh@gmail.com
Witzenhausen, Deutschland

Universität Teramo, Department für Lebensmittelwissenschaften- und technik
Prof. Dr. Paola Pittia, ppittia@unite.it
Teramo, Italien

Universität Tuscia, Department für Innovation in Bio-, Ernährungs und Forst Systemen
Prof. Dr. Riccardo Massantini, massanti@unitus.it
Dr. Roberto Moschetti, rmoscetti@unitus.it
Tuscia, Italien

Vorwort

Dieser Leitfaden für Qualität und Verarbeitung biologischer Lebensmittel wurde als Teil des CoreOrganic Plus geförderten Projektes „SusOrganic – Entwicklung von Qualitätsstandards und optimierten Verarbeitungsverfahren für biologisch angebaute Produkte“ erstellt. Sie sind als Unterstützung von Akteuren im Bereich der biologischen Lebensmittelverarbeitung gedacht und sollen gleichzeitig die Ressourceneffizienz und die Produktqualität verbessern, indem sie ein tieferes Verständnis für das Rohmaterial, prozess- und produktrelevante Aspekte bietet. Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit liegt auf der Konservierung von Obst, Kräutern, Gemüse, Fisch und Fleisch durch Trocknen und Kühlen/Gefrieren.

Ergänzend zu diesem Leitfaden und um die praktische Umsetzung zu unterstützen wurde ein e-learning Kurs entwickelt, welcher <https://www.susorgplus.eu/zugänglich> ist:

ZIEL DIESES LEITFADENS IST ES, VERARBEITERN FOLGENDES BEREITZUSTELLEN:

- Trocknungsbezogene Aspekte
- Ein tieferes Verständnis für natürlich vorkommende Heterogenitäten in der Rohware und deren Einfluss auf die Trocknungseigenschaften
- Informationen zum Einfluss von Vorbehandlungen und Wartezeiten zwischen Vorbereitung und Trocknungsprozess und den daraus folgenden Produktqualitäten
- Informationen über den Einfluss der Trocknung und damit verbundene Prozesseinstellungen auf die Produktqualität
- Informationen bezüglich verbesserter Trocknungsstrategien und Prozesssteuerungskonzepten
- Best Practice Beispiele der Verarbeitung
- Best Practice bezogen auf LCA und LCCA
- Lebensmitteltrocknung und zugehörige Lebensmittellogistik
- Aspekte der Kühlung und des Gefrierens:
 - Konzept Superchilling
 - Superchilling für Bio-Schweinefleisch und Lachs
 - Auswirkung von Gefrieren und Gefrieren auf biologisches Obst

Eine Möglichkeit des selbstständigen Trainings in deutscher Sprache ist über den ISEKI Lebensmittelverband gegeben: <https://moodle.iseki-food.net/course/view.php?id=59>

Das SusOrganic Konsortium bedankt sich beim CoreOrganic EraNet und den beteiligten nationalen Förderträgern für ihre finanzielle und beratende Unterstützung während der Projektlaufzeit.

Wir möchten die Leser weiterhin darauf hinweisen, dass wir im Rahmen des SusOrgPlus Projektes derzeit an der zweiten Phase der Technologie- und Produktentwicklung arbeiten. Weitere Informationen hierzu wird es zeitnah über die Website [susorgplus.eu](https://www.susorgplus.eu) geben.

Im Falle von Fragen bezüglich dieses Leitfadens oder bei Interesse am laufenden SusOrgPlus Projekt teilzunehmen, nehmen Sie gerne Kontakt über susorganic@uni-kassel.de zu uns auf.

Wir hoffen, Sie finden diesen Leitfaden hilfreich und freuen uns auf Ihr Feedback.

Barbara Sturm

KAPITEL I TROCKNUNG

I.1 Einfluss der Verarbeitung auf die Qualität von Obst und Gemüse	12
1. Heterogenität des Rohmaterials	12
1.1. Morphologie des Apfels	12
1.1.1. Beziehung zwischen Frucht und Zellwachstum	12
1.1.2. Fruchtfestigkeit	12
1.1.3. Feuchte Verteilung	13
1.1.4. Einfluss der Scheibendicke auf die Prozessdauer	13
1.2. Einfluss des Anfangsfeuchtegehaltes und der Lagerdauer	14
1.3. References	23
2. Einfluss der Trocknungsbedingungen auf die Produktqualität	24
2.1. Nährstoffveränderungen	24
2.1.1. Ascorbinsäure	24
2.1.2. Carotenoide	25
2.1.3. Phenole	25
2.1.4. Vitamin E	26
2.2. Farbveränderungen	26
2.2.1. Chlorophyll und Carotenoide	26
2.2.2. Enzymatische Bräunung	26
2.2.3. Nicht-Enzymatische Bräunung	27
2.3. Physikalische Veränderungen	28
2.3.1. Schrumpfung	28
2.3.2. Textur	28
2.3.3. Wassergehalt und -aktivität	29
2.4. Referenzen	30
3. Trocknungsbedingte Qualitätsveränderungen von Obst und Gemüse	35
3.1. Äpfel	35
3.1.1. Einfluss von Vorbehandlung und Wartezeiten während der Verarbeitung auf Bräunungsreaktionen	36
3.2. Möhren	39
3.2.1. Qualität getrockneter Möhren	41
3.2.2. Einfluss von Vorbehandlung auf die Qualität getrockneter Möhren	41

3.2.3. Einfluss von Trocknungsmethoden und Prozessparametern auf die Qualität	42
3.2.4. Physikalische Qualität	42
3.2.5. Erhaltung von Nährstoffen	43
3.2.6. Zusammenfassung	44
3.3. Referenzen	45
I.2 Trocknungsstrategien, Prozesse und Energie	52
4. Empfehlungen und praktische Erfahrungen (Best Practice Verarbeitung)	52
4.1. Hintergrund	52
4.2. Empfehlungen	52
4.2.1. Verarbeitungskette Trocknung	52
4.2.2. Lagerung vor der Verarbeitung	53
4.2.3. Vorbereitung	54
4.2.4. Vorbehandlung	54
4.2.5. Verweildauer zwischen Vorbereiten und Trocknen	56
4.2.6. Einfluss der Partikelgröße	56
4.2.7. Trocknung	57
4.2.8. Best-Practice Verarbeitung von Kräutern und Hopfen	58
4.2.8.1. Vorbereitung/ Rohmaterialhandhabung	58
4.2.8.2. Vorverarbeitung	59
4.2.8.3. Trocknung	59
4.2.8.3.1. Luftverteilung	59
4.2.8.3.2. Schütthöhe/ -gewicht	60
4.2.8.3.3. Schüttdichte/ -produkt	61
4.3. Produkttemperatur in der Messung und Regelung des Trocknungsprozesses	62
4.4. Optimierung Energie bereitstellender Systeme und Integration erneuerbarer Ressourcen	63
4.5. Referenzen	64
5. Verbesserte Trocknungsstrategien	65
5.1. Einleitung	65
5.2. Trocknung mit erwärmter Umgebungsluft (Heated Ambient Air Drying)	65
5.3. Trocknungssystem mit geschlossenem Kreislauf	66
5.4. Wärmepumpentrocknung	67

5.5. Simulation der Leistung eines R744 Wärmepumpentrockners	69
5.6. Analyse der Leistung des Wärmepumpentrockners	73
5.7. Zusammenfassung	75
5.8. Referenzen	75
6. Vergleich von Prozesssteuerungskonzepten	76
6.1. Gegenwart und Zukunft der Trocknungstechnik	76
6.2. Computer Vision Technologie	76
6.2.1. Bildanalyse	77
6.2.2. Einzelpunktspektroskopie	78
6.2.3. Hyper-/Multi-Spektrale Bildgebung	78
6.3. Elektronische Nase und elektronische Schleimhaut	79
6.4. Kernmagnetresonanztomographie	80
6.5. Mikrowellen-Dielektrikumspektroskopie	80
6.6. Die intelligente Trocknungstechnologie	80
6.7. Entwurf eines intelligenten Trocknungsprozesses, Quality by Design Ansatz	80
6.8. Validierung eines intelligenten Trocknungsprozesses	82
6.9. Referenzen	84
I.3 LCA, LCCA und Lebensmittellogistik	87
7. Best Practice auf Basis von Life Cycle Analysis (LCA) und Life Cycle Cost Analysis (LCCA)	87
7.1. Einleitung	87
7.2. Praktische LCA- und LCCA-Studien aus dem SusOrganic-Projekt	88
7.3. Lehren aus LCA- und LCCA-Studien	93
8. Lebensmittel Trocknung und damit verbundene Lebensmittellogistik	94
8.1. Einleitung	94
8.1.1. Trocknungsprozess und Lebensmitteltransport	95
8.1.2. Lebensmittel Trocknung und Auswirkungen auf die Haltbarkeit und den Verlust von Lebensmitteln	96
8.1.3. Hervorgehobene Lehren	99
8.2. Referenzen	101
 KAPITEL II KÜHLEN UND GEFRIEREN	
II. I Superchilling	102

1. Konzept Superchilling	102
1.1. Stand der Technik	107
1.2. Das Potential des Superchillings für Bio-Lebensmittelhersteller	110
1.3. Herausforderungen des Superchillings	112
1.4. Zusammenfassung	113
1.5. Referenzen	114
2. Superchilling von Bio-Schweinefleisch und Lachs	116
2.1. Einleitung	116
2.1.1. Superchilling von Bio-Lachsfilets	117
2.2. Superchilling biologischer Schweinekoteletts	119
2.3. Mikrobiologische Analyse	120
2.4. Physikalische Eigenschaften	120
2.4.1. Anfangswassergehalt	120
2.4.2. Wasserhaltevermögen	120
2.4.3. Farbe	120
2.4.4. Tropfsaftverlust	121
2.5. Ergebnisse für die Superkühlung von Lachsfilets	121
2.5.1. Mikrobiologische Analyse	121
2.6. Physikalische Eigenschaften	122
2.6.1. Anfangswassergehalt	122
2.6.2. Tropfsaftverlust	122
2.6.3. Wasserhaltevermögen	122
2.6.4. Farbe	123
2.7. Ergebnisse für normal gekühltes und supergekühltes Schweinekotelett	124
2.7.1. Mikrobiologische Analyse	124
2.8. Physikalische Eigenschaften	125
2.8.1. Wassergehalt	125
2.8.2. Tropfsaftverlust	125
2.8.3. Wasserhaltevermögen	126
2.8.4. Farbe	126
2.9. Zusammenfassung	126
2.10. Referenzen	127

II. II Gefrieren	128
3. Einfluss der Gefrier- und Gefriereschwindigkeit auf die Qualität von Bio-Äpfeln	128
3.1. Einleitung	128
3.2. Experimentelles Design	129
3.2.1. Wirkung von Vorbehandlungen Tauchen und Vakuumimprägnierung zur Verbesserung der Stabilität über die Lagerzeit	130
3.2.2. Experiment 2: Auswirkung der Gefriereschwindigkeit	130
3.3. Ergebnisse (Experiment 1):	132
3.3.1. Charakterisierung von frischen Früchten: ORG vs. CONV	132
3.3.2. Auswirkung von Vorbehandlung frischer Früchte	132
3.3.3. Auswirkung der Vorbehandlung auf die Farbe der Frucht	134
3.3.4. Auswirkung der Vorbehandlung auf die Festigkeit von Äpfeln	134
3.3.5. Wirkung der Vorbehandlung auf bioaktive Verbindungen	135
3.3.6. Einfluss von Gefrieren und Gefrierlagerung auf die Farbe	135
3.3.7. Einfluss von Gefrieren und Gefrierlagerung auf die Festigkeit	135
3.3.8. Einfluss von Gefrieren und Gefrierlagerung auf bioaktive Verbindungen...	136
3.4. Results (Experiment 2):	136
3.4.1. Fresh fruits characterization: ORG vs. CONV	136
3.4.2. Effect of freezing rate on quality of apples CONV and ORG	137
3.5. Conclusions	139
3.5.1. Experiment 1	139
3.5.2. Experiment 2	139
3.6. References	139
II IV Empfehlungen zum Kühlen und Gefrieren	142
4. Hauptgründe für die Anwendung niedriger Temperaturen auf Lebensmittel	142
4.1. Gefrieren	143
4.1.1. Gefriereschwindigkeit	144
4.1.1.1. Langsames Gefrieren	144
4.1.1.2. Schnelles Gefrieren	144
4.2. Qualitätsrelevante Aspekte beim Einfrieren	144
4.2.1. Mikroorganismen	144
4.2.2. Enzymaktivität	145

4.3. Gefrierbrand	146
4.4. Auftauen	146
4.4.1. Schnelles Auftauen	147
4.5. Tierische Produkte	147
4.5.1. Fleisch	147
4.5.2. Fisch	147
4.6. Gefriertechnologien	148
4.6.1. Konduktion	148
4.6.2. Konvektion	148
4.6.3. Frosten in verdampfenden Flüssigkeiten	149
4.7. Zusammenfassung	149
4.8. Referenzen	150

1. Trocknung

I.1 EINFLUSS DER VERARBEITUNG AUF DIE QUALITÄT VON OBST UND GEMÜSE

1. Heterogenität des Rohmaterials

Universität Kassel, Abteilung für Agrar- und Biosystemtechnik

Im Folgenden wird der Apfel als Beispiel für die Heterogenität des Rohmaterials herangezogen. Im Allgemeinen sind diese Untersuchungen aber auch auf andere Obst- und Gemüsesorten anwendbar.

1.1. Morphologie des Apfels

Im Mittel besteht ein Apfel aus ca. 85 % Wasser, 14 % Kohlenhydrate, 2,4 % Ballaststoffen, 0,3 % Proteinen und 0,2 % Lipiden. Aufgrund der Sorte, des Reifegrades, des Anbaugesbietes sowie ackerbaulicher und Umwelteinflüssen entstehen Schwankungen der Anteile der einzelnen Komponenten (Ackermann et al., 1992). Die natürliche Schwankungsbreite des Wassergehaltes erntereifer Äpfel beispielsweise liegt zwischen 80,4 und 90 % oder anders ausgedrückt: 4,1 und 9 gW/gTS (Kröll & Kast, 1989).

Etwa 75 % der in einem Apfel enthaltenen Kohlenhydrate sind Zucker: Fruktose (etwa 6 %), Glucose (2,4 %) und Saccharose (2,0 %). Apfelsäure ist mit 0,3-1 % die vorherrschende organische Säure. Der Säureanteil eines Apfels hängt von Sorte, Reifegrad und Umwelteinflüssen während des Wachstums und der Lagerung ab. (Ackermann et al. 1992).

1.1.1. Beziehung zwischen Frucht- und Zellwachstum

Die Größe einer Frucht wird von der Zellzahl, dem Zellvolumen und der Zelldichte bestimmt. Während der Entwicklung nimmt der Volumenanteil des Kortex an der Frucht auf etwa 73 % zu, während der Anteil des Kernbereiches auf etwa 24 % zurückgeht (Bain & Robertson, 1951). Allgemein sind die Zellen in großen Früchten länger und voluminöser und haben größere Flächen als in kleinen Früchten. Fruchtgröße und Reifungszustand können zum Erntezeitpunkt stark variieren (Krüger, 1986).

Die Beziehung zwischen Frucht- und Zellgröße ist sortenspezifisch und aufgrund von Umwelteinflüssen variabel. In erster Linie ist die Zellgröße von der Assimilatversorgung abhängig, was durch Ausdünnungs-, Schnitt-, Beschattungs- und Düngeversuche belegt wurde. Deshalb spielt letztendlich auch die Position des Apfels im Fruchtstand, am Trieb und am Baum eine Rolle bei seiner Ausbildung (Hund & Stösser, 1984). Nährstoffversorgung und Witterung während der Zellteilung und -streckung sind ebenfalls maßgebend für die Abhängigkeit der Fruchtgröße von der Zellgröße.

1.1.2. Fruchtfestigkeit

Die Fruchtfestigkeit nimmt mit Fortschreiten des Reifungsprozesses aufgrund des Abbaus der

Mittellamellen und des Umbaus der Zelle (Prasanna et al., 2007) stetig ab. Diese Abnahme geht auch während der Lagerung weiter. Die Frucht-festigkeit gilt als Merkmal, mit dessen Hilfe die Textureigenschaften einer Frucht am einfachsten quantifiziert werden können. Die Festigkeit erntereifer Früchte ist ein Merkmal, das aufgrund seiner guten Korrelation zu subjektiven Kriterien wie Knackigkeit geeignet ist, die Fruchtqualität zu beschreiben (Brennan et al., 1977; Wills et al., 1980).

1.1.3 Feuchteverteilung

To show the moisture distribution within an apple, it was sliced into slices of 3.8 mm thickness. As shown in the following Figure 1.1, the core was removed and the outer diameter of the slices was cut to 72 mm. The slices were cut into Quarters, weighed and dried at 70 °C for 48 hours.

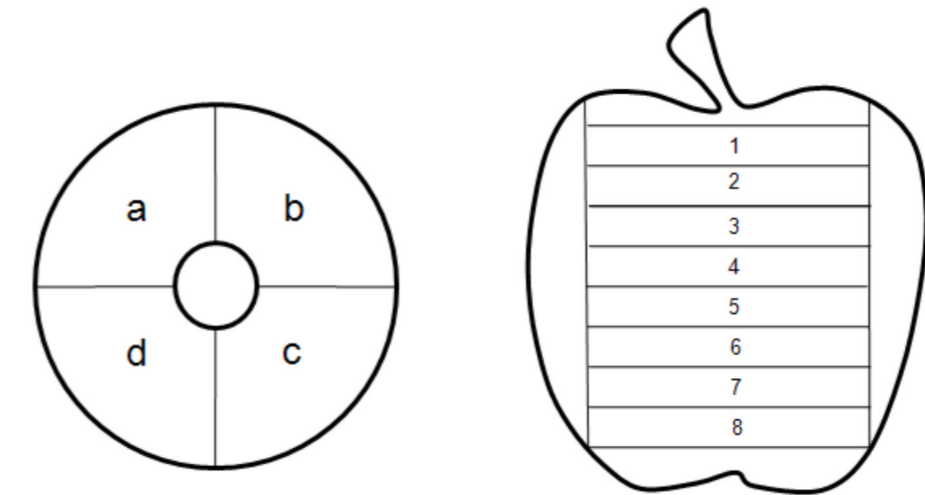


Abbildung 1.1: Aufteilung der Apfelscheiben in Sektoren und Anordnung Apfel, links horizontal, rechts vertikal

The samples were weighted again and the moisture of each slice as well as the moisture alongside the middle axes was calculated. Moisture content fluctuates which depends on the natural structure of apples and is not avoidable. Further, the fluctuations within the apple remains in very narrow limits and the average values are almost the same ($x_0=86.7 \% \pm 0.8 \%$), which allows the calculation of the final moisture content from only a few slices.

1.1.4. Einfluss der Scheibendicke auf die Prozessdauer

Die Dicke der Trocknungsgutstücke hat einen signifikanten Einfluss auf die Trocknungsdauer (Rahman & Kumar, 2007). In Abbildung 1.2 ist die Auswirkung einer Verringerung der Scheibendicke von Apfelscheiben von 3,8 mm auf 2,8 mm für zwei unterschiedliche Trocknungsbedingungen dargestellt. In beiden Fällen führt diese Verringerung zu einer Reduktion der benötigten Trocknungszeit um etwa 50 %. Fernando et al. (2008) ermittelten vergleichbare Werte für Knob-

lauch- und Papayascheiben. Dissa et al. (2008) ermittelten für eine Verringerung der Dicke von Mangoscheiben von 16 auf 8 mm eine Reduktion der daraus resultierenden Trocknungsdauer von 62 %.

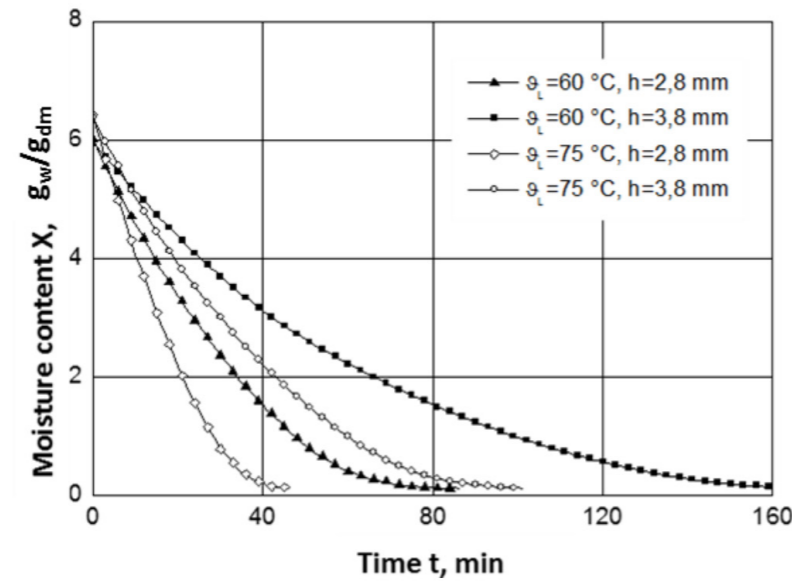


Abbildung 1.2: Trocknungsverlauf für Apfelscheiben unterschiedlicher Dicke bei unterschiedlichen Trocknungsparametern Lufttemperatur=60 °C (Luftgeschwindigkeit=3,4 m/s, Taupunkttemperatur=17,5 °C), Lufttemperatur=75 °C (Luftgeschwindigkeit=4,3 m/s Taupunkttemperatur=17,5 °C)

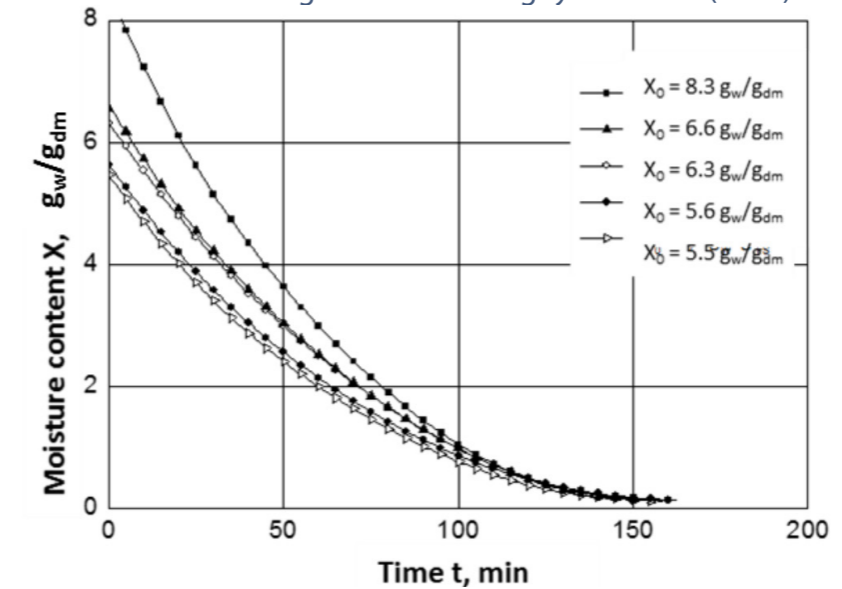
Durch die deutliche Verkürzung der Trocknungsdauer wird die Einwirkzeit der Temperatur deutlich verkürzt, wodurch die thermische Schädigung reduziert werden kann. Bashir (1998) zeigte, dass die Dicke der Zwiebelringe bis 6 mm keinen negativen Einfluss auf die Farbveränderungen des Produktes hat, darüber hinaus jedoch aufgrund der längeren Einwirkzeit der Temperatur Schädigungen auftreten.

1.2. Einfluss des Anfangsfeuchtegehaltes

Die verwendeten Äpfel stammten aus einem CA-Lager (Controlled Atmosphere), und die Chargen für Vor- und Hauptversuche wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten bezogen. Um den Einfluss der Einlagerungsdauer zu bestimmen, wurden Proben aus beiden Chargen unter identischen Bedingungen getrocknet. Zur Bestimmung des Einflusses des Anfangswassergehaltes auf die Trocknungsdauer und die während der Trocknung ablaufenden Veränderungen wurden Vergleichsversuche durchgeführt. Weiterhin erfordert die Implementierung verschiedener Trocknungsstrategien die Untersuchung von deren Einflüssen auf die Versuchsergebnisse.

Abbildung 1.3 zeigt die Trocknungsverlaufskurven der Äpfel, die für 3 Monate gelagert wurden. Die Anfangsfeuchte variiert zwischen den Proben sehr stark. Der maximale Anfangsfeuchtegrad beträgt dabei 8,3 gW/gTS und der minimale 5,5 gW/gTS. Alle Proben erreichen ungefähr nach der gleichen Trocknungszeit den angestrebten Endfeuchtegrad $X_E=0,13$ gW/gTS. Die Proben mit

dem höchsten Anfangsfeuchtegrad waren sogar etwas schneller trocken als die mit niedrigerem. Diese Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen von Nguyen & Price (2007) für Bananen überein.



In Abbildung 1.4 sind die Trocknungsverläufe für Äpfel nach 5 Monaten dargestellt. Auch hier erreichen alle Proben ungefähr zum gleichen Zeitpunkt den Endfeuchtegrad $X_E=0,13$ gW/gTS. Dieser stimmt mit den Erkenntnissen aus der ersten Testreihe überein. Weiterhin zeigt sich, dass die Anfangsfeuchtegrade X_0 im Schnitt deutlich niedriger liegen als nach 3 Monaten Lagerung. Die Äpfel haben während der längeren Lagerung deutlich an Wasser verloren.

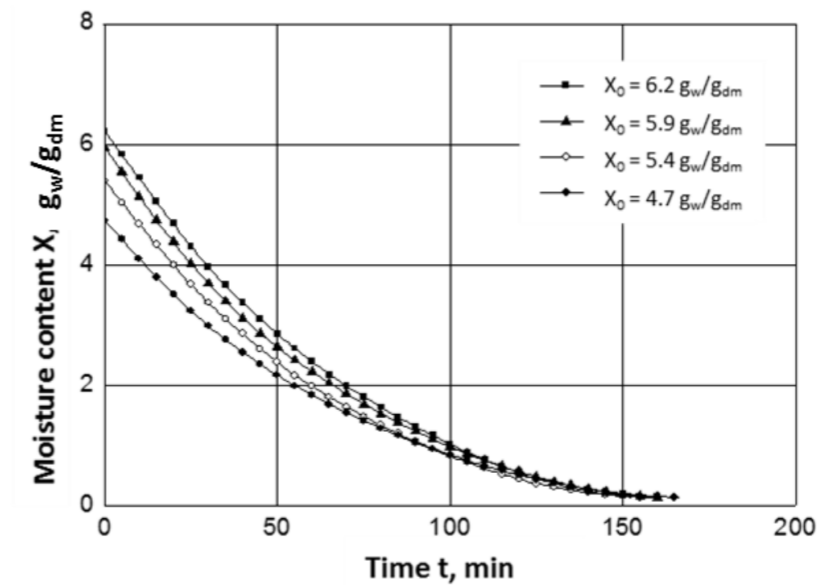


Abbildung 1.4: Trocknungsverlauf von Äpfeln unterschiedlicher Anfangsfeuchtegrade bei identischen Trocknungsbedingungen, Lagerung 5 Monate, Prozessbedingungen wie in Abbildung 1.3

Abbildung 1.5 zeigt die Gesamttrocknungszeit der einzelnen Proben als Funktion des Anfangs-

wassergehaltes nach 3 und 5 Monaten Lagerung. Bei der Auftragung der Trocknungsdauer über dem Anfangsfeuchtegrad wird deutlich, dass die Lagerdauer bei gleichem Anfangsfeuchtegrad keinen Einfluss auf die Trocknungsdauer hat. Alle untersuchten Proben wurden unabhängig vom Anfangsfeuchtegrad etwa zur gleichen Zeit trocken. Mit zunehmendem Anfangsfeuchtegrad sinkt die benötigte Trocknungsdauer leicht ab.

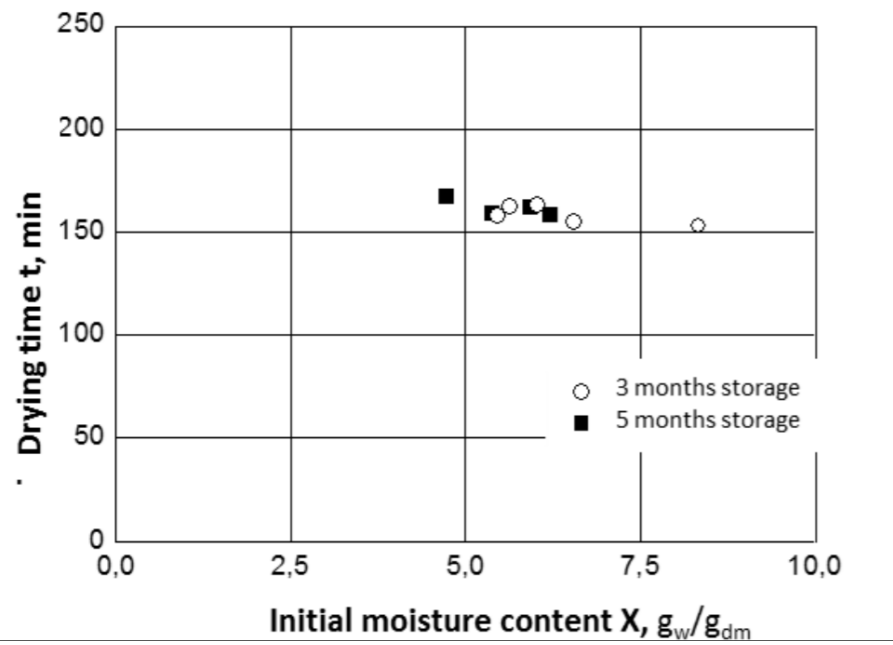


Abbildung 1.5: Gesamttrocknungsdauer für die Trocknung von Apfelscheiben auf einen Endfeuchtegrad von $X_E=0,13$ gW/gTS in Abhängigkeit vom Anfangsfeuchtegrad, Prozessbedingungen wie in Abbildung 1.3

Die Trocknungsgeschwindigkeit (Abbildung 1.6) liegt bei den Proben mit höherem Anfangsfeuchtegrad bis zu einem Feuchtegrad von $X=0,4$ gW/gTS höher als bei denen mit niedrigem.

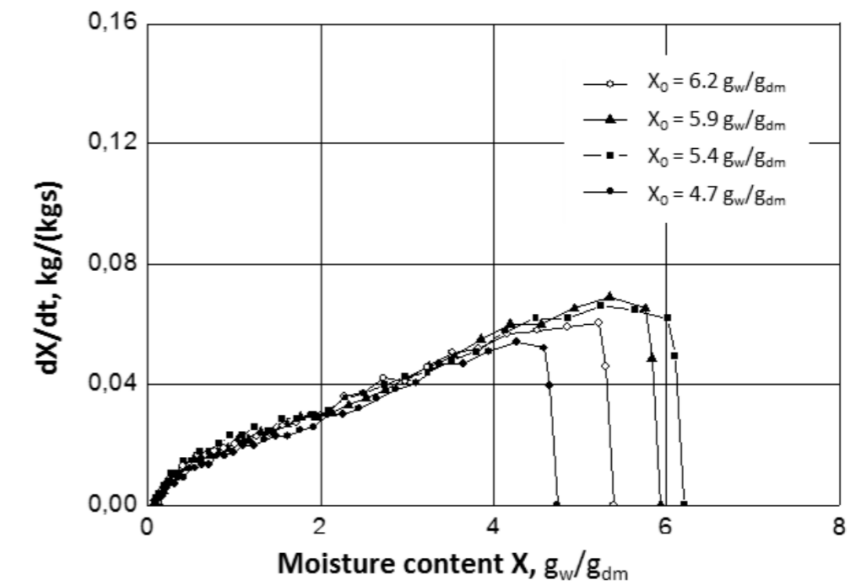


Abbildung 1.6: Trocknungsgeschwindigkeit für unterschiedliche Anfangsfeuchtegrade als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Abbildung 1.3

Der Anfangsfeuchtegehalt beeinflusst die Produkttemperatur und die Farbveränderung (TCD=Total colour difference) nicht significant, wie in Abbildung 1.7 zu sehen ist:

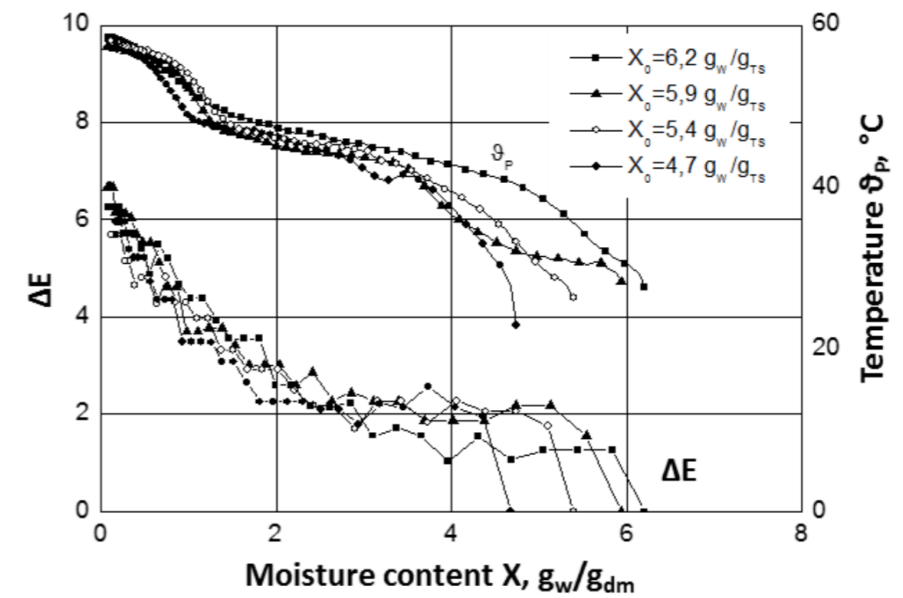


Abbildung 1.7: Produkttemperatur und TCD für unterschiedliche Anfangsfeuchtegrade X_0 als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen wie in Abbildung 1.3

Abbildung 1.7 zeigt den Verlauf der Flächenschrumpfung als Funktion des Feuchtegrades. Die Verläufe sind für alle Proben ähnlich, hängen jedoch ebenfalls vom Anfangs-feuchtegrad ab, was zu einer Parallelverschiebung auf der x-Achse führt.

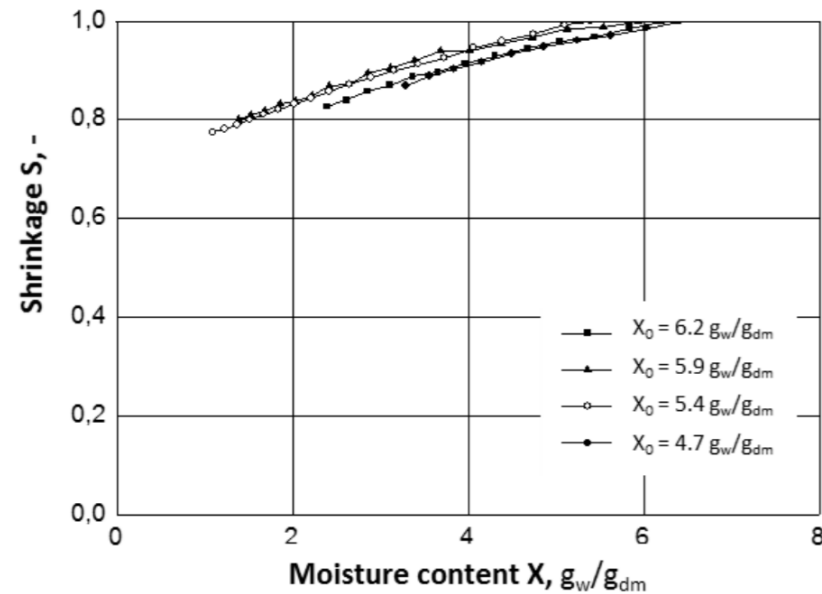


Abbildung 1.8: Flächenschrumpfung S für unterschiedliche Anfangsfeuchtegrade X_0 als Funktion des Feuchtegrades, Prozessbedingungen siehe Abbildung 1.3

Zur Untersuchung der mikrostrukturellen Ursachen für die sehr unterschiedlichen Trocknungsgeschwindigkeiten wurden aus Charge 1 die beiden Proben mit dem höchsten (Probe 1, $X_0=8,3$ gW/gTS) und niedrigsten (Probe 2, $X_0=5,5$ gW/gTS) Anfangsfeuchtegrad und rasterelektronenmikroskopisch untersucht (Abbildung 1.9-1.12). Zur detaillierten Bestimmung der Rauigkeit der sichtbaren Oberfläche wurden in die topographischen Aufnahmen jeweils drei horizontale und zwei vertikale Linien gelegt und deren Verläufe analysiert. Maxima und Minima dieser Linien erlauben eine Aussage über die Rauigkeitstiefe und Häufigkeit der Rauigkeiten. Die in Abbildung 1.11 und 1.12 dargestellten Linien entsprechen von oben nach unten zu-nächst den horizontalen Linien von oben nach unten und dann den vertikalen Linien von links nach rechts der jeweils zugehörigen topografischen Aufnahme (Abbildung 1.9 und 1.10).

Ein Vergleich der erhaltenen topografischen Daten zeigt klare Unterschiede zwischen den untersuchten Proben. Probe 1 mit einem höheren Anfangsfeuchtegehalt weist nur wenige Rauigkeitsspitzen auf, deren mittlere Tiefe bezogen auf die Vergleichsprobe gering ist (Abbildung 1.11). Probe 2 hingegen zeichnet sich durch eine erhöhte Rauigkeit aus (Abbildung 1.12). Anzahl und Ausprägung der Spitzen sind deutlich größer als bei der Vergleichsprobe.

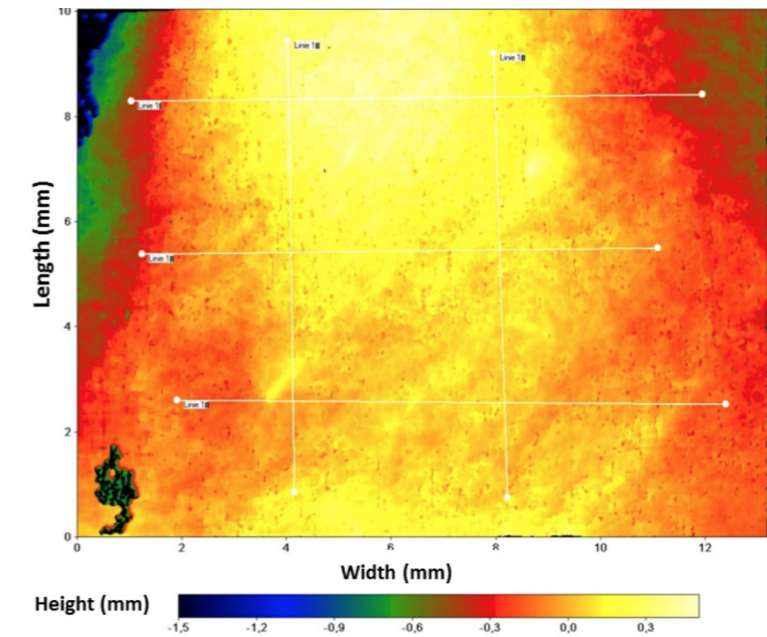


Abbildung 1.9: Topografische Aufnahme der Schnittfläche von Probe 1 ($X_0=8,3$ gW/gTS) nach der Trocknung

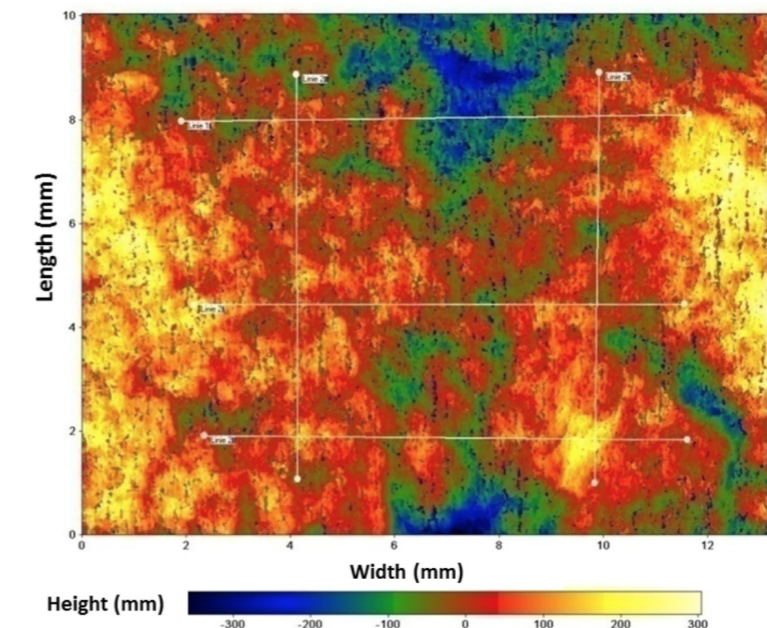


Abbildung 1.10 Topografische Aufnahme der Schnittfläche von Probe 2 ($X_0=5,5$ gW/gTS) nach der Trocknung

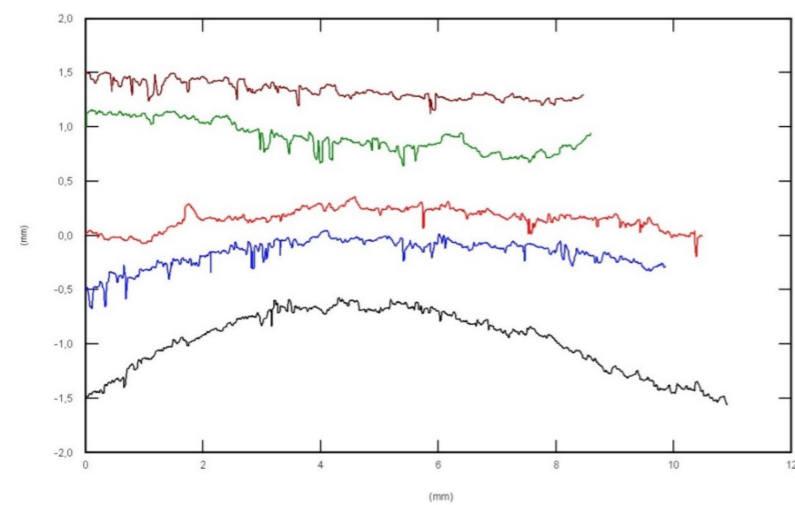


Abbildung 1.11: Rauigkeitswerte Probe 1, $X_0=8,3$ gW/gTS

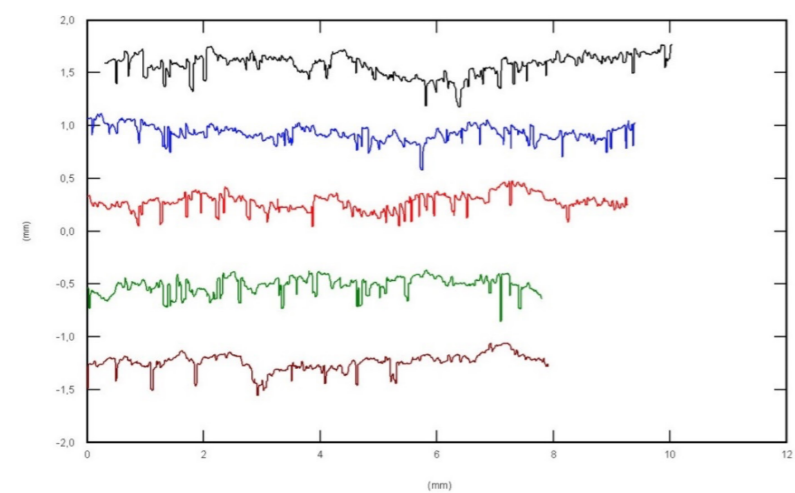


Abbildung 1.12: Rauigkeitswerte Probe 2, $X_0=5,5$ gW/gTS

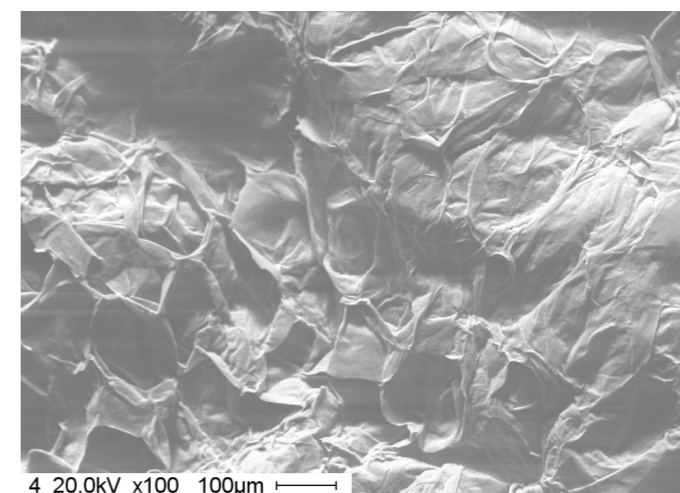


Abbildung 1.13: Sichtbare Oberfläche Probe 1, 100-fach vergrößert, $X_0=8,3$ gW/gTS

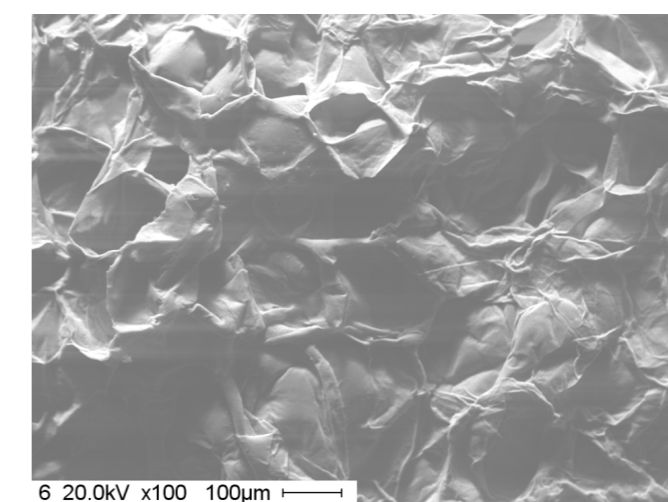


Abbildung 1.14: Sichtbare Oberfläche Probe 2, 100-fach vergrößert, $X_0=5,5$ gW/gTS

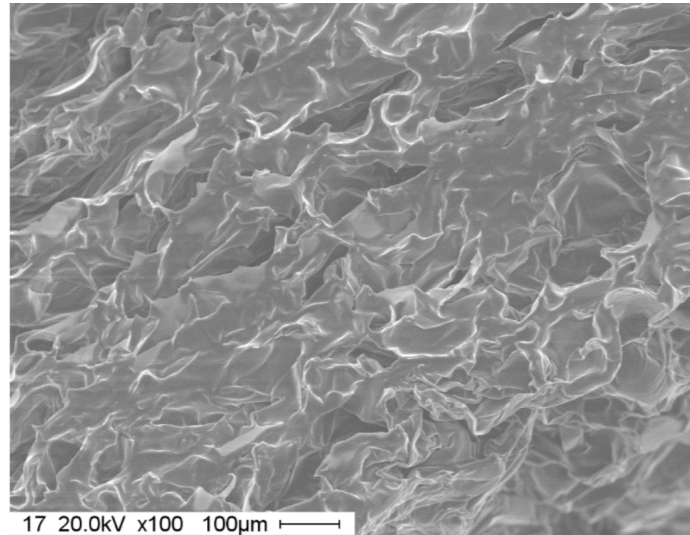


Abbildung 1.15: Vertikale Schnittfläche Probe 1, 100-fach vergrößert, $X_0=8,3$ gW/gTS

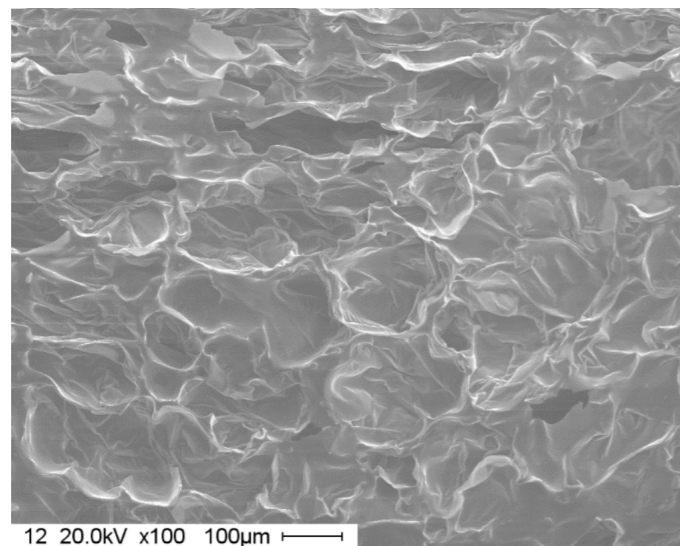


Abbildung 1.16: Vertikale Schnittfläche Probe 2, 100-fach vergrößert, $X_0=5,5$ gW/gTS

Die REM-Aufnahmen (Abbildung 1.13 – 1.16) zeigen deutliche Unterschiede der Strukturen der Vergleichsproben. Bei Probe 1 (Abbildung 1.13) ist die Struktur sehr stark in sich zusammengesackt, es gibt kaum Bereiche, in denen die Zellreste offen stehen, die Aufnahme vertikal zur Schnittfläche der Apfelscheibe zeigt sehr große Zellreste (Abbildung 1.15). Probe 2 (Abbildung 1.14) hingegen weist sich durch eine deutlich besser erhaltene Struktur aus. Viele Zellreste stehen offen, es gibt kaum Bereiche, die komplett in sich zusammengesackt sind. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Zellgröße bei Probe 1 deutlich größer ist als bei Probe 2. Weiterhin sind die

Zellwände von Probe 1 deutlich dünner als von Probe 2. Die Aufnahmen zeigen, dass Proben mit niedrigem Anfangsfeuchtegrad deutlich stabilere Zellwände aufweisen als Proben mit hohem Anfangsfeuchtegrad. Dadurch wird die Diffusion durch die Zellwände erschwert. Weiterhin bedingen kleinere Zellen eine höhere Kapillarwirkung.

1.3 Referenzen

Ackermann, J.; M. Fischer & R. Amado. 1992. Changes in sugars, acids, and amino acids during ripening and storage of apples (Cv Glockenapfel). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40 (7): 1131-1134.

Bain, J. M. & R. N. Robertson. 1951. The physiology of growth in apple fruits. I. Cell size, cell number and fruit development. *Australian Journal of Biological Sciences* 4: 75-91.

Brennan, J. G.; R. Jowitt & A. M. A. Mohamed. 1977. Instrumental measurement of fruit texture: a study
Dissa, A. O.; H. Desmorieux; J. Bathiebo & J. Koulidiati. 2008. Convective drying characteristics of Amelia mango (*Mangifera Indica* L. cv. "Amelie") with correction for shrinkage. *Journal of Food Engineering* 88 (4): 429-437.

Fernando, W. J. N.; A. L. Ahmad; S. R. Abd. Shukor & Y. H. Lok. 2008. A model for constant temperature drying rates of case hardened slices of papaya and garlic. *Journal of Food Engineering* 88 (2): 229-238.

Hund, U. & R. Stösser. 1984. Einfluss der Blütenstellung innerhalb der Infloreszenz auf das Pollenschlauchwachstum und die Fruchtentwicklung beim Apfel. *Mitteilungen Klosterneuburg* 34: 261-268.

Kröll, K. & W. Kast. 1989. *Trocknen und Trockner in der Produktion*, Bd. 3. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.

Krüger, B. 1986. Über die Beziehung zwischen Fruchtgröße, Struktur des Fruchtfleisches und Fruchtfestigkeit bei drei Apfelsorten. Dissertation, Universität Hohenheim.

Rahman, N. & S. Kumar. 2007. Influence of Sample Size and Shape on Transport Parameters during Drying of Shrinking Bodies. *Journal of Food Process Engineering* 30 (2): 186-203.

Prasanna, V.; T. N. Prabha & R. N. Tharanathan. 2007. Fruit Ripening Phenomena – An Overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 47 (1): 1-19.

Sturm, B. 2010. Einfluss der Führung des Trocknungsprozesses auf den Trocknungsverlauf und die Produkteigenschaften empfindlicher biologischer Güter. Forschungsbericht Agrartechnik 491 des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG). (Doctoral Dissertation).

Wills, R. B. H.; P. A. Bambridge & K. J. Scott. 1980. Use of flesh firmness on other objective tests to determine consumer acceptability of Delicious apples. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry* 20: 252-256.

2. Einfluss der Trocknungsbedingungen auf die Produktqualität

Universität Tuscia, Department für Innovationen in Biologischen, Agro-Lebensmittel und Forst Systemen, Italien

Massantini, R. & Moscetti, R.

Das Ziel der Lebensmittel-trocknung ist die Senkung des Gehaltes an freiem Wasser um Verderb-sprozesse zu verlangsamen, die hauptsächlich von mikrobiellem Wachstum, chemischen Reak-tionen und/oder enzymatischer Aktivität verursacht werden. Obst und Gemüse sind besonders empfindlich gegenüber Verderbsprozessen, da ihr Wassergehalt unverarbeitet bei 74-90 % liegt (Koszela et al., 2014) und die dabei vorhandene Wasseraktivität ($a_w > 0.60$) mikrobielles Wachs-tum zulässt. Trotz der Vorteile, die die Trocknung auf die Haltbarkeit hat, kann die Trocknung auch Schäden und starke Veränderungen der physiochemischen, organoleptischen und nutriti-ven Eigenschaften bewirken (An et al., 2016; Filkova and Munjundar, 2014; Ratti, 2001). Besonders bei der Trocknung von Obst und Gemüse treten viele Qualitätsveränderungen auf, z.B. bezüglich der Farbe durch enzymatische oder nicht enzymatische Bräunungsreaktionen, Veränderungen in der Textur, Schrumpfung. Sowie Verlust und/oder Zersetzung von Nährstoffen (z.B. Ascorbinsäu-re, Carotinoide, Phenole u.a.) (Nindo et al., 2003).

2.1. Nährstoffveränderungen

Der Ernährungswert von Obst und Gemüse bezieht sich auf ihre chemische Zusammensetzung, welche sehr stark variiert und von der Gattung, der Sorte und dem Reifegrad abhängt. Der Ein-fluss der Erwärmung führt zur Zersetzung und/oder der Isomerisierung der meisten chemischen Bestandteile. Aufgrund der Komplexität der Lebensmittelmatrizen, werden nur einige chemische Komponenten als Marker für den Nährwert dargestellt (Vicente et al., 2009). Für Obst und Gemü-se sind dies Ascorbinsäure, Carotinoide, Vitamin E- und Phenolgehalt.

2.1.1. Ascorbinsäure

Ascorbinsäure ist ein essentieller Nährstoff der menschlichen Ernährung. Da Obst und Gemüse einen hohen Gehalt an Ascorbinsäure aufweisen, wird sie häufig als Qualitätsmarker genutzt. Ascorbinsäure ist ein Antioxidans, hitzeinstabil und wasserlöslich, weiterhin kann sie Tocophero-le (Vitamin E) reoxidieren (Liu and Russell, 2008). Hohe Trocknungstemperaturen, lange Trock-nungsdauern und die Anwesenheit von Sauerstoff führen zu erheblichen Senkungen des Gehalts in Obst und Gemüse, beispielsweise verlieren Tomaten über die Hälfte der ursprünglich enthalte-nen Ascorbinsäure während der Trocknung bei 75 °C (Ashebir et al., 2009). Einen leichten Verlust bewirkt auch das Blanchieren als Vorbehandlung auf Grund der Wasserlöslichkeit der Ascorbin-säure. Allerdings kann sich eine Vorbehandlung positiv auf den Erhalt von Ascorbinsäure wäh-rend der Trocknung auswirken (Barbosa de Lima et al., 2015). Weiterhin wurde beobachtet, dass Telfairia Blätter (*T. occidentalis*) beim kurzen Blanchieren unter hoher Temperatur und niedrigem pH-Wert geringere Ascorbinsäureverluste aufweisen als bei längerer Behandlung bei niedrigeren

Temperaturen und hohem pH-Wert (Ariahu et al., 2011). Während der Heißlufttrocknung konn-ten für verschiedene Früchte größere Verluste beobachtet werden als bei der Gefriertrocknung (Shofian et al., 2011).

2.1.2. Carotinoide

Carotinoide sind eine große Anzahl der Terpene und verantwortlich für leuchtende rote, gelbe und orangene Farben in Obst und Gemüse. Aufgrund ihrer hydrophoben (wasserabweisenden) Eigenschaften treten Carotinoide hauptsächlich in der Lipidschicht oder als Proteinkomplexe auf (Gruszecki, 2010). Über 600 Stoffe werden als Carotinoide klassifiziert und die meisten sind Vor-stufen des für den Menschen wichtigen Vitamin A. Innerhalb der Pflanzen sind sie an der Pho-tosynthese beteiligt und beugen der Oxidation des Chlorophylls vor; in der menschlichen Ernäh-rung senkt die Aufnahme von β -Carotin und Lutein, der beiden in der menschlichen Ernährung wichtigsten Carotinoide, das Risiko an Lungenkrebs und chronischen Augenleiden wie Katarakt zu erkranken (Lefsrud et al., 2008). Während der Trocknung konnte ein nur geringer Verlust an Carotinoiden insgesamt in Möhren festgestellt werden (Urrea et al., 2011); darüber hinaus ist es die Kombination aus Blanchieren und Trocknen, die Carotinoide aus der Lipidschicht und aus Komplexverbindungen löst und dadurch die Verfügbarkeit für den Organismus erhöht (Divya et al., 2012; Seybold et al., 2004). Trotz dieses positiven Effekts bewirkt Hitze die Isomerisation der Carotinoide von der trans- in die cis-Form, die anfälliger für oxidative Reaktionen ist (Strati and Oreopoulou, 2016). Gegenüber der Gefriertrocknung weist die Heißlufttrocknung (und die Mikro-wellentrocknung) weniger Verluste an Leukopin in Tagetes (*Tagetes erecta* L.) auf (Siriamornpun et al., 2012).

2.1.3. Phenole

Phenole gehören einer weiteren großen Stoffgruppe an und haben mindestens einen aromati-schen Ring mit einem oder mehreren Substituenten; sie können auch funktionale Derivate (z.B. Ester) enthalten. Phenole wirken antioxidativ und innerhalb der Pflanze als Abwehr gegen Pa-thogene und Parasiten; daher hat die Schale meist einen höheren Gehalt als das Fruchtfleisch (Chinnici et al., 2004). Meistens sind Phenolen sensorische Eigenschaften zugeordnet (z.B. Ad-stringenz, Farbe usw.) (Romaric G. Bayili, 2011). Obst und Gemüse, die reich an Phenolen sind, ha-ben meist eine blaue oder rote Färbung. Der regelmäßige Verzehr von phenolreichen Obst- und Gemüsesorten steht in Zusammenhang mit einem reduzierten Risiko an chronischen Krankhei-ten wie Krebs und Herz-Kreislauf-Erkrankungen zu erkranken (Liu, 2004). Signifikante Verluste an Phenolen sind der mechanischen Verarbeitung (z.B. Schälen, Schneiden, Zerkleinern) zuzuord-nen, begründet durch den vermehrten Kontakt mit Sauerstoff (Wlodzimierz and Grajek, 2010). In luftgetrockneten Produkten sind höhere Verluste an Phenolen zu beobachten verglichen mit der Gefriertrocknung und der Mikrowellentrocknung. Dies liegt in der Anwendung höherer Tem-peraturen und längerer Trocknungszeiten (An et al., 2016; Vega-Gálvez et al., 2012).

2.1.4. Vitamin E

Vitamin E vereint eine Gruppe an fettlöslichen Nährstoffen, die Tocopherole und Tocotrienole beinhaltet. A-Tocopherole sind die dem menschlichen Organismus am meisten zugeführten (Lodge, 2005). Vitamin E Verbindungen sind während der Verarbeitung und/oder Lagerung sowohl gegenüber Licht als auch Sauerstoff sehr empfindlich (Vicente et al., 2009). Fettreiche, pflanzliche Nahrungsmittel, Brokkoli und Blattgemüse sind sehr gute Vitamin E Quellen. Während der Trocknung von Esskastanien bei 50 °C für 10 Stunden, sank der Vitamin E Gehalt nur leicht (Delgado et al., 2016). Das Kochen und Behandeln mit Mikrowellen verschiedener Produkte führt insgesamt zu einem Verlust an Vitamin E von 10 % (Lešková et al., 2006).

2.2. Farbveränderungen

Die Beibehaltung der Farbe ist wichtig um verarbeitetes Obst und Gemüse ansprechend und für den Verbraucher annehmbar zu machen. Die Farbe ist die erste Eigenschaft, die von Verbrauchern angegeben wurde in Bezug auf die Kaufentscheidung (Shewfelt, 1999). Aus diesem Grund haben verschiedene Forscher die Konservierung der Farbe während der Nacherntebehandlung und -verarbeitung von Obst und Gemüse untersucht (Shewfelt, 1999). Während der Trocknung sind verschiedene Vorgänge verantwortlich für Farbveränderungen. Die häufigsten sind der Abbau von Pigmenten (Roshanak et al., 2015) und das Auftreten von Bräunungen auf Grund enzymatischer und nicht-enzymatischer Reaktionen (Maskan, 2001).

2.2.1. Chlorophyll und Carotinoide

Die Farbgebung grüner und gelber/roter/orangener Gemüse ist meistens durch Pigmente begründet, die jeweils der Stoffgruppe Chlorophyll und Carotinoide zugeordnet sind (Brennan, 2006). Diese Pigmente zersetzen sich während der Nachernteverarbeitung sehr leicht durch Einflüsse von Licht, Hitze, Sauerstoff und Enzymen (Madhava Naidu et al., 2016). Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass der Produkttyp, sein Ursprung, Vorbehandlung und Trocknungsverfahren die Zerfallsrate von Chlorophyll und Carotinoiden beeinflusst (Brennan, 2006). Weiterhin fördern hohe Temperaturen und niedrige pH-Werte die Umwandlung von Chlorophyll in Phäophytine durch den Austausch des zentralen Magnesiumions durch zwei Wasserstoffionen im Chlorinring (Marangoni, 2017); sobald Chlorophyll in Phäophytin umgewandelt wurde, verändert sich die Farbe von hell leuchtend zu olivbraun. Die Umwandlungsrate nach Phäophytin Form scheint sich zu verlangsamen, sobald die Wasseraktivität (a_w) niedriger als 0,32 ist (Roshanak et al., 2015). Zusätzlich zu dieser Reaktion steht der Zerfall des Chlorophylls in Zusammenhang mit der Lipidperoxidation. Bei dieser Reaktion spielen die Lipoxigenase und Sauerstoff die entscheidenden Rollen (Cui et al., 2004).

2.2.2. Enzymatische Bräunung

Polyphenoloxidase (PPO) und Peroxidasen (POD) sind hauptsächlich verantwortlich für die enzymatische Bräunung. Der Reaktionsweg beginnt mit der Umwandlung des L-Phenylalanins zur

trans-Zimtsäuren durch die Phenylalanin-Ammoniak-Lyase (PAL) und endet mit dem Zerfall der Phenole. (Cecchini et al., 2011; Mencarelli et al., 1995). Die PPO wandelt trans-Zimtsäure zu ortho-Chinon um, welche spontan zu Melanin polymerisiert (braune Pigmente die verantwortlich für die Braunfärbung und Fehlgerüche sind) (Degl'Innocenti et al., 2007; Taylor et al., 1993). In der Lebensmittelverarbeitenden Industrie sind Produkte, die diese enzymatischen Reaktion zeigen, oft unerwünscht. Eine Ausnahme stellen Rosinen dar, da Verbraucher hier braune getrocknete Trauben zu bevorzugen scheinen (Grncarevic and Hawker, 1971). Verschiedene Lösungsansätze wurden unternommen, die enzymatische Bräunung zu vermeiden, wie z.B.: [1] die Verwendung von Hitze als Vorbehandlung um die Enzyme zu inaktivieren und [2] die Verwendung von Schwefeldioxid oder Sulfiden, die in der Lage sind, einen Komplex mit dem ortho-Chinon zu bilden und so die Bildung von Melanin unmöglich machen (Yingsanga et al., 2008). Eine weitere Möglichkeit besteht darin den pH-Wert des Produktes durch die Verwendung von Säure zu senken (z.B. Zitronen-, Apfel-, Phosphor- oder Ascorbinsäure) oder die Kombination verschiedener Grundverfahren (z.B. Osmotische Trocknung gefolgt von Lufttrocknung) (Ioannou, I.; Mohamed, 2013).

2.2.3. Nicht-Enzymatische Bräunung

Nicht enzymatische Bräunung (NEB) wird durch eine Reihe chemischer Reaktionen hervorgerufen die innerhalb eines thermalen Prozesses auftreten und mit Veränderungen der Farbe, Textur, antioxidativen Komponenten und des Aromas enden (Martins et al., 2000; Perera, 2005). Die wichtigste, nicht enzymatische Reaktion ist die Karamellisierung, welche die Pyrolyse von Zuckern und die Maillard Reaktion (MR) beinhaltet (Manzocco et al., 2000). 1913 beschrieb Louis Maillard, ein französischer Chemiker, als Erster die Reaktion, während es John E. Hodge 1953 als erstem Wissenschaftler gelang, den chemischen Reaktionsweg der MR zu beschreiben. Sie beginnt mit der Reaktion eines reduzierenden Zuckers und einer freien Aminogruppe (z.B. einer Aminosäure, Polypeptids oder Proteins) zu einem Stickstoff substituierten Glukosamin, welches sich dann zum Amadori und Heyns Produkt umgestaltet (Hodge, 1953). Die Maillard Reaktion ist ein komplexes Netz, das aus parallel und nacheinander ablaufenden, chemischen Reaktionen entsteht und mit den Produkteigenschaften (z.B. pH, Wassergehalt usw.) und den Prozesseigenschaften (z.B. Temperatur und Dauer der Wärmeeinwirkung) in Beziehung steht (Cernișev, 2010; Martins et al., 2000). Bei einem pH-Wert von unter 7,0 führt die Reaktion hauptsächlich zur Bildung von Furfural und Hydroxymethylfurfural (Garza et al., 1999; Hodge, 1953; Martins et al., 2000), bei einem pH-Wert von über 7,0, werden Hydroxymethyl-dihydrofuranone (HMFone) und Spaltprodukte (z.B. Acetol, Methylglyoxal, Diacetyl) gebildet (Cernișev, 2010; Martins et al., 2000). Alle diese Verbindungen sind hochreaktiv und somit an weiteren Reaktionen beteiligt, die für die Entwicklung von Braunpigmenten (z.B. Melanoidine) verantwortlich sind (Garza et al., 1999). Im Allgemeinen wird die NEB-Entwicklung verursacht durch [1] den Zuckergehalt des Produkts (z.B. Saccharose, Fructoseglukose usw.) (Garza et al., 1999; Wegener et al., 2017), und [2] den Gehalt an HMF (Contreras-Calderón et al., 2016; Garza et al., 1999) und Furfural (Contreras-Calderón et al., 2016). Die Bräunungsintensität kann am besten durch Spektralmessung bei 420 nm erfasst werden (Contreras-Calderón et al., 2016; Garza et al., 1999; Hurtado et al., 2016; Wegener et al., 2017). Oft reduziert die NEB die Qualität von verarbeiteten Lebensmitteln (Sharma et al., 2014) mit eini-

gen Ausnahmen, z.B. geröstetem Kaffee und Backwaren, bei denen die MR für Farbe, Geschmack und Aroma verantwortlich ist (Jaeger et al., 2010).

2.3. Physikalische Veränderungen

Während der Trocknung treten physikalische Veränderungen auf, die die Eigenschaften des Trocknungsprodukts oft stark beeinflussen. Die wichtigsten physikalischen Veränderungen (d.h. Schrumpfung und Textur) werden im Folgenden erläutert.

2.3.1. Schrumpfung

Beim Trocknen verlieren Obst und Gemüse Wasser und die Zellmembranen brechen zusammen. Dieses Phänomen ist für die Reduzierung der Form und Größe von Lebensmittelgewebe, auch bezeichnet als Schrumpfung, verantwortlich (Aprajeeta et al., 2015). Die Feuchtigkeit wandert allmählich aus dem Zentrum der Lebensmittelgewebe zu den Außenflächen (Bonazzi und Dumoulin, 2011). Mehrere Studien bestätigten, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt (MC) und Schrumpfung gibt (Dehghannya et al., 2015; Nadia, 2011; Yadolahinia und Jahangiri, 2009). In der Anfangsphase der Lufttrocknung nimmt die Schrumpfung schnell zu, je trockner das Produkt wird, desto langsamer nimmt sie zu, bis sie die Gleichgewichtsfeuchte erreicht ist (Kerdpi boon et al., 2007). Es wurde beobachtet, dass sowohl bei der Mikrowellen- als auch bei der Heißlufttrocknung ein stärkeres Schrumpfungssphänomen auftritt als bei der Gefriertrocknung (Bonazzi und Dumoulin, 2011; Prothon et al., 2003). Eine Erhöhung der Produkttemperatur erhöht die Rate der Zellschrumpfung nach dem Arrhenius-Verhalten (Yadolahinia und Jahangiri, 2009). In einer Studie an Erdbeeren wurde jedoch ein ähnliches Rehydrierungsverhalten zwischen Mikrowellen- und Gefriertrocknung festgestellt (de Bruijn et al., 2016).

2.3.2. Textur

Texturparameter von Obst und Gemüse werden mit dem Tastsinn und dem Gehör wahrgenommen, entweder wenn das Produkt mit der Hand aufgenommen oder in den Mund gelegt und gekaut wird (Bourne, 2002). Die Textur ist das Ergebnis komplexer Wechselwirkungen zwischen Lebensmittelkomponenten auf mikro- und makrostruktureller Ebene (Guiné und Barroca, 2012); am Beispiel von Tomaten tragen die unlöslichen Feststoffe, die aus den Zellwänden gewonnen werden (Lešková et al., 2006), am meisten zur Textur bei. Andere Parameter hängen mit Veränderungen der Textur zusammen (z.B. Gewebestruktur, Turgor, Porosität, Zellorientierung und Zusammensetzung). Beim Trocknen von Obst und Gemüse sind mehrere Veränderungen in der Textur üblich (z.B. Härte, Kohäsion, Elastizität und Kaubarkeit) (Kotwaliwale et al., 2007).

Texturveränderungen werden üblicherweise mit einem Texturprofilanalysator (TPA) gemessen (Cecchini et al., 2011; Tan, 2000). Die hohe Temperatur und die lange Trockenzeit bei der Heißlufttrocknung führen oft zu Hitzeschäden und Texturverlusten (Vega-Gálvez et al., 2012). Bei der Heißlufttrocknung von Apfelscheiben wurden drei Phasen der Textur beobachtet: Erweichung,

bei der allmähliche Veränderungen der Festigkeit auftreten, gleichmäßige Härte und Aushärtung (Martynenko und Janaszek, 2014). Der letzte Schritt ist auf eine begrenzte Feuchtigkeitsdiffusionsrate zurückzuführen (Martynenko und Janaszek, 2014). In einer Studie an Karotten wurde festgestellt, dass die Mikrowellentrocknung schneller ist als die Heißlufttrocknung und zudem das Endprodukt bessere strukturelle Eigenschaften aufweist (Lin et al., 1999).

2.3.3. Wassergehalt und -aktivität

Der Feuchtigkeitsgehalt ist ein Indikator für die in einer festen Probe enthaltene Wassermenge (z.B. Boden, Obst und Gemüse). Feuchtigkeitsänderungen während der Trocknung werden in der Regel als trockene Basis des Feuchtigkeitsgehalts (MC_d) ausgedrückt, was dem Verhältnis zwischen der Wassermenge in der Probe (m_w) und dem Restfeststoffgehalt (m_{RSC}) entspricht, beide ausgedrückt in derselben Einheit (z.B. g/g oder kg/kg).

$$MC_d = \frac{m_w}{m_{RSC}}$$

Bei anderen Anwendungen der Lebensmittelindustrie wird der Feuchtigkeitsgehalt jedoch üblicherweise auf Nassbasis (MC_w) ausgedrückt, was dem Verhältnis zwischen der Wassermenge in der Probe (m_w) und dem Gesamtgewicht der Probe (m_{tot}) entspricht.

$$MC_w = \frac{m_w}{m_{tot}} = \frac{m_w}{m_w + m_{RSC}}$$

Die Beziehung zwischen MC_d und MC_w wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$MC_d = \frac{MC_w}{1 - MC_w}$$

Während der Trocknung nimmt die m_w ab, und die m_{RSC} bleibt konstant. Das mikrobielle Wachstum hängt eher mit der Menge an freiem Wasser in der Nahrung als mit der Menge an Gesamtwasser zusammen (Gabriel, 2008). Um das mikrobielle Wachstum zu kontrollieren, sollte daher ein weiterer Parameter beachtet werden: die Wasseraktivität (a_w). Sie wird als Verhältnis zwischen dem Dampfdruck von Wasser in einer Substanz (P_a) und dem Dampfdruck von reinem Wasser (P_0) unter identischen thermodynamischen Bedingungen dargestellt.

$$a_w = \frac{P_a}{P_0}$$

Die a_w beeinflusst nicht nur die Kontrolle des mikrobiellen Wachstums, sondern auch die Haltbarkeit von Lebensmitteln, die Verfärbungsrate, die enzymatische Aktivität und die Modulation der chemischen Reaktionsrate (Bonazzi und Dumoulin, 2011). Der Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Wasseraktivität während der Trocknung ist komplex, nicht-linear und für jedes Lebensmittelprodukt individuell. Dies ist auf Kolligations-, Kapillar- und Oberflächeneffekte zurückzuführen (Sablani, 2007).

2.4. Referenzen

- An, K., Zhao, D., Wang, Z., Wu, J., Xu, Y., Xiao, G., 2016. Comparison of different drying methods on Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): Changes in volatiles, chemical profile, antioxidant properties, and microstructure. *Food Chem.* 197, 1292–1300. doi:10.1016/j.foodchem.2015.11.033
- Aprajeeta, J., Gopirajah, R., Anandharamkrishnan, C., 2015. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *J. Food Eng.* 144, 119–128. doi:10.1016/j.jfoodeng.2014.08.004
- Ariahu, C.C., Abashi, D.K., Chinma, C.E., 2011. Kinetics of ascorbic acid loss during hot water blanching of fluted pumpkin (*Telfairia occidentalis*) leaves. *J. Food Sci. Technol.* 48, 454–459. doi:10.1007/s13197-010-0123-0
- Ashebir, D., Jezik, K., Weingartemann, H., Gretzmacher, R., 2009. Change in color and other fruit quality characteristics of tomato cultivars after hot-air drying at low final-moisture content. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 60 Suppl 7, 308–315. doi:10.1080/09637480903114128
- Barbosa de Lima, A.G., Da Silva, J. V., Pereira, E.M.A., Dos Santos, I.B., Barbosa de Lima, W.M.P., 2015. Drying of bioproducts: Quality and energy aspects, in: *Drying and Energy Technologies*. doi:10.1007/978-3-319-19767-8_1
- Bonazzi, C., Dumoulin, E., 2011. Quality Changes in Food Materials as Influenced by Drying Processes. *Mod. Dry. Technol.* 3, 1–20. doi:10.1002/9783527631667.ch1
- Bourne, M.C., 2002. Texture, Viscosity, and Food, in: *Food Texture and Viscosity*. Elsevier, pp. 1–32. doi:10.1016/B978-012119062-0/50001-2
- Brennan, J.G., 2006. *Food Processing Handbook*, Food Processing Handbook. Wiley-VCH Verlag, Weinheim. doi:10.1002/3527607579
- Cecchini, M., Contini, M., Massantini, R., Monarca, D., Moschetti, R., 2011. Effects of controlled atmospheres and low temperature on storability of chestnuts manually and mechanically harvested. *Postharvest Biol. Technol.* 61, 131–136.
- Cernižev, S., 2010. Effects of conventional and multistage drying processing on non-enzymatic browning in tomato. *J. Food Eng.* 96, 114–118. doi:10.1016/j.jfoodeng.2009.07.002
- Chinnici, F., Bendini, A., Gaiani, A., Riponi, C., 2004. Radical Scavenging Activities of Peels and Pulpes from cv. Golden Delicious Apples as Related to Their Phenolic Composition. *J. Agric. Food Chem.* 52, 4684–4689. doi:10.1021/jf049770a
- Contreras-Calderón, J., Mejía-Díaz, D., Martínez-Castaño, M., Bedoya-Ramírez, D., López-Rojas, N., Gómez-Narváez, F., Medina-Pineda, Y., Vega-Castro, O., 2016. Evaluation of antioxidant capacity in coffees marketed in Colombia: Relationship with the extent of non-enzymatic browning. *Food Chem.* 209, 162–170. doi:10.1016/j.foodchem.2016.04.038

Cui, Z.-W., Xu, S.-Y., Sun, D.-W., 2004. Effect of Microwave-Vacuum Drying on the Carotenoids Retention of Carrot Slices and Chlorophyll Retention of Chinese Chive Leaves. *Dry. Technol.* doi:10.1081/DRT-120030001

de Bruijn, J., Rivas, F., Rodriguez, Y., Loyola, C., Flores, A., Melin, P., Borquez, R., 2016. Effect of Vacuum Microwave Drying on the Quality and Storage Stability of Strawberries. *J. Food Process. Preserv.* n/a-n/a. doi:10.1111/jfpp.12691

Degl'Innocenti, E., Pardossi, A., Tognoni, F., Guidi, L., 2007. Physiological basis of sensitivity to enzymatic browning in "lettuce", "escarole" and "rocket salad" when stored as fresh-cut products. *Food Chem.* 104, 209–215. doi:10.1016/j.foodchem.2006.11.026

Dehghannya, J., Gorbani, R., Ghanbarzadeh, B., 2015. Shrinkage of Mirabelle Plum during Hot Air Drying as Influenced by Ultrasound-Assisted Osmotic Dehydration. *Int. J. Food Prop.* doi:10.1111/jfpp.12521

Delgado, T., Pereira, J.A., Ramalhosa, E., Casal, S., 2016. Effect of hot air convective drying on the fatty acid and vitamin E composition of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) slices. *Eur. Food Res. Technol.* doi:10.1007/s00217-015-2633-5

Divya, P., Puthusseri, B., Neelwarne, B., 2012. Carotenoid content, its stability during drying and the antioxidant activity of commercial coriander (*Coriandrum sativum* L.) varieties. *Food Res. Int.* 45, 342–350. doi:10.1016/j.foodres.2011.09.021

Filkova, I., Mujundar, A.S., 2014. *Handbook of industrial drying systems*, Handbook of industrial drying systems (Vol.1), fourth edition.

Gabriel, A.A., 2008. Estimation of water activity from pH and Brix values of some food products. *Food Chem.* 108, 1106–1113. doi:10.1016/j.foodchem.2007.11.077

Garza, S., Ibarz, A., Pagán, J., Giner, J., 1999. Non-enzymatic browning in peach puree during heating. *Food Res. Int.* 32, 335–343. doi:10.1016/S0963-9969(99)00094-0

Grncarevic, M., Hawker, J.S., 1971. Browning of Sultana Grape Berries During Drying 22, 1970–1972.

Gruszecki, W.I., 2010. Carotenoids in lipids Membranes, in: *Carotenoids: Physical, Chemical, and Biological Functions and Properties*. pp. 19–30.

Guiné, R.P.F., Barroca, M.J., 2012. Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper). *Food Bioprod. Process.* 90, 58–63. doi:10.1016/j.fbp.2011.01.003

Hodge, J.E., 1953. Dehydrated foods. Chemistry of browning reactions in model systems. *Agric. Food Chem.* 1, 928–943. doi:10.1021/jf60015a004

Hurtado, A., Guàrdia, M.D., Picouet, P., Jofré, A., Ros, J.M., Bañón, S., 2016. Stabilisation of red fruit-based smoothies by high-pressure processing. Part II: Effects on sensory quality and selected nutrients. *J. Sci. Food Agric.* doi:10.1002/jsfa.7795

Ioannou, I.; Mohamed, G., 2013. Prevention of enzymatic browning in fruits and vegetables. *Eur. Sci. J.* 9, 310–341. doi:10.1021/bk-1989-0405.ch003

Jaeger, H., Janositz, A., Knorr, D., 2010. The Maillard reaction and its control during food processing. The potential of emerging technologies. *Pathol. Biol.* 58, 207–213. doi:10.1016/j.patbio.2009.09.016

Kerdpi boon, S., Devahastin, S., Kerr, W.L., 2007. Comparative fractal characterization of physical changes of different food products during drying. *J. Food Eng.* 83, 570–580. doi:10.1016/j.jfoodeng.2007.03.039

Koszela, K., Otrza sek, J., Zaborowicz, M., Boniecki, P., Mueller, W., Raba, B., Lewicki, A., Przybył, K., 2014. Quality assessment of microwave-vacuum dried material with the use of computer image analysis and neural model. *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.* 9159, 1–9. doi:10.1117/12.2064274

Kotwaliwale, N., Bakane, P., Verma, A., 2007. Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying. *J. Food Eng.* 78, 1207–1211. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.12.033

Lefsrud, M., Kopsell, D., Sams, C., Wills, J., Both, A.J., 2008. Dry matter content and stability of carotenoids in kale and spinach during drying. *HortScience* 43, 1731–1736.

Lešková, E., Kubíková, J., Kováčiková, E., Košická, M., Porubská, J., Holčíková, K., 2006. Vitamin losses: Retention during heat treatment and continual changes expressed by mathematical models. *J. Food Compos. Anal.* 19, 252–276. doi:10.1016/j.jfca.2005.04.014

Lin, T.M., Durance, T.D., Scaman, C.H., 1999. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices 31.

Liu, C., Russell, R.M., 2008. Nutrition and gastric cancer risk: An update. *Nutr. Rev.* 66, 237–249. doi:10.1111/j.1753-4887.2008.00029.x

Liu, R.H., 2004. Potential synergy of phytochemicals in cancer prevention: mechanism of action. *J. Nutr.* 134, 3479S–3485S. doi:10.1093/jn/134/12/3479S

Lodge, J.K., 2005. Vitamin E bioavailability in humans. *J. Plant Physiol.* 162, 790–796. doi:10.1016/j.jplph.2005.04.012

Madhava Naidu, M., Vedashree, M., Satapathy, P., Khanum, H., Ramsamy, R., Hebbar, H.U., 2016. Effect of drying methods on the quality characteristics of dill (*Anethum graveolens*) greens. *Food Chem.* 192, 849–856. doi:10.1016/j.foodchem.2015.07.076

Manzocco, L., Calligaris, S., Mastrocola, D., Nicoli, M.C., Lerici, C.R., 2000. Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. *Trends Food Sci. Technol.* 11, 340–346. doi:10.1016/S0924-2244(01)00014-0

Marangoni, A.G., 2017. Chlorophyll Degradation in Green Tissues: Olives, Cabbage and Pickles, in: *Kinetic Analysis of Food Systems*. Springer, Cham, pp. 55–63. doi:10.1007/978-3-319-51292-1

Martins, S.I.F.S., Jongen, W.M.F., Van Boekel, M.A.J.S., 2000. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. *Trends Food Sci. Technol.* 11, 364–373. doi:10.1016/S0924-2244(01)00022-X

Martynenko, A., Janaszek, M. a., 2014. Texture Changes During Drying of Apple Slices. *Dry. Technol.* 32, 567–577. doi:10.1080/07373937.2013.845573

Maskan, M., 2001. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *J. Food Eng.* 48, 169–175. doi:10.1016/S0260-8774(00)00154-0

Mencarelli, F., Agostini, R., Botondi, R., Massantini, R., 1995. Ethylene production, ACC content, PAL and POD activities in excised sections of straight and bent gerbera scapes. *J. Hortic. Sci.* 70, 409–416. doi:10.1080/14620316.1995.11515310

Nadia, D.M., 2011. Effect of Air Drying on Color, Texture and Shrinkage of Sardine (*Sardina pilchardus*) Muscles. *J. Nutr. Food Sci.* 1, 1–7. doi:10.4172/2155-9600.1000113

Nindo, C.I., Sun, T., Wang, S.W., Tang, J., Powers, J.R., 2003. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *LWT - Food Sci. Technol.* 36, 507–516. doi:10.1016/S0023-6438(03)00046-X

Perera, C.O., 2005. Selected Quality Attributes of Dried Foods. *Dry. Technol.* 23, 717–730. doi:10.1081/DRT-200054180

Prothon, F., Ahrné, L., Sjöholm, I., 2003. Mechanisms and prevention of plant tissue collapse during dehydration: a critical review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 43, 447–479.

Ratti, C., 2001. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *J. Food Eng.* 49, 311–319. doi:10.1016/S0260-8774(00)00228-4

Romarić G. Bayili, 2011. Phenolic compounds and antioxidant activities in some fruits and vegetables from Burkina Faso. *African J. Biotechnol.* 10, 13543–13547. doi:10.5897/AJB10.2010

Roshanak, S., Rahimmalek, M., Goli, S.A.H., 2015. Evaluation of seven different drying treatments in respect to total flavonoid, phenolic, vitamin C content, chlorophyll, antioxidant activity and color of green tea (*Camellia sinensis* or *C. assamica*) leaves. *J. Food Sci. Technol.* 53, 721–729.

doi:10.1007/s13197-015-2030-x

Sablani, S.S., 2007. Evaluating water activity and glass transition concepts for food stability 78, 266–271. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.09.025

Seybold, C., Fröhlich, K., Bitsch, R., Otto, K., Böhm, V., 2004. Changes in contents of carotenoids and vitamin E during tomato processing. *J. Agric. Food Chem.* 52, 7005–7010. doi:10.1021/jf049169c

Sharma, S.K., Juyal, S., Rao, V.K., Yadav, V.K., Dixit, A.K., 2014. Reduction of non-enzymatic browning of orange juice and semi-concentrates by removal of reaction substrate. *J. Food Sci. Technol.* 51, 1302–1309.

doi:10.1007/s13197-012-0632-0

Shewfelt, R.L., 1999. What is quality? *Postharvest Biol. Technol.* 15, 197–200. doi:10.1016/S0925-5214(98)00084-2

Shofian, N.M., Hamid, A.A., Osman, A., Saari, N., Anwar, F., Dek, M.S.P., Hairuddin, M.R., 2011. Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits. *Int. J. Mol. Sci.* 12, 4678–4692. doi:10.3390/ijms12074678

Siriamornpun, S., Kaisoon, O., Meeso, N., 2012. Changes in colour, antioxidant activities and carotenoids (lycopene, β -carotene, lutein) of marigold flower (*Tagetes erecta* L.) resulting from different drying processes. *J. Funct. Foods* 4, 757–766. doi:10.1016/j.jff.2012.05.002

Strati, I.F., Oreopoulou, V., 2016. Recovery and isomerization of carotenoids from tomato processing. *Waste and Biomass Valorization* 1–21. doi:10.1007/s12649-016-9535-z

Tan, S., 2000. Determinants of eating quality in fruit and vegetables. *Proceedings-Nutrition Soc.*
Taylor, S.L., Kinsella, J.E., Archer, D., Gregory, J.F., Harlander, S.K., Lund, D.B., Schneeman, B.O., Macrae, R., 1993. *Food Science and Technology. Enzym. Food Process.* ii-iiib. doi:10.1016/B978-0-08-057145-4.50001-3

Urrea, D., Eim, V. S., González-Centeno, M. R., Minjares-Fuentes, R., Castell-Palou, A., Juárez, M. D., Roselló, C., 2011. EFFECTS OF AIR DRYING TEMPERATURE ON ANTIOXIDANT ACTIVITY AND CAROTENOIDS CONTENT OF CARROTS (*Daucus carota*), in: *European Drying Conference*. pp. 26–28.

Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzón, J., García-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R., Di Scala, K., 2012. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chem.* 132, 51–59. doi:10.1016/j.foodchem.2011.10.029

Vicente, A.R., Manganaris, G.A., Sozzi, G.O., Crisosto, C.H., 2009. *Nutritional Quality of Fruits and Vegetables, Second Ed.* ed, Postharvest Handling. Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-374112-7.00005-6

Wegener, S., Kaufmann, M., Kroh, L.W., 2017. Influence of L-pyroglutamic acid on the color formation process of non-enzymatic browning reactions. *Food Chem.* 232, 450–454. doi:10.1016/j.foodchem.2017.04.046

Włodzimierz, O., Grajek, A., 2010. The influence of food processing and home cooking on the antioxidant stability in foods, in: Smith, J., Charter, E. (Eds.), *Functional Food Product Development*. pp. 178–205.

Yadollahinia, A., Jahangiri, M., 2009. Shrinkage of potato slice during drying. *J. Food Eng.* 94, 52–58.

Yingsanga, P., Srilaong, V., Kanlayanarat, S., Noichinda, S., McGlasson, W.B., 2008. Relationship between browning and related enzymes (PAL, PPO and POD) in rambutan fruit (*Nephelium lappaceum* Linn.) cvs. Rongrien and See-Chompoo. *Postharvest Biol. Technol.* 50, 164–168. doi:10.1016/j.postharvbio.2008.05.004

3. Trocknungsbedingte Qualitätsveränderungen von Obst und Gemüse

Universität Kassel, Fachgebiet Agrar- und Biosystemtechnik, Deutschland

3.1. Äpfel

Shestha, L.

In den letzten Jahren ist die Trocknung von Obst zu einer sehr gewöhnlichen Praxis geworden ein Produkt so zu verändern, dass es leichter zu handhaben/vertreiben ist und die Lagerfähigkeit durch das Senken von Fäulnisregenern und mikrobiellem Wachstum zu erhöhen. Verschiedene Trocknungsmethoden können angewandt werden, z. B. Freiluft, Ofen- oder Gefriertrocknung um Endprodukte von hohem Nährwert zu erhalten. Als Folge der Konzentrierung getrockneter Produkte im Vergleich zur Rohware, weist getrocknetes Obst einen höheren Gesamtenergiegehalt, Nährstoffdichte, Faseranteil und oftmals signifikant höhere antioxidative Aktivität auf (Bennett et al., 2011). Der Verzehr getrockneter Früchte als Snack oder als weiterverarbeitete Produkte steigt enorm an (Alberti et al., 2014; Garau, Simal, Rossello, & Femenia, 2007). Die Trocknung ruft jedoch physikalische, strukturelle, chemische und biologische Veränderungen hervor, die die Qualitätsmerkmale Textur, Farbe, Geschmack und Nährwert und besonders den Gehalt an Nährstoffen und sekundären Pflanzenstoffen, welchen relativ hitzelabil sind, hervor (Lee, 2012; Vega-Gálvez et al., 2012; Witrowa-Rajchert & Rząca, 2009). Die chemische Zusammensetzung von Äpfeln variiert stark zwischen der Anbauregion, Anbaupraktiken, Ernte- und Lagerbedingungen und der Sorte (Feliciano et al., 2010; Kalinowska et al., 2014; Raudone et al., 2016). Gleichwohl beinhalten Äpfel verschiedene chemische Inhaltsstoffe, ihr Verzehr trägt zur Gesunderhaltung des menschlichen Metabolismus bei und schützt vor Degenerationskrankheiten wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, bestimmten Krebsarten und Diabetes, weiterhin senkt der Verzehr den Cholesterinspiegel und unterstützt die Gewichtsabnahme (Kalinowska et al., 2014). Die vorbeugende Funktionalität ist auf die verschiedenen in Äpfeln enthaltenen Phenole und Flavonoide zurückzuführen. Diese Inhaltsstoffe zeichnen sich durch eine hohe Anzahl an Doppelbindungen und Hydroxylgruppen aus, welche ihre antioxidative Aktivität begründen (Khanizadeh et al., 2008; Tsao, Yang, Xie, Sockovie, & Khanizadeh, 2005). Fünf Hauptgruppen der Polyphenole wurden in Äpfeln gefunden: Hydroxyzimtsäure (hauptsächlich Chlorogensäure), flavan-3-ole [(+)-Catechin, (-)-Epicatechin and Anthocyanidine], Flavonole (hauptsächlich verschiedene Quercetin Glycoside), Dihydrochalcone (Phloridzin ist das dominanteste) and Anthocyanine (größtenteils Cyanidin-3-Galactoside) (Oszmiański, Wojdyło, & Lachowicz, 2016; Tsao, Yang, Young, & Zhu, 2003). Das Vorkommen von Polyphenolen ist besonders hoch in der Schale verglichen mit dem Fruchtfleisch oder Kerngehäuse (Lacueva et al., 2014; Wolfe, Wu, & Liu, 2003). Im Fruchtfleisch stellen die Procyanidine über 56 % der gesamten Phenole dar, gefolgt von Hydroxyzimtsäure (40%) und Dihydrochalcon (4%). Dennoch variiert der Phenolgehalt der Sorte entsprechend (Tsao et al., 2003).

3.1.1. Einfluss von Vorbehandlung und Wartezeiten während der Verarbeitung auf Bräunungsreaktionen

Das grundlegende Ziel der Verarbeitung von Obst, wie das Trocknen, ist die Erhöhung der Lagerfähigkeit, sowie die Erhaltung der Nährstoffe und der sensorischen Qualitätsparametern, indem die Aktivität der Mikroorganismen und der chemischen Veränderungen gesenkt wird, die sonst die Qualität des Endproduktes negativ beeinflussen würden. Während des konvektiven Trocknens passiert es häufig, dass umfangreiche Veränderungen der Qualitätsparameter auftreten.

Es gibt viele Einflussgrößen, die den Trocknungsprozess beeinflussen, wie die Temperatur im Trocknungsraum, die Luftgeschwindigkeit die Luftfeuchte etc. Weiterhin gibt es noch Einflussgrößen des Rohmaterials und chemische Reaktionen während der Vorverarbeitung, hauptsächlich durch die Konzentration an Reaktionsmitteln, Temperatur, pH-Wert, Oxidations-/Reduktionspotential und bedingt durch gehemmte und katalysierte Reaktionen.

Die Veränderungen treten während der Vorverarbeitung auf, meist mit Veränderungen im Trocknungsprozess einhergehend. Dies betrifft nicht nur die Konvektionstrocknung, sondern auch unkonventionelle Methoden wie die Trocknung unter hydrostatischem Hochdruck (Janowicz and Lenart, 2018). Es ist daher essentiell die Vorverarbeitung zu optimieren bevor der eigentliche Trocknungsprozess beginnt. Beispielsweise führt das Zusammenfallen der Zellbestandteile während des Schneidens und Schärens der Äpfel zu enzymatischen Reaktionen und somit zur Bräunung der Äpfel. Die Bräunung nimmt während der Trocknung durch chemische Reaktionen wie die Maillard-Reaktion weiter zu, was zu einer dunkleren Farbe des Endproduktes führt. Daher gibt es verschiedene Möglichkeiten der Vorbehandlung um die Nährstoffe und die äußere Erscheinung von Apfelscheiben zu erhalten. Weiterhin spielen aber auch die Sorte, die Verarbeitungsumgebung und die Zeit, in der die Oberfläche der Luft bei Raumtemperatur ausgesetzt ist eine Rolle.

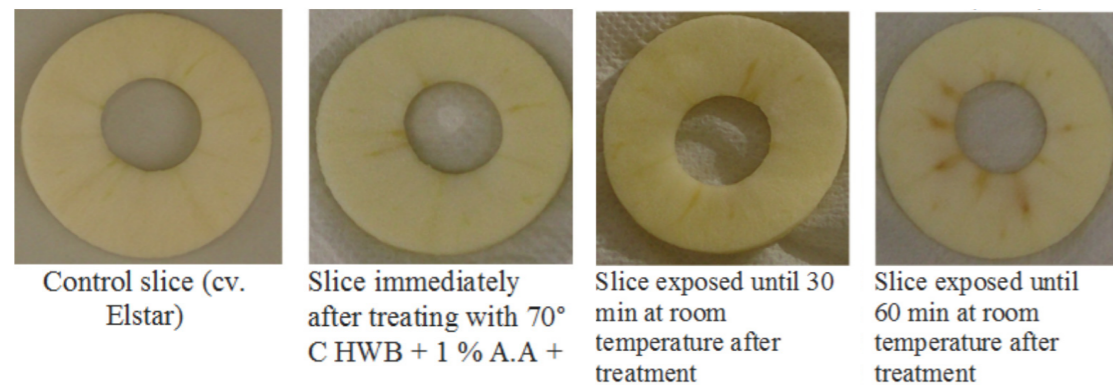


Abbildung 3.1: Einfluss der Zeit, in der die Oberfläche der Umgebungsluft ausgesetzt ist nach Blanchieren bei 70 °C + 1 % Zitronensäure + 1 % Ascorbinsäure.

Abbildung 3.1 zeigt den Einfluss der Umgebungsluft auf die Oberfläche auf vorbehandelte Äpfel (blanchiert bei 70 °C + 1 % Zitronensäure + 1 % Ascorbinsäure). Das Ergebnis zeigt eine Verfärbung nachdem die Oberfläche der Umgebungsluft ausgesetzt war, obwohl die Probe in mit Zitronensäure und Ascorbinsäure versetztem 70 °C warmen Wasser blanchiert wurde. So nützt die Vorbehandlung nicht viel, wenn die Zeit zwischen Vorbehandlung und Trocknungsprozess zu lange ist. Die Veränderung der Farbe verglichen mit dem Rohprodukt kann nach dem Blanchieren relativ hoch sein. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Maillardreaktion stattgefunden hat, bei der der hohe Gehalt an Zucker (hauptsächlich Fruktose) bei Hitze reagiert und so die Umfärbung erzeugt (Hecke et al., 2006; Laroque et al., 2008). Je höher die Temperatur, desto stärker die Bräunung. Zwar werden die Enzyme bei einer Temperatur von 70 °C inaktiviert, jedoch kann es zu Zellbrüchen und Gewebeveränderungen kommen, bei dem vermehrt Luft eindringen kann und weitere Enzyme freigesetzt werden. Berührungspunkte verschiedener Zellkomponenten führen schließlich zu Farbveränderungen an der Produktoberfläche. Das Öffnen zellulärer Poren während des Blanchierens kann weiterhin die Synthese sekundärer Produkte einleiten, einschließlich einer Vielzahl phenologischer Substanzen.

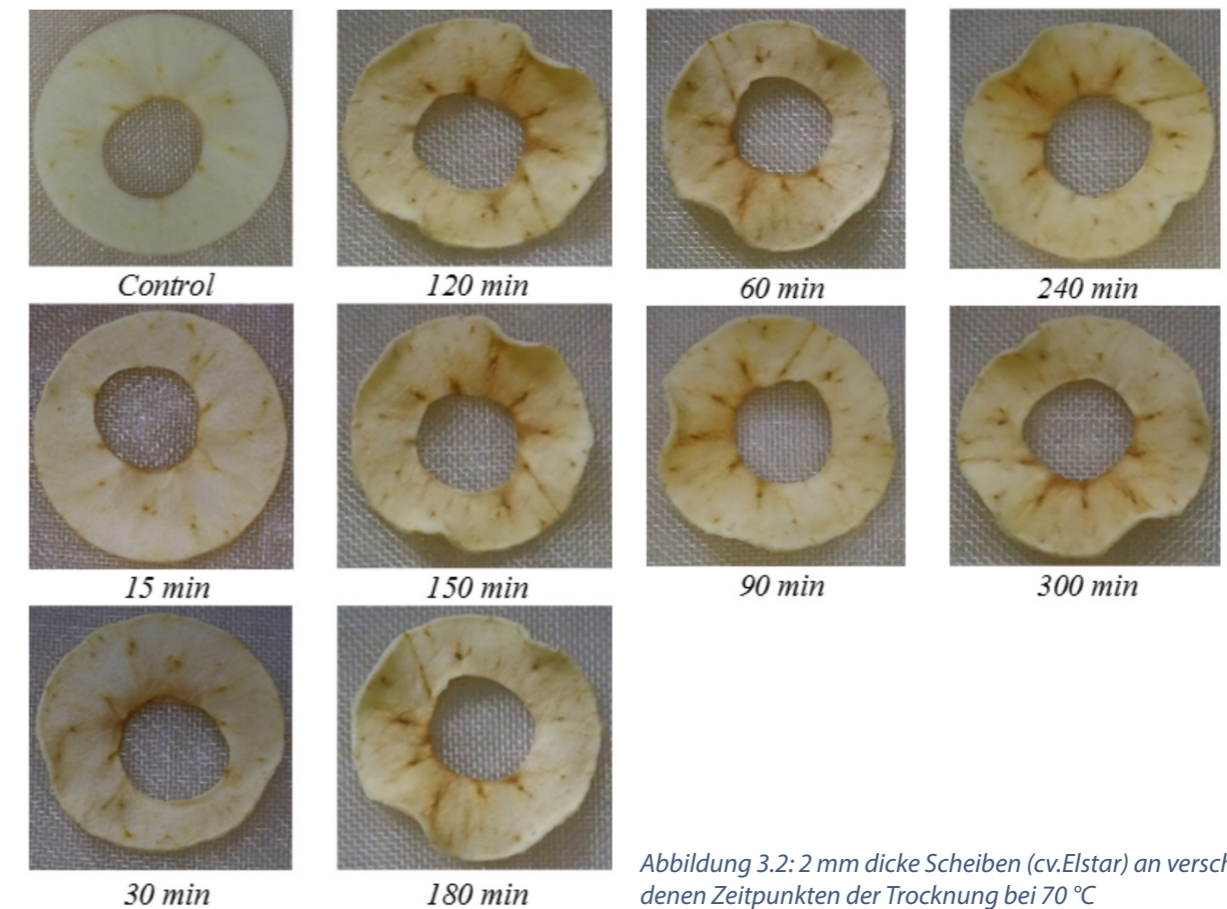


Abbildung 3.2: 2 mm dicke Scheiben (cv.Elstar) an verschiedenen Zeitpunkten der Trocknung bei 70 °C

So kann das Blanchieren auch einen nachteiligen Effekt auf die Zellmembran haben, der sich durch Veränderungen in den Inhaltsstoffen, Struktur, Funktion oder dem Verlust der Proteinfunktionalität zeigt (Gonzalez and Barrett, 2010).

Abbildung 3.2 zeigt den visuellen Vergleich von 2 mm dicken Apfelscheiben zu verschiedenen Zeitpunkten des Trocknungsprozesses bei 70 °C. Die deutliche Veränderung der Farbe kann besonders deutlich in den ersten 90 Minuten beobachtet werden. Danach ist die Veränderung bis zum Ende des Prozesses kaum noch wahrzunehmen. Dies kann an der geringeren Zeit zwischen Vorverarbeitung und Trocknungsprozess begründet liegen (< 30 min). Zellen von Äpfeln beinhalten Phenole, die in der Vakuole vorliegen, das Enzym Polyphenoloxidase (PPO) liegt in den Plastiden vor. Der Kontakt zwischen Phenolen und PPO löst eine Reaktion aus, die als enzymatische Bräunung bekannt ist. Polyphenole werden dabei zu Chinonen oxidiert. Diese Phenole und PPOs polymerisieren mit anderen Chinonen oder Phenolen und formen braune Farbpigmente. Farbveränderungen werden signifikant von Phenolkonzentration und PPO Aktivität beeinflusst, die Signifikanz variiert aber zwischen den Apfelsorten (Holderbaum et al., 2010). Insgesamt wird die Bräunung von enzymatischen und nicht-enzymatischen Reaktionen beeinflusst (Lavelli and Caronni, 2010).

Unter Hitzeeinwirkung findet die Maillard-Reaktion als ein Ablauf verschiedener chemischer Reaktionen statt zwischen reduzierenden Zuckern und Amino-Gruppen. Das Ausmaß der Maillard-Reaktion wird hauptsächlich durch die Faktoren Temperatur und Zeit bestimmt, welche durch die Prozessbedingungen beeinflusst sind, sowie durch pH, Wasseraktivität, Typ und Variation der Reaktionspartner, welche von den Produkteigenschaften abhängen, aber durch Verarbeitung und Rohmaterial beeinflussbar sind (Jaeger et al., 2010). So brauchen speziell Äpfel eine besondere Vorbehandlung und kurze Intervalle an der Luft um die genannten Bräunungsreaktionen zu vermeiden.

Während die Verarbeitungsschritte wie Schälen, Schneiden und Trocknung kann die Zusammensetzung des Polyphenolgehalts durch Oxidationen beeinflusst werden (antioxidative Aktivität der Phenole und oxidative Bräunung). Phenole agieren als Antioxidanten und Substanzen für oxidative Bräunungsreaktionen, hauptsächlich für PPOs und Peroxidasen (POD) welches eventuell die organoleptische und Nährstoffqualität beeinflusst. Daher sollte die Stabilität der Antioxidanten während der Verarbeitung von Äpfeln berücksichtigt werden. Beispielsweise stellten Henriquez, Córdova, Almonacid, & Saavedra (2014) fest, dass der Zerfall des Gesamtphenolgehaltes in der Schale von Äpfeln während des Trocknens bei hohen Temperaturen ansteigt. Dies geschieht durch (1) enzymatische und nicht-enzymatische Zerfallsreaktionen, (2) Bildung nicht-löslicher Oxidationskomponenten, (3) Bildung von Polymeren, (4) Zerfall hitzelabiler Substanzen (Henriquez et al., 2014; Nicoli, Anese, & Parpinel, 1999). Ein langer Trocknungsprozess oder zu hoch angesetzte Temperaturen beeinflussen daher die antioxidativen Eigenschaften und den Phenolgehalt negativ. Bisher gibt es nicht viele Studien, die den Zerfall in Apfelscheiben untersucht haben. Die grundsätzlichen Verfallsprozesse von Phenolen können aber von anderen Produkten übernommen werden. Zum Beispiel konnte der größte Zerfall phenolischer Substanzen in rotem Trau-

rentrester bei hohen Trocknungslufttemperaturen (über 60 °C) festgestellt werden. Hauptsächlichste Ursache war hier die Lösung gebundener Polyphenole. Die teilweise Zerstörung von Lignin kann zur Lösung von Phenolsäurederivaten führen und/oder zum Beginn thermischen Zerfalls der Phenole (Larrauri, Rupérez, & Saura-Calixto, 1997). Karaaslan et al. (2014) beobachteten einen starken Zerfall von Anthocyanin und Phenolen bei 75 °C bei Granatapfelkernen, während bei 55 °C der Zerfall am geringsten ausfiel. Weiterhin kann auch die Vorbehandlung des Blanchierens zu höheren Phenolgehalten im Vergleich zu unbehandelten Proben führen. Geringe Verluste an Phenolen wurden bei Temperaturen während der Warmlufttrocknung von unter 60 °C für Apfeltrester (Heras-Ramírez, Quintero-Ramos, Torres-Muñoz, & Salas-Muñoz, 2012), Litschi Fruchtfleisch (Kessy, Hu, Zhao, & Zhou, 2016), Pfirsiche und Äpfel (Rababah, Ereifej, & Howard, 2005) und Persimonen (Akyildiz, Zorlugenc, Benli, Aksay, & Fenercioglu, 2008) festgestellt. Die Ergebnisse dieser verschiedenen Studien zeigen, dass hohe Trocknungstemperaturen und lange Trocknungszeiten Phenole zerstören. Auf der anderen Seite wurden höhere Gehalte an Hydroxyzimtsäure in Pfirsichen, Äpfeln und Pflaumen gefunden, die bei höheren Temperaturen getrocknet wurden. Dies ist auf die Inaktivierung von Oxidasen zurückzuführen und auf die Bildung neuer Zimtsäuren (McSweeney & Seetharaman, 2015).

In jedem Fall ist es unabdingbar, den Einfluss der Trocknung auf bioaktive Phenole zu kennen und so Nährstoffe zu erhalten. Größtenteils wird der Anteil pflanzlicher Stoffe durch die Temperatur und die Anwesenheit von Sauerstoff beeinflusst. Weiterhin sind Wärmebehandlungen, Prozessdauer und Licht Faktoren, die zur Zerstörung wertvoller Pflanzeninhaltsstoffe führen.

3.2. Möhren

Saleh, R.

Die Möhre ist für Menschen weltweit ein wichtiges Gemüse. Sie ist das zweitmeist verzehrte Gemüse der Welt und wurde als gesündestes Gemüse bewertet auf Grund ihrer Inhaltsstoffe wie Carotinoide, Vitamin C und Mineralstoffe (Anon, 2011). Diese Nährstoffe haben einen wesentlichen gesundheitlichen Mehrwert für den Menschen durch ihr antioxidatives Vermögen, Anti-Krebs Eigenschaften, entzündungshemmende und viele andere Wirkungen (Zeb and Mahmood, 2004). Der weltweit größte Produzent für Möhren ist China mit 26,91 % der Gesamtproduktion im Jahr 2013, es folgen Deutschland und Russland (Jared & Lopez, 2016). Die Möhre ist auch das zweitwichtigste Gemüse in Europa nach der Tomate und Deutschland war 2015 der größte europäische Produzent mit fast 527000 Tonnen (Anon, 2016). Oft wird die Möhre roh verzehrt, sie ist aber auch Bestandteil in verschiedenen verarbeiteten Lebensmitteln, besonders in der Herstellung von Instantlebensmitteln. Die Möhre wird in verschiedenen Gerichten verwendet, wie in Aufläufen, Suppen, Currys, Salaten und kann auch Bestandteil von Broten und Kuchen sein. Sie kann weiterhin in Dosen, als getrocknetes Produkt, als Saft, Mixgetränk, Süßigkeit oder sauer eingelegt verarbeitet und konserviert werden (Aggarwal and Kaur, 2014).

Land	Produktion (in Tonnen)
France	560,000
Germany	526,900
Spain	410900
Belgium	245400
Denmark	89200
Ireland	40200
Greece	32500
Chec Republic	23500
Estonia	18100
Bulgaria	7900

Quelle: EUROSTAT, 2016

Tabelle 1.3: Hauptproduzenten für Möhren in Europa (2015)

In den letzten Jahren ist die Entwicklung möhrenbasierter Produkte für die Gesundheits- und Kosmetikindustrie, auf Grund ihres gesundheitlichen Nutzens durch Carotinoide als Vorstufe des Vitamin A, stetig gestiegen. Die meisten Produzenten arbeiten mit getrockneten Möhren, da sie roh unter Umgebungsbedingungen leicht verderblich ist und nur eine kurze Lagerdauer haben. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Trocknung von Möhren ein entscheidender Verarbeitungsschritt. Verschiedene Trocknungstechniken wurden mit verschiedenen Prozesseinstellungen bereits von vielen Forschern untersucht um ein Produkt von hoher Qualität in Bezug auf Aussehen und Inhaltsstoffen zu erhalten unter maximaler Erhaltung der Carotinoide. Die am häufigsten angewandte Technik ist die Warmlufttrocknung verschiedener Formen von Möhren (Mulet et al., 1989; Ratti, 1994; Krokida and Maroulis, 1997; Khraisheh et al., 1997; Lin et al., 1998). Diese Autoren haben verschiedene Qualitätseigenschaften des Rohmaterials vor der Trocknung beschrieben. Die Erhaltung der Qualitätsparameter des Rohmaterials ist sehr wichtig für die Qualitätssicherung und Evaluierung des fertigen Produkts. Darauf basierend gibt es einen Bedarf an der Entwicklung spezifischer Trocknungsstrategien von Möhren um die Qualität, die ihren gesundheitlichen Nutzen beeinflusst, zu erhalten. Dazu ist es nötig die bioaktiven Komponenten wie Carotinoide zu erhalten um den maximalen gesundheitlichen Wert für den Konsumenten sicherzustellen. Bisher gab es viele Untersuchungen zu verschiedensten Trocknungstechniken, aber nur wenige zu verschiedene Trocknungsstrategien und deren Bezug auf Qualitätsparameter zur Prozesssteuerung und -optimierung. Das fehlende Wissen zum Trocknungsverhalten in Bezug auf die Produktqualität führt zu folgenden Problemen:

- Übertrocknung, was zu Strukturellen Beschädigungen, wie z. B. Brüchigkeit, Verlust der Tragstruktur und Pulverbildung führt und damit zum Qualitätsverlust.
- Unzureichender Trocknung, der angestrebte Endfeuchtegehalt also nicht erreicht wird. Dies führt zu einer gesenkten Lagerfähigkeit aufgrund mikrobieller Aktivität, Bräunung und Zerfall sekundärer Pflanzenstoffe.
- Uneinheitliche Produktqualität auf Grund ungeeigneter Trocknungstechnik und damit unzureichende Qualität des Endproduktes.
- Ungleichmäßige Trocknung aufgrund der Form und unterschiedlichen thermomechanischen Eigenschaften der Rohware, was zu ungleichmäßiger Trocknung auf Grund von Unterschieden in der Dicke der Trocknungsschicht führt.
- Ineffizienter Energienutzung durch unpassender Auswahl von Parametern die zusätzlich Energie verbrauchen.
- Unnötig lange Trocknungszeiten durch unpassend ausgewählte Trocknungsparameter und dadurch resultierende geringe Produktionsraten und Zerfall der Produktqualität.

3.2.1. Qualität getrockneter Möhren

Die häufig untersuchten Eigenschaften von getrockneten Möhren lassen sich in zwei Hauptkategorien einteilen: (1) die technischen Eigenschaften der Trockenprodukte und (2) die physikalisch-chemische Qualität. Die technischen Eigenschaften umfassen die effektive Feuchtigkeitsdiffusion, die effektive Wärmeleitfähigkeit, den spezifischen Wärme- und Gleichgewichtsfeuchtegehalt, die für die Gestaltung von Lebensmittelprozessen und Verarbeitungsanlagen sowie die Optimierung einer Prozesssteuerung unerlässlich sind. Der größte Teil der gemessenen physikalisch-chemischen Qualität der getrockneten Möhre umfasst eine Reihe von Parametern wie Farbe, Rehydrationskapazität, Schrumpfung, Carotinoidgehalt und Vitamin C. Obwohl diese Eigenschaften für die Vorhersage der Trocknungszeit und der Prozessmodellierung nicht erforderlich sind, sind sie für die Charakterisierung und Vorhersage der Qualität des getrockneten Produkts wichtig (Krokida und Maroulis, 2000). Sie sind auch sehr wichtig für die Entwicklung neuer Industrieprodukte mit gewünschten Eigenschaften oder für die Qualitätsverbesserung bereits bestehender Produkte. Daher wird im Folgenden auf die physikalisch-chemische Qualität von getrockneten Möhren eingegangen.

3.2.2. Einfluss von Vorbehandlung auf die Qualität getrockneter Möhren

Vorbehandlungen vor der Trocknung wie Blanchieren oder das Eintauchen in Lösungen wie Zitronen-/Ascorbinsäure, Kalziumchlorid u.a. wurden als wirkungsvolle Methoden beschrieben, Verluste in getrockneten Möhren zu vermeiden. Verschiedene Forscher stellten Verluste von bis zu 80 % des Carotins fest, wenn ohne Vorbehandlung getrocknet wurde (Sablani, 2006). Hauptsächlich sollen durch Vorbehandlungen Enzyme wie die Peroxidase und Katalase inaktiviert werden, die Nährstoffe zerstören und zu Verfärbungen (Bräunung) führen können (Shivare, et al., 2009). Die Hitze während des Blanchierens zerstört auch Enzyme, die in Zusammenhang mit der

Farbe stehen, wie Oxidasen, Lipoxigenasen und Chlorophylase und führt so zu einer besseren Farberhaltung beim Endprodukt (Cui et al., 2004). Blanchieren bei relativ niedriger Temperatur von 77 °C für 20-30 min hat weiterhin einen positiven Effekt auf die Festigkeit von Möhren verglichen mit dem Blanchieren bei 100 °C für 4-5 Minuten (Lee et al., 1979). Blanchieren bei 95 °C für 5 Minuten wird als die effektivste Vorbehandlung beschrieben um Peroxidasen zu inaktivieren und eine Erhaltung von bis zu 55 % Carotin zu ermöglichen (Shivare et al., 2009). Blanchieren kann sich aber auch negativ auf Nährstoffe auswirken, so konnte eine Reduktion des Vitamin Cs auf 38 % beobachtet werden (90 °C für 7 Minuten) (Lin et al., 1998). Gegenteiliges beobachtete Bognar et al. (1987) für das Mikrowellenblanchieren, bei dem 100 % Carotin erhalten blieben. Blanchieren mit anschließender Gefriertrocknung zeigte einen positive Effekt in Bezug auf die Farberhaltung (Patras et al., 2011).

3.2.3. Einfluss von Trocknungsmethoden und Prozessparametern auf die Produktqualität getrockneter Möhren

Die Konservierung von Möhren durch Wasserentzug bis zu einem Grad, der eine unbedenkliche Lagerung ermöglicht, ist von vielen Forschern dokumentiert. Eine längere Lagerfähigkeit und eine signifikante Volumenverringerung sind die Hauptbestrebungen der Trocknung. Die Qualität des Endproduktes hängt jedoch stark von Trocknungsmethode und Prozessparametern ab (Krokida and Maroulis, 2000). Die am häufigsten angewandte Trocknungsmethode ist die Konvektionstrocknung mit Warmluft. Bei der Warmlufttrocknung kann der Verlust an Qualität direkt proportional zur Trocknungstemperatur und der Trocknungsdauer sein (Vadivambal and Jayas, 2007). Dadurch kommt es zu Verlusten des Geruchs und Geschmacks, der Farbe, Nährstoffe und auch der Wiederbefeuchtungskapazität (Lin, et al., 1998; Vadivambal and Jayas, 2007 Drouzas et al., 1999). Flüchtige Substanzen verdunsten mit dem Wasser und resultiert in der Bildung eines Fehlgeschmacks- und geruchs des Endprodukts. Diese Verluste können verschiedenen Grades sein und sind von einer Vielzahl von Forschern belegt.

3.2.4. Physikalische Qualität

Die physikalische Qualität getrockneter Möhren bezieht sich auf die Schrumpfung, die Wiederbefeuchtungskapazität und die Farbe. Der wichtigste Parameter ist die Farbveränderung während der Trocknung. Bezug nehmend auf Kudra and Strumillo (1998), treten Farbveränderungen nicht nur durch die Verdunstung von Wasser an der Oberfläche auf, sondern auch durch Reaktionen, z. B. durch enzymatische und nicht-enzymatische Bräunung und durch Karamellisierung. Diese Reaktionen sind bei vielen Produkten unerwünscht, daher liegt ein Hauptaugenmerk während der Trocknung auf der Erhaltung der Farbe durch verschiedene Maßnahmen, wie Temperaturänderungen in spezifischen Bereichen, qualitätsangepasste Änderungen von Trocknungsparametern während der Trocknung oder die Anwendung bestimmter Säuren. Prabhanjan et al. (1995) beobachteten eine bessere Farbbeibehaltung während der Mikrowellentrocknung, als bei der Konvektionstrocknung, ähnliches beschreiben Lin et al. (1998). Dabei wird beschrieben, dass warmluftgetrocknete Möhren dunkler sind und auch Verluste in der Rot- und Gelbfärbung zu er-

kennen sind im Vergleich zu mikrowellen- und gefriergetrockneten. Gefriergetrocknete Möhren zeigten weiterhin höhere Werte in der Helligkeit, waren aber etwas weniger gelb als die mikrowellentrockneten. Die Dunkelfärbung bei warmluftgetrockneten Möhren könnte das Ergebnis der Hitzeeinwirkung im Vergleich zum gefriergetrockneten Produkt sein. Weiterhin kann die höhere Dichte warmluftgetrockneten Möhren dazu beitragen, dass sie dunkler erscheinen. Weiterhin konnte z.B. von Howard et al. (1996) gezeigt werden, dass die Helligkeit (L-Wert) getrockneter Möhren von der Trocknungstemperatur beeinflusst wird, mit steigender Temperatur zeigt sich auch die Dunkelfärbung ausgeprägter, ähnliches beobachteten Abbatemaro und Ramaswamy (1995). Krokida et al. (1998) untersuchten die Farbverluste und stellten fest, dass Gelb- und Rotfärbung von Möhren stark von der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit während der Trocknung abhängen. Schrumpfung und Wiederbefeuchtungskapazität werden gleichermaßen von Temperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte beeinflusst, wie von Hong et al. (2010) beschrieben. Der Autor beobachtete, dass Möhren, die bei 40 °C, 13 m/s Luftgeschwindigkeit und 40 % Luftfeuchte getrocknet wurden die höchste Kapazität zur Wiederaufnahme von Wasser zeigten.

3.2.5. Erhaltung von Nährstoffen

Die Trocknung verursacht Qualitätsveränderungen in Möhren, die auch den Verlust von Nährstoffen beinhalten, was vielfach beschrieben wurde. In Bezug auf Möhren ist besonders der Erhalt der Carotinoiden von Bedeutung. Carotinoide sind licht-, sauerstoff- und enzymempfindlich (Cui et al., 2004). Der Autor weist darauf hin, dass besonders Temperatur und Sauerstoff erheblich für Farbverluste verantwortlich sind, die Zersetzung von Carotinoiden durch die Lipoxygenase aber Einfluss auf den gesundheitlichen Nutzen hat. Die Ausprägung der Verluste ist abhängig von der Vorbehandlung, der Trocknungsmethode und den Prozessparametern (Cui et al., 2004). Ein Verlust von bis zu 68 % konnte in für die Mikrowellentrocknung beschrieben werden (Park, 1987). Eine hohe Temperatur von 150 °C für eine geringe Zeit von 12,5 Minuten zeigte sehr kleine Verluste von nur 17,7 % (Mudhahar et al., 1989). Mohamed und Hussein (1994) beobachteten den höchsten Erhalt an Carotinoiden bei einer langen Trocknung bei 40 °C. Der Autor schlussfolgert hier eine vermehrte Empfindlichkeit der Carotinoide gegenüber der Trocknungstemperatur und weniger gegenüber der Trocknungsdauer.

Abonyi et al. (2002) beobachteten bei der Methode der Refractance Window Trocknung vergleichbar hohe Gehalte an Vitamin C und Carotinoiden wie bei der Gefriertrocknung, während die Tommeltrocknung den Zerfall von Carotinoiden, aufgrund von starker Hitzeeinwirkung während der Trocknung fördert. Im Vergleich von Geringdruck-Dampf- und Gefriertrocknung schnitt die Warmlufttrocknung mit rund 60 % erhaltenem β -Carotin am schlechtesten ab (Suvarnakuta, et al., 2005). Dieser Wert für die Warmlufttrocknung konnte in eigenen Untersuchungen wiederholt werden (Saleh, unveröffentlicht). Ein hoher Zerfall an Carotinoiden von bis zu 80 % konnte bei der gleichen Methode bei 80 °C beobachtet werden (Anthanasia und Konstantinos, 2010). Einige Forscher wandten auch die Wirbelschichttrocknung mit verschiedenen Einstellungen an (Pan et al., 1999; Brod et al., 1998). Gute Ergebnisse konnten hier in der stufenweisen Trocknung verglichen mit der kontinuierlichen Trocknung erzielt werden (Pan et al., 1999).

3.2.6. Zusammenfassung

Qualitätsverluste an getrockneten Möhren können während der Vorbehandlung und während des Trocknungsprozesses auftreten. Verschiedene Sorten können weiterhin die Qualitätsverluste beeinflussen, die genannten Studien wurden mit Sorten aus der ganzen Welt angefertigt, sodass auch Wachstum und Boden die Qualität beeinflusst haben könnten. Vorbehandlungen und beeinflussende Faktoren in Trocknungsprozessen wurden benannt und diskutiert. Insgesamt beeinflussen die Vorbehandlung, die Trocknungsmethode und die Prozessparameter die Qualität des Endproduktes. Weiterhin sind noch weitere Daten bezüglich der Trocknungskinetik und Verlust von Nährstoffen nötig um ein Optimierungsmodell zur Prozesssteuerung entlang der Prozesskette zu entwickeln.

Auch die Entwicklung von Trocknungsstrategien muss weiter entwickelt werden um einen verbesserten Prozess für ein besseres Verständnis der Trocknungscharakteristiken und dessen Effekt auf die Produktqualität von Möhren zu bekommen. Wichtig ist auch, die physiologischen Veränderungen im Produkt während der Trocknung zu überwachen und kritische Punkte zu identifizieren um zukünftig bessere Qualitäten herstellen zu können.



Abbildung 3.3: Frische Möhrenscheiben



Abbildung 3.4: Blanchierte (oben) und unblanchierte Möhrenscheiben (unten)

3.3. Referenzen

Abbatemarco, C. and Ramaswamy, H. S. (1995) End-over-end thermal processing of canned vegetables: Effect on texture and color. *Food Research International* 27, 327–234.

Abonyi, B. I., Feng, H., Tang, J., Edwards, C. G., Chew, B. P., Mattinson, D. S., & Fellman, J. K. (2002). Quality retention in strawberry and carrot purees dried with Refractance Window™ system. *Journal of Food Science*, 67(3), 1051-1056.

Aggarwal, P. and Kaur, R. (2014). Development of intermediate moisture product from carrot pulp. *American Journal of Food Science & Nutrition Research* 1(6) : 52 – 59.

Akyildiz, A., Zorlugenc, F. K., Benli, H., Aksay, S., & Fenercioglu, H. (2008). Changes in color and total phenolic content of different cultivars of persimmon during dehydration. *International Journal of Food Engineering*, 4(7). <https://doi.org/9r10.2202/1556-3758.1199>

Alberti, A., Zielinski, A. A. F., Zardo, D. M., Demiate, I. M., Nogueira, A., & Mafra, L. I. (2014). Optimization of the extraction of phenolic compounds from apples using response surface methodology. *Food Chemistry*, 149, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.086>

Anon (2011). Agricultural Marketing Resource Center (AgMRC). Carrot Profile. 2011;Iowa State University, Ames, IO. Available online at: <http://www.agmrc.org>.

Anon (2016). EUROSTAT – Statistics Explained. Available online at http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/Agricultural_production_-_crops

Athanasia, M.G. and Konstantinos, G.A.(2010). Kinetic models of B-carotene degradation during air drying of carrots. *Drying Technology*, 28(6) : 752 – 761.

Bennett, L. E., Jegasothy, H., Konczak, I., Frank, D., Sudharmarajan, S., & Clingeleffer, P. R. (2011). Total polyphenolics and anti-oxidant properties of selected dried fruits and relationships to drying conditions. *Journal of Functional Foods*, 3(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.03.005>

Bognar, A., Grunauer, A., & Doll, D. (1987). Comparative-studies on the influence of microwave blanching and conventional blanching on the sensory and nutritive quality of vegetables. *Ernährungs-Umschau*, 34(5), 168-176.

Brod, F.P.R., Alonso, L.F.T., Rosa, R.H.C., Minagawa, F.K. and Park, K.J. 1998. Carrot Drying in a Vibro-Fluidized Dryer. *Drying' 98—Proceedings of the 11th International Drying Symposium*. 1998, Halkidiki, Greece. Vol. V B., pp.1237–1243.

Cui, Z. W., Xu, S. Y., & Sun, D. W. (2004). Effect of microwave-vacuum drying on the carotenoids retention of carrot slices and chlorophyll retention of Chinese chive leaves. *Drying Technology*, 22(3), 563-575.

Drouzas, A. E., & Schubert, H. (1996). Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering*, 28(2), 203-209.

Feliciano, R. P., Antunes, C., Ramos, A., Serra, A. T., Figueira, M. E., Duarte, C. M. M., ... Bronze, M. R. (2010). Characterization of traditional and exotic apple varieties from Portugal. Part 1 - Nutritional, phytochemical and sensory evaluation. *Journal of Functional Foods*, 2(1), 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2009.12.004>

Garau, M. C., Simal, S., Rossello, C., & Femenia, A. (2007). Food Chemistry Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties of dietary fibre and antioxidant capacity of orange (*Citrus aurantium* v . Canoneta) by-products, 104, 1014–1024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.01.009>

Gonzalez, M.E., Barrett, D.M., 2010. Thermal, high pressure, and electric field processing effects on plant cell membrane integrity and relevance to fruit and vegetable quality. *J. Food Sci.* 75. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01763.x>

Hecke, K., Herbinger, K., Veberic, R., Trobec, M., Toplak, H., Stampar, F., Keppel, H., Grill, D., 2006. Sugar-, acid- and phenol contents in apple cultivars from organic and integrated fruit cultivation. *Eur. J. Clin. Nutr.* 60, 1136–1140. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602430>

Henríquez, C., Córdova, A., Almonacid, S., & Saavedra, J. (2014). Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-products. *Journal of Food Engineering*, 143, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.06.037>

Heras-ramírez, M. E., Quintero-ramos, A., Torres-muñoz, J. V., & Salas-muñoz, E. (2012). Effect of Blanching and Drying Temperature on Polyphenolic Compound Stability and Antioxidant Capacity of Apple Pomace, 2201–2210. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0583-x>

Hiranvarachat, B., Suvarnakuta, P. and Devahastin S. (2008). Isomerisation kinetics and antioxidant activities of B-carotene in carrot undergoing different drying techniques and conditions. *Food Chemistry*, 107: 1538 – 1546.

Holderbaum, D.F., Kon, T., Kudo, T., Guerra, M.P., 2010. Enzymatic browning, polyphenol oxidase activity, and polyphenols in four apple cultivars: Dynamics during fruit development. *HortScience* 45, 1150–1154.

Hong, W.X., Zhen, J.G., Hai, L. and Wen, X.Y. (2005). Air impingement drying characteristic and quality of carrot cubes. *Journal of Food Process Engineering*, 33: 899 – 918.

Hongjie, P., Zhenfeng, L., Ju Hui and Vijaya Raghavan, G.S. (2016). Effect of relative humidity on microwave drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 190: 162-175.

Howard, L. R., Braswell, D. D. and Aselage, J. (1996) Chemical composition and color of strained carrots as affected by processing. *Journal of Food Science* 61, 327–330.

Ibrahim, D. (2004). Convective air drying characteristics of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* : 359 – 364.

Jaeger, H., Janositz, A., Knorr, D., 2010. The Maillard reaction and its control during food processing. The potential of emerging technologies. *Pathol. Biol. (Paris)*. 58, 207–13. <https://doi.org/10.1016/j.patbio.2009.09.016>

Janowicz, M., Lenart, A., 2018. The impact of high pressure and drying processing on internal structure and quality of fruit. *Eur. Food Res. Technol.* 0, 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3047-y>

Jared, A.P and Jose, A.L. (2016). An analysis of the global vegetables market: Tomatoes, carrots, cauliflower, lettuce, onions and spinach. A publication of Texas A&M University. Available online

at <https://faculty.tamuc.edu/jlopez/documents/2016Pathways-Peckham-et-al.pdf>.

Juana, F., Elena, P., Monica, U. and Concepcion V.V. (2010). Influence of drying by convective air dryer or power ultrasound on the vitamin C and B-carotene contents of carrots. *J.Agric. Food Chem.* 58 : 10539-10544.

Karaaslan, M., Yilmaz, F. M., Cesur, Ö., Vardin, H., İkinci, A., & Dalgiç, A. C. (2014). Drying kinetics and thermal degradation of phenolic compounds and anthocyanins in pomegranate arils dried under vacuum conditions. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(2), 595–605. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12342>

Kessy, H. N. E., Hu, Z., Zhao, L., & Zhou, M. (2016). Effect of steam blanching and drying on phenolic compounds of litchi pericarp. *Molecules*, 21(6). <https://doi.org/10.3390/molecules21060729>

Khanizadeh, S., Tsao, R., Rekika, D., Yang, R., Charles, M. T., & Vasantha Rupasinghe, H. P. (2008). Polyphenol composition and total antioxidant capacity of selected apple genotypes for processing. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21(5), 396–401. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.03.004>

Khraisheh MAM, Cooper TJR, Magee TRA. (1997). Shrinkage characteristics of potatoes dehydrated under combined microwave and convective air conditions. *Drying Technol* 15(3–4):1003–21. Krokida MK, Maroulis ZB. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technol* 15(10):1145–55.

Krokida, M. K., Tsami, E., & Maroulis, Z. B. (1998). Kinetics on color changes during drying of some fruits and vegetables. *Drying Technology*, 16(3-5), 667-685.

Krokida, M., & Maroulis, Z. (2000). Quality changes during drying of food materials. *Drying technology in agriculture and food sciences*, 61-106.

Kudra, T. and Strumillo, C. (eds.), 1998. *Thermal Processing of Bio-materials*, Gordon and Breach Sci Publ., Amsterdam, The Netherlands, 669p.

Kumar, H.S.P., Radhakrishna, K., Nagaraju, P.K. and Vijaya Rao, D. (2001). Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot & pumpkin. *Journal of Food Processing Preservation*, 25: 447-460.

Lacueva, A., Urpi Sarda, M., Kviklys, D., Liaudanskas, M., Viškelis, J., Buskiene, L., ... Ma, F. (2014). Phenolic Profiles and Contribution of Individual Compounds to Antioxidant Activity of Apple Powders. *Food Chemistry*, 123(4), 157–164. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13277>

Laroque, D., Inisan, C., Berger, C., Vouland, É., Dufossé, L., Guérard, F., 2008. Kinetic study on the Maillard reaction. Consideration of sugar reactivity. *Food Chem.* 111, 1032–1042. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.05.033>

Larrauri, J. A., Rupérez, P., & Saura-Calixto, F. (1997). Effect of Drying Temperature on the Stability of Polyphenols and Antioxidant Activity of Red Grape Pomace Peels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(4), 1390–1393. <https://doi.org/10.1021/jf960282f>

Lavelli, V., Caronni, P., 2010. Polyphenol oxidase activity and implications on the quality of intermediate moisture and dried apples. *Eur. Food Res. Technol.* 231, 93–100. <https://doi.org/10.1007/s00217-010-1256-0>

Lee, C. Y. (2012). Common Nutrients and Nutraceutical Quality of Apples, 4–9.

Lee, C. Y., Bourne, M. C., & Buren, J. V. (1979). Effect of blanching treatments on the firmness of carrots. *Journal of Food Science*, 44(2), 615-616.

Lin, T. M., Durance, T. D., & Scaman, C. H. (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, 31(2), 111-117.

McSweeney, M., & Seetharaman, K. (2015). State of Polyphenols in the Drying Process of Fruits and Vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5), 660–669. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.670673>

Mohamed, S.; Hussein, R. Effect of low temperature blanching, cysteine-HCl, N-acetyl-L-cysteine, Na metabisulphite and drying temperatures on the firmness and nutrient content of dried carrots. *Journal of Food Processing and Preservation* 1994, 18, 343–348.

Mudahar, G. S., Toledo, R. T., Floros, J. D., & Jen, J. J. (1989). Optimization of carrot dehydration process using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 54(3), 714-719.

Mulet A, Berna A, Rosello C, Pinaga F. 1989. Drying carrots. II. Evaluation of drying models. *Drying Technol* 7(4):641–61.

Navneet, K., Sarkar, B.C and Sharma, H.K. (2012). Mathematical modeling of thin layer hot air drying of carrot. *J. Food Sci. Technol.* 49(1) : 32 – 41.

Nicoli, M., Anese, M., & Parpinel, M. (1999). Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*, 10, 94–100.

Nuray, K., Hande, S.B. and Feryal. K. (2007). Kinetics of color changes in dehydrated carrots. *Journal of Food Engineering*, 78 : 449 – 455.

Oszmiański, J., Wojdyło, A., & Lachowicz, S. (2016). Effect of dried powder preparation process on polyphenolic content and antioxidant activity of blue honeysuckle berries (*Lonicera caerulea* L. var. *kamtschatica*). *LWT - Food Science and Technology*, 67, 214–222. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.051>

lwt.2015.11.051

Pan, Y.K, Wu, H., Li, Z.Y., Mujumdar, A.S. and Kudra, T. (1997). Effect of tempering period on drying of carrot in a vibro fluidized bed. *Drying technology*, 15(6-8): 2037 – 2043.

Pan, Y.K., Zhao, L.J., Dong, Z.X., Mujumdar, A.S. and Kudra, T. (1999). Intermittent drying of carrot in vibrated fluid bed : Effect on product quality. *Drying technology*, 17(10): 2323 – 2340.

Park, Y. W. (1987). Effect of freezing, thawing, drying, and cooking on carotene retention in carrots, broccoli and spinach. *Journal of Food Science*, 52(4), 1022-1025.

Patras, A., Tiwari, B. K., & Brunton, N. P. (2011). Influence of blanching and low temperature preservation strategies on antioxidant activity and phytochemical content of carrots, green beans and broccoli. *LWT-Food Science and Technology*, 44(1), 299-306.

Prabhanjan, D. G., Ramaswamy, H. S., & Raghavan, G. V. (1995). Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food engineering*, 25(2), 283-293.

Rababah, T. M., Ereifej, K. I., & Howard, L. (2005). Effect of ascorbic acid and dehydration on concentrations of total phenolics, antioxidant capacity, anthocyanins, and color in fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(11), 4444–4447. <https://doi.org/10.1021/jf0502810>

Ratti, C. (1994). Shrinkage during drying of food stuffs. *Journal of Food Engineering*, 23(1): 91-105

Raudone, L., Raudonis, R., Liaudanskas, M., Viskelis, J., Pukalskas, A., & Janulis, V. (2016). Phenolic Profiles and Contribution of Individual Compounds to Antioxidant Activity of Apple Powders. *Journal of Food Science*, (August). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13277>

Regier, M.; Mayer-Miebach, E.; Behnlian, D.; Neff, E.; Schuchmann, H.P. Influences of drying and storage of lycopene rich carrots on the carotenoid content. *Drying Technology* 2005, 23 (4), 989–998.

Sablani, S. S. (2006). Drying of fruits and vegetables: retention of nutritional/functional quality. *Drying technology*, 24(2), 123-135.

Shivhare, U. S., Gupta, M., Basu, S., & Raghavan, G. S. V. (2009). Optimization of blanching process for carrots. *Journal of food process engineering*, 32(4), 587-605.

Singhanat, P. And Jeeranan, W. (2010). Desorption isotherms and drying characteristics of carrot using tray and heat pump assisted dehumidified drying. *KKU Res J.* 15(3): 171-180.

Sra, S. K., Sandhu, K. S., & Ahluwalia, P. (2011). Effect of processing parameters on physico-chemical and culinary quality of dried carrot slices. *Journal of food science and technology*, 48(2), 159-166.

Suvarnakuta, P.; Devahastin, S.; Mujumdar, A.S. Drying kinetics and b-carotene degradation in carrot undergoing different drying processes. *Journal of Food Science* 2005, 70 (8), S521–S526.

Tsao, R., Yang, R., Xie, S., Sockovie, E., & Khanizadeh, S. (2005). Which polyphenolic compounds contribute to the total antioxidant activities of apple? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(12), 4989–4995. <https://doi.org/10.1021/jf048289h>

Tsao, R., Yang, R., Young, J. C., & Zhu, H. (2003). Polyphenolic profiles in eight apple cultivars using high-performance liquid chromatography {(HPLC)}. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(21), 6347–6353. <https://doi.org/10.1021/jf0346298>

Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2007). Changes in quality of microwave-treated agricultural products—a review. *Biosystems engineering*, 98(1), 1-16.

Valeria, S.E., Carmen, R., Antoni, F. and Susana, S. (2011). Moisture sorption isotherm and thermodynamic properties of carrot. *International Journal of Food Engineering*, 7(3), Article 13.

Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Di Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. *Granny Smith*) slices. *Food Chemistry*, 132(1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.029>

Vera, L., Bruno, Z. and Anna, Z. (2007). Effect of water activity on carotenoid degradation in dehydrated carrot. *Food Chemistry*, 104: 1705-1711.

Witrowa-Rajchert, D., & Rząca, M. (2009). Effect of Drying Method on the Microstructure and Physical Properties of Dried Apples. *Drying Technology*, 27(7–8), 903–909. <https://doi.org/10.1080/07373930903017376>

Wolfe, K., Wu, X., & Liu, R. H. (2003). Antioxidant activity of apple peels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 609–614. <https://doi.org/10.1021/jf020782a>

Zeb, A., and S. Mahmood. 2004. Carotenoids Contents from Various Sources and Their Potential Health Applications. *Pakistan Journal of Nutrition*. 3:199-204. <http://dx.doi.org/10.3923/pjn>.

Zielinska, M. and Markowski, M. (2012). Color characteristics of carrots: Effect of drying and rehydration. *International Journal of Food Properties*, 15(2), 450-466

I.2 TROCKNUNGSSTRATEGIEN, PROZESSE UND ENERGIE

4. Empfehlungen und praktische Erfahrungen (Best Practice Verarbeitung)

Universität Kassel, Fachgebiet Agrar- und Biosystemtechnik, Germany
Meridian Fruchthandelsgesellschaft mbH, Deutschland

Sturm, B., Esper, A.

4.1. Hintergrund

Heutzutage ist gerade in klein- und mittelständischen Verarbeitungsbetrieben die Technik oftmals veraltet. Die Prozesseinstellungen basieren auf Erfahrungswerten, die teilweise viele Jahre alt sind. Die Trocknungszeiten sind dadurch länger als notwendig, was zusammen mit einer suboptimalen Dämmung und Luftstrom zu einem erhöhten Energiebedarf führt.

Verarbeiter müssen mit der bestehenden Technik auf veränderte Verbrauchervünschen reagieren, was häufig zur weiteren Minderung der Gesamteffizienz aller involvierten Prozesse führt.

In den meisten Prozessen werden produktbezogene Informationen nicht überwacht, sondern der Prozess als eine "Blackbox" wahrgenommen. Jedoch gibt es ein großes Potential für die Entwicklungen von Prozessen, die Produktinformationen enthalten, z.B. die Nutzung der Produkttemperatur als direktes Messverfahren der physischen Veränderungen der Produkteigenschaften.

Die Ziele der optimierten Trocknung können direkt aus den vorherigen Zeilen übernommen werden. Es gibt einen Bedarf für die zielgerichtete Steuerung von Trocknungsprozessen in Bezug auf bestimmte Produkteigenschaften (Farbe, Schrumpfung, chemische Zusammensetzung). Jedoch müssen die Lösungen einfach in die Praxis übertragbar sein und Wege gefunden werden, den Energiebedarf zu senken. Mit der Senkung von Produktionszeiten kann der Durchsatz eines Systems gesteigert werden.

Der Ziel dieses Kapitels ist es Ratschläge zu geben, wie die Leistung eines bestehenden Produktionssystems durch den Einsatz einer Reihe umsetzbarer Maßnahmen gesteigert werden kann und folglich die Produktqualität erhöht werden kann.

4.2. Empfehlungen

4.2.1. Verarbeitungskette Trocknung

In Bezug auf das Rohmaterial und die zu erzielenden Eigenschaften des Endprodukts, ist eine Vielzahl an weiteren Verarbeitungsschritten neben dem eigentlichen Trocknen nötig (Abbildung 4.1). Hierbei ist es von äußerster Wichtigkeit, den Einfluss der einzelnen Produktionsschritte auf die Entwicklung der Produktqualität zu verstehen, aber auch die Prozesseffizienz und folglich auf den Bedarf an Ressourcen.

Wie zuvor erwähnt hat jeder Schritt der Verarbeitung einen Einfluss auf die Endproduktqualität aber auch auf die Effektivität auf den Prozess selbst.

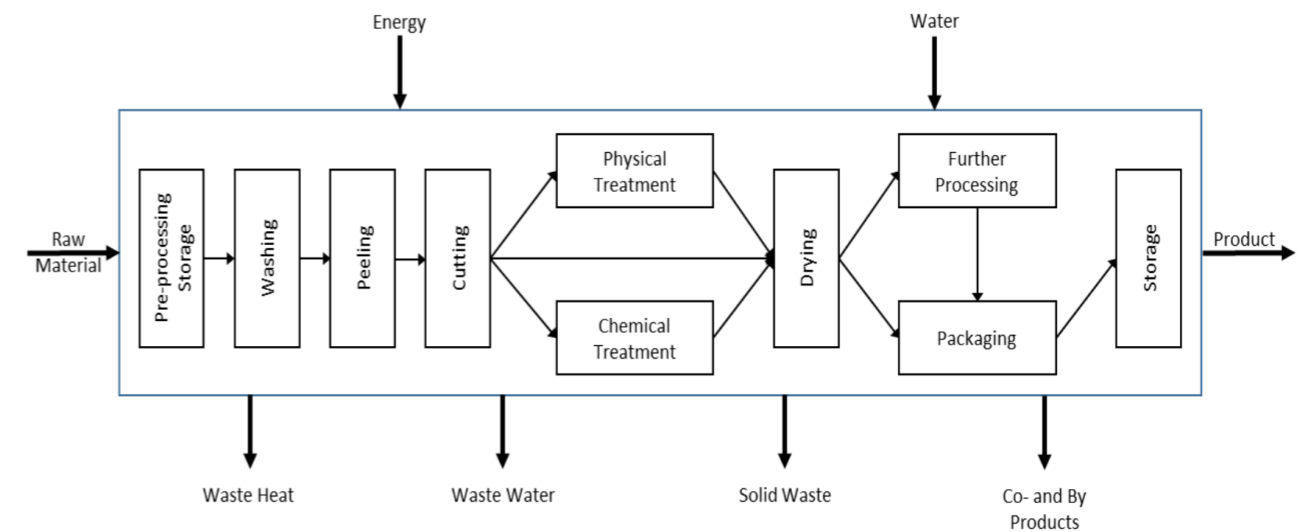


Abbildung 4.1: Übersicht der Verarbeitungsschritte in der Produktion getrockneter, landwirtschaftlicher Güter (Sturm, 2017)

4.2.2. Lagerung vor der Verarbeitung

Generell gibt es zwei Typen pflanzlich basierter landwirtschaftlicher Produkte. Die einen sind sehr empfindlich gegenüber der Lagerung im Rohzustand (Kräuter, Medizinalpflanzen, Hopfen) die anderen können über einen längeren Zeitraum gelagert werden (Äpfel, Möhren, Kartoffeln). Jedoch kommt es in allen Rohmaterialien zu erheblichen Veränderungen während des Lagerns. Daher ist es von höchster Bedeutsamkeit, die Lagerzeit vor der Verarbeitung möglichst gering zu halten und während der gesamten Zeit bestmögliche Bedingungen zu gewährleisten:

- Hochempfindliche Rohstoffe (wird Best-Practice Fall weiter ausgeführt)
 - Sicherstellen, dass Ernte- und Schneidwerkzeuge gut geschärft sind
 - Stumpfe Werkzeuge führen zu signifikanten Beschädigungen der Ware
 - Wenn möglich sollte die Rohware sofort nach der Ernte getrocknet werden
 - Wenn eine sofortige Trocknung nicht möglich ist muss sichergestellt sein, dass die Rohware in der Zwischenzeit gut durchlüftet wird um das "Schwitzen" und mikrobielle Aktivität zu vermeiden.
 - Einrichtung eines geeigneten Belüftungssystems
- Lagerfähige Rohware
 - Geeignete Kaltlagerung unter Schutzatmosphäre kann die Geschwindigkeit von Zerfallsprozessen verringern aber nicht stoppen. Ungeeignete Lagerbedingungen beschleunigen Qualitätsveränderungen

- Weiterverarbeitung so bald als möglich nach der Ernte um die höchstmögliche Qualität der Rohware zu erhalten
- Sobald es um eine längerfristige Lagerung geht müssen geeignete Bedingungen geschaffen werden

4.2.3. Vorbereitung

Besonders bei Obst, Gemüse und Fleisch bedarf es bei der Vorbereitung zum Trocknen verschiedene mechanische Prozesse der Rohware wie Schälen und Schneiden. Dabei kommt es zu einer Durchmischung chemischer Komponenten von den Zellinnen- und -zwischenräumen, die normalerweise getrennt sind. Weiterhin gerät die Schnittfläche mit der umgebenden Luft in Berührung, der darin enthaltene Sauerstoff beschleunigt Reaktionen. Diese Reaktionen gehen meist mit einer Farbveränderung einher, was ein Indikator eines Qualitätsverlustes ist.

Die Verwendung geeigneter Werkzeuge (Schneidemaschine, Messer) hilft, negative Auswirkungen auf Grund einer Verringerung unkontrollierter Zellwandverletzungen. In diesem Zusammenhang sind viele Aspekte von höchster Bedeutung um eine hohe Qualität zu erzeugen:

- Vermeidung von Schneidwerkzeugen, die auf hohem mechanischem Druck basieren (Schneidmesser, die nur durch Herrunterdrücken schneiden): der Druck kann zu Quetschungen der Schnittstelle und der Auflagefläche auf dem Schneidbrett führen
- Verwendung von glatten Klingen, Vermeidung geriffelter Klingen (unnötige Strukturverletzungen der Rohware)
- Regelmäßiges Schärfen der Schneidwerkzeuge: stumpfe Instrumente resultieren in einer risigeren Schneidfläche als geschärfte (Vergrößerung der Oberfläche = vermehrte Reaktionsmöglichkeiten)
- Wenn möglich Keramikklingen benutzen
- Sollte die Vorbereitung einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen, sind die Schneidwerkzeuge regelmäßig zu säubern/zu wechseln: mit der Zeit sammeln sich Schneidreste an den Ecken, die mit der umgebenden Atmosphäre reagieren. Teile davon werden folglich auf frische Schneidflächen verschleppt, was zu vermehrten Abbauprozessen führen kann. In der Fleischverarbeitung kann es zudem zu einer erhöhten mikrobiellen Kontamination kommen.

4.2.4. Vorbehandlung

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, gibt es verschiedene Möglichkeiten der Vorbehandlung pflanzlicher Rohware um die nachteiligen Effekte der umgebenden Luft während der Vorbereitung und der Verarbeitung zu reduzieren. Diese sind die Anwendung von natürlichen Antioxidantien oder das Blanchieren. Die Anwendung natürlicher Antioxidantien, z. B. Ascorbinsäure- oder Zitronensäurelösung, zeigt häufig gute Erfolge wenn es um die Erhaltung der Farbe und natürlich vorkommender Inhaltsstoffe geht, jedoch kann dies sehr aufwendig sein. Dahingegen ist das Blanchieren eine einmalige Aufwendung und wasserbasiert. Jedoch kann es beim

Blanchieren teilweise zu hitzebedingten Zerfallsprozessen kommen. Dies ist erwünscht um bestimmte Enzyme, die z. B. für die enzymatische Bräunung und andere Zerfallsprozesse verantwortlich sind, zu inaktivieren, für viele andere Inhaltsstoffe jedoch ist es unerwünscht.

- Natürliche Antioxidantien
 - Zu empfehlende Konzentrationen hängen stark vom jeweiligen Produkt, der Rohwarequalität und deren Heterogenität ab
 - Die Effektivität hängt weiterhin ab von:
 - Der Zeit zwischen Vorbereitung und Trocknungsprozess
 - Den Prozessbedingungen während der Trocknung
 - In einigen Fällen ist kein bedeutsamer Vorteil einer Vorbehandlung erkennbar
- Blanchieren
 - Zerstörung chemischer Bestandteile als eine Funktion von Temperatur und Zeit
 - Blanchieren bei geringen Temperaturen über einen längeren Zeitraum zerstört empfindliche Substanzen im Rohmaterial signifikant
 - Lange Blanchierzeiten fördern die Auswaschung von Inhaltsstoffen der Rohware in das umgebende Wasser
 - Hohe Temperaturen – kurzes Blanchieren wird empfohlen um die Qualität des Rohmaterials zu erhalten. Eigene Untersuchungen im SusOrganic Projekt haben gezeigt, dass die geringsten Verluste für Möhrenscheiben (5 cm Dicke) bei 90-95 °C für 1,5 bis 3 Minuten auftreten.
 - Blanchieren sollte nur genutzt werden, falls zwingend notwendig:
 - Für gewöhnlich ist die Qualitätserhaltung nach dem Blanchieren geringer als bei unbehandelten Proben
 - Wenn eine lange Lagerung angestrebt wird, sollte nicht auf das Blanchieren verzichtet werden, da Zerfallsprozesse so verringert werden können.
 - Bei langen Wartezeiten zwischen Schneiden und Trocknung sollte ebenfalls blanchiert werden, s. nachfolgende Abschnitte
- Sortenauswahl
 - Es sollten jeweils Sorten ausgewählt werden, die eine geringe Empfindlichkeit gegenüber der Bräunung aufweisen

4.2.5. Verweildauer zwischen Vorbereiten und Trocknen

Bei Obst und Gemüse hat die Zeit, die zwischen dem Schneiden und dem Trocknen vergeht, einen entscheidenden Einfluss auf die darauf folgende enzymatische Bräunung. Wird ein Schrankrockner verwendet, ist die beste Strategie, den Trocknungsprozess sofort zu starten und die Horden, nachdem sie jeweils befüllt sind, hineinzuschieben. Dies reduziert die Zeitspanne, in der die enzymatische Bräunung auftreten kann, signifikant. Jedoch muss hier darauf geachtet werden, die Horden in genau der selben Reihenfolge wieder aus dem Trockner zu entfernen, der Trockner wird mit Entfernen der letzten Horde ausgeschaltet.

- Sofortiges Überführen der Horde nachdem sie befüllt wurde.
 - Der Energiebedarf wird bei dieser Trocknungsmethode nur unwesentlich beeinflusst, da sich der Trocknungsprozess insgesamt beschleunigt. In der Praxis werden Trockner bezogen auf ihre Kapazität, das Wasser zu entziehen, häufig überladen. Dies führt zu längeren Trocknungszeiten und gleichzeitig zu Zerfallsprozessen.

4.2.6. Einfluss der Partikeldicke

Die Erwärmung und der Abtransport des Wassers in und von einem Produkt hängt stark von seiner Geometrie ab. Während dickere Partikel hinsichtlich einer kürzeren Verarbeitungszeit und einer höheren Kapazität des Trockners zunächst besser erscheinen, hat dies oft negative Auswirkungen auf die Produktqualität auf Grund der erhöhten Trocknungszeit. Wie in wissenschaftlichen und praktischen Tests gezeigt werden konnte, bewirkt eine Verringerung der Partikeldicke um 50 % eine Verringerung der Trocknungszeit um 70 %. Ein Beispiel dazu zeigt Abbildung 4.2.

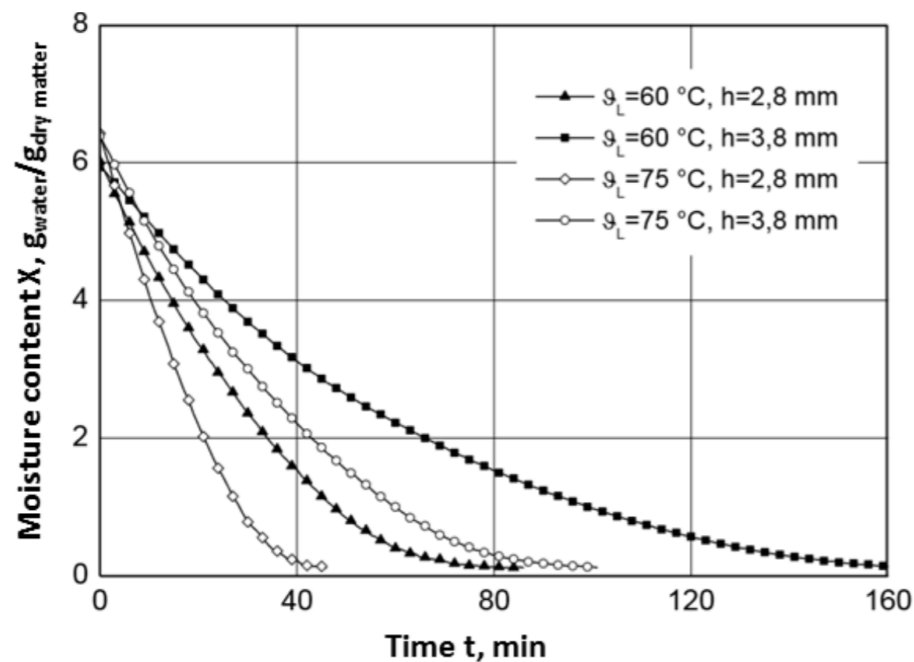


Abbildung 4.2: Trocknungsverhalten in Abhängigkeit der Scheibendicke und Lufttemperatur (übernommen aus Sturm, 2010)

- Durch Verringerung der Produktdicke erhöht sich die Trocknungseffizienz und die Produktqualität
- Schaffung von Kostenvorteile durch erhöhten Arbeitsaufwand in der Vorbereitung

4.2.7. Trocknung

Wie zuvor dargestellt, sind Veränderungen im Produkt eine Funktion von Temperatur und Zeit. Daraus folgt, dass längere Trocknungszeiten bei geringeren Temperaturen einen höheren Einfluss auf die Produktqualität haben als ein kurzer Trocknungsprozess bei höherer Temperatur.

Schrankrockner weisen häufig die Problematik einer ungleichen Luftverteilung zwischen den Horden, aber auch innerhalb der einzelnen Horden auf. Dies macht ein Umschichten der Horden nötig, manchmal wiederholt. Wo immer möglich, sollte das System so umgestaltet werden, dass eine gleichmäßige Luftverteilung gewährleistet ist, durch eine schrittweise Verringerung der Weite des Luftkanals wie in Abbildung 4.3 oder durch andere geeignete Maßnahmen.



Abbildung 4.3: Luftverteilung in einem Schrankrockner (Innotech Ingenieurgesellschaft mbH)

Trockner sind mit einer festgelegten maximalen Wärmeversorgung und Ventilatorkapazität ausgerüstet. Dies führt zu einer definierten maximalen Trocknungskapazität. Zu Beginn des Prozesses, wenn das Gut noch sehr feucht ist, ist die Menge an Wasser, die pro Minute abtransportiert werden muss um ein Vielfaches höher als zu einem späteren Zeitpunkt. Daher ist es von allerhöchster Wichtigkeit, den Trockner nicht zu überladen.

In vielen Fällen ist der Ventilator in Bezug auf den Luftheizer unterdimensioniert. Dies heißt, dass der Luftstrom nicht die gesamte Menge an verdunstetem Wasser abtransportieren kann. Als Folge kondensiert Wasser an der Produktoberfläche und fördert Zerfallsprozesse.

- Die gleichmäßige Luftverteilung im gesamten Trockner muss sichergestellt werden, andern-

falls wirkt sich dies auf unterschiedliche Restfeuchten einzelner Partikel aus und somit auf die Produktqualität

- Der Trocknungsprozess wird gestoppt werden, sobald der zuvor festgelegte Endfeuchtegehalt erreicht ist
 - Das eigene Wissen sollte genutzt werden
 - Kostengünstige Lösungen sind bisher auf dem Markt nicht verfügbar
- Überladen vermeiden → Kenntnis über Ventilatoren- und Luftheritzerkapazität
- Ist die Kapazität des Ventilators zu gering um anfallende Mengen an Feuchtigkeit zu transportieren, sollte zu Beginn des Trocknungsprozesses die Trocknungstemperatur verringert werden
- Wenn möglich sollte in drehzahlveränderbare Ventilatoren investiert werden mit einer ausreichenden Kapazität gerade für den Beginn der Trocknung

4.2.8. Best-Practice Verarbeitung von Kräutern und Hopfen

Hopfen und Kräuter werden in der Regel in Schüttgutrocknern getrocknet, wobei die Luft das System von unten durchströmt. Abhängig von der zu produzierenden Menge werden Mehrstufentrockner eingesetzt. Das nachfolgende Best Practice Beispiel stellt einfache Maßnahmen zur Erreichung einer höheren Produktivität und Produktqualität in den Vordergrund.

4.2.8.1. Vorbereitung/ Rohmaterialhandhabung

Kräuter und Hopfen sind gegenüber Zerfallsprozessen nach der Ernte sehr empfindlich. Als allgemeine Regel gilt, die Rohware nach der Ernte nicht länger als vier Stunden zu lagern um eine hinreichende Qualität des Endproduktes zu erzeugen. Die Lagerungsbedingungen selber haben einen großen Einfluss und können Zersetzungsprozesse fördern. Bei der Lagerung muss darauf geachtet werden, die Schüttung ausreichend zu belüften um die Bildung frei werdender Feuchtigkeit zu verhindern. Abbildung 4.4 zeigt ein Beispiel getrockneter Hopfendolden, die zuvor unter optimalen Bedingungen (links) und solchen, die unzureichend gut (ohne Belüftung) gelagert wurden, und so begonnen haben zu schwitzen (rechts), was eine Farbveränderung zur Folge hat. Dies wiederum zeigt deutliche chemische Veränderungen innerhalb des Produktes an.



Abbildung 4.4: Vor der Trocknung unter guten Bedingungen gelagerter Hopfen (links) und unter schlechten Bedingungen gelagerter Hopfen (rechts) (Münsterer, 2015)

4.2.8.2. Vorverarbeitung

Werden Kräuter vor der Trocknung geschnitten um die Trocknungsrate zu erhöhen, kann das deutliche Qualitätsminderungen nach sich ziehen, da die Schnittfläche vermehrt enzymatischen Reaktionen ausgesetzt ist, was im ungeschnittenen Zustand nicht möglich ist.

4.2.8.3. Trocknung

4.2.8.3.1. Luftverteilung

Eine gleichförmige Luftbewegung ist unabdingbar für ein gleichmäßiges Trocknungsverhalten des Produkts. Daher ist es von höchster Wichtigkeit alle Maßnahmen zur Behebung zu ergreifen, sofern das Problem der ungleichmäßigen Luftverteilung auftritt. Abbildung 4.5 zeigt die Problematik eines falschen Lufteinlasses eines Durchstromtrockners, der häufig in der Kräuter- und Hopfentrocknung zu finden ist. Mit einer Verringerung der Luftgeschwindigkeit (und somit dem Volumenstrom) von links nach rechts, erhöht sich die Trocknungszeit signifikant.

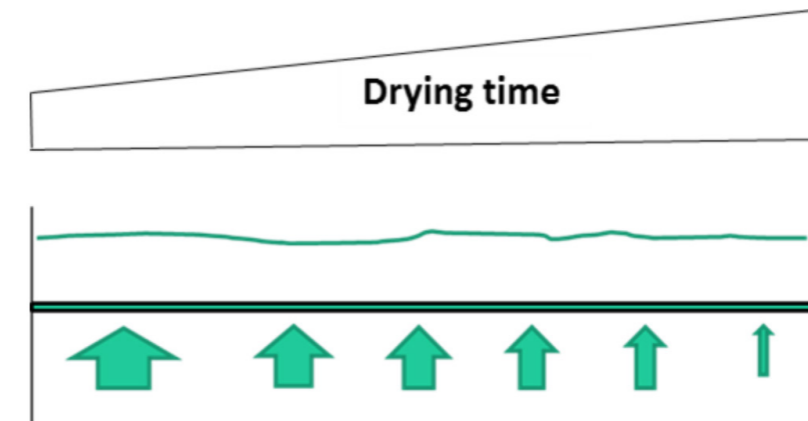


Abbildung 4.5: Einfluss der ungleichen Luftverteilung über die Länge des Trockners auf die Trocknungszeit der Schüttung (Sturm, 2017b)

In der Praxis wird dieses Problem oft dahingehend angegangen, dass die Schüttung regelmäßig durchmischt wird. Dies ist sehr arbeitsintensiv und anstrengend, besonders unter Berücksichtigung der dort herrschenden Umgebungstemperatur zwischen 40-45 °C und einer Luftfeuchtigkeit von bis zu 100 %. Diese Maßnahme lindert zwar das Problem, kann aber niemals ähnliche Trocknungszeiten und Qualitäten erzeugen, wie eine gleichmäßige Luftverteilung. Daher sollten, wo immer möglich, Maßnahmen ergriffen werden um eine gleichmäßige Luftverteilung zu erwirken. Neben einstufigen Durchstromtrocknern sind mehrstufige Trockner in der Hopfen- und Kräutertrocknung weit verbreitet. Bei diesen Trocknern sind für den Verarbeiter nur die oberste (Einfüllen des frischen Materials) und die unterste Horde (Entnahme des Endproduktes) zugänglich. Das Produkt wird stufenweise gekippt was zu einer ungleichen Verteilung des Materials führen kann und somit zu einer ungleichmäßigen Trocknung und der Entstehung von „Hotspots“ mit hohen Feuchtegehalten, sogenannten Feuchtenestern, s. Abbildung 4.6.

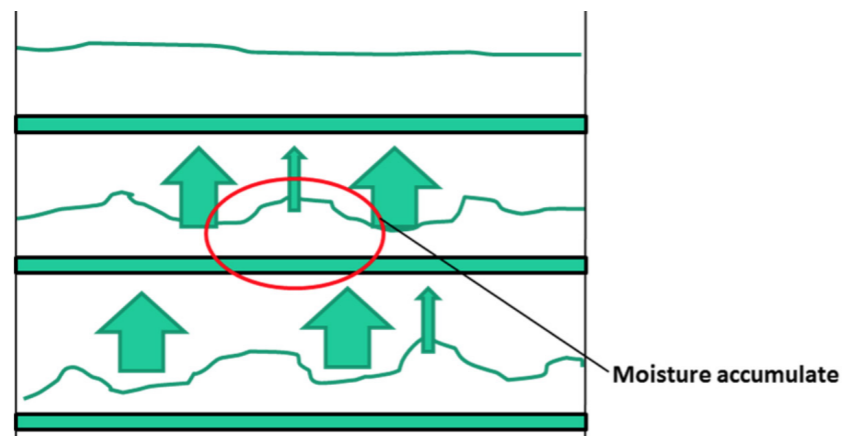


Abbildung 4.6: Verteilung des Schüttguts und der Luft in einem Mehrphasentrockner (Sturm, 2017b)

4.2.8.3.2 Schütthöhe/-gewicht

Trocknungszeit und -temperatur innerhalb der Schüttung und die Entwicklung der Luftfeuchtigkeit sind direkt von einem hohen/spezifischen Gewicht des Rohmaterials beeinflusst, s. Abbildung 4.7. Die Luft, die durch die Schüttung strömt, gibt Wärme an das Produkt ab und transportiert Feuchte von der Oberfläche ab. Dies führt gleichzeitig zu einer Verringerung der Lufttemperatur und dem Anstieg der relativen Luftfeuchte. Je mehr Material in den Trockner gefüllt wird, desto stärker sind die Verringerung der Lufttemperatur, der Anstieg der Luftfeuchte und die Trocknungsdauer.

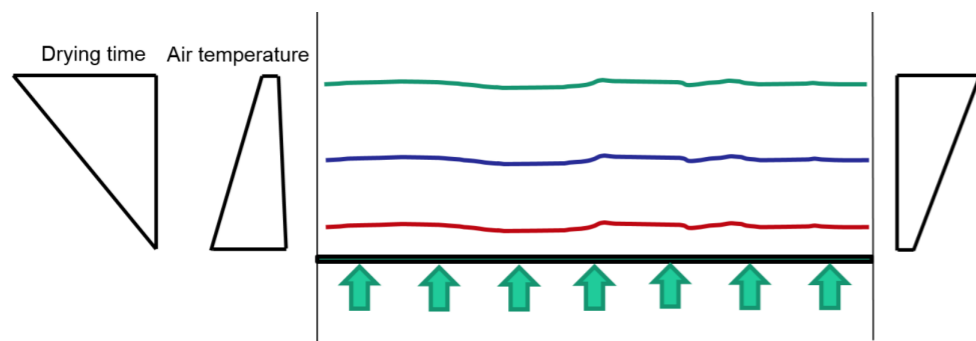


Abbildung 4.7: Einfluss von Schütthöhe /-gewicht auf Lufttemperatur, Luftfeuchte und Trocknungsdauer.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig sicherzustellen, dass das abtransportierte Wasser der niedrigeren Lagen nicht an den weiter oben liegenden (und noch kälteren) Schüttungen rekondestriert. Gleichzeitig muss das Wasser von der Oberfläche der oberen Lagen zuverlässig abtransportiert werden. Dies kann durch die Erhöhung der Luftstromrate (spezifischer Volumenstrom) zu Beginn des Prozesses, wenn das Rohmaterial noch sehr feucht ist und große Mengen an Feuchtigkeit freigibt, erreicht werden. Ist dies nicht möglich, weil die Höchstkapazität des Ventilators schon erreicht ist, ist es ratsam in dieser Trocknungsphase die Lufttemperatur zu reduzieren um die Wasserevaporationsrate zu senken und wiederum zu vermeiden, dass sich Feuchte in den

oberen Bereichen ansammelt. Weiterhin sollte die Luftfeuchte über der Schüttung 70 % nicht übersteigen, was der Gleichgewichtsfeuchte entspricht.

Viele Verarbeiter befüllen ihre Trockner basierend auf der Schütthöhe. Praktische Tests im Bereich der Hopfentrocknung haben jedoch gezeigt, dass das Schüttgewicht ein sinnvolles Maß ist, das zu einem gleichmäßigeren Trocknungsergebnis führt.

4.2.8.3.2 Schüttdichte /-produkt

Trocknungszeit und -temperatur innerhalb der Schüttung und die Entwicklung der Luftfeuchtigkeit sind direkt von einem hohen/spezifischen Gewicht des Rohmaterials beeinflusst, s. Abbildung 4.7. Die Luft, die durch die Schüttung strömt, gibt Wärme an das Produkt ab und transportiert Feuchte von der Oberfläche ab. Dies führt gleichzeitig zu einer Verringerung der Lufttemperatur und dem Anstieg der relativen Luftfeuchte. Je mehr Material in den Trockner gefüllt wird, desto stärker sind die Verringerung der Lufttemperatur, der Anstieg der Luftfeuchte und die Trocknungsdauer.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig sicherzustellen, dass das abtransportierte Wasser der niedrigeren Lagen nicht an den weiter oben liegenden (und noch kälteren) Schüttungen rekondestriert. Gleichzeitig muss das Wasser von der Oberfläche der oberen Lagen zuverlässig abtransportiert werden. Dies kann durch die Erhöhung der Luftstromrate (spezifischer Volumenstrom) zu Beginn des Prozesses, wenn das Rohmaterial noch sehr feucht ist und große Mengen an Feuchtigkeit freigibt, erreicht werden. Ist dies nicht möglich, weil die Höchstkapazität des Ventilators schon erreicht ist, ist es ratsam in dieser Trocknungsphase die Lufttemperatur zu reduzieren um die Wasserevaporationsrate zu senken und wiederum zu vermeiden, dass sich Feuchte in den oberen Bereichen ansammelt. Weiterhin sollte die Luftfeuchte über der Schüttung 70 % nicht übersteigen, was der Gleichgewichtsfeuchte entspricht.

Viele Verarbeiter befüllen ihre Trockner basierend auf der Schütthöhe. Praktische Tests im Bereich der Hopfentrocknung haben jedoch gezeigt, dass das Schüttgewicht ein sinnvolles Maß ist, das zu einem gleichmäßigeren Trocknungsergebnis führt.

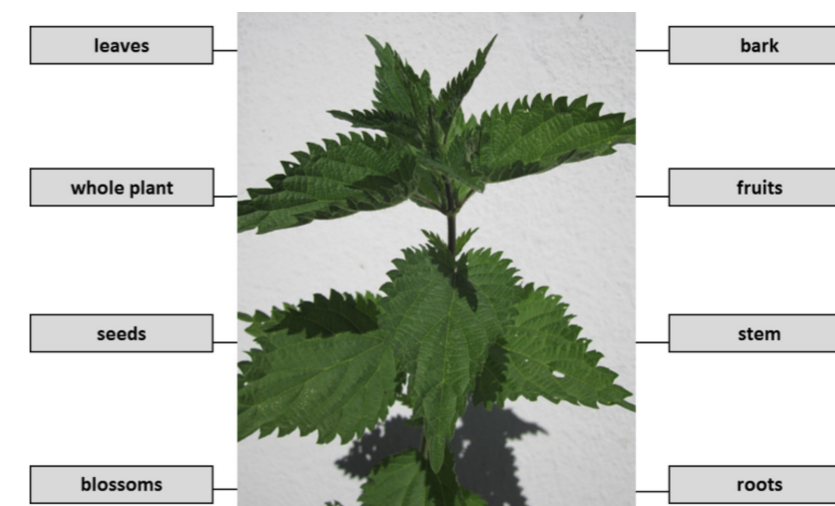


Abbildung 4.8: Häufig genutzte Teile von Pflanzen

Abbildung 4.9 zeigt die Bestandteile der Hopfendolden verschiedener Sorten.



Abbildung 4.9: Einfluss der Sorte auf die Zusammensetzung von Hopfendolden (Münsterer, 2015)

4.3. Berücksichtigung der Produkttemperatur in der Messung und Regelung des Trocknungsprozesses

Es ist hinreichend bekannt, dass die Produkttemperatur ein entscheidender Faktor in Bezug auf die Qualität eines Produktes ist. Dennoch wird in den meisten Trocknungsprozessen nur die Lufttemperatur geregelt, während die Produkttemperatur völlig unberücksichtigt bleibt.

Besonders in der biologischen Verarbeitung, in der die meisten Prozesse eine Temperatur von 45 °C nicht übersteigen sollen, kann das Einbeziehen der Produkttemperatur in die Prozesssteuerung dazu beitragen, die Prozessleistung zu steigern und die wertvollen Inhaltsstoffe der Produkte zu schützen. Abbildung 4.10 zeigt die typischen Verläufe der Lufttemperatur (schwarz) und Produkttemperatur (rot) in der Luft- (links) und Produkttemperatur (rechts) gesteuerten Trocknung.

Sturm (2010) zeigt außerdem, dass es möglich ist, stufenweise Trocknungsstrategien herzuleiten, basierend auf der Entwicklung der Produkttemperatur über den gesamten Prozess, und somit die Produktqualität weiter zu steigern.

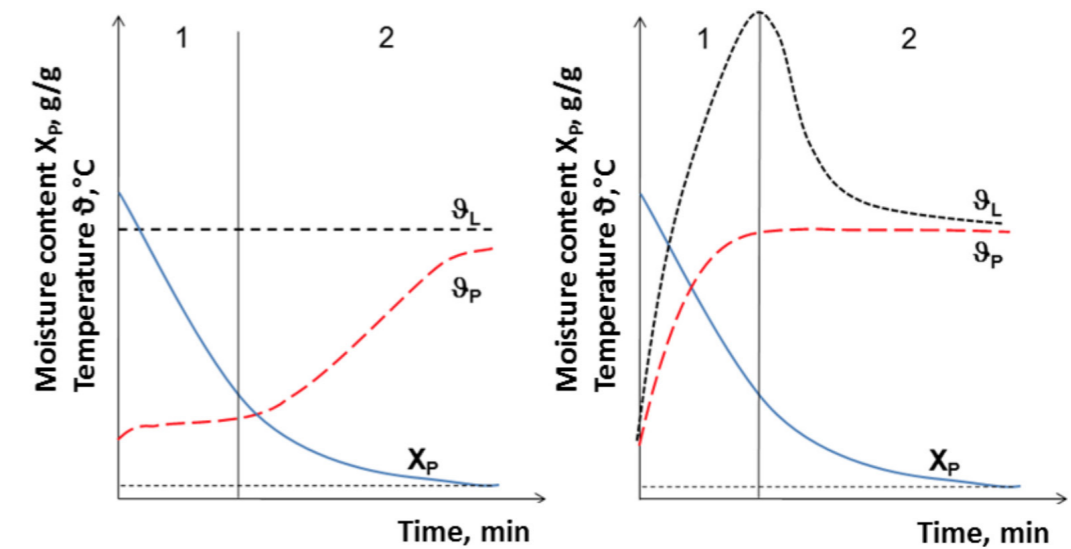


Abbildung 4.10: Temperaturentwicklungen während der Luft- (links) und Produkttemperatur (rechts) gesteuerten Trocknung (Sturm, 2010)

4.4. Optimierung Energie bereitstellender Systeme und Integration erneuerbarer Ressourcen

Besonders in der biologischen Branche ist die Nutzung regenerativer Ressourcen ein wichtiger Aspekt um vermehrt die nachhaltige Produktion zu fördern. Wenn eine solche Investition anvisiert wird, ist Folgendes unbedingt zu beachten:

- Zunächst muss die Produktions- und Wärmanlage optimiert werden
 - Der gegenwärtige Energiebedarf ist zu bewerten und mit Referenzen zu vergleichen und/oder Experten sind hinzuzuziehen
 - Die Dämmung muss, wo nötig, verbessert werden
 - Optimierung von Prozessbedingungen
 - Abwärmerückgewinnung
- Überlegungen zur Integration erneuerbarer Energien
 - Jährliche Nutzung der Anlage
 - Nutzungszeiten über den Tag
 - Standort
 - Mix mit Netzenergie

- Integrationsmöglichkeiten Erneuerbare Energien in Bezug auf Nachhaltigkeit
 - Biomasse
 - Holzbasiert einfach nachzurüsten
 - Nachhaltigkeit ist sehr stark an die Waldbewirtschaftung gekoppelt
 - Wärmegruppen
 - Gut geeignet für Prozesse, die über längere Zeiträume stattfinden
 - Die Nachhaltigkeit hängt stark von der im jeweiligen Land verfügbaren Energiemix ab
 - Solar thermisch und Photovoltaik
 - Nur geeignet für Prozesse, die eine hohe Anzahl an Stunden pro Jahr laufen
 - Nur für Regionen mit einer angemessenen Sonneneinstrahlung in der Prozessphase

4.5. Referenzen

Münsterer, J. (2015). Neueste Erkenntnisse zur Leistungssteigerung und Energieeffizienz bei der Trocknung von Hopfen (Newest insights into the increase of throughput and energy efficiency in hop drying), IHB Kongress 2015, 26-31th July 2015, Bad Gögging, Germany.

Sturm, B. (2010). Einfluss der Führung des Trocknungsprozesses auf den Trocknungsverlauf und die Produkteigenschaften empfindlicher biologischer Güter (Impact of process control on the drying kinetics and product characteristics of sensitive biological products).

Forschungsbericht Agrartechnik 491 des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG). (Doctoral Dissertation) (<https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:34-2010102534814/3/DissertationBarbaraSturm.pdf>).

Sturm, B. (2017). Systemic optimisation and design approach for thermal food processes - Increase of quality, process- and resource efficiency in dried agricultural products manufacturing, Habilitationsschrift, University of Kassel, Witzenhausen.

5. Verbesserte Trocknungsstrategien

SINTEF Energy Research, Trondheim, Norwegen
(Bantle et al., 2016)

5.1. Einleitung

Die Trocknung von Obst und anderen Lebensmitteln ist eine alte Technik der Lebensmittelkonservierung, die die Lebensmittelsicherheit bereits Jahrhunderte vor der Industrialisierung dieses Prozesses verbessert hat. Industrialisierte Trocknungsprozesse konnten die Lebensmittelsicherheit, Prozessstabilität und Produktqualität verbessern, während die Verarbeitung nicht mehr vom am Produktionsort herrschenden Klima abhängig war. Die meisten Verarbeiter haben über viele Jahre ihre eigenen Prozessparameter entwickelt, die ihren Produkten das kennzeichnende Aussehen und Geschmack geben. Die Trocknungstechnik jedoch ist ähnlich, die Prozessparameter, die am häufigsten gesteuert werden, die Temperatur und die Feuchte der Trocknungsluft sind. Jeder Trocknungsprozess hängt von der Verfügbarkeit eines Trocknungsmediums ab (meistens Luft), welche das verdunstende Wasser vom Produkt abtransportiert und gleichzeitig die notwendige latente Wärme zur Verdunstung zur Verfügung stellt. Daher stellt die Trocknung einen kombinierten Prozess von Wärme- und Massenstrom dar. Das Design einer Trocknungskammer sollte einen guten Kontakt zwischen Trocknungsluft und Produkt ermöglichen und ist somit entscheidend für Trocknungsrate, Produktionszeit und Produktqualität. Das Versorgungssystem des Trocknungsmediums stellt ausreichend Platz für die Menge an Trocknungsluft bei einer bestimmten Temperatur und Luftfeuchte zur Verfügung. Die Wirtschaftlichkeit eines Trocknungsprozesses hängt somit vom Aufbau des Versorgungssystems ab, während die Produktqualität von anderen Parametern in der Trocknungskammer beeinflusst wird. Im Folgenden werden die verschiedenen Eigenschaften von Trocknungssystemen beschrieben, die in industriellen Trocknungsprozessen genutzt werden.

5.2. Trocknung mit erwärmter Umgebungsluft (Heated Ambient Air Drying)

Traditionell wurde die Trocknung mit Umgebungsluft für die Trocknung von Obst genutzt und viele Verarbeiter nutzen sie heute noch als Trocknungsmedium, besonders in Region, in denen das Klima passend zu den Trocknungsbedingungen ist. Ein auf der Umgebungsluft basiertes Trocknungssystem hat einen relativ einfachen Aufbau und ist somit auch mit geringen Investitionskosten verbunden. Dies mag einer der Gründe sein, warum sich dieses System so großer Beliebtheit erfreut. Meistens reicht die Temperatur der Luft nicht aus, daher wird sie zunächst über einen Wärmetauscher erhitzt und gelangt dann direkt in die Trocknungskammer. Aus hygienischen Gründen ist es ratsam, einen Luftfilter zu integrieren. Über die Steuerung des Wärmetauschers kann die gewünschte Temperatur erzeugt werden. Die Feuchtigkeit der Trocknungsluft kann angeglichen werden, indem Teile der feuchten Abluft mit der frischen Luft gemischt werden. Umgebungslufttrocknungssysteme sind stark von der saisonalen Zusammensetzung der Luft ab, und Probleme treten dann auf, wenn die Luftfeuchtigkeit zu hoch ist. Die Wirtschaftlichkeit dieses Systems hängt folglich von der aufzubringenden Erwärmung der Luft ab und von der

saisonalen Variabilität der Umgebungsluft ab. Wenn die Energie, die zur Erwärmung benötigt wird, aus Abwärme anderer Systemen genutzt werden kann, kann dieser Prozess sehr wirtschaftlich sein. Wird jedoch eine extra Energiequelle für diesen Schritt benötigt, kann die Trocknungseffizienz (welche sich aus der für die Verdunstung verbrauchte latente Wärme, geteilt durch die bereitgestellte Wärme insgesamt, ergibt) sehr gering sein. Dies ist speziell dort der Fall, wo die Temperatur der Umgebungsluft deutlich unter der benötigten Trocknungsluft liegt.

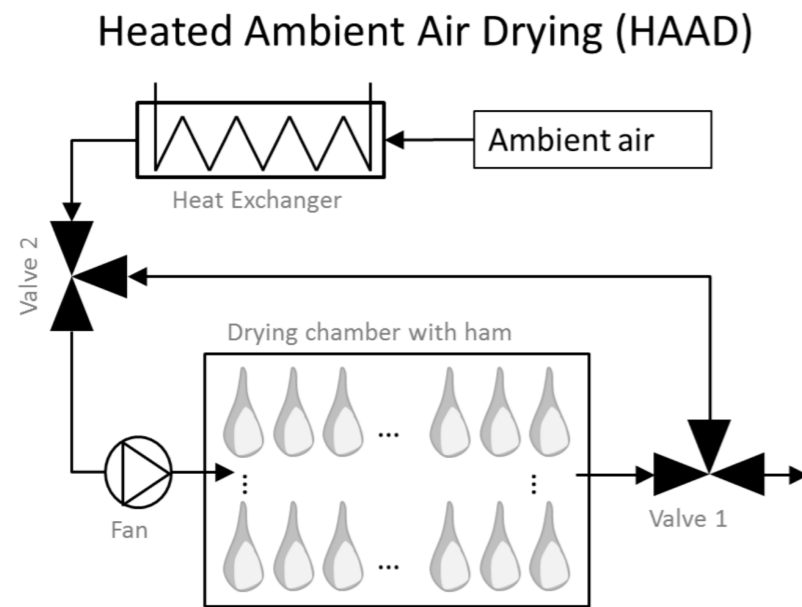


Abbildung 5.1: Skizze eines Warmlufttrockners, industrielle Nutzung

5.3. Trocknungssystem mit geschlossenem Kreislauf

Zirkuliert die Trocknungsluft während des Prozesses in einem Kreislauf, ist der Prozess unbeeinflusst von der Umgebungsluft und somit stabiler, sodass weniger Regelung nach der Festlegung der Prozessbedingungen nötig ist. Dennoch muss das verdunstete Wasser aus der Trocknungsluft entfernt werden. Dies geschieht normalerweise durch Absenkung der Temperatur unter ihren Taupunkt, sodass die Feuchte kondensiert. Die entfeuchtete Luft muss dann in einem zweiten Wärmetauscher wieder erwärmt werden. Die Wärmetauscher für die Kühlung werden mit einem Kühlmedium ausgestattet, das von einem separaten Kühlsystem temperiert wird. Das gleiche Prinzip kann auch für den Wärmetauscher verwendet werden, der die Trocknungsluft wieder erwärmen soll. In einigen Fällen wird hierfür aber auch direkte Wärme genutzt um ein weiteres Wärmesystem zu vermeiden und um Wärmeübertragungsverluste gering zu halten. Die Regelung eines Systems mit geschlossenem Kreislauf erfolgt durch die Steuerung des Massenstroms der Wärme- und Kühlmedien durch ihre jeweiligen Pumpen. Es ist weiterhin auch möglich, Abwärme anderer Prozesse für die Wiedererwärmung der Trocknungsluft zu nutzen. Die Investitionskosten für ein geschlossenes Kreislaufsystem sind moderat, können jedoch auch höher sein, durch die Nutzung zwei verschiedener Wärmesysteme (Kühlung, gefolgt von Erwärmung) oder wenn mehr

Subsysteme gebraucht werden. Die Trocknungseffizienz liegt daher oft unter 30 %. Die Steuerung ist jedoch sehr einfach und der Prozess stabil, weshalb dieses System häufig Anwendung in der Industrie findet.

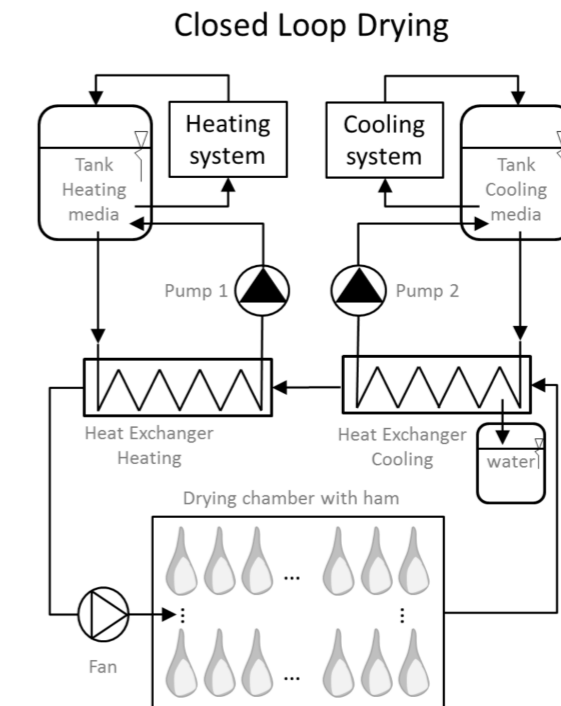


Abbildung 5.2: Industrielle Trocknung im geschlossenen Kreislaufsystem, welche Kühlung und Erwärmung der zirkulierenden Luft benötigt um das verdunstete Wasser zu entfernen.

5.4. Wärmepumpentrocknung

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl von Wärmepumpen in verschiedenste Systeme, Prozesse und Anwendungen integriert. Speziell als Heizquelle für Wohnhäuser ist der Marktanteil von Wärmepumpen gestiegen, auch weil sie mit zu den erneuerbaren Energien zählt. Industrielle Wärmepumpensysteme werden allgemein als energieeffiziente Maßnahmen eingestuft, bei der Wärmequellen niedrig Temperatur so aufgewertet werden, dass eine höhere Temperatur zur Verfügung gestellt werden kann. In einigen Ländern ist der Marktanteil an Wärmepumpen sehr gering (z. B. Deutschland) und lokale Energiepreise aber auch Überlegungen zum Investitionsrückfluss beeinflussen Entscheidungsträger stark.

Eine deutsche Studie (Wolf et al., 2014) hat das Potential von Wärmepumpen für verschiedene Industriebranchen basierend auf 34 europäischen Ländern evaluiert. Industrielle Wärmepumpen mit einer Wärmesenke von bis zu 100 °C sind als konventionell erhältliche Wärmepumpen deklariert. Es ist darauf hinzuweisen, dass zu diesem Zweck Kühlmittel entwickelt wurden und werden, während natürliche Kühlmittel (R717, R718 und R744) bereits bestehen und Anwendung finden. Der Wärmebedarf von bis zu 100 °C wird auf 650 TWh/Jahr für Europa geschätzt, besonders die Lebensmittel-, Tabak-, Holz-, Papier- und Chemiebranche wurden mit einem Bedarf in diesem

Wärmebereiches identifiziert. In diesen Branchen benötigen Prozesse wie Trocknung, Verdunstung, Kochen, Waschen und Reinigen Temperaturen von unter 125 °C und besonders für Trocknungs- und Verdunstungsprozesse stellt die Abwärme eine ideale Quelle für Wärmepumpen dar. Konvektionstrocknung, basierend auf Luft als Trocknungsmedium, ist eine der am meisten genutzten Konservierungstechnologien und über 85 % aller Trockner sind diesem Typ zuzuordnen. Das Energiesparpotential für Wärmepumpen unterstütztes Trocknen (HeatPumpDrying) ist groß und das Handbuch der Industriellen Trocknung legt eine Trocknungseffizienz von 95 % für diese Trocknung zugrunde, verglichen mit 35-40 % in der Warmlufttrocknung. Die meisten HPD Systeme laufen jedoch bei Trocknungstemperaturen von unter 30 °C.

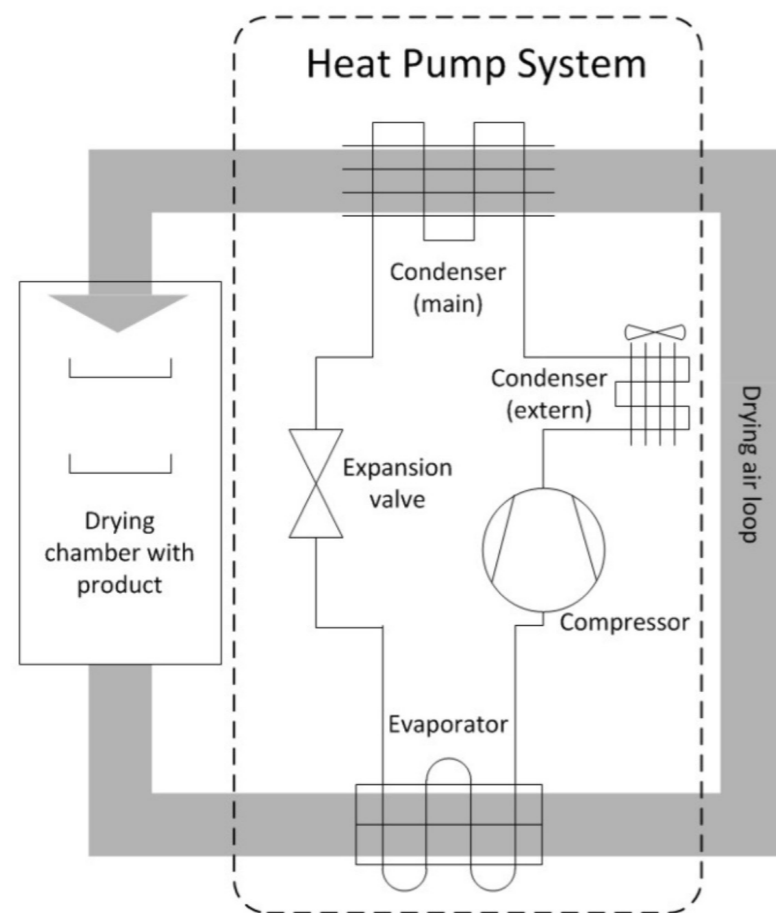


Abbildung 5.3: Prinzipieller Aufbau der Wärmepumpen gestützten Trocknung für die Konvektions(luft)trocknung in einem geschlossenen Kreislauf

Wärmepumpen zeichnen sich durch ihre Möglichkeiten aus, Wärmequellen von niedriger Temperatur zu nutzen (Verdampfer) und eine Wärmeesenke bei höherer Temperatur bereitzustellen (Kondensator). Im Falle der Trocknung ist diese kombinierte Wärme- und Kühllast zur Rückgewinnung der Trocknungsenergie nutzbar (grundsätzlich die latente Wärme des verdunsteten

Wassers), sodass die Energie als entfeuchtete und wiederbeheizte Trocknungsluft wieder in den Trocknungsprozess eingespeist werden kann (s. Abbildung 5.3). Die Wärmepumpentrocknung besteht aus zwei Kreisläufen: einer für die Trocknungsluft, der andere als Kühlkreis.

Am Verdampfer der Wärmepumpe wird die Trocknungsluft unter den Taupunkt runtergekühlt so dass die Feuchte an der Oberfläche des Wärmetauschers kondensiert. Hierbei wird Wärme an das Kühlmittel abgegeben, welches dadurch verdampft wird. Das verdampfte Kühlmittel wird dann verdichtet und kann nun im Kondensator bei höheren Temperaturen kondensieren. Hierbei wird die zuvor übertragene Energie wieder an die Trocknungsluft abgegeben, welche dann auf die ursprünglich gewünschten Bedingungen wiedererwärmt wird. Bei diesem Prozess ist es nötig, einen zweiten, externen Kondensator zu installieren, um die überschüssige Wärme aus dem System hinauszuleiten. Die Hauptquelle für diese überschüssige Energie ist der Kompressor, welcher auch mit einem Drehzahlregler ausgestattet sein sollte um optimale Arbeitsbedingungen bei variierenden Wärme- und Kühllasten zu ermöglichen.

Es wird außerdem empfohlen ein Umgehungsventil für die Trocknungsluft zu installieren, sodass nur die benötigte Menge an Trocknungsluft gekühlt und wiedererwärmt wird, was den Prozess effizienter macht.

Dieses Prinzip kann auch für Trocknungssysteme mit offenem Kreislauf verwendet werden, wenn die Umgebungsluft mithilfe der überschüssigen Wärme der abgekühlten und feuchten Luft, die aus der Trocknungskammer kommt, auf die gewünschte Trocknungslufttemperatur aufgeheizt wird. Jedoch besteht für Wärmepumpen bei offenen Systemen nicht die Möglichkeit, die Feuchte der Trocknungsluft zu regeln, daher sind die meisten angewendeten Systeme geschlossene Kreislauf-trocknungen.

5.5. Simulation der Leistung eines R744 Wärmepumpentrockners

Die Wärmepumpentrocknung setzt voraus, dass die Trocknungsluft nach der Entfeuchtung auf ihre ursprüngliche Temperatur wiedererwärmt wird. Dies führt zu einem signifikanten Temperaturabfall und subkritische Kältemittel führen aufgrund ihrer stabilen Kondensationstemperatur zu hohen Wärmeübertragungsverlusten, sobald die Kondensationstemperatur einige Kelvin über der Temperatur der Abluft liegen sollte. Dies könnte vermieden werden, indem ein Arbeitsfluid in einem transkritischen Zustand verwendet wird, das Wärme bei Gleittemperatur abweist. Die thermodynamischen Eigenschaften R744 scheinen ein geeignetes Kältemittel für die Wärmepumpentrocknung zu sein, insbesondere für Trocknungsprozesse zwischen 30°C und bis zu 70°C. Als natürliches Kältemittel weist R744 per Definition ein Treibhauspotenzial von 1 und ein Ozonabbaupotenzial von 0 auf; daher ist seine Umweltbelastung im Vergleich zu handelsüblichen Hydrofluorolefinen (HFOs) vernachlässigbar gering.

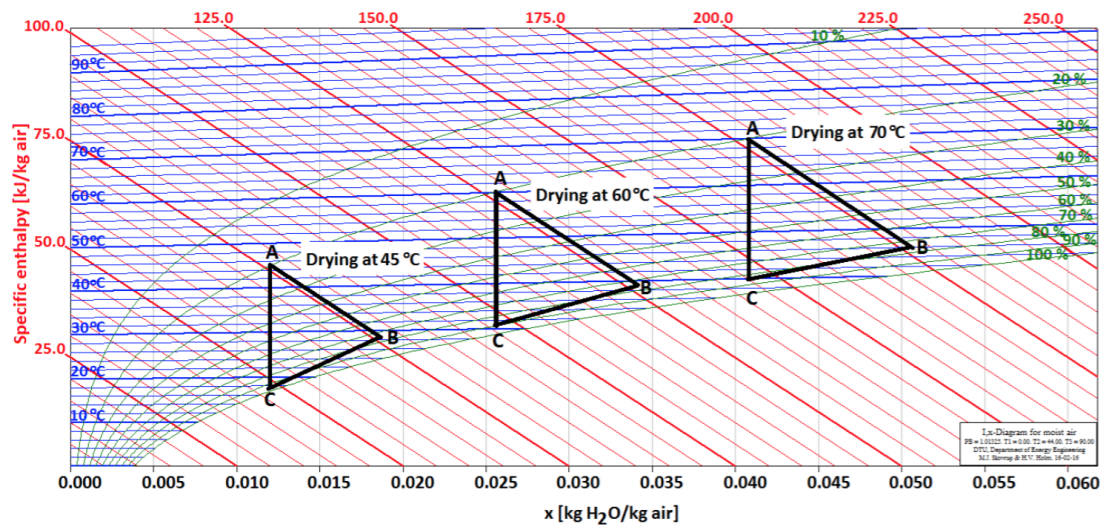


Abbildung 5.4: Mollier-Diagramm von Trocknungsprozessen bei verschiedenen Temperaturen, wobei A den Lufterlass zur Trocknungskammer, B den Auslass und C die Phase nach der Dampfkondensation vor der Wiedererwärmung zeigt. Für die Trocknung bei 70 °C waren diese Phasen bei Punkt A: 20 % rel. Luftfeuchte und 70 °C, Punkt B: 75 % rel. Luftfeuchte und 46,4 °C und Punkt C: beinahe gesättigt und 39,4 °C.

Abbildung 5.4 zeigt den Trocknungsluft Kreislauf im Mollier-Diagramm bei verschiedenen Trocknungstemperaturen. Es ist zu beachten, dass Punkt C nicht die Sättigungslinie der feuchten Luft kreuzt, obwohl ein beträchtlicher Anteil an Wasser aus der Luft entfernt wurde. Dies kann durch das Temperaturprofil der Luft durch den Verdampfer erklärt werden. Die Luft, die in direktem oder engem Kontakt mit dem Wärmetauscher steht, wird bis zur Sättigungslinie bei Temperaturen unter dem Punkt C abgekühlt, was eine Kondensation ermöglicht. Der Punkt C im Mollier-Diagramm stellt die durchschnittliche Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Trockenluft dar. Die Simulationen zeigen, dass die gewünschten Trocknungsbedingungen für den Trockner mit dem vorgeschlagenen R744-Wärmepumpensystem erreicht werden können. Tabelle 5.1 fasst die Energieflüsse, die Prozessleistung und die Betriebsbedingungen des Systems zusammen.

Tabelle 5.1: Energieflüsse, -effizienzen und Betriebsbedingungen für einen mit R744 betriebenen Wärmepumpentrockner bei 45 °C, 60 °C und 70 °C.

Trocknungstemperatur	45 °C	60°C	70°C
Wärmestrom im Verdampfer	101 kW	109 kW	118 kW
Wärmestrom im Gaskühler	100 kW	108 kW	116 kW
Kompressorleistung	23 kW	28 kW	32 kW
COP (Leistungskoeffizient) für Erwärmung	4.3	3.9	3.6
COP für Erwärmung und Kühlung	8.8	7.8	7.2

SEC (Spezifischer Energieverbrauch)	968 kJ/kg	917 kJ/kg	865 kJ/kg
SEC	0.269 kWh/kg	0.255 kWh/kg	0.240 kWh/kg
Hochdruck	75 bar	100 bar	130 bar
Niederdruck	37.9 bar	45 bar	57.3 bar
Massenstrom des CO2	0.56 kg/s	0.62 kg/s	0.72 kg/s
Feuchtegehalt der der Luft in den Trockner hinein	0.012 kg/kg	0.025 kg/kg	0.039 kg/kg
Feuchtegehalt der der Luft aus dem Trockner heraus	0.018 kg/kg	0.033 kg/kg	0.049 kg/kg
Lufttemperatur nach der Kondensation	17.1 °C	30.5 °C	39.4 °C
Lufttemperatur nach der Trocknungskammer	28.8 °C	39.2 °C	46.4 °C
Entzogenes Wasser	0.024 kg/s	0.031 kg/s	0.037 kg/s
Temperatur nach Kompressor	73 °C	87 °C	96 °C
Temperatur vor der Drosselung	24.5 °C	27.0 °C	30.2 °C

Die Abbildungen 5.5, 5.6 und 5.7 zeigen den R744 Wärmepumpenkreislauf im Temperatur-Entropie-Diagramm bei verschiedenen Trocknungstemperaturen. Da die Trocknungstemperatur höher ist als der kritische Punkt, ist es notwendig, das Kältemittel weiter herunter zu kühlen.

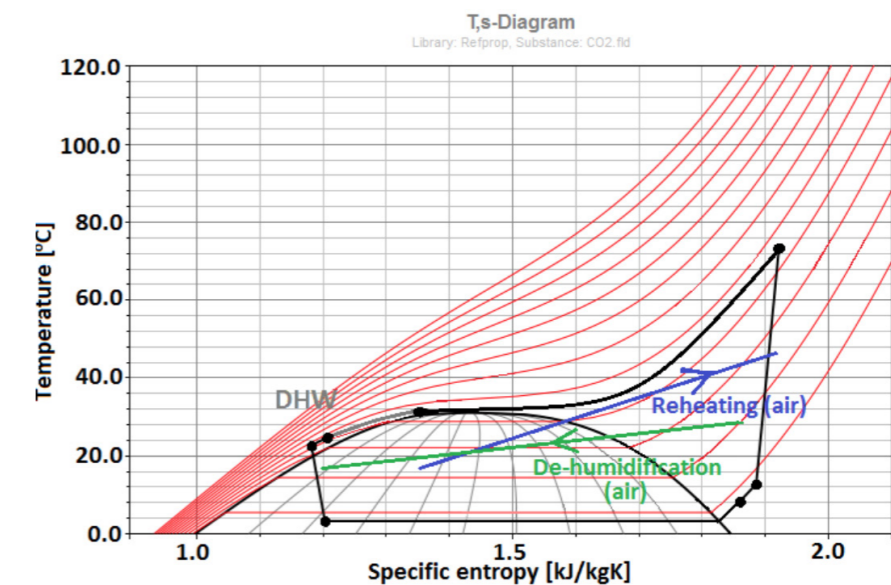


Abbildung 5.5: Wärmepumpenunterstützter Trockner mit R744 für eine Trocknungstemperatur von 45°C

Im vorliegenden Fall wurde dies erreicht, indem Brauchwasser (DHW) vorerhitzt wurde, aber auch andere Wärmesenken sind vorstellbar.

Das Diagramm zeigt außerdem das dazugehörige Abkühlen und Wiedererwärmen der Trocknungsluft. Es ist zu bedenken, dass die notwendige Entfeuchtung der Trocknungsluft im Verdampfer der Wärmepumpe erfolgt, der für die Förderung und Ableitung von Kondenswasser ausgelegt sein muss.

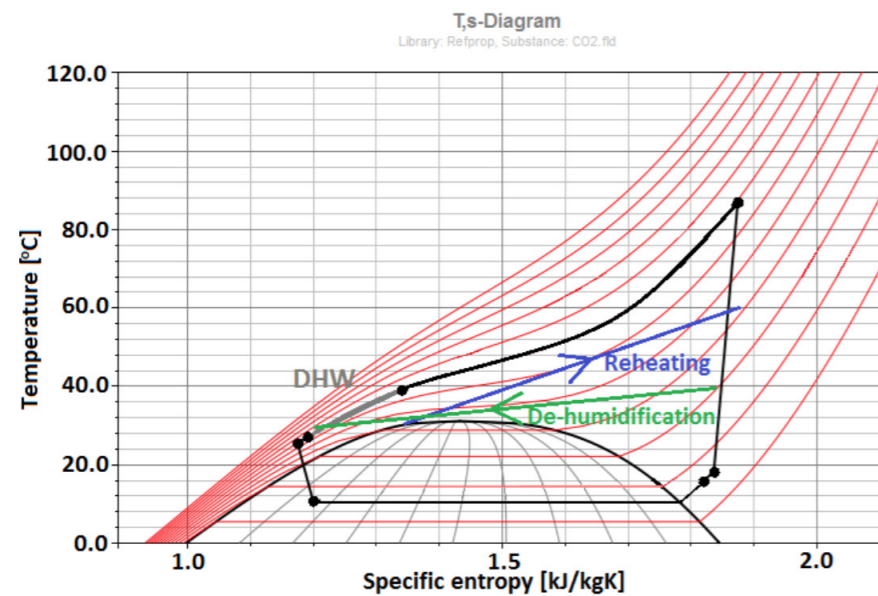


Abbildung 5.6: Wärmepumpenunterstützter Trockner mit R744 für eine Trocknungstemperatur von 60°C.

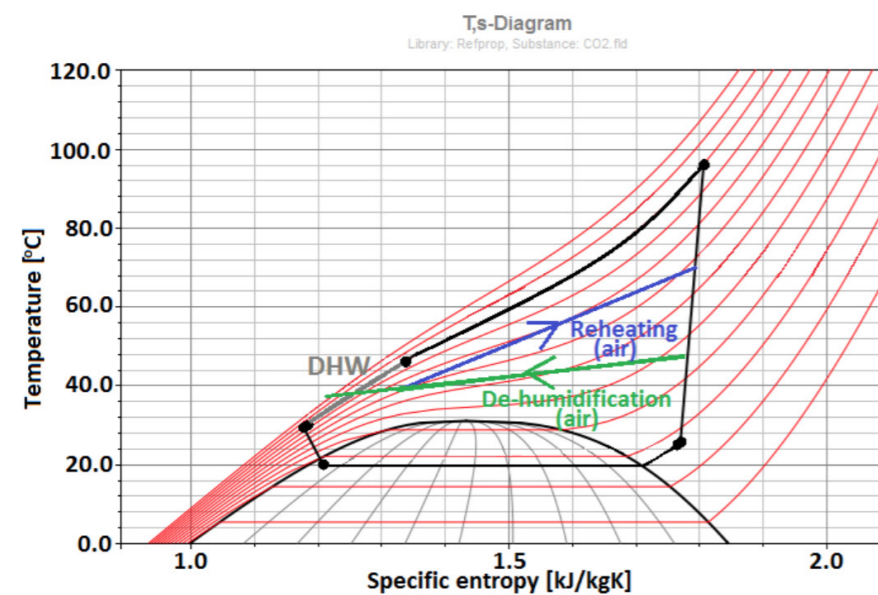


Abbildung 5.7: Wärmepumpenunterstützter Trockner mit R744 für eine Trocknungstemperatur von 70°C.

5.6. Analyse der Leistung des Wärmepumpentrockners

Die Trocknung von biologischem Material ist ein kombinierter Wärme- und Stoffaustauschprozess, bei dem Wasser aus einer festen Matrix durch Verdampfung entfernt wird. Im betrachteten Temperaturbereich beträgt die Latente Wärme der Verdampfung etwa 2250 kJ oder 0,63 kWh, um ein Kilogramm Wasser zu verdunsten. Die durchgeführte Untersuchung ergab, dass ein wärmepumpenunterstützter Trocknungsprozess je nach Trocknungstemperatur zwischen 0,24 und 0,27 kWh/kg benötigt. Im Vergleich zur latenten Wärme des Wassers liegt die Energieeinsparung also bei etwa 60 %. Für einen eigentlichen offenen Trocknungsprozess, der die erwärmte Umgebungsluft nutzt und berücksichtigt, beträgt der spezifische Energieverbrauch in der Regel mindestens 0,8 kWh/kg, kann aber auch bis zu 2 kWh/kg betragen. Es ist jedoch schwierig, diese Trocknungssysteme strikt mit Energiebewertungen zu vergleichen, da Aspekte wie die Feuchtigkeitskontrolle (die bei der Wärmepumpentrocknung möglich ist) nur schwer in offene Trocknungssysteme einbezogen werden können. Berichte zur Energieeinsparungen bei der wärmepumpenunterstützten Trocknung lagen zwischen 30 und 50 %, jedoch auf unterschiedlichen Kältemitteln basierend. Die Einführung einer Wärmepumpe scheint bei allen drei betrachteten Temperaturen möglich und würde zu ähnlichen oder etwas besseren Energieeinsparungen, wie in verschiedenen Studien der letzten Jahre berichtet wurde, führen.

Die Trocknung im geschlossenen Kreislauf erfordert eine kontrollierte Kühlung, Entfeuchtung und Wiedererwärmung der Trocknungsluft. Diese Prozesse führen auf natürliche Weise zu Temperaturveränderungen. Da der R744-Zyklus im transkritischen Zustand arbeitet, sind die Wärmeaustauschverluste für die Wiederaufheizung geringer als bei einem Wärmepumpenzyklus mit konstanter Kondensationstemperatur. Die Wahl eines transkritischen Prozesses führt auch zu entsprechenden Temperaturunterschieden im Erwärmungsprozess und gibt damit die Möglichkeit, Exergieverluste zu reduzieren. Der Temperaturverlauf der Luft beim Abkühlen ist kleiner und es ist umso wichtiger, einen entsprechenden Temperaturverlauf für den Heizprozess zu erzeugen. Die thermischen Eigenschaften von R744 im transkritischen Zustand sind für das Konzept der wärmepumpengestützten Trocknung im Allgemeinen von Vorteil.

Mit steigender Trocknungstemperatur nimmt der COP der Wärmepumpe ab und der Nettoenergieverbrauch nimmt zu. Gleichzeitig wird die Prozesseffizienz der wärmepumpenunterstützten Trocknung erhöht, da die entzogene Wassermenge bei höheren Trocknungstemperaturen höher war. Dieser Effekt gleicht den reduzierten COP bei höheren Trocknungstemperaturen aus. Ähnliche Ergebnisse wurden in experimentellen Tests von CO₂-Trocknern gefunden. Der Einsatz einer CO₂-Wärmepumpe in der Wirbelschichttrocknung bei 40 °C und 20 % Feuchte und 50 °C und 13 % Feuchte, jeweils bei 60 % Feuchte nach der Trocknung, führte zu SEC-Werten von 0,606 und 0,268 sowie COPs von 2,31 und 4,18. Da sich diese beiden berichteten Ergebnisse signifikant unterscheiden, scheint die Menge des entzogenen Wassers für die Leistung sehr wichtig zu sein; je besser die beiden berichteten Ergebnisse sind, desto ähnlicher ist der Fall mit 45°C Trocknungstemperatur in dieser Studie.

Geschlossene Wärmepumpen unterstützte Trocknungskreise, wie die hier modellierten, erzeugen immer einen Wärmeüberschuss (vor allem durch den Verdichtungsschritt), so dass in diesem Fall eine zusätzliche Wärmesenke erforderlich ist, da der Wärmestrom zum Kühlen und Wie-

dererwärmen der Trocknungsluft gleich groß ist. Der zweite Gaskühler (oder Kondensator bei Verwendung anderer Kältemittel) bietet die Möglichkeit, die Trocknungsbedingungen kontinuierlich zu regeln, was zu stabilen Trocknungstemperaturen und Luftfeuchtigkeit führt. Systeme, die nicht über diesen zweiten Gaskühler (oder Kondensator) verfügen, werden oft in der Ein/Aus-Regelung betrieben, wenn die Trocknungstemperatur zu hoch wird. Für CO₂-Kreisläufe, die nahe oder oberhalb des transkritischen Punktes betrieben werden, ist es ebenfalls entscheidend, vor dem Drosseln eine ausreichende Kühlung zu erreichen, um einen effizienten Prozess zu erhalten. Geschlossene Systeme müssen Wärmesenken wie einen Wasserkühler haben, um eine hohe Leistung zu erzielen. Für die vorliegende Studie wurde Wasser als Wärmesenke genutzt und angenommen, dass dies als vorgewärmtes Brauchwasser genutzt wird. Andere Wärmesenken, wie z.B. die Umgebungsluft, könnten zu diesem Zweck ebenfalls in Betracht gezogen werden; es wird jedoch empfohlen, eine Wärmesenke mit stabilen Temperaturniveaus zu implementieren, um die Prozessstabilität zu erhalten. Die im zweiten Gaskühler übertragene Wärme wurde bei der Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs des Trocknungsprozesses nicht berücksichtigt. Das untersuchte Wärmepumpensystem basierte auf einer Trocknerleistung, die es ermöglicht, je nach Trocknungstemperatur und -zustand rund 100 kg Wasser pro Stunde zu entziehen. Die Kapazität von Industrietrocknern kann von einigen Kilogramm bis zu mehreren Tonnen entnommenem Wasser pro Stunde reichen; daher ist es schwierig, eine allgemein anwendbare Trocknergröße festzulegen. Das untersuchte System kann auf verschiedene Trocknergrößen hoch- oder herunterskaliert werden, ohne die Prozesseffizienz zu beeinflussen, unter der Voraussetzung, dass die Größe der Komponenten der Wärmepumpe angepasst werden kann. Die Größe und der Wirkungsgrad des Kompressors sind dabei die am meisten limitierenden Faktoren. Mit der derzeit verfügbaren Verdichtungstechnologie sollte es möglich sein, das System auf eine Trocknerleistung von 500 kg/h zu erweitern. Ein weiterer Faktor, der berücksichtigt werden muss, ist die Konstruktion des Gaskühlers und des Verdampfers, der effizient für den Wärmeaustausch bei großem Luftstrom ausgelegt sein muss. Die Größe und Leistung eines Ventilators zur Zirkulation der Trocknungsluft hängt von der Konstruktion der Wärmetauscher und der Trockenkammer ab. Der Ventilator des Trocknungssystems erfordert einen zusätzlichen Energiebedarf, der die Prozesseffizienz reduziert. In der vorliegenden Studie wurde die Ventilatorleistung nicht berücksichtigt, da das Trocknungssystem, aber auch die Geometrie der Wärmetauscher vereinfacht wurde. Aber auch für offene Trocknungssysteme wird eine bestimmte Ventilatorleistung benötigt, die die Prozesseffizienz in ähnlicher Größenordnung reduziert.

Weitere Designbewertungen sollten auch die Möglichkeit der Reinigung von z.B. Wärmetauschern aus Gründen der Hygiene, insbesondere in der Lebensmittelindustrie, beinhalten. Beim Trocknen von biologischem Material wird die Luft oft mit Partikeln usw. verunreinigt, die im Wärmetauscher agglomerieren können. Daher muss auch die Reinigung ein Konstruktionsaspekt sein, um den Wärmewiderstand zu reduzieren und einen hohen Wärmeübergang in den Wärmetauschern aufrechtzuerhalten.

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Aspekte Trocknungsprodukt und Qualität nicht bewertet. Im Allgemeinen verfügt das System über ein Energiesparpotenzial für alle Trocknungsprozesse, die eine Trocknungstemperatur zwischen 45°C und 70°C erfordern. Lebensmittel wie Getreide, Obst und Gemüse, aber auch Zellstoff, Papier oder Holz könnten unter diesen Bedin-

gungen getrocknet werden; und die Liste kann sicherlich noch erweitert werden. Die Trocknungsbedingungen müssen jedoch in Abhängigkeit von einer erforderlichen Qualität und einem bestimmten Trocknertyp bestimmt werden, was den Rahmen dieser Untersuchung überstieg. In einer breiteren Perspektive kann der untersuchte Wärmepumpentrockner (basierend auf erneuerbaren Energiequellen) dazu beitragen, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren.

Die vorliegende Studie untersuchte nicht die Investitionskosten oder die Rendite der Investitionen, sondern konzentrierte sich ausschließlich auf das Energiesparpotenzial. Basierend auf der durchgeführten Analyse wird es möglich sein, diese Zahlen für bestimmte Trocknungsprozesse und Produkte zu berechnen. Das Energieeinsparpotenzial der R744-Wärmepumpen unterstützten Trocknung wurde eindeutig identifiziert und die Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur (nicht der COP der Wärmepumpe) aufgezeigt.

5.7. Zusammenfassung

Das Potenzial der Verwendung von R744 als Kältemittel in Wärmepumpen unterstützten Trocknungsprozessen wurde untersucht. Der spezifische Energieverbrauch des Trocknungsprozesses kann auf 0,269 kWh/kg bei einer Trockentemperatur von 45°C, 0,255 kWh/kg bei 60°C und 0,240 kWh/kg bei 70°C reduziert werden. Die Prozesseffizienz wurde hauptsächlich durch die Menge an entnommenem Wasser aus der Trocknungsluft beeinflusst, während der COP der Wärmepumpe nur einen sekundären Einfluss hatte. Herkömmliche offene Trockner haben im Allgemeinen einen spezifischen Energieverbrauch zwischen 0,8 und 2 kWh/kg, so dass das Energiesparpotenzial erheblich ist. Insbesondere die Temperaturverschiebung im transkritischen R744-Zyklus kann für die Wärmepumpentrocknung im Vergleich zum subkritischen Wärmepumpenbetrieb mit stabiler Kondensationstemperatur von Vorteil sein.

Der Trocknungsprozess ist gekennzeichnet durch das gleichzeitige Auftreten von Wärmebedarf und verfügbarer Abwärme, was für die Realisierung einer wärmepumpenunterstützten Trocknung im Allgemeinen spricht. In einer breiteren Perspektive kann die Wärmepumpentrocknung (basierend auf erneuerbaren Energiequellen) dazu beitragen, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern. Das Potenzial für die industrielle wärmepumpengestützte Trocknung im untersuchten Temperaturbereich ist von Bedeutung in der Lebensmittel-, Tabak-, Holz- und Papierindustrie.

5.8. Referenzen

Bantle, M., et al. (2016). Performance simulation on a heat pump drying system using R744 as refrigerant. 12th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants GL2016 : Proceedings, International Institute of Refrigeration.

Wolf, S., et al. (2014). Analyse des Potenzials von Industrierärmepumpen in Deutschland (in German) Forschungsbericht. Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung.

6. Vergleich von Prozesssteuerungskonzepten

Universität Tuscia, Department für Innovation in Biologischen, Agro-Lebensmitteln und Forst Systemen, Italien

Massantini, R. & Moschetti, R.

6.1. Gegenwart und Zukunft der Trocknungstechnik

Die Trocknung ist ein relativ komplexer, dynamischer, instabiler und nichtlinearer Prozess, der durch die Eigenschaften des nassen Materials, den Produktionsumfang und die Einhaltung von Vorschriften (z.B. Europäische Bio-Verordnung) sowie Betriebs- und Umweltbedingungen beeinflusst wird (Aghbashlo et al., 2015). Diese Faktoren können sowohl Qualitätsmerkmale als auch organoleptische, ernährungsphysiologische und funktionelle Eigenschaften beeinflussen und damit zu einer geringeren Akzeptanz bei den Verbrauchern führen (Brosnan und Sun, 2004; Vega-Gálvez et al., 2012). Die Trocknung ist einer der energieintensivsten Prozesse in der Lebensmittelindustrie (Akpınar et al., 2003) und trägt zum Klimawandel bei, da die meisten Trockner fossile Brennstoffe verwenden (Mujumdar, 2012).

Um die Herausforderungen in der Trocknung zu beheben, sollte das Ziel neuer Trocknungstechnologien darin bestehen, gleichzeitig die Produktqualität und den Produktwert zu erhalten, die Trocknungsrate zu maximieren und die Umweltbelastung zu minimieren (Mujumdar, 2012; Su et al., 2015). „Smart drying“, eine der neuesten und vielversprechendsten neuen Trocknungstechniken und ist durch den Einsatz von Sensoren, Werkzeugen (z.B. neue zerstörungsfreie Technologien) und Verfahren (z.B. Überwachung und Steuerung von Qualitäts- und Trocknungsparametern und/oder den Bedingungen des Trockners usw.) zur Steigerung der Trocknungseffizienz gekennzeichnet. Die Idee der intelligenten Trocknungstechnologie besteht darin, Echtzeitinformationen über den Prozess und das Produkt zu erhalten, um gleichzeitig den Trocknungsprozess zu modulieren. Das Ergebnis ist ein standardisiertes, hochwertiges Trockenprodukt (Su et al., 2015). So kann eine intelligente Trocknung sowohl bei der Echtzeitüberwachung der Lebensmittelqualität als auch bei der dynamischen Steuerung der Betriebsbedingungen während des gesamten Trocknungsprozesses kostengünstig sein. Smart Drying ist ein multidisziplinärer Sektor, dessen jüngste Entwicklungen folgende Bereiche der Forschung & Entwicklung umfassen: Künstliche Intelligenz (Aghbashlo et al., 2015), Biomimetische (Ghasemi-Varnamkhasti et al., 2010), Computer Vision (Brosnan und Sun, 2004), Mikrowellen-/Dielektrische Spektroskopie (Jha et al., 2011), Hyper-/Multispektralbildgebung (ElMasry und Sun, 2010), Magnetresonanztomographie (Clarka et al., 1997; Su et al., 2014), Ultraschallabbildung (Awad et al., 2012), elektrostatische Abtastung (Chen et al., 2013) und Steuerungssysteme für die Trocknungsumgebung. Darüber hinaus sind die Spektroskopie im sichtbaren (Vis) und nahen Infrarot (NIR) Bereich Techniken mit potenziellen Anwendungen in der intelligenten Trocknung im Hinblick auf die Überwachung von Qualitätsmerkmalen (Nicolai et al., 2007).

6.2. Computer Vision Technologie

Der Mensch benutzt seine Augen, um die Welt um ihn herum zu sehen und visuell zu erfassen. Computer Vision (CV) ist die Wissenschaft, die darauf abzielt, einer Maschine oder einem Compu-

ter eine ähnliche Fähigkeit zu verleihen. Seine Anwendung betrifft die automatische Extraktion, Analyse und das Verständnis nützlicher Informationen aus einem einzelnen oder einer Folge von Bildern, wobei eine algorithmische Grundlage für das automatische visuelle Verständnis verwendet wird (Li et al., 2015).

Seit den frühen 1960er Jahren, mit dem Aufkommen des digitalen Computers, wurde die Bildverarbeitung als ein wichtiges Instrument zur Bewertung der Qualität in der Lebensmittelproduktion anerkannt, und ihr Einsatz ständig gesteigert. Es ist möglich, die visuellen Eigenschaften und Mängel von Lebensmitteln schnell und kostengünstig non-invasiv zu bewerten (Davies, 2009). Heutzutage wird CV in verschiedenen Bereichen eingesetzt (z.B. Lebensmittelindustrie, Robotik, medizinische Diagnostik und Industrierobotersysteme). Ein CV-System besteht im Allgemeinen aus fünf Elementen: einem Beleuchtungssystem, einem Sensor oder einer Kamera, einem Digitalisierer (nur wenn die Kamera nicht digital ist), einem Computer und einer Software, die das Bild verarbeiten kann (Abbildung 6.1). Ähnlich wie beim menschlichen Sehen wird die CV-Technik stark von mehreren Faktoren beeinflusst (z.B. Lichtquelle, Hintergrund, Lichtrichtung, Größe der Fläche mit gleicher Farbe und Unterschiede in der individuellen Wahrnehmung) (Menesatti et al., 2012).

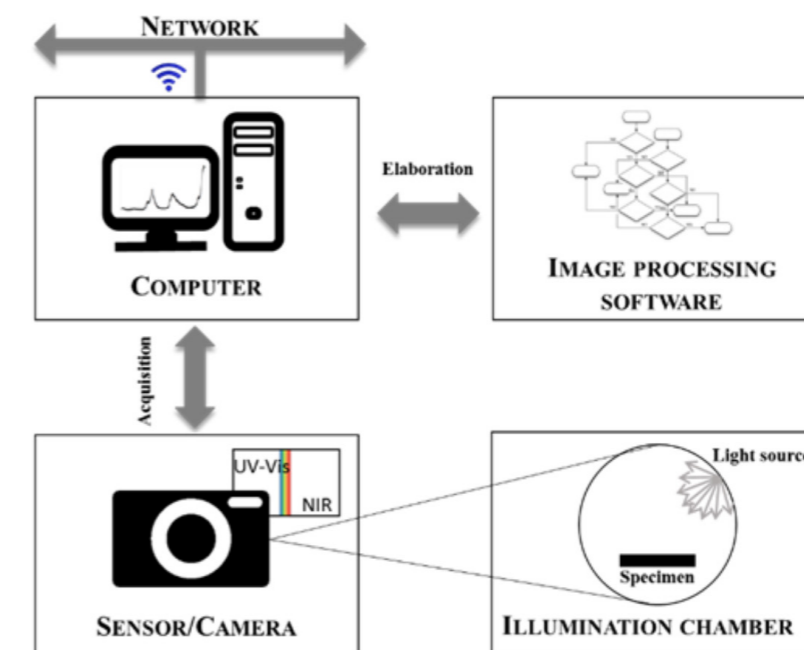


Abbildung 6.1: Element eines Computer Vision Systems (Raponi et al., 2017)

6.2.1. Bildanalyse

Äußere Veränderungen und Mängel an Obst und Gemüse sind oft durch Unterschiede in Farbe, Form und Größe gekennzeichnet. Im Allgemeinen ermöglicht eine RGB-Kamera (Rot, Grün und Blau), die mit einem Bildverarbeitungssystem verbunden ist, eine schnelle, genaue und schnelle Inspektion externer Produkte. RGB-Kameras emulieren die Fähigkeit des menschlichen Auges, Bilder aufzunehmen (Batchelor und Waltz, 2001).

6.2.2. Einzelpunktspektroskopie

Die Spektroskopie ist die Untersuchung der Wechselwirkung von Materie und elektromagnetischer Strahlung (ER). Die Interaktion erfolgt auf verschiedene Weise (d.h. Reflexion, Transmission, Absorption oder Streuung von polychromatischer oder monochromatischer Strahlung), wie in Abbildung 6.2 dargestellt.

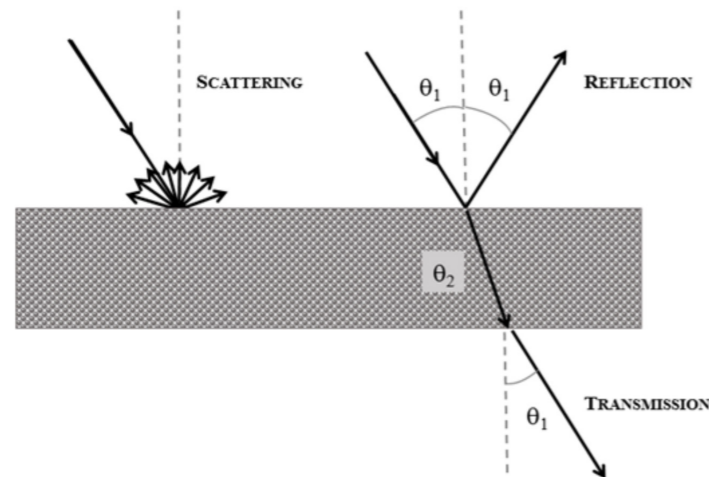


Abbildung 6.2: Wechselwirkung zwischen Materie und elektromagnetischer Strahlung (Raponi et al., 2017)

Verschiedene elektromagnetische Bereiche geben unterschiedliche Informationen über die chemische Zusammensetzung der Probe. Denn jede chemische Bindung absorbiert Lichtenergie bei bestimmten Wellenlängen. Pigmente (z.B. Chlorophyll, Carotinoide und Anthocyane) absorbieren hauptsächlich im sichtbaren Spektralbereich, während Wasser, Kohlenhydrate, Fette und Proteine Absorptionsbanden im NIR-Bereich aufweisen (Abbott, 1999; Munjanja und Sanganyado, 2004). Für die Bewertung der Lebensmittelqualität (z.B. Qualitätskontrolle und Authentizität) sind die Bereiche Ultraviolett (UV), Sichtbar (Vis) und Nahinfrarot (NIR) die wichtigsten Spektralbereiche (Reid et al., 2006).

6.2.3. Hyper-/Multi-Spektrale Bildgebung

Hyperspektrale Bildsysteme (HSI) sind Geräte, die sowohl spektroskopische als auch räumliche Informationen erfassen können (Mollazade et al., 2012; Moscetti et al., 2015). Die Datenstruktur des Hyperspektralbildes wird als Hyperwürfel (hyper cube) bezeichnet, d.h. ein 3D-Bild mit zwei räumlichen und einer spektroskopischen Dimension (Bild 6.3).

HSI-Geräte in der Lebensmittelanalytik arbeiten im Vis/NIR-Bereich, jeweils mit Absorptions- und Emissionsspektroskopie (Menesatti et al., 2008). Der Hauptvorteil der HSI ist die Möglichkeit, sowohl externe als auch interne Qualitätsparameter zu überwachen. Mit diesem Gerät ist es möglich, Objekte mit ähnlicher Farbe, Form, Größe und überlappenden Spektren zu unterscheiden und zu analysieren. Die Nachteile hängen mit der langen Erfassungszeit, der hohen Anzahl redundanter Informationen und damit der großen Datenmenge zusammen. Diese Nachteile begrenzen HSI in der Online-Verarbeitung. Darüber hinaus erhöht sich die Rechenzeit für die Entwicklung des Vor-

hersagemodells erheblich (Li et al., 2015). Die Entwicklung eines Multi Spektralen Bild Systems (MSI) kann diese Nachteile reduzieren, vor allem aufgrund seiner Möglichkeit, die bedeutendsten Wellenlängen (von 3-15) auszuwählen, um die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Interesse vorherzusagen (Zhang et al., 2014). MSI hat mehrere Vorteile gegenüber HSI, wie z.B.: eine schnellere Scanrate, Durchführbarkeit der Online-Anwendung in der Lebensmittelindustrie, weniger Computerspeicherbedarf für die Erfassung und Verarbeitung der Bilder (Mahesh et al., 2015). Die Nachteile hängen mit der mangelnden Flexibilität des Gerätes zusammen. Dieses wird in der Regel von Forschern entsprechend der spezifischen bildgebenden Aufgabe aufgebaut. Darüber hinaus ist es notwendig, vor der Entwicklung des MSI-Gerätes ein HSI-System zu verwenden.

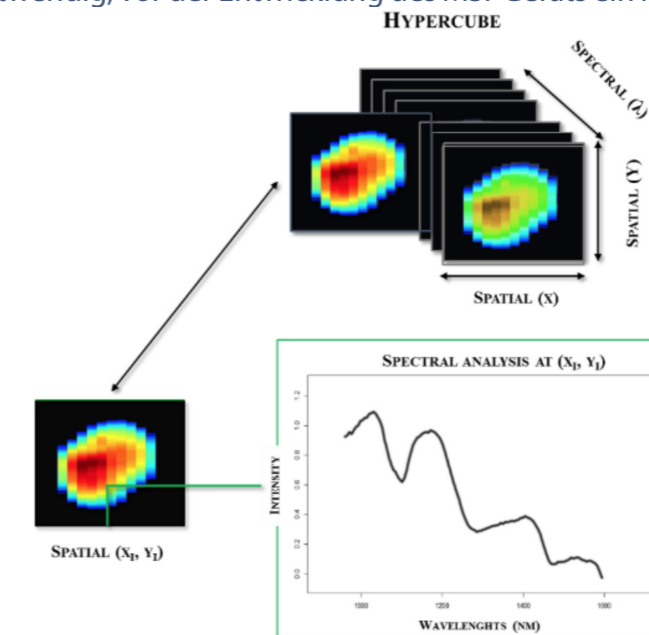


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung eines Hyperkubus (Raponi et al., 2017)

6.3. Elektronische Nase und elektronische Schleimhaut

Lebensmittelaromen enthalten in der Regel komplexe Mischungen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs), die sich durch verschiedene sensorische und chemische Eigenschaften auszeichnen. Jede Änderung der relativen Konzentrationen dieser Verbindungen kann den Geruch des Produkts bestimmen. Die Änderung des Aromas während des Trocknungsprozesses ist von großer Bedeutung. Tatsächlich kommt es häufig zu unerwünschtem Aromaverlust, Veränderung, Verformung oder gar Zerstörung und zu unangemessenen Endprodukten. Elektronische Nase und elektronische Schleimhaut sind elektronische Systeme, die versuchen, die Struktur des Geruchssystems von Säugetieren nachzuahmen. Ihre Ergebnisse können die Charakterisierung von Duftstoffen, Defekten oder Eigenschaften von Lebensmitteln, die Konzentrations-schätzung von VOCs usw., sein. Mit anderen Worten, beide Geräte können das Lebensmittelaroma in Sekundenschnelle erfassen, was eine Echtzeitüberwachung des Lebensmittelaromas während der Trocknung ermöglicht. Die elektronische Schleimhaut ist eine technologische Weiterentwicklung

der elektronischen Nase, die sich durch eine höhere Anzahl von Sensoren auszeichnet.

6.4. Kernmagnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist eine Art der kernmagnetischen Resonanztechnologie, die sowohl von Chemikern als auch von Biochemikern intensiv genutzt wird, um Weichteilbilder für diagnostische Zwecke zu erhalten und damit Molekularstrukturen zu identifizieren, sowie das Auftreten chemischer Reaktionen zu untersuchen. Die MRT verwendet Radiowellen und Magnete, um Bilder von Lebensmittelproben zu erzeugen. Wissenschaftler haben die Verwendung von MRT untersucht, um Veränderungen des Feuchtigkeitsgehalts, der Wasseraktivität, des Salzgehalts usw. während der Trocknung zu untersuchen.

6.5. Mikrowellen-Dielektrikumspektroskopie

Die dielektrische Mikrowellenspektroskopie ist eine berührungslose, zuverlässige und sehr schnelle Technik zur Bestimmung von Änderungen der Feuchtigkeit und Dichte von Materialien während eines Trocknungsprozesses. Da sich die Mikrowellenresonanzfrequenz mit dem Feuchtigkeitsgehalt von Lebensmitteln ändert, ist diese Technik besonders effizient, um kontinuierlich repräsentativere Feuchtigkeitsdaten zu liefern. Die Technik ist völlig unabhängig von Dichte oder Produktbelastung, Farbe und Oberflächenstruktur von Lebensmitteln.

6.6. Steuerung eines Trocknungsprozesses durch die intelligente Trocknungstechnologie

Derzeit besteht die Notwendigkeit, intelligente oder intelligente Trockner für die nächsten zwei Jahrzehnte zu entwickeln. Es ist notwendig, die Trocknung zu einem nachhaltigen Prozess zu machen, der die neuesten Fortschritte in verwandten Technologien und wissenschaftlichen Bereichen umsetzt, wie beispielsweise: 1] Computertechnologie, 2] Mikrocontroller und Sensorik, 3] online, inline, At-Line Detektionstechnologie, 4] mathematische Modellierung von Trocknern, 5] maschinelles Lernen (z.B. Deep Learning), 6] Low-Power Wide Area Network und 7] Big Data Management und Cloud Computing. In diesem Zusammenhang wenden sich die Forscher der Anwendung intelligenter Technologien von der Laborforschung bis zur industriellen Produktion zu. Inzwischen ist die Industrie qualitätsbewusster geworden und neigt daher dazu, in die Qualitätskontrolle der Trocknungstechnik zu investieren.

6.7. Entwurf eines intelligenten Trocknungsprozesses, der Quality by Design Ansatz

Das Konzept der Quality by Design (QbD)-Strategie erfordert, dass neuartige Trocknungstechnologien entwickelt werden, die sich auf die Kenntnis des zu trocknenden Produkts sowie auf strenge Qualitätsmerkmale des Produkts stützen. Darüber hinaus ist es auf der Grundlage des QbD-Ansatzes notwendig, den Trocknungsprozess für eine sorgfältige Optimierung der Standardbetriebsansätze besser zu verstehen. Mit anderen Worten, eine QbD-Strategie kann meh-

tere Schritte umfassen, wie in Abbildung 6.4 dargestellt: Identifizierung des Zielproduktprofils und seiner kritischen Qualitätsmerkmale, die idealerweise erreicht werden, um eine gewünschte Produktqualität zu gewährleisten; [2] Definition des Produktdesignraums (d.h. der Eigenschaften des Produkts am Eingang der Trocknungseinheit); [3] Definition des Prozessdesignraums (d.h. der Prozesscharakterisierung, die zur Definition der akzeptablen Variabilität der Prozessparameter nützlich ist); und [4] Definition einer Steuerstrategie, die Folgendes umfassen kann: Verfahrenskontrollen, prozessbegleitende Kontrollen, Prozessüberwachung usw. Schließlich muss eine Prozessvalidierung durchgeführt werden, um nachzuweisen, dass die Endproduktqualität akzeptabel ist.

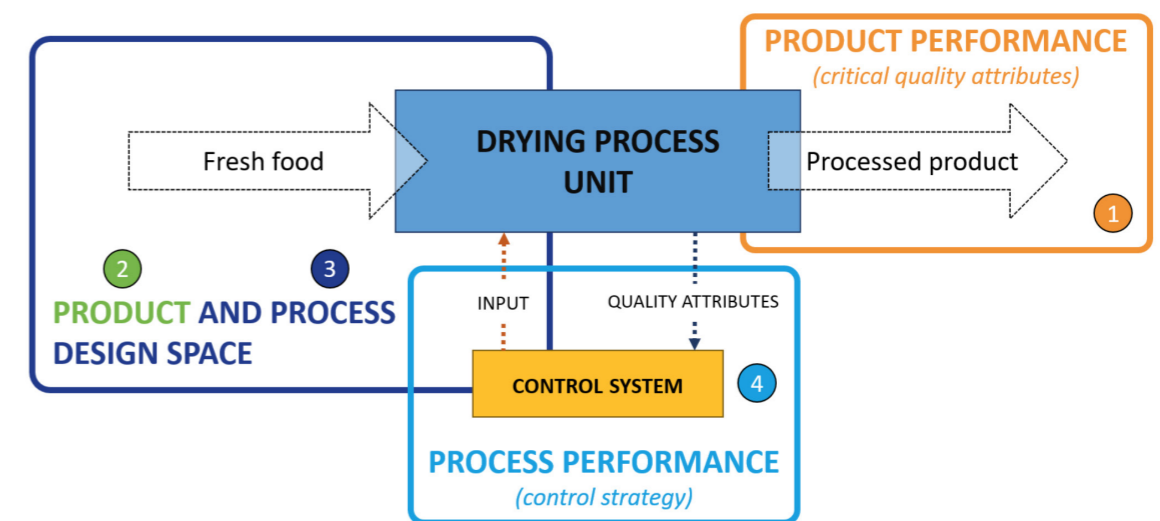


Abbildung 6.4: Quality by Design Schritte zur Qualitätssicherung von getrockneten Produkten

Die QbD-Strategie basiert in der Regel auf Echtzeit-Messtechniken, die in at-line, on-line und in-line unterteilt sind (Bild 6.5). Die Atline-Prozessmessung erfolgt durch Probenahme aus dem Prozess und Analyse der Probe in den Prozessbereich innerhalb des Verarbeitungszeitraums. Bei der Online-Messung wird die Probe analysiert und anschließend in den Prozessstrom zurückgeführt. Der Inline-Prozess erfolgt nicht durch eine Probenahme, sondern durch die Platzierung von Sensoren im Prozessstrom.

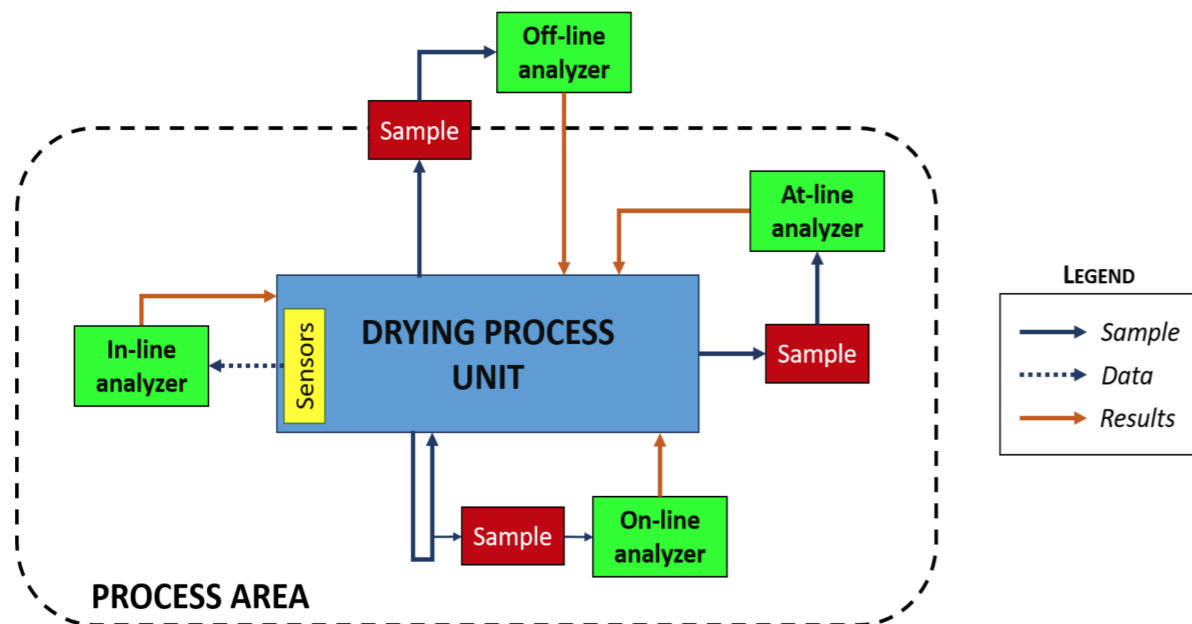


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Unterschiede zwischen Offline-, Atline-, Online- und Inline-Messtechniken (Raponi et al., 2017)

6.8. Validierung eines intelligenten Trocknungsprozesses

Die Entwicklung von In-Line-/Online-/Online-/Online-Methoden zur Identifizierung, Qualifizierung und Quantifizierung von Produkteigenschaften während eines Trocknungsprozesses erfordert den Test verschiedener mathematischer und statistischer Ansätze. Im maschinellen Lernen besteht die Mustererkennung aus der Konstruktion und dem Studium mathematischer Modelle, die Labels (Klassifizierung) oder realwertige Ausgaben (Regression) einem gegebenen Eingangsdatensatz zuweisen können. Mathematische Modelle können entwickelt werden, um nützliche Informationen aus großen Datensätzen zu extrahieren, um die chemische Zusammensetzung der Probe zu bestimmen (z.B. Feuchtigkeitsgehalt, Gehalt an löslichen Feststoffen, Farbe usw.) oder eine Chargenklassifizierung durchzuführen (z.B. Rohwarenerkennung usw.). Daher wird diese Art von Forschungsmethoden in der Regel in drei Phasen unterteilt: #1 Datenvorverarbeitung, #2 Modellkalibrierung und #3 Modellvalidierung (Bild 6.6).

#1 Datenvorverarbeitung. Die Vorverarbeitung ist ein sehr wichtiger Schritt, da sie in der Lage ist, Variationsquellen vor der Entwicklung eines Modells zu verbessern oder zu reduzieren. Es gibt verschiedene Vorverarbeitungstechniken und die Auswahl der optimalen Methode erfordert oft eine Iteration mit dem Kalibriermodell.

#2 Modellkalibrierung. Die Kalibrierung ist der Prozess der Konstruktion eines mathematischen Modells, um die Reaktion des Sensors oder des Analysegeräts auf die interessierenden Eigenschaften der getrockneten Proben zu korrelieren. Nach der Kalibrierung folgt die Vorhersage, d.h. der Prozess der Verwendung des entwickelten Modells zur Vorhersage der Eigenschaften einer unbekannt Probe. Sowohl die Konstruktions- als auch die Vorhersagephase sind für die Erstellung

von Kalibriermodellen entscheidend.

#3 Modellvalidierung. Die Validierung zeigt die Machbarkeit und Eignung des Modells für den vorgesehenen Zweck. Die Validierungsanforderungen, die bei der Entwicklung von Klassifizierungs- und Regressionsmodellen häufig bewertet werden, sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

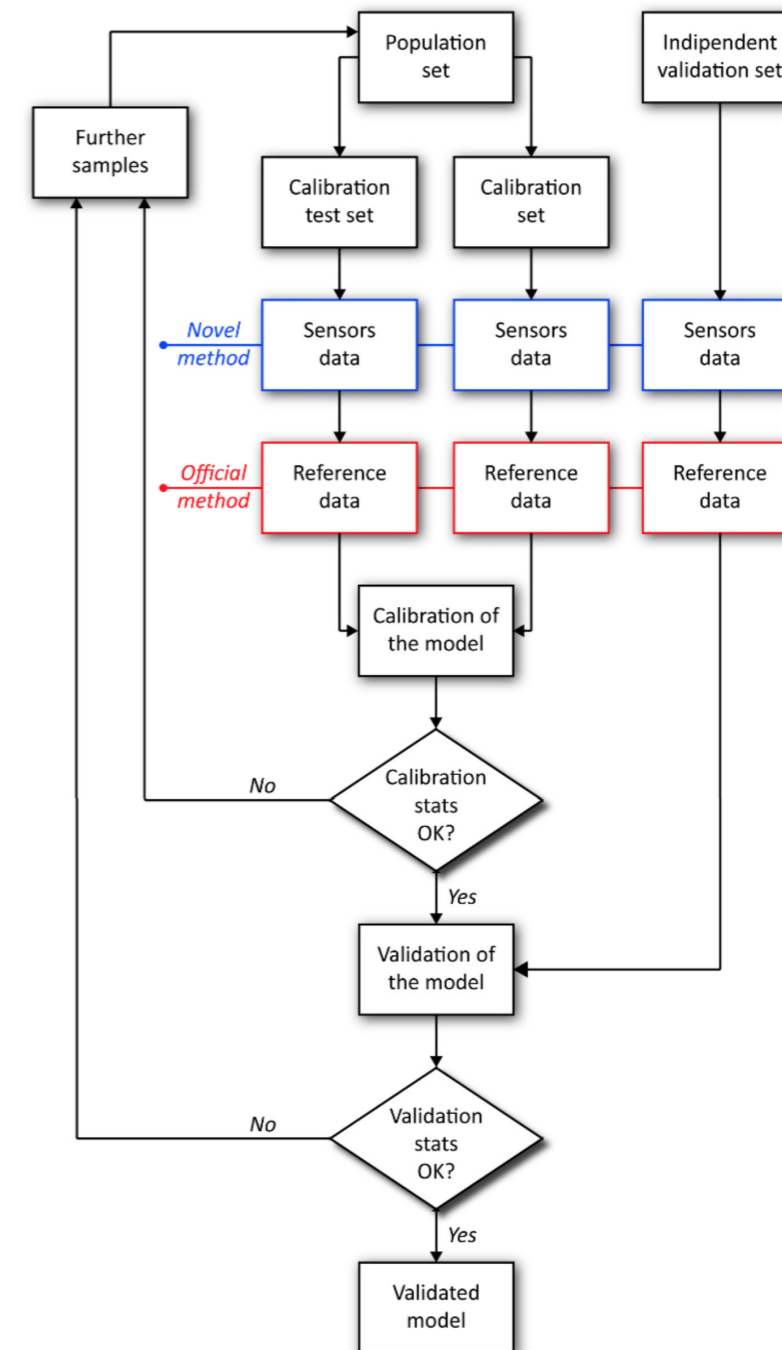


Abbildung 6.6: Workflow von Datenvorverarbeitungs-, Kalibrier- und Validierungsschritten

Tabelle 6.1: Liste der Validierungsparameter, die üblicherweise für Klassifizierungs- und Regressionsmodelle ausgewertet werden.

Term	Description	Classification	Regression
Empfindlichkeit	Fähigkeit, positive Ergebnisse zu identifizieren, wenn die Anwesenheit von Analyten gegeben ist.	✓	✓
Spezifität	Möglichkeit, negative Ergebnisse zu identifizieren, da kein Analyt vorhanden ist.	✓	✓
Genauigkeit	Die Übereinstimmung zwischen einem Testergebnis und dem akzeptierten Referenzwert.	X	✓
Linearität	Proportionalität des Signals zur Menge des Referenzmaterials, nachgewiesen durch die Berechnung einer Regressionslinie mit der geeigneten statistischen Methode.	X	✓
Reichweite	Bereich der Analytkonzentrationen, über die das Verfahren linear durchgeführt wird.	X	✓
Wahrhaftigkeit	Die Übereinstimmung zwischen dem Durchschnittswert aus einer großen Serie von Prüfergebnissen und einem anerkannten Referenzwert.	X	✓
Robustheit	Fähigkeit des Verfahrens, Änderungen zu widerstehen, ohne seine anfängliche stabile Konfiguration anzupassen.	✓	✓
Erkennungsgrenze	Der Mindestgehalt ab dem Vorhandensein eines Analyten kann mit einer gegebenen Sicherheit nachgewiesen/gemessen werden.	✓	✓

✓ machbare X nicht machbare Anwendung

6.9. Referenzen

Abbott, J., 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 15, 207–225. doi:10.1016/S0925-5214(98)00086-6

Aghbashlo, M., Hosseinpour, S., Mujumdar, A.S., 2015. Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Drying Technology: A Comprehensive Review. *Dry. Technol.* 33, 1397–1462.

Akpinar, E.K., Bicer, Y., Yildiz, C., 2003. Thin layer drying of red pepper. *J. Food Eng.* 59, 99–104.

Awad, T.S., Moharram, H.A., Shaltout, O.E., Asker, D., Youssef, M.M., 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Res. Int.* 48, 410–427.

Batchelor, B., Waltz, F., 2001. Programmable color filter Representation of color, in: *Intelligent Machine*

Vision Techniques, Implementations and Applications. Springer, London, pp. 345–422.

doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0239-7

Brosnan, T., Sun, D.W., 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision - A review. *J. Food Eng.* 61, 3–16.

Chen, Q., Zhang, C., Zhao, J., Ouyang, Q., 2013. Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety. *TrAC - Trends Anal. Chem.* 52, 261–274.

Clarka, C.J., Hockings, P.D., Joyce, D.C., Mazucco, R.A., 1997. Application of magnetic resonance imaging to pre- and post-harvest studies of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 11, 1–21.

Davies, E.R., 2009. The application of machine vision to food and agriculture: a review. *Imaging Sci. Journal*, 57, 197–217. doi:10.1179/174313109X454756

ElMasry, G., Sun, D.-W., 2010. Hyperspectral imaging for food quality analysis and control, in: Sun, D.-W. (Ed.), *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control.* Academic Press, London, UK, pp. 3–43.

Ghasemi-Varnamkhasti, M., Mohtasebi, S.S., Siadat, M., 2010. Biomimetic-based odor and taste sensing systems to food quality and safety characterization: An overview on basic principles and recent achievements. *J. Food Eng.* 100, 377–387.

Jha, S.N., Narsaiah, K., Basediya, A.L., Sharma, R., Jaiswal, P., Kumar, R., Bhardwaj, R., 2011. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods-a review. *J. Food Sci. Technol.* 48, 387–411.

Li, J.B., Huang, W.Q., Zhao, C.J., 2015. Machine vision technology for detecting the external defects of fruits — a review. *Imaging Sci. J.* 63, 241–251. doi:10.1179/1743131X14Y.0000000088

Mahesh, S., Jayas, D.S., Paliwal, J., White, N.D.G., 2015. Hyperspectral imaging to classify and monitor quality of agricultural materials. *J. Stored Prod. Res.* 61, 17–26. doi:10.1016/j.jspr.2015.01.006

Menesatti, P., Angelini, C., Pallottino, F., Antonucci, F., Aguzzi, J., Costa, C., 2012. RGB color calibration for quantitative image analysis: The “3D Thin-Plate Spline” warping approach. *Sensors (Switzerland)* 12, 7063–7079. doi:10.3390/s120607063

Menesatti, P., Zanella, A., D’Andrea, S., Costa, C., Paglia, G., Pallottino, F., 2008. Supervised Multivariate Analysis of Hyper-spectral NIR Images to Evaluate the Starch Index of Apples. *Food Bioprocess Technol.* 2, 308–314. doi:10.1007/s11947-008-0120-8

Mollazade, K., Omid, M., Tab, F.A., Mohtasebi, S.S., 2012. Principles and Applications of Light Backscattering Imaging in Quality Evaluation of Agro-food Products: A Review. *Food Bioprocess Technol.* 5, 1465–1485. doi:10.1007/s11947-012-0821-x

Moscetti, R., Saeys, W., Keresztes, J.C., Goodarzi, M., Cecchini, M., Danilo, M., Massantini, R., 2015. Hazelnut

Quality Sorting Using High Dynamic Range Short-Wave Infrared Hyperspectral Imaging. *Food Bioprocess Technol.* 8, 1593–1604.

Mujumdar, A.S., 2012. Editorial: The Role of Drying Technology in Sustainable R&D and Innovation. *Dry Technol.* 30.

Munjanja, B., Sanganyado, E., 2004. UV-Visible Absorption, Fluorescence, and Chemiluminescence Spectroscopy, in: Nolle, L.M., Fidel, T. (Eds.), *Handbook of Food Analysis*. CRC Press, pp. 572–583.

Nicolai, B.M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K.I., Lammertyn, J., 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biol. Technol.* 46, 99–118.

Raponi, F., Moschetti, R., Monarca, D., Colantoni, A., & Massantini, R. (2017). Monitoring and Optimization of the Process of Drying Fruits and Vegetables Using Computer Vision: A Review. *Sustainability*, 9(11), 2009.

Reid, L.M., O'Donnell, C.P., Downey, G., 2006. Recent technological advances for the determination of food authenticity. *Trends Food Sci. Technol.* 17, 344–353. doi:10.1016/j.tifs.2006.01.006

Su, Y., Zhang, M., Mujumdar, A.S., 2015. Recent Developments in Smart Drying Technology. *Dry Technol.* 33, 260–276.

Su, Y., Zhang, M., Mujumdar, A.S., 2014. Recent Developments in Smart Drying Technology. *Dry Technol.* 33, 260–276.

Vega-Gálvez, A., Ah-Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Martínez-Monzó, J., García-Segovia, P., Lemus-Mondaca, R., Di Scala, K., 2012. Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chem.* 132, 51–59.

Zhang, B., Huang, W., Li, J., Zhao, C., Fan, S., Wu, J., Liu, C., 2014. Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review. *Food Res. Int.* 62, 326–343. doi:10.1016/j.foodres.2014.03.012

I.3 LCA, LCCA UND LEBENSMITTELOGISTIK

7. Best Practice auf Basis von Life Cycle Analysis (LCA) und Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

SLU, Department Energie und Technologie, Schweden
Gebresenbet, G. & Bosona, T.

7.1. Einleitung

Zunehmende Weltbevölkerung, Urbanisierung, Erschöpfung von Ressourcen, sowie energieintensive fossile Brennstoffe, sowie räumliche und zeitliche Schwankungen der Nahrungsmittelverfügbarkeit stellen die Nachhaltigkeit heutiger Lebensmittelwertschöpfungsketten (food value chain, FVC) in Industrie- und Entwicklungsländern vor große Herausforderungen (UN, 2017; Hammond et al, 2015). Nachhaltigkeit im Kontext der nachhaltigen Entwicklung wird von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (1987) definiert als: „Formen des Fortschritts, die den Bedürfnissen der Gegenwart entsprechen, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen, ihre Bedürfnisse zu befriedigen, zu beeinträchtigen“. Nachhaltigkeit ist ein komplexes Konzept (Borg et al., 2016). Insbesondere ist die Nachhaltigkeit bei Lebensmitteln komplexer, da sie Landwirtschaft, Lebensmittelverarbeitung, Vertrieb und Konsum mit unterschiedlichem Ausmaß an sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Belangen auf jeder Ebene der FVC umfasst, wie in Abbildung 7.1 dargestellt.

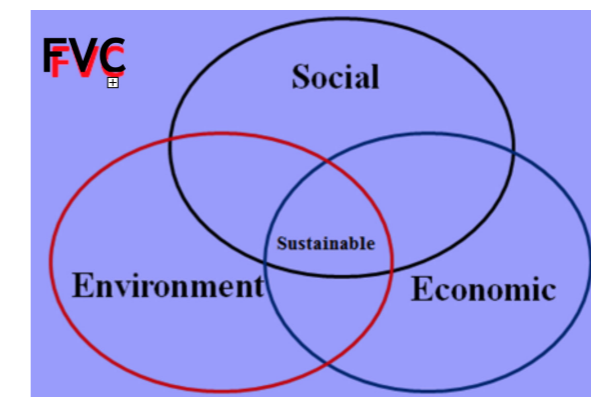


Abbildung 7.1: Konzeptionelle Darstellung der Nachhaltigkeit innerhalb der FVC (Food Value Chain)

Die Umweltdimension berücksichtigt die zunehmenden Umweltbelastungen wie Treibhausgasemissionen, Wassermangel, erhöhter Energieverbrauch, Schäden an der biologischen Vielfalt usw., während die wirtschaftliche Dimension geschäftsentwicklungsbezogene Faktoren wie Kosten der Nahrungsmittelproduktion und -versorgung, Rentabilität und Beitrag zur lokalen Wirtschaft berücksichtigt. Der soziale Aspekt befasst sich mit Themen wie Lebensmittelsicherheit, Lebensmittelqualität und Verbrauchergesundheit, Verbraucherezufriedenheit, gesellschaftliche Ernährungssicherheit, Tierschutz und Arbeitsumfeld für die im Lebensmittelsektor tätige Gesellschaft.

7.2. Praktische LCA- und LCCA-Studien aus dem SusOrganic-Projekt

Um die ökologischen und ökonomischen Aspekte von lokal produzierten ökologischen Lebensmitteln zu verstehen, wurden hier einige Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCA) und der Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) des SusOrganic-Projekts vorgestellt. Die Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine Methode zur Bewertung der Umweltleistung eines Produkts (und einer Dienstleistung) unter Berücksichtigung seiner „Lebenszyklusphasen“. Gemäß ISO 14040 ist die LCA definiert als „Zusammenstellung und Bewertung von Inputs, Outputs und potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems über dessen gesamten Lebenszyklus“ (LCA-Handbuch, 2004).

Im Rahmen von SusOrganic wurde der standardisierte LCA-Ansatz der International Standard Organisation (ISO) verwendet, d.h. ISO 14040 mit der Beschreibung von LCA-Prinzipien und -Rahmen und ISO 14044 (2006) mit den Anforderungen und Richtlinien der LCA. Im Allgemeinen wurde die LCA-Studie innerhalb der Systemgrenze von der landwirtschaftlichen Produktion bis zum Verbraucherportal durchgeführt (siehe Abbildung 6.2), während die Abfallwirtschaft und der Verbrauch ausgeschlossen wurden. Eine Tonne geerntetes Frischprodukt am Hof oder im Schlachthof wurde als Funktionseinheit verwendet. Eine nähere Beschreibung der Funktionseinheit ist in Tabelle 6.1 enthalten. Zwei Umweltwirkungskategorien, der Primärenergiebedarf als kumulierter Energiebedarf (CED) und die Treibhausgasemissionen (GHG), sind in diesem Dokument vorgestellt. Für Tätigkeiten, die elektrische Energie als Input benötigen, wurde in allen Fällen Energie aus dem schwedischen nationalen Stromnetz angenommen, welches aus Wasserkraftwerken (erneuerbare Energie) und Kernenergie (nicht erneuerbar) den größten Anteil entfallen, mit Ausnahme von Bio-Lachs, wo der Standort Norwegens berücksichtigt wurde. Die Lebenszykluskostenanalyse (Life Cycle Cost Analysis, LCCA) ist eine ökonomische Bewertungstechnik, die es ermöglicht, die Gesamtkosten für den Betrieb einer Anlage oder eines Systems über einen bestimmten Zeitraum und in verschiedenen Produkt(system) Lebenszyklusphasen zu bestimmen (Farr J.V., 2011). Auch wenn es in Lebensmittelwertschöpfungsketten nicht weit verbreitet ist, ermöglicht die LCCA die Bereitstellung zusätzlicher Informationen zur Ergänzung der LCA-basierten Entscheidungsfindung. Im Falle von SusOrganic wurde die LCCA unter Berücksichtigung der gleichen Systemgrenze verwendet, die für die oben beschriebene LCA-Studie verwendet wurde. Um eine Vergleichsanalyse zwischen der Wertschöpfungskette für Frischprodukte (z.B. Äpfel) und der Wertschöpfungskette für verarbeitete Produkte (z.B. Apfelchips) durchzuführen, wurden alle Kostenwerte in Euro (€) pro Funktionseinheit dargestellt, die in der LCA-Studie angenommen wurden, d.h. jeweils pro Tonne geerntetes Frischprodukt im Betrieb oder Frischfleisch im Schlachthof. Es ist sehr wichtig zu beachten, dass diese 1 Tonne Frischprodukt dem Kunden als frisches oder verarbeitetes (z.B. getrocknetes) Produkt (wie im LCA-Fall beschrieben) geliefert wird, aber der Kostenwert pro 1 Tonne Frischprodukt, das für die Verarbeitung vorbereitet wurde (Superchilling oder Trocknung), aber nicht pro Tonne verarbeitetes Produkt angegeben wird. Im Allgemeinen wurden die Systemgrenzen und Funktionseinheiten so gewählt, dass die LCA- und LCCA-Ergebnisse jedes untersuchten ökologischen Lebensmittels aus Umwelt- und Kostensicht sinnvoll verglichen werden können.

Die LCA- und LCCA-Analysen wurden an ausgewählten Bio Lebensmittelketten durchgeführt,

nämlich Lachs aus Norwegen, der an Verbraucher in Norwegen geliefert oder nach Frankreich exportiert wurde, Rindfleisch, Äpfel, Karotten und Tomaten in Schweden (siehe Tabelle 7.1). Da die Ergebnisse von LCA und LCCA durch System-Randbedingungen und Funktionseinheiten beeinflusst werden, die bei der Analyse berücksichtigt werden, sollten die Werte mit Vorsicht verwendet werden, wenn sie mit Ergebnissen aus anderen ähnlichen LCA- und LCCA-Studien verglichen werden. Weitere Kurzbeschreibungen finden Sie hier (siehe Bild 7.2; Tabellen 7.1). Sowohl in LCA- als auch in LCCA-Fällen sind die wichtigsten Phasen des Produktlebenszyklus die landwirtschaftliche Produktion, die Nachernte und die Transportphase. Da es in jeder Bio-Lebensmittel-Wertschöpfungskette mehr als ein Transportsegment gibt, wird in Tabelle 7.2 auch eine nähere Beschreibung der Transportkonfiguration gegeben. Beispiele für Ergebniszusammenfassungen sind in den Tabellen 7.3, 7.4 und 7.5 enthalten, gefolgt von Lektionen, die für Praktiker, Entscheidungsträger und andere interessierte Benutzer nützlich sind.

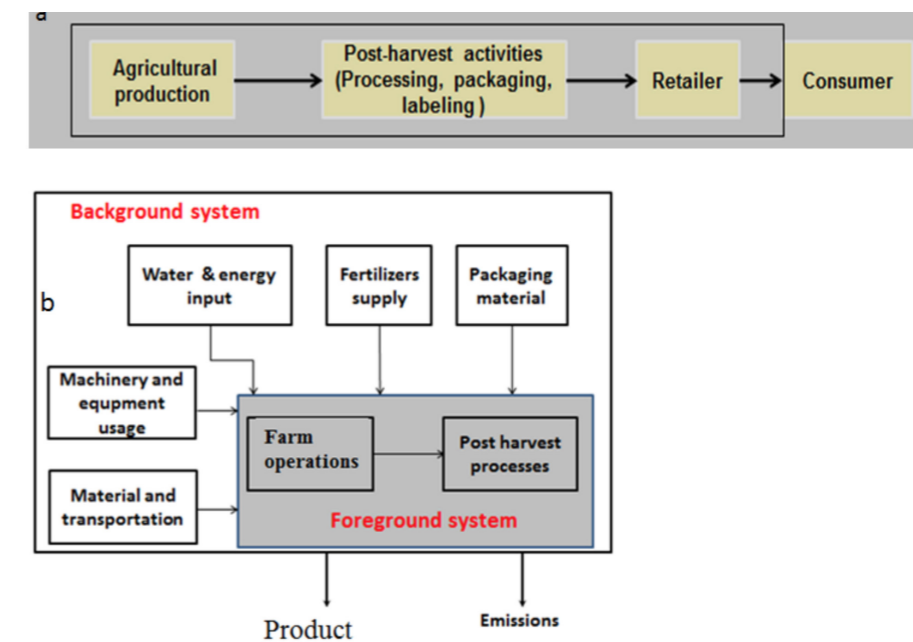


Abbildung 7.2: Systemgrenze: (a) Vereinfachte Wertschöpfungskette, die die Systemgrenze von der Farmstufe bis zum Verbraucherportal beschreibt; (b) vereinfachtes Flussdiagramm, das Hintergrund- und Vordergrundsystemgrenzen beschreibt.

Tabelle 7.1: Beschreibung der Systeme und Funktionseinheiten

Wertschöpfungskette für Bio-Lebensmittel	Systembeschreibung	Funktionseinheit
Bio-Lachs (frisch)	Lachs, der in Norwegen produziert und verzehrt wird.	1 Tonne frisches Lachsfilet im Schlachthof, das an den Verbraucher geliefert wird.
Bio-Lachs (Superchilling)	Super-Chilling vor der Verteilung an die Verbraucher	1 Tonne abends gekühltes Lachsfilet im Schlachthof, das an den Verbraucher geliefert wird.

Bio-Rindfleisch (frisch)	Biologische Rindfleischproduktion und lokaler Verbrauch in Schweden	1 Tonne knochenfreies Frischfleisch am Schlachthof, das dem Verbraucher als Frischfleisch geliefert wird.
Bio-Rindfleisch (getrocknet)	Basierend auf der Annahme der Fleisch Trocknung im Schalentrockner von 74% Feuchtigkeitsgehalt auf 5%.	1 Tonne knochenfreies Frischfleisch am Schlachthof, das dem Verbraucher als Trockenfleisch geliefert wird.
Bio-Apfel (frisch)	Hergestellt und geliefert in Schweden. Kartonverpackung berücksichtigt.	1 Tonne frische Äpfel am Hof, der als frische Äpfel an den Verbraucher geliefert wird.
Bio-Apfel (getrocknet)	In der Verarbeitungsanlage, die sich in einer Entfernung von 80 km vom Bauernhof befindet, wurde der Apfel im Trockner von MC von etwa 82% bis 11% getrocknet.	1 Tonne frischer Apfel am Hof, der als getrocknet an den Verbraucher geliefert wird.
Bio-Möhre (frisch)	Kultiviert und geliefert in Schweden.	1 Tonne frische Möhren am Hof, die dem Verbraucher als frische Möhren geliefert wird.
Bio-Möhre (Trockenmöhren)	Es wird angenommen, dass die Möhren in 80 km Entfernung vom landw. Betrieb von ca. 87% auf 12% Wassergehalt in einem Hordentrockner getrocknet werden sollen.	1 Tonne frische Möhren am Hof, die dem Verbraucher als getrocknete Möhren geliefert wird.
Bio-Tomate (frisch geliefert)	Tomatenproduktion in Schweden mit Gewächshausanlage	1 Tonne frische Tomaten am Hof, die dem Verbraucher als frische Tomaten geliefert wird.
Bio Tomaten (getrocknet)	Es wird davon ausgegangen, dass die Trocknung in 80 km Entfernung vom landw. Betrieb erfolgt. Die frischen Tomaten werden von 93% auf 12% Wassergehalt getrocknet.	1 Tonne frische Tomate am Hof, die dem Verbraucher als getrocknete Tomate geliefert wird.

Tabelle 7.2: Beschreibung der in LCCA und LCCA des SusOrganic-Projekts berücksichtigten Transportsegmente

Wertschöpfungskette für Bio-Lebensmittel	Segmente des Lebensmitteltransports
Bio-Lachsangebot in Norwegen	Etwa 580 km vom Bauernhof/Schlachthof zum Verteilzentrum in Oslo und weitere Verteilung im Umkreis von 50 km.
Bio-Lachs (Lieferung nach Frankreich)	Etwa 580 km vom Bauernhof/Schlachthof zum Verteilzentrum in Oslo und weiterer Transport nach Frankreich, d.h. etwa 1700 km Straßenverkehr mit LKW und 95 km Überseetransport mit Autofähre.

Bio-Rindfleisch	10 km vom Bauernhof zum Schlachthof (Tiertransport), 50 km vom Schlachthof zum Einzelhändler
Bio-Apfel, Bio-Karotte, Bio-Tomate, Bio-Tomate	80 km vom Betrieb zum Verarbeitungsbetrieb; 50 km vom Verarbeitungsbetrieb zum Einzelhändler

Tabelle 7.3: Beitrag der Lebenszyklusphasen zu verschiedenen Wirkungskategorien pro Funktionseinheit

Wertschöpfungskette	Wirkungskategorie	Einheit	Landwirtschaftliche Produktion	Verarbeitung	Transport	Gesamt
frischer Lachs	CED	GJ	37.78	5.48	5.21	48.38
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	1366	108	341	1815
Lachs, superchilling	CED	GJ	37.78	4.69	3.59	46.06
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	1366	110	240	1715
Reduzierung Erhöhung	CED	%	0	(-)14	(-)30	(-)5
	GWP ₁₀₀	%	0	(+)2	(-)30	(-)6
Frisches Rindfleisch	CED	GJ	6.34	1.7	0.69	8,72
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	12889	30	45	12964
Getrocknetes Rindfleisch	CED	GJ	6.34	9.72	0.27	16.33
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	12889	70	18	12977
Reduzierung Erhöhung	CED	%	0	(+)472	(-)61	(+)87
	GWP ₁₀₀	%	0	(+)133	(-)60	(+)0.1
Frische Äpfel	CED	GJ	1.32	3.33	1.46	6.11
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	34	136	95	265
Getrocknete Äpfel	CED	GJ	1.32	7.51	0.84	9.68
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	34	55	55	143
Reduzierung Erhöhung	CED	%	0	(+)125	(-)43	(+)58
	GWP ₁₀₀	%	0	(-)60	(-)43	(-)46
Frische Möhren	CED	GJ	0.31	1.22	1.12	2.64
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	35	14	73	121
Getrocknete Möhren	CED	GJ	0.31	5.7	0.67	6.67
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	35	33	44	111
Reduzierung Erhöhung	CED	%	0	(+)367	(-)40	(+)153
	GWP ₁₀₀	%	0	(+)141	(-)40	(-)8
Frische Tomaten	CED	GJ	41	2.17	1.42	44.58
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	366	88	93	547
Getrocknete Tomaten	CED	GJ	41	7.60	0.80	49.40
	GWP ₁₀₀	kg CO2 eqc	366	49	52	467
Reduzierung Erhöhung	CED	%	0	(+)250	(-)44	(+)11
	GWP ₁₀₀	%	0	(-)45	(-)43	(+)15

Zu Tabelle 7.3:

a) Die Verarbeitungsphase beinhaltet den Trocknungsprozess. b) Die Transportphase umfasst den Transport vom landwirtschaftlichen Betrieb zum Verarbeitungsbetrieb und von der Einrichtung zum Einzelhandel und dann zum Verbraucherportal c) kg CO₂-Äquivalent.

Tabelle 7.4: Einfluss des Energieeffizienzbedarfs bei der Tomatentrocknung auf die CED- und Treibhausgasemissionen (GHG)

Wirkungskategorie	CED		GHG Emissionen	
	GJ	Änderung in %	kg CO ₂ eq	Änderung in %
Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen				
30% Reduzierung	47.18	(-)4.5	455.07	(-)2.7
Grundszenario*	49.40	0	467.44	0
30% Erhöhung	51.62	(+)4.5	479.81	(+)2.7
Ohne landwirtschaftliche Produktionsphase				
30% Reduzierung	6.18	(-)26.42	88.68	(-)12.24
Grundszenario*	8.40	0	101.05	0
30% Erhöhung	10.62	(+)26.42	113.42	(+)12.24

*- Grundsätzliches Szenario ist die Trocknungsenergie, die in der Wertschöpfungskette für getrocknete Tomaten berücksichtigt wird, wie in Tabelle 7.2 oben dargestellt.

Tabelle 7.5: Lebenszyklus-Kostenrechnungsstufen und ihr Anteil an den Gesamtkosten pro Funktionseinheit

Wertschöpfungskette für Bio-Lebensmittel	Unit ^a	Farm stage	Post-harvest processing stage ^b	Transport stage	Total
Lachs aus Norwegen (mit normaler Kühlkette)	€	6213	475	27	6715
Innerhalb Norwegens gelieferter Lachs (Supper-Chill)	€	6213	494	18	6725
Reduzierung/Erhöhung	%	0	(+)4.0	(-)33.33	(+)0.15
Lachslieferung nach Frankreich (mit normaler Kühlkette)	€	6213	475	106	6794
Lachs nach Frankreich geliefert (Superchilling)	€	6213	494	71	6778
Reduzierung/Erhöhung	%	0	(+)4	(-)33	(-)0.24
Frischer Apfel	€	1865	482	42	2391
Trockenapfel	€	1865	643	27	2537
Reduzierung/Erhöhung	%	0	(+)33.4	(-)36	(+)6
Frisches Rindfleisch	€	6326	14204 ^c	1550	22080
Getrocknetes Rindfleisch	€	6326	14204 ^c	885	21964
Reduzierung/Erhöhung	%	0	(+)4	(-)42	(+)0.5

a- Die Werte sind pro Funktionseinheit angegeben, nicht aber pro Tonne Endprodukt. b) Dazu gehört auch die Verpackung in dieser Phase; c) Auf der Grundlage einer durchschnittlichen Betriebsspanne von 4,4% auf Verarbeitungs- und Einzelhandelsebene, die in einigen Fällen höher sein könnte.

7.3. Lehren aus LCA- und LCCA-Studien

Die LCA-Ergebnisse aus dem SusOrganic-Projekt wurden in Tabelle 7.3 zusammengefasst. Die Werte geben die Gesamtzahl der CED in Giga Joule (GJ pro Funktionseinheit) und die Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äquivalent (kg CO₂-Äquivalent pro Funktionseinheit) sowie den Beitrag von drei wichtigen Lebenszyklusphasen an, nämlich landwirtschaftliche Produktionsstufe, Nachernte- und Verarbeitungsstufe sowie Transportstufe pro Funktionseinheit. Tabelle 7.4 stellt ein Beispiel dar, wie die Verbesserung der Trocknungsenergie die Umweltbelastung reduzieren könnte.

Basierend auf den LCA-Ergebnissen unter den definierten Systemgrenzen und Funktionseinheiten wurden einige wichtige Erkenntnisse aufgezeigt:

- Von den untersuchten Biolebensmitteln stellten sich Lachs- und Tomaten-Wertschöpfungsketten am energieintensivsten heraus. Der Gesamtenergiebedarf für Bio-Lachs beträgt ca. 48 GJ für den normalen Kühlkettenversorgungsfall und ca. 49 GJ für das Superchilling. Etwa 80% des Energieeinsatzes befinden sich in der landwirtschaftlichen Produktionsphase von Lachs, was darauf hindeutet, dass die Futtermittelproduktion und die Phasen der Lachsaufzucht mehr Aufmerksamkeit hinsichtlich Verbesserungen erfordern.
- Der Gesamtwert für frische Tomaten liegt bei etwa 45 GJ, während er für getrocknete Tomaten etwa 49GJ beträgt. Etwa 90% der 45GJ werden im landwirtschaftlichen Betrieb verbraucht, da der Energieverbrauch für die Gewächshausheizung und andere landwirtschaftliche Aktivitäten sehr hoch ist. Aus energetischer Sicht ist die landwirtschaftliche Produktionsphase daher ein Hot-Spot, der die Nachhaltigkeit des ökologischen Tomatenanbaus auf Treibhausbasis in Schweden gefährden könnte.
- Was die Treibhausgasemissionen betrifft, so hat Biorindfleisch mit etwa 12964 kg CO₂-Äquivalent bei der Lieferung von frischem Rindfleisch und 12977 kg CO₂-Äquivalent bei Trockenfleisch die größten Auswirkungen. Neben Rindfleisch hat Bio-Lachs einen hohen THG-Emissionswert mit 1815 kg CO₂- Äquivalent normaler Kühlkette und 1715 kg CO₂- Äquivalent für den Versorgungsfall mit Lachs nach dem Superchilling Verfahren.
- Der Trocknungsprozess erhöht den Energiebedarf in der Verarbeitungsphase und reduziert in einigen Fällen die Treibhausgasemissionen. Der Trocknungsprozess reduziert jedoch auf Grund der Gewichtsminderung sowohl den Energiebedarf als auch die Treibhausgasemissionen in den Transportphasen im Vergleich zu Frischprodukten.
- In fast allen Fällen reduzierte der Trocknungsprozess die gesamten Treibhausgasemissionen in jeder Produktwertschöpfungskette. Die Reduktion variiert von 8% (Fall von Bio-Karotte) bis 46% (Fall von Bio-Apfel).
- Eine weitere Verbesserung der Effizienz der Lebensmittelverarbeitung (z.B. Trocknung) führt zu einer Verringerung der Umweltbelastung. Wenn beispielsweise die Trocknungsenergie um

30% reduziert wird, könnten der Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen aus den Verarbeitungs- und Transportstufen (ohne landwirtschaftliche Stufe) bei der Wertschöpfungskette von Bio-Tomaten um 26% bzw. 12% reduziert werden (siehe Tabelle 7.4).

- Neben der Verbesserung der Energieeffizienz in der Landwirtschaft und nach der Ernte ist die Einführung erneuerbarer Energien wichtig, wo immer dies möglich ist, um die Nachhaltigkeit der Wertschöpfungsketten für ökologische Lebensmittel zu verbessern.

Tabelle 7.4 zeigt einige Ergebnisse aus der LCCA, die für verschiedene Lebenszyklusphasen berechnet wurden. Im Falle der Wertschöpfungskette für Bio-Lachs reduziert das Superchillingverfahren die Transportkosten um etwa 33%. Die Phase der Lachszucht und -verarbeitung (einschließlich der Verpackung) macht jedoch etwa 92% bzw. 7% der gesamten Lebenszykluskosten aus, und weitere Verbesserungsmaßnahmen in diesen Phasen könnten die Nachhaltigkeit von Bio-Lachs verbessern.

Im Falle der Lieferkette für Bioäpfel erhöhte der Trocknungsprozess die Gesamtkosten um 6% im Vergleich zu Frische-Lieferkisten. Die Kosten in der Nachernteverarbeitung wurden um rund 33% erhöht, während die Transportkosten um 36% gesenkt wurden. Das bedeutet, dass bei größeren Vertriebswegen der Kostenvorteil gegenüber der Frischapfelflieferung steigt.

Auf Betriebsebene werden die Produktionskosten für Rindfleisch schätzungsweise höher sein als die Verkaufspreise für Schlachttiere, was darauf hindeutet, dass im Falle Schwedens eine Beihilfe für die ökologische Produktion zur Förderung der ökologischen Rindfleischproduktion erforderlich ist. Die Kosten für die Verarbeitung von Rindfleisch wurden auf der Grundlage einer durchschnittlichen Betriebsspanne von 4,4% auf Verarbeitungs- und Einzelhandelsebene berechnet, die in einigen Fällen höher sein könnte. Höhere Gewinnmargen deuten darauf hin, dass die Betriebskosten auf Verarbeitungs- und Einzelhandelsebene gesenkt werden könnten, was wiederum die gesamtwirtschaftliche Nachhaltigkeit der ökologischen Rindfleisch-Wertschöpfungskette erhöht. Im Allgemeinen erhöht der Trocknungsprozess die Kosten in der Verarbeitungsphase, kann aber durch eine geringere Transportnachfrage und Verpackung abgelöst werden.

8. Lebensmittel Trocknung und damit verbundene Lebensmittellogistik

SLU, Department für Energie and Technologie, Schweden

Gebresenbet, G. & Bosona, T.

8.1. Einleitung

Um FVCs zu erhalten und zu verbessern, sind systemische Veränderungen in den gesamten Lebensmittelversorgungsketten ein Muss. Dazu könnten die Einführung effizienterer Produktions- und Verarbeitungstechniken (z.B. Trocknung), Konservierungs-, Lager- und Transporttechniken auf regionaler oder landwirtschaftlicher Ebene gehören. Durch Steigerung der Lebensmittelproduktion an produktiven Standorten, könnten Landwirte die Bevölkerung regional mit weniger ökologischen und wirtschaftlichen Kosten ernähren und so den Bedarf an Nahrungsmittelimporten aus der Ferne verringern. Eine solche lokale Nahrungsmittelproduktion sollte in die ökologi-

sche Nahrungsmittelproduktion integriert werden, um den ökologischen und sozialen Nutzen für die lokalen Nahrungsmittelkonsumenten zu erhöhen.

Aus Sicht auf die Umwelt und die Nachhaltigkeit sind weitere Untersuchungen erforderlich, die sich auf Nacherntephasen von Lebensmittelzyklusphasen konzentrieren. Bisher gibt es eine Vielzahl von Forschungsarbeiten im Lebensmittelsektor, wobei der Schwerpunkt jedoch hauptsächlich auf der landwirtschaftlichen Produktionsphase liegt. Nach der Ernte wurden Phasen wie Lagerung, Verpackung, Transport und Lebensmittelverlust entlang von FVCs wenig beachtet (Hammond et al., 2015).

Nicht nur die Nahrungsmittelknappheit wirft vermehrt Nachhaltigkeitsbedenken für den Nahrungsmittelfernverkehr auf. Die unterschiedlichen Produktionskosten in den verschiedenen Regionen führen dazu, dass Lebensmittel über lange Distanzen transportiert werden. Ebenso sind die Klimaveränderungen und saisonale Schwankungen der Produktion Gründe für den Nahrungsmittelfernverkehr über weite Strecken (Borg et al., 2016). Tabelle 8.1 zeigt das Volumen und den Wert des Lebensmittelhandels in Europa in den Jahren 2012 und 2016. Es zeigt, wie der Lebensmittelhandel sowohl in Volumen als auch in Werten zugenommen hat. Das Import- und Exportvolumen stieg von 2012 bis 2016 um 6% bzw. 42%. Diese zunehmende Tendenz des Volumens des Lebensmittelhandels bedeutet einen verstärkten Transport von Lebensmitteln über weite Strecken mit erhöhten Umweltbelastungen und wirtschaftlichen sowie sozialen Einschränkungen.

Tabelle 8.1: Beispiel für den internationalen Lebensmittelhandel Europas (Eurostat, 2017)

Jahr	Import nach Europa		Export aus Europa	
	Mio. Tonnen	Mrd. Euro	Mio. Tonnen	Mrd. Euro
2012	87.74	85,6	64	70
2016	93	101	91	84
Zuwachs %	6	18	42	20

8.1.1. Trocknungsprozess und Lebensmitteltransport

Beste Erfahrungen mit der Trocknung von Lebensmitteln könnten eine wichtige Rolle bei diesem derzeit zunehmenden Trend des Lebensmitteltransports sowohl im Transportvolumen als auch in der Entfernung spielen (siehe Tabelle 8.1). Dies kann durch die Einführung effektiver und erschwinglicher Verarbeitungseinrichtungen für lokale oder regionale Lebensmittelerzeuger erfolgen, um den Transport von frischen Lebensmitteln zu reduzieren und die Einfuhr in die jeweiligen Region zu verringern, sowie durch die Verarbeitung von Lebensmitteln vor dem Langstreckentransport.

Lebensmittel Trocknungsprozesse beeinflussen nicht nur die Aspekte der Lebensmittelqualität, sondern auch die Dienstleistungen und das Management der Lebensmittellogistik. In diesem Fall bezieht sich der Begriff Lebensmittellogistik auf den Transport, die Verpackung, die Lagereinrichtungen und Informationen im Zusammenhang mit der Bewegung von Lebensmitteln entlang der Lieferkette. Im weiteren Sinne kann Logistikmanagement definiert werden als „der

Teil des Lieferketten Managements, der den effizienten, effektiven Weitertransport plant, implementiert und steuert und den Fluss und die Lagerung von Waren, Dienstleistungen und damit zusammenhängenden Informationen zwischen Herkunfts- und Verbrauchsort umkehrt, um den Anforderungen der Kunden gerecht zu werden“ (CSCMP, 2011). Daher führt jede Verbesserung der Leistung der Lebensmittellogistikdienste und des Logistikmanagements zur Nachhaltigkeit von FVC. In diesem Zusammenhang spielt die Lebensmittellogistik eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Nachhaltigkeit der ökologischen Lebensmittelproduktion und -versorgung. In diesem Dokument wird die Rolle von Lebensmitteltransport, -verpackung und -lagerung sowie die Frage, wie geeignete Trocknungsverfahren den logistischen Aspekt beeinflussen könnten, mit Beispielen aus dem SusOrganic-Projekt, beschrieben. Im Fall des SusOrganic Projects wurde in den meisten Fällen der Fall der lokalen Produktverteilung angenommen (siehe Tabelle 8.2).

8.1.2. Lebensmitteltrocknung und ihre Auswirkungen auf die Haltbarkeit und den Verlust von Lebensmitteln

Die zunehmende Entfernung und das zunehmende Volumen des Lebensmitteltransports zur Versorgung der wachsenden und urbanisierten Bevölkerung sollte danach streben energieeffizient zu sein. In dieser Hinsicht sind Frachtschiffe für den Fernverkehr effizienter als Lastwagen, Züge oder Flugzeuge (Harmond et al., 2015). Einige Lebensmittel wie Fisch, Fleisch, frisches Obst und Gemüse haben eine kurze Haltbarkeit, und diese Lebensmittel benötigen Hochgeschwindigkeitstransporte, um Verderb zu vermeiden und die Verbraucher zufrieden zu stellen, was zu hohen Transportkosten führt. Daher spielt die Einführung der Lebensmittelverarbeitung wie die Lebensmitteltrocknung eine große Rolle bei der Senkung der Transportkosten. Denn den Trocknungsprozess erhöht sich die Haltbarkeit von Lebensmitteln, was wiederum den schnellen und kostspieligen Transport von Lebensmitteln überflüssig macht. Neben der Reduzierung des Transportvolumens vermeidet die Lebensmitteltrocknung den Einsatz zusätzlicher Energie für die Kühlung oder das Gefrieren auf dem Weg vom landwirtschaftlichen Betrieb zum Verbraucher. Durch den Einsatz von Trocknungstechnik sind auch kleine Betriebe mit lokal erzeugten und vertriebenen Biolebensmitteln in der Lage, die Transportkosten senken, Lebensmittelverluste zu vermeiden und mehr Marktchancen zu schaffen.

Der Verlust von Lebensmitteln ist eines der Probleme im Lebensmittelsektor. In allen globalen Lebensmittelversorgungsketten (einschließlich des Bio- und konventionellen Lebensmittelsektors) gehen schätzungsweise jährlich etwa 1,3 Milliarden Tonnen essbarer Lebensmittel verloren (Corrado et al., 2016). Aufgrund seiner ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Belange sollte der Verlust von Lebensmitteln mehr Aufmerksamkeit erhalten. Verschwendung von Lebensmitteln bedeutet Verschwendung von Ressourcen, die als Input für die Herstellung, Verarbeitung, Verpackung, Lagerung und Verteilung von Lebensmitteln verwendet werden. Dazu gehören Energie, natürliche Ressourcen (z.B. Wasser, Land) und Humanressourcen.

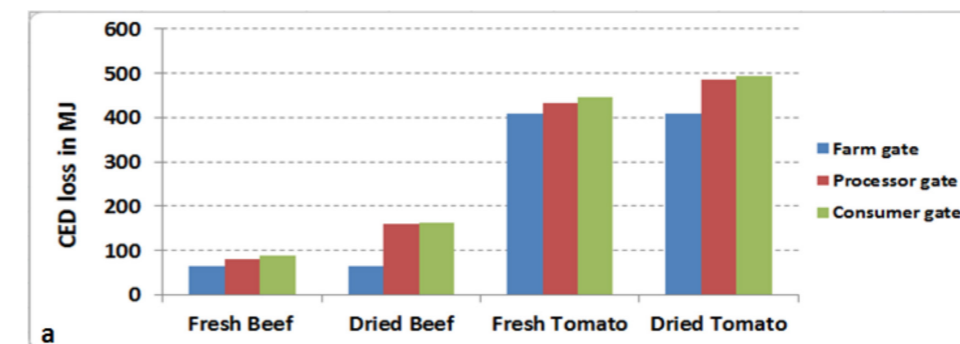
Tabelle 8.2 zeigt den geschätzten Nahrungsmittelverlust und den damit verbundenen Ressourcenverlust.

Objektbezeichnung	Einheit	Menge
Jährliche Lebensmittelabfälle in der gesamten globalen Lebensmittelversorgungskette	Mrd. Tonnen	1.3
Wasser, das zur Herstellung der oben genannten verlorenen Lebensmittel verwendet wird.	Kubikmeter	80 000
Flächen, die zur Herstellung der oben genannten verlorenen Lebensmittel genutzt werden.	Mrd. Hektar	1.4
Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit dem oben genannten Lebensmittelverlust	Giga Tonnen CO ₂ -Äquivalent	3.3

Quelle: Corrado et al. (2016).

Der Verlust von Lebensmitteln auf den nachgelagerten Stufen der Lieferkette ist neben dem Verlust von essbaren Lebensmitteln mit zusätzlichen Ressourcenverlusten verbunden. Es ist wichtig zu beachten, dass Verluste nach der Verpackungsphase die Umweltbelastung und den wirtschaftlichen Verlust erhöhen. Verarbeitete Lebensmittel, z.B. getrocknete Produkte, müssen Transport und Handhabung aushalten und am Bestimmungsort in einem zufriedenstellenden Zustand ankommen (UNECE, 2007). Im Allgemeinen ist die Verschwendung von verarbeiteten Lebensmitteln im Einzelhandel oder bei den Verbrauchern mit einem höheren Ressourcenverlust als Lebensmittelabfälle auf betrieblicher Ebene verbunden, da auf den nachgelagerten Stufen der Lebensmittelversorgungskette mehr Ressourceneinsatz für die Verarbeitung, Handhabung und den Transport verwendet wird.

Dies wurde mit Beispielen aus dem SusOrganic-Projekt erläutert. Abbildung 8.1 veranschaulicht, wie der Verlust von Lebensmitteln in Höhe von 1% der Funktionseinheit (d.h. 10 kg Frischprodukt am Hof) den kumulierten Energiebedarf (CED) und die Treibhausgasemissionen erhöhen kann. Abbildung 8.1 zeigt ein typisches Beispiel dafür, wie der Energiebedarf durch Lebensmittelverluste entlang der Wertschöpfungskette erhöht wird. Es kann gezeigt werden, dass der Verlust von getrocknetem Rindfleisch auf Verbraucherebene den Energieverlust um etwa 160 % erhöht hat, verglichen mit dem gleichwertigen Verlust am Hof. Ebenso erhöhte der Verlust von getrockneten Tomaten am Verbraucherportal den Energieverlust um mehr als 130 % im Vergleich zu gleichwertigen Produktverlusten in der Landwirtschaft.



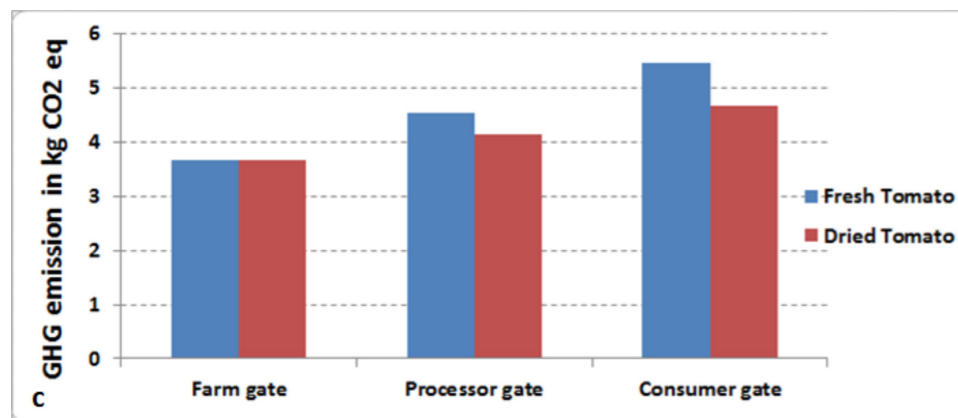
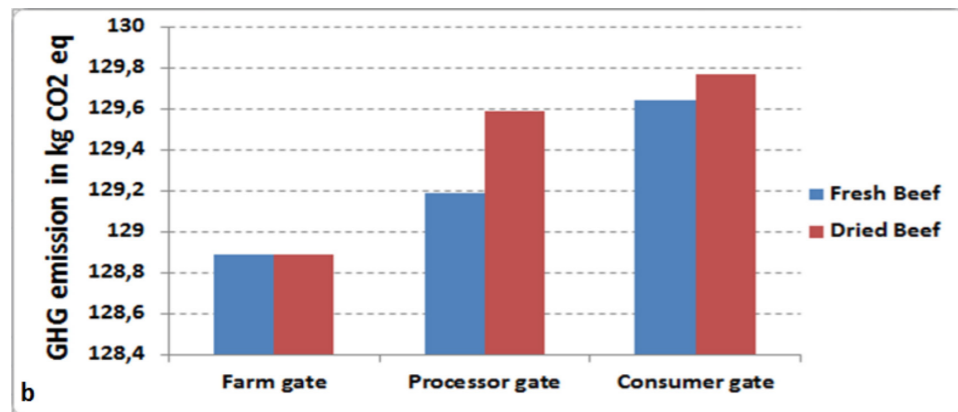


Abbildung 8.1: Typische Darstellung der zusätzlichen Umweltbelastung durch Produktverlust in Höhe von 1% der Funktionellen Einheit (FU), d.h. 10 kg Frischprodukte auf betrieblicher Ebene. a) Auswirkungen von Lebensmittelverlusten auf den kumulierten Energiebedarf der Wertschöpfungskette von ökologischem Rindfleisch und Tomaten b) Auswirkungen von Produktverlusten auf die Treibhausgasemissionen der Rindfleisch-Wertschöpfungskette c) Auswirkungen von Produktverlusten auf die Treibhausgasemissionen der Tomaten-Wertschöpfungskette

Was die Treibhausgasemissionen betrifft, so ist ein Anstieg der Emissionen (sowohl bei der Lieferung von Frischfleisch als auch bei der Lieferung von Trockenfleisch) um etwa 1% zu verzeichnen, die aufgrund von Verlusten auf Verbraucherebene im Vergleich zu Verlusten auf Betriebsebene entstehen. Die durch den Verlust von Rindfleischprodukten verursachten Emissionen (entspricht 10 kg Frischfleisch im Betrieb) sind jedoch signifikant, d.h. bis zu 130 kg CO₂-Äquivalente pro Funktionseinheit (siehe Abbildungen 8.2 b).

Im Falle von Tomaten ist die durch Produktverluste verursachte Treibhausgasemission im Vergleich zum Rindfleisch geringer (siehe Abbildung 8.2 c). Die Emissionen durch den Verlust von frischer Tomaten auf Verbraucherebene liegen jedoch bei etwa 5,5 kg CO₂-Äquivalent, was um 49 % höher ist als der entsprechende Verlust auf landwirtschaftlicher Ebene. Für getrocknete Tomaten betragen diese Werte 4,7 kg CO₂-Äquivalent bzw. 28 %. Dies zeigt, dass der Trocknungsprozess bei effektiver Umsetzung mehrere Vorteile aus ökologischer Sicht hat:

- i. Er erhöht die Haltbarkeit des Produkts, was wiederum den Produktverlust reduziert;
- ii. Er reduziert die gesamten Treibhausgasemissionen der Tomaten-Wertschöpfungskette aufgrund der Verringerung des Verpackungs- und Transportvolumens (siehe Tabelle 8.3); und
- iii. Der Verlust von getrockneten Tomaten am Verbraucherportal ist mit weniger Treibhausgasemissionen im Vergleich zum gleichen Verlust von frischen Tomaten auf Verbraucherebene verbunden.

Der Trocknungsprozess sollte jedoch mit der Verwendung umweltfreundlicherer Lebensmittelverpackungen kombiniert werden. Nachhaltige Lebensmittelverpackungen ermöglichen es, den lokal produzierten ökologischen Lebensmittelsektor zu fördern. Lebensmittelverpackungen sollten umweltfreundlich, verbraucherfreundlich und wirtschaftlich erschwinglich für Lebensmittelproduzenten sein, insbesondere für kleine Bio-Lebensmittelhersteller. Eine solche nachhaltige Lebensmittelverpackung ermöglicht es, die Frische von Lebensmitteln zu erhalten, ihre Haltbarkeit zu verlängern und den Verlust von Lebensmitteln zu reduzieren. Dies wiederum reduziert die Umweltbelastung in der Lebensmittelwertschöpfungskette, erhöht die Zufriedenheit der Verbraucher und senkt die Produktionskosten für Lebensmittel.

So verursacht beispielsweise die Verwendung von Kunststoffverpackungen weniger Treibhausgasemissionen als die Verwendung von Papier- und Kartonverpackungen. Ein Bio-Gemüsekitensystem in Großbritannien zeigte, wie die durch Verpackungen verursachten Treibhausgasemissionen um 70% reduzieren könnte, wenn Kunststoffkisten anstelle von Kartons verwendet wurden (The Guardian, 2010). Ebenso zeigten die LCA-Ergebnisse des SusOrganic-Projekts, dass die Verwendung von Kartons als Transportverpackung die Treibhausgasemissionen und den Energieverbrauch erhöhen kann. So könnte beispielsweise die Verwendung von Kartonagen für Verpackungen (zusätzlich zu Kunststoffverpackungen) etwa 94% bzw. 24% der Treibhausgasemissionen aus der Nacherntephase der Wertschöpfungskette für frische Äpfel (123 kg CO₂-Äquivalent) und getrocknete Äpfel (55 kg CO₂-Äquivalent) beitragen. Was die CED betrifft, so wird die Verwendung von Karton etwa 89 % des gesamten CED-Wertes (3,3GJ pro Funktionseinheit), der für die Verarbeitungs- und Handhabungsphase nach der Ernte geschätzt wird, beitragen. Bei getrocknetem Apfel beträgt trägt die Verpackung in Karton 4 % des Energieeinsatzes von insgesamt 7,5 GJ in der Nacherntephase bei.

Ebenso beträgt die Verwendung von Kartonverpackungen für frisches Rindfleisch 57% des CED-Wertes (4 GJ) und etwa 77% der gesamten Treibhausgasemissionen (134 Kg CO₂-Äquivalente) aus der Verarbeitungsstufe (einschließlich der Schlachtung und Verpackung) bei. Im Falle von Trockenfleisch betragen die Zahlen 6% des CED-Wertes (10,32 GJ) und 28% der Treibhausgasemissionen (97 kg CO₂-Äquivalente) aus der Verarbeitungsphase, die das Schlachten, Trocknen und Verpacken umfasst. Bei der Trockenfleischverpackung reduziert sich der Anteil der Verpackung durch den erhöhten Anteil des Energieverbrauchs bei der Trocknung, der etwa 80% beträgt.

8.1.3. Hervorgehobene Lehren

In Bezug auf die Lebensmitteltrocknung und die damit verbundenen logistischen Aspekte, die

vorstehend erläutert wurden, können einige wichtige Anmerkungen gemacht werden:

- Der Ort des Trocknungsprozesses sollte so nah wie möglich am Betrieb liegen. Dies reduziert die den Transport frischer Produkten vom Betrieb zur Verarbeitungsanlage, was wiederum die Umweltbelastung und die Kosten reduziert.
- Es geht nicht nur um die Verarbeitung der Lebensmittel, sondern auch um die Reduzierung der Verluste und die damit verbundenen Umwelt- und Kostenbelastungen durch die geeignete Verpackung und Handhabung.
- Die Nutzung erneuerbarer Energien für die Lebensmittelverarbeitung, -lagerung und -transport reduziert, sofern sie möglich ist, die Umweltbelastung durch die Bereitstellung biologischer Lebensmittel. Bestimmte Bereiche können höhere Produktionskosten verursachen, wenn die erneuerbaren Energien entsprechend teurer sind. Es wird empfohlen, dass diese zusätzlichen Kosten innerhalb der Grenze liegen, die durch erhöhte Verkaufspreise für Bio-Lebensmittel ausgeglichen werden kann.
- Bei Versorgung über kurze Distanzen führt insbesondere der Trocknungsprozess zu einer erhöhten Umweltbelastung. Gleichzeitig wird dies durch eine längere Haltbarkeit der Lebensmittel, mehr Lagerraum und eine einfachere Handhabung ausgeglichen. Weiterhin reduziert der Trocknungsprozess bei langen Lieferketten das Transportvolumen und die Verpackung, was die Umweltbelastung durch den Trocknungsprozess kompensiert.
- Der Trocknungsprozess erhöht die Umweltbelastung und die Kosten in der Verarbeitungsphase, kann aber durch eine geringere Transportnachfrage und Verpackung abgelöst werden. Dies deutet darauf hin, dass mit zunehmender Verteilungsdistanz der Umwelt- und Kostenvorteil von Trockenprodukten im Vergleich zu Frischproduktlieferungen zunimmt. Die praktische Umsetzung erfordert jedoch ein integriertes Management der Lebensmittelwertschöpfungskette, das alle Akteure entlang der Kette einbezieht.
- Für die Fälle, in denen Transport- und Verarbeitungsphasen zur mehr Umweltbelastung beitragen als die landwirtschaftliche Stufe (z.B. Bioäpfel- und möhren Wertschöpfungsketten), führt die Verbesserung der Energieeffizienz in der Verarbeitungsphase und die geringeren Transportanforderungen zu einer gesteigerten Nachhaltigkeit der Biolebensmittel Wertschöpfungsketten. So ermöglicht beispielsweise die Verringerung des Abstands zwischen der Verarbeitungsanlage (Trocknung) (und zwischen Schlachthof und Betrieb im Falle der Fleisch Wertschöpfungskette) eine Verbesserung der Nachhaltigkeit der ökologischen Wertschöpfungsketten.
- Die Steigerung der Produktion und die Verringerung von Verlusten entlang der Lebensmittelversorgungskette spielt im Allgemeinen eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Nachhaltigkeit der Lebensmittelwertschöpfungskette. In diesem Zusammenhang stellt die Einführung geeigneter Trocknungsmethoden und Verpackungen eine einen hohen Nutzen bei der Erhöhung der Lebensmittelverfügbarkeit und der Verringerung ökologischer und wirtschaftlicher Zwänge dar.
- Neben der Verlängerung der Haltbarkeit von Bio-Lebensmitteln ermöglichen geeignete Konservierungsmethoden wie das Kühlen von Lachs und das Trocknen von Fleisch, Obst und

Gemüse, das Angebot an Bio-Lebensmitteln lange Transportwege aufrechtzuerhalten und die Nachfrage der Verbraucher nach Biolebensmitteln zu befriedigen. Die Zufriedenheit der Verbraucher ergibt sich nicht nur durch ein erhöhtes Angebot an Biolebensmitteln, sondern auch durch eine geringere Umweltbelastung durch die Lieferung von Trockenprodukten statt der Lieferung von Frischprodukten über weite Strecken.

8.2. Referenzen

- Borg J., Per Fors, Simon Isaksson S., Kambanou M.L.(2016). Food transport within the context of sustainability. Sustainability Opportunities 2016. https://gmv.gu.se/digitalAssets/1593/1593132_final-presentation-transportation-of-food.pdf
- Corrado S., Ardente F., Sala S., Saouter E. (2016). Modelling of food loss within life cycle assessment: From current practice towards a systematization. *Journal of Cleaner Production*, 140 (2017) 847-859. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.050>.
- CSCMP (2011). CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary. Council of supply chain professionals. URL: http://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921 [2018-02-20].
- EC (2007). Council Regulation (EC) No 834/2007 of 28 June 2007 on organic production and labelling of organic products and repealing Regulation (EEC) No 2092/91. *Official Journal of the European Union*.
- Eurostat (2017). EU trade in food. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/EDN-20171016-1?inheritRedirect=true&redirect=%2Feurostat%2F>. Accessed on February 24, 2018.
- Farr J.V. (2011). *Systems Life Cycle Costing Economic Analysis, Estimation, and Management*. Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742.
- Hammond S.T, Brown J.H., Burger J.R., Flanagan T.P., Fristoe T.S., Mercado-Silva N., Nekola J.C., and Okie J.G. (2015). Food Spoilage, Storage, and Transport: Implications for a Sustainable Future. *BioScience* 65 (8): 758-768. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv081>.
- LCA handbook (2004). *Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers; eBook ISBN: 0-306-48055-7; New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow.
- DDP-19: concerning the marketing and commercial quality control of DRIED TOMATOES. 2007 edition, United Nations. https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trade/agr/standard/dry/dry_e/19DriedTomatoes_e.pdf. [Accessed on 2016-12-12].
- UNECE (2007). UNECE STANDARD Giovannoni E. and Fabietti G. (2014). What Is Sustainability? A Review of the Concept and Its Applications. *Integrated Reporting*, DOI: 10.1007/978-3-319-02168-3_2.
- UN (2017). *The Sustainable Development Goals Report 2017 of United Nations*. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2017/TheSustainableDevelopmentGoalsReport2017.pdf>.

Kapitel II Kühlen und Gefrieren

II.1 SUPERCHILLING

1. Konzept Superchilling

SINTEF Energy Research, Trondheim, Norwegen
Bantle, et al.

Die Ernährungssicherheit ist eine von vielen Herausforderungen, vor denen die Menschheit in Zukunft steht und die stark von der wachsenden Bevölkerung, der verfügbaren landwirtschaftlichen Fläche und den Energieressourcen auf dem Planeten abhängt. Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) schätzt, dass jedes Jahr etwa ein Drittel aller für den menschlichen Verzehr hergestellten Lebensmittel in der Welt verloren geht oder verschwendet wird (FAO, 2013). Diese Verluste stellen eine verpasste Chance für die globale Ernährungssicherheit dar, insbesondere wenn man die begrenzten landwirtschaftlichen Ressourcen und die Tatsache berücksichtigt, dass immer noch rund 1 Milliarde Menschen unter Hunger leiden. Die FAO identifiziert unter anderem die Fleischindustrie als globalen Umwelt-Hotspot im Zusammenhang mit der Verschwendung von Lebensmitteln, und fordert eine Prüfung durch Entscheidungsträger, um der Abfallreduzierung entgegenzutreten. Selbst wenn die Abfallmengen an Fleisch vergleichsweise gering sind, haben sie erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt in Bezug auf Landnutzung und CO₂-Bilanz, insbesondere in einkommensstarken Regionen, in denen etwa 67 % des Fleisches verschwendet werden, sowie in Lateinamerika.

Der Bio-Fleischmarkt in Norwegen ist klein und nur die Hälfte des biologisch erzeugten Fleisches wird unter der Bio-Kennzeichnung verkauft. Die Gründe dafür werden in diesem Projekt nicht untersucht, aber beim Kontakt mit kleinen Produzenten wurde deutlich, dass in der Kühlkette zwischen Schlachtung, Verarbeitung und Verpackung wertvolle Zeit verloren geht, bevor das Produkt marktreif ist. In einigen Fällen verfügen kleine Erzeuger nicht über die Infrastruktur/Möglichkeit, selbst zu schlachten, und müssen ihre Tiere in zertifizierte Schlachthöfe verbringen. Nach der Schlachtung wird das unverarbeitete Rohfleisch zur Weiterverarbeitung und/oder Verpackung und Kennzeichnung an die Erzeuger zurückgesandt. Erst dann kann das Fleisch an den Einzelhändler verschickt werden. Das Bio-Fleisch ist daher einige Tage alt, bevor der Verbraucher auf Grund der Entfernungen, des Produktionsortes und der für den Transport und die Verarbeitung erforderlichen Zeit die Möglichkeit hat, es zu kaufen.

Folglich weist das Bio-Fleisch bereits einer Qualitätsminderung im Vergleich zu traditionell produziertem Fleisch im Supermarkt auf. Es kann geschätzt werden, dass die Haltbarkeit von Bio-Fleisch im Vergleich zu konventionellem Fleisch in bestimmten Fällen um 50 % reduziert ist. Möglichkeiten zur Verlängerung der Haltbarkeit und zur Verbesserung der Qualität von Biofleisch würden den Erzeugern helfen, auf dem Markt wettbewerbsfähiger zu sein und würde auch den lokalen Erzeugern ermöglichen, entferntere Märkte zu erreichen, die derzeit aufgrund der Transportzeit nicht genutzt werden können.

Fleisch- und Fischprodukte werden meist durch traditionelle Kühlverfahren konserviert und müssen über die Kühlkette von den Produktionsanlagen bis auf den Teller des Verbrauchers kühl

gehalten werden. Die Konservierung in Form von Trocknung, Trockenlegung oder Salzung wird auch bei Fleisch und Fisch angewendet. Im Vergleich zur weltweiten Fleisch- und Fischproduktion stellt dies aber ein nicht nennenswertes Volumen dar. Die meisten modernen Speichereinrichtungen verfügen heute über Kälteanlagen, Kühl-/Gefrieranlagen und Kühlhäuser, die auch gewisse Anforderungen hinsichtlich Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit erfüllen. Weltweit erfordert die Wohnsitzverlegung von Menschen in städtische Gebiete eine vermehrte Haltbarmachung, Transport und großräumigere Verteilung von verderblichen Lebensmitteln.

Das Verbraucherverhalten, insbesondere in einkommensstarken Regionen, erfordert qualitativ hochwertige Fleisch- und Fischprodukte, die die Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen in der Lieferkette erfüllen. Insbesondere die produzierende und verarbeitende Industrie in der Kühlkette steht bei der Konservierung und Verteilung von frischen verderblichen Produkten, die die Verbraucherakzeptanz erreicht haben, vor Herausforderungen. Die wichtigsten Faktoren für die Qualität von Fleisch- und Fischprodukten sind Lagertemperatur und -zeit, was sich direkt auf die Haltbarkeit und Qualität auswirkt. Bei konstanten Lagertemperaturen ist die Haltbarkeit eines Produkts eine einfache Funktion der Lagerzeit (z.B. Abbildung 1.1). Für jedes Produkt treten je nach Produktvariation sowie Verarbeitung und Verpackung bestimmte Schwankungen hinsichtlich der Haltbarkeit auf.

Industrielländer verfügen in der Regel über eine ausreichende Kühlkette, in der die verschiedenen Teile während der Produktion, Verarbeitung, des Transports und der Lagerung kontrolliert werden. Verschiedene Studien und Messungen haben gezeigt, dass die Segmente Transport und Vertrieb vor Herausforderungen stehen, die geforderte maximale Temperatur der Kühlkette einzuhalten. Dazu gehören Fehler und fehlende Kühlung bei Transfervorgängen oder Transportmitteln (Hemmingsen et al., 2004).

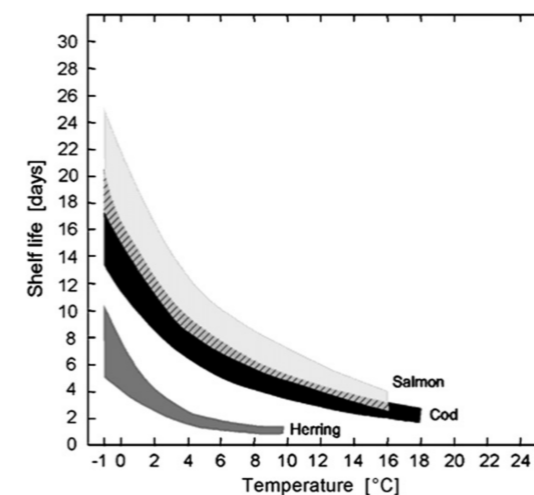


Abbildung 1.1: Allgemein akzeptierte Haltbarkeit für ausgewählte norwegische Fischarten. Der schattierte Bereich zeigt die geschätzten Auswirkungen der Produktverarbeitung. (Magnussen, 1993)

Unter Superchilling versteht man im Prinzip ein teilweises Einfrieren eines Produktes mit einem Eisgehalt von 5 % bis 20 % (Kaale et al., 2011). Es gibt keine Definition von Superchilling, auf die in der Literatur allgemein eingegangen wird, und in einigen Publikationen wurde ein Eisgehalt von bis zu 30 % als Superchilling Produkt angesehen. Die Grundidee des Superchillings ist, dass das Produkt trotz Eis nicht gefroren erscheint. Daher muss für jedes Produkt die zulässige Menge an Eisbildung berücksichtigt werden. In der Literatur findet sich der Begriff Supercooling für Lebensmittel, der sich von der Unterkühlung unterscheidet. Supercooled Produkte werden auch bei Temperaturen unter dem anfänglichen Gefrierpunkt gelagert, jedoch ohne das Vorhandensein von Eis in der Lebensmittelmatrix. Dies wird durch ein spezielles Produkthandling erreicht, das eine anfängliche Eisnukleation vermeidet. Supergekühlte Produkte hingegen haben einen bestimmten Anteil an Eis in der Lebensmittelmatrix.

Die Herausforderung bei der Herstellung eines Superchilling Produkts besteht darin, die Menge der Eisbildung zu kontrollieren. Das in Lebensmitteln enthaltene Wasser ist in den Feststoff des Produkts eingebettet, und die Eisbildung in Lebensmitteln erfolgt über einen bestimmten Temperaturbereich. Dies steht im Gegensatz zur Eisbildung von reinem Wasser, die genau bei 0°C stattfindet und die Temperatur eines Reinwasser-Eis-Gemisches erst dann auf unter 0°C gesenkt werden kann, wenn das gesamte flüssige Wasser zu Eis gefroren ist. Bei Lebensmitteln liegt der anfängliche Gefrierpunkt normalerweise ein oder zwei Kelvin unter dem Gefrierpunkt von Wasser und die Temperatur des Produkts kann weiter gesenkt werden (normalerweise bis auf etwa -20°C), obwohl flüssiges, ungefrorenes Wasser vorhanden ist. Dies ist in Abbildung 1.2 und Abbildung 1.3 veranschaulicht, wo die Änderung der spezifischen Enthalpie für Lebensmittel eine glatte Kurve ist, die vom anfänglichen Gefrierpunkt ausgeht und sich über einen bestimmten Gefrierbereich erstreckt; anstelle eines starken Rückgangs bei der Gefriertemperatur. Das Wasser im Produkt ist teilweise als Eis und teilweise als flüssiges Wasser auch bei Temperaturen bis zu 20°C vorhanden (siehe auch Abbildung 1.1.2). Folglich ist die Menge des vorhandenen Eises für ein bestimmtes Produkt eine Funktion der Temperatur, und wenn die Lagertemperatur auf ein bestimmtes stabiles Temperaturniveau geregelt wird, kann auch die Menge des gebildeten Eises im Produkt gesteuert werden.

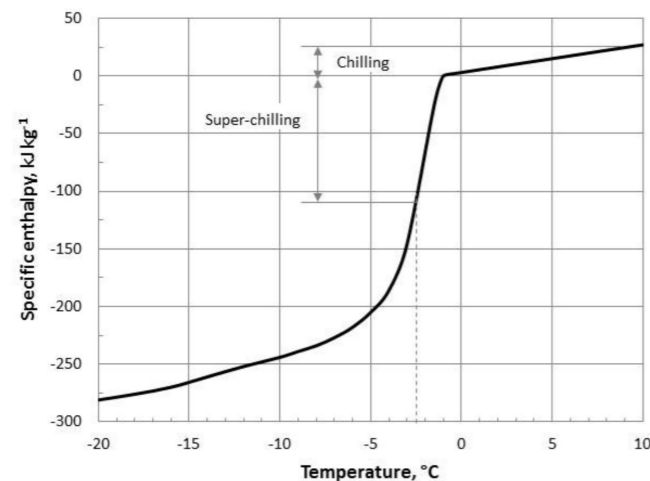


Abbildung 1.2: Energie in Nahrungsmitteln am Beispiel von Kabeljaufilets, nach Valentas (1997)

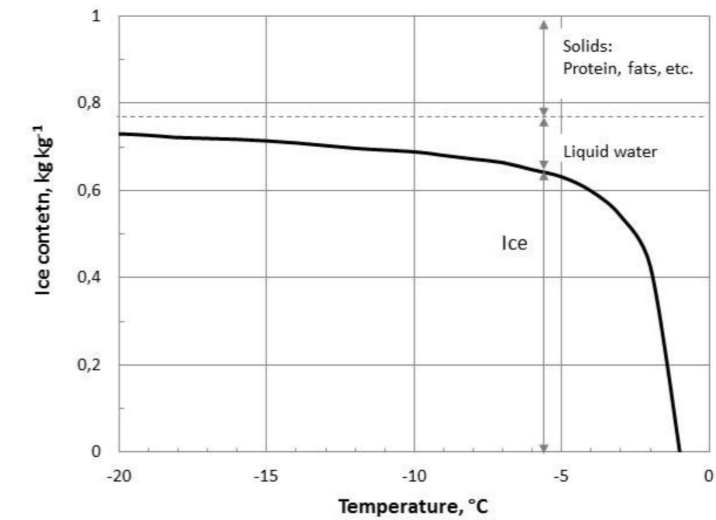


Abbildung 1.3: Der Eisgehalt in Lebensmitteln am Beispiel von Kabeljaufilets, nach Valentas (1997).

In der Literatur werden mehrere Methoden beschrieben, um Bedingungen des Superchillings in Lebensmitteln zu erhalten. Um Superchilling Bedingungen zu erreichen, ist es notwendig, die Temperatur zu bestimmen, bei der das Produkt die gewünschte Eismenge bildet bzw. enthält. Eine der einfachsten, aber nicht die beste Methode ist, das Produkt bei dieser Temperatur in einem Lagerraum zu lagern. Das Produkt erreicht nach einer bestimmten Zeit, abhängig von der Wärmeübertragung zwischen Produkt und Lagerumgebung, den Zustand des Superchilling. Experimentelle Untersuchungen zeigen jedoch eine eher schlechte Kontrolle der Eisfraktion, wenn das Produkt einfach bei seiner spezifischen Superchilling Temperatur gelagert wird. Die Eisbildung ist sehr zeitaufwendig (>1-2 Tage) und hängt von der effektiven Hitzebeständigkeit des Produkts und des Lagersystems ab. Die Lagerung des Produkts im Superchilling Lagerbedingungen führt somit zu zwei praktischen Problemen: Erstens wird das Lager als Teilgefrierschrank fungieren, was Herausforderungen für die Dimensionierung, Verpackung, Temperaturverteilung und Steuerung der Eisfraktion mit sich bringt. Zweitens wird die Zeit bis zum Aufbau der Teileismenge sehr lang sein, da die Wärmeübertragung durch die geringe Temperaturdifferenz zwischen Produkt und Umgebungsbedingungen sowie den Wärmeübertragungswiderstand und die Produktvariationen begrenzt wird.

SINTEF hat ein Superchilling-Konzept evaluiert und getestet, das auf einer schnellen Erstgefrierung der Schale mit einem konventionellen Schockfroster basiert, bevor das Produkt bei Superchilling-Temperaturen gelagert wird. Beim Schockfrosten wird die Außenschicht des Produkts gefroren. Die Gefrierzeit ist relativ kurz, nur 1-3 Minuten, je nach Produkt und Produktgröße. Aufgrund des hohen Wärmeübertragungskoeffizienten und einer Gefrierlufttemperatur von ca. -40 °C ist die Gefrierzeit relativ kurz. Die Bedingungen müssen hinsichtlich Gefrierzeit, Produktgröße, Wärmeübertragungskoeffizient und Temperaturdifferenz (zwischen Luft und Produkt) genauestens bewertet werden, um die richtige Menge an Eisbildung zu erhalten. Ziel des Schockfrostens ist es, bereits vor der Lagerung die Menge Eis zu erzeugen, die für das Superchilling benötigt wird. Durch dieses Verfahren wird sichergestellt, dass während der anschließenden Lagerung nur die definierte Temperatur gehalten werden muss und keine Wärmelast für die Eisbildung entsteht.



Abbildung 1.4: Die verschiedenen Schritte beim Superchilling von Lebensmitteln: Das im Produkt vorhandene Wasser ist teilweise gefroren und nach einer gewissen Zeit ist eine Mischung aus Wasser und Eis in der Struktur des Produkts vorhanden.

Während der Lagerung von supergekühlten Lebensmitteln verteilt sich das Eis in der Außenhülle des Produkts langsam gleichmäßig durch die Lebensmittelmatrix, so dass das gefrorene Eis verschwindet und das Produkt als frisch erscheint. Als Endergebnis weist das Superchilling Produkt eine bestimmte Menge an Eis auf, das gleichmäßig über das Produkt verteilt ist, und die Produkttemperatur liegt unter seinem anfänglichen Gefrierpunkt. Das Aussehen des Produkts weist noch immer die eines konventionell gekühlten Produktes auf und es ist nicht möglich, die bestehende Eisfraktion zu fühlen oder zu sehen. Der Zusammenhang zwischen dem Eisanteil und der Lagertemperatur ist für einige ausgewählte Produkte in Tabelle 1.1 angegeben. Dieses Thema wird in der Literatur ausführlich diskutiert (Valentas 1997, ASHRAE 2006), jedoch mit Fokus auf den gesamten Temperaturbereich zum Einfrieren (bis -25°C). Es wird daher empfohlen, diesen Zusammenhang detaillierter für bestimmte Produkte im Temperaturbereich des Superchillings zu bestimmen.

Tabelle 1.1: Zusammenhang zwischen Lagertemperatur und Eisanteil für einige ausgewählte Produkte (Tolstorebrov et al., 2014). Produktvariationen machen es notwendig, den Eisanteil individuell zu bestimmen.

Product	Lagertemperatur (Superchilling)	Eisanteil	Beginn des Einfrierens
Lachsfilet	-1.8°C	6.3 %	-1.6°C
	-2.2°C	18.2 %	
	-2.6°C	26.9 %	
Forelle	-2.2°C	8.2 %	-2.0°C
	-2.6°C	21.8 %	
	-3.0°C	27.0 %	

Makrele	-1.8°C	6.3 %	-1.6°C
	-2.2°C	18.2 %	
	-2.6°C	29.3 %	
Hering	-1.8°C	4.0 %	-1.6°C
	-2.2°C	11.6 %	
	-2.6°C	18.7 %	
Kabeljau (Aquakultur)	-1.2°C	10.2 %	-1.0°C
	-1.6°C	27.9 %	
	-2.0°C	38.6 %	
Rindfleisch, mager (Valentas 1997)	-1.0°C	5 %	n.a.
	-2.0°C	45 %	

1.1. Stand der Technik

Der Hauptgrund für die Anwendung des Superchilling-Konzepts auf ein Produkt ist die Möglichkeit, die Haltbarkeit eines frischen Produkts zu verlängern. Die Haltbarkeit eines Produktes hängt von mehreren Faktoren ab, bei denen die Lagertemperatur einen dominierenden Einfluss hat. Auch andere Faktoren wie Verarbeitungshygiene, mechanische Belastung, Verpackung und Produktvariationen werden einen Einfluss haben, was vergleichende Bewertungen verschiedener Studien erschwert. Im Vergleich zu herkömmlichen Kühllagern ist die Temperatur der Lagerung unter Superchilling Bedingungen jedoch um 5 - 10 Kelvin niedriger, und diese Temperatursenkung wird durch das Superchillingkonzept umgesetzt.

Duun und Rustad (2007) untersuchten das Superchilling von Zucht-Kabeljaufiletts und zeigten eine erhöhte Haltbarkeit von etwa 2 Wochen im Vergleich zur Lagerung auf Eis. Der Tropfverlust für den Superchilling Kabeljau war geringer, jedoch war der Flüssigkeitsverlust beim langsamen Zentrifugieren bei Superchilling Kabeljaufiletts höher. Dies wurde durch die Gefrierdenaturierung von Muskelproteinen erklärt. Es wurde dargelegt, dass der Superchilling Prozess in Bezug auf Gefriereschwindigkeit und Grad des Superchillings optimiert werden muss, um die Denaturierung von Proteinen zu minimieren und gleichzeitig eine ausreichende niedrige Temperatur beizubehalten, um eine Verlängerung der Haltbarkeit zu gewährleisten.

Der Einfluss des Superchillings auf Schweinebraten wurde von derselben Gruppe untersucht (Duun et al., 2008). Die Lagerzeit betrug 16 Wochen für vakuumverpackten Schweinebraten bei einer Temperatur von $2,0^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zur herkömmlichen gekühlten Lagerung bei $3,5^{\circ}\text{C}$. Die sensorische Qualität wurde als gut bewertet und die mikrobiologische Belastung war während der gesamten Lagerzeit gering. Auch hier war der Tropfverlust bei supergekühlten Produkten geringer. Es wurde geschlossen, dass die Haltbarkeit bei Anwendung des Superchillings von 2 auf 16 Wochen verlängert werden kann. Es wird aber auch auf die Bedeutung einer stabilen Temperatur mit sehr geringen Schwankungen bei dieser speziellen Lagerung hingewiesen.

Das Superchilling von gezüchtetem Atlantischem Lachs bei Lagertemperaturen von $1,4^{\circ}\text{C}$ und $-3,6^{\circ}\text{C}$ wurde in einer weiteren Untersuchung (Duun & Rustad, 2008) mit der Lagerung von ge-

kühltem Eis (Lagertemperatur von rund 0 °C) verglichen. Für den eisgekühlten Lachs wurde eine Lagerzeit von 17-21 Tagen festgelegt, während die Lagerzeit für Lachse unter Superchilling Bedingungen verdoppelt wurde. Es wurden keine Unterschiede hinsichtlich der Haltbarkeit für das Superchilling von Lachs bei 1,4°C und -3,6°C festgestellt.

Der Tropfverlust wurde als ein großes Problem für das Superchilling beim Lachs identifiziert. Die Werte der Texturmessungen waren bei supergekühltem Lachs bei -3,6°C höher und für die bei 1,4°C gelagerten Proben wurde eine stärkere Protein-Denaturierung festgestellt. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde für Lachs eine Temperatur für das Superchilling zwischen 1,4°C und -3,6°C empfohlen, weiterhin war Lachs besser geeignet für das Superchilling als Kabeljau. Ähnliche Ergebnisse wurden für unter schonenden Bedingungen geschlachteten Atlantischen Lachs erzielt (Erikson et al., 2011).

In einem nationalen norwegischen Projekt (Norwegian Research Council, 2016) wurde untersucht, unter welchen Bedingungen das Superchilling für frisches Lamm (Lammkeule) angewendet werden kann. Eine Superchillingtemperatur von -1,6 °C verlängerte die Haltbarkeit von 21 Tagen auf 40 Tage (90 % Steigerung). Das Projekt untersuchte auch, wie das Konzept des Superchillings in der Produktion umgesetzt werden kann und installierte ein Schockfrostersystem in einer bestehenden Produktionslinie, wodurch die Bearbeitungszeit um einen Tag verkürzt wurde. Dies führte als Nebeneffekt zu einer Reduzierung der Produktionskosten.

Die Farbe und der pH-Wert des supergekühlten Lammes variierten nicht im Vergleich zu herkömmlichem gekühltem Lammfleisch, aber der Tropfverlust war höher. Die verlängerte Haltbarkeit ermöglichte es, den Bedarf an Gefriergut zu reduzieren. Dadurch verringerten sich die Kühllast von 40 % auf 10 % und der Energiebedarf um 13 %. Das Einfrieren und Auftauen verursacht das Freiwerden von Proteinen und das Austreten anderer Substanzen aus der Zelle. Für Lamm wurde die Aktivität der lysosomalen Protease Cathepsin B verwendet, um zu zeigen, dass nach Anwendung des Superchillings das Fleisch weniger Gefrierschäden aufweist als gefrorenes Fleisch (Fristad & Rustad, 2014). Im Vergleich zu frischem Fleisch führte das Superchilling jedoch zu einer etwas erhöhten Schädigung des Fleisches. Im Allgemeinen zeigte die Arbeit, dass das Superchilling zu geringen Gefrier-/Tauschäden im Vergleich zu herkömmlich gekühltem Fleisch führt, aber der Schaden weniger stark im Vergleich zu gefrorenem Fleisch ist.

Claussen (2011) berichtete für Hühnerfleisch von einer Verlängerung der Haltbarkeit von 15 auf 30 Tage durch das Superchilling. Es wurde jedoch nicht näher spezifiziert, bei welcher Temperatur das Fleisch gelagert wurde und auch andere Qualitätsaspekte wurden in diesem Beitrag nicht untersucht.

In allen durchgeführten Experimenten, die beschrieben wurden, wurde die Lagerungstemperatur so eingestellt, dass sie dem Erhalt der Eisfraktion im Produkt, der durch das Gefrieren der Schale entsteht, entspricht. Allerdings fehlte es in den Untersuchungen generell an Informationen über den tatsächlichen Eisanteil, da die Messung des Eisanteils im Prozess schwierig war (Stevik et al., 2010). In den meisten Fällen wird die Eisfraktion mit einem invasiven Verfahren in Vorversuchen für bestimmte Produkte bestimmt.

Die niedrige Temperatur und der teilweise Eisgehalt in Produkten, die bei hohen Temperaturen gelagert werden, führen zu einem verzögerten Wachstum von Bakterien und Mikroorganismen. Die schnelle Abkühlung durch das Einfrieren der Schale stoppt dieses Wachstum und die bak-

terielle Aktivität an der Produktoberfläche wird teilweise zerstört oder beschädigt, was für das Konzept der Superchillings im Allgemeinen von Vorteil ist (Magnussen et al., 2008). Abbildung 1.5 zeigt einige Beispiele für erzielte reduzierte Wachstumsraten von Schaderregern (CFU = Colony Forming Unit). Die Haltbarkeit von Lebensmitteln basiert auf einer Qualitätsgrenze von 107 CFU. Oberhalb dieses Wertes gelten Lebensmittel als ungeeignet für den menschlichen Verzehr.

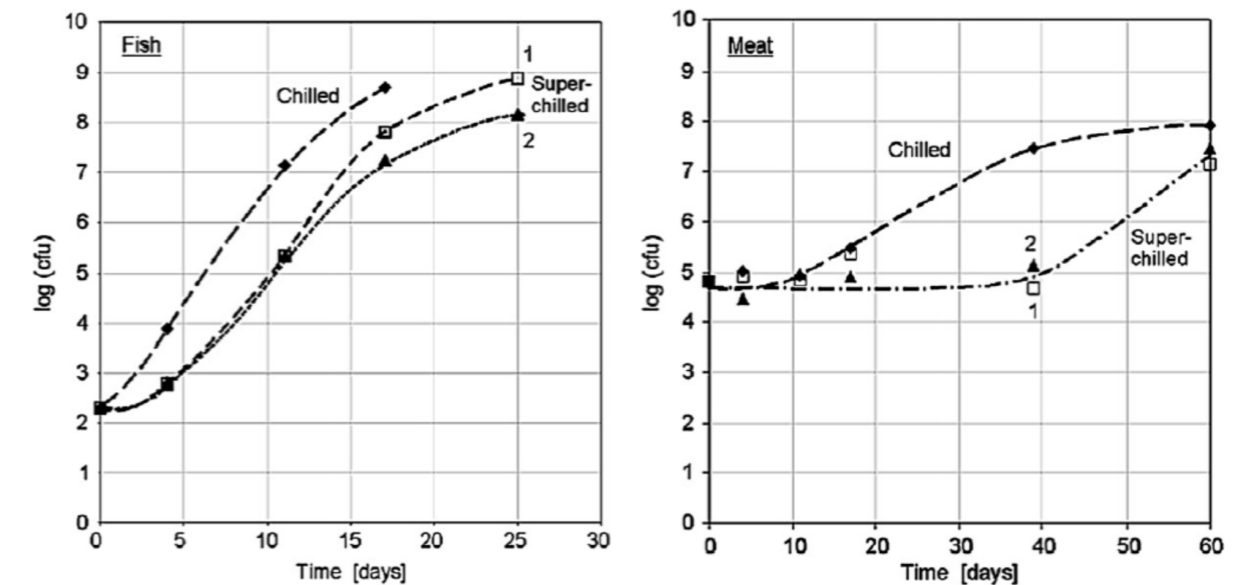


Abb.

Abbildung 1.5: Wachstum von aeroben Bakterien an supergekühltem und normal gelagertem Fisch (Lachs) und Fleischprodukten (Schweinefleisch); aus Magnussen, Haugland et al. 2008. 1 und 2 beziehen sich auf einen niedrigen bzw. hohen Eisgehalt. CFU = Kolonie bildende Einheiten.

Das Superchilling wurde hauptsächlich für Fleisch- und Fischprodukte untersucht, bei denen im Vorfeld ein Gefrierprozess der äußeren Schicht im Vorfeld zur Lagerung unter Superchilling Bedingungen angewendet wurde. Es wurden signifikante Erhöhungen der Haltbarkeit festgestellt, die im Allgemeinen mit der niedrigeren Lagertemperatur im Vergleich zur konventionellen Kühlung zusammenhängen. Der Superchillingprozess wird von einigen Qualitätsverlusten oder -veränderungen wie beispielsweise höheren Tropfverlusten begleitet, die durch das Vorhandensein von Eis in der Lebensmittelmatrix erklärt werden können.

Lagerparameter wie Temperaturänderungen oder Verpackungen können die Haltbarkeit von supergekühlten Produkten zusätzlich beeinflussen und auch verbessern. Tabelle 1.2 gibt einen Überblick aus der Literatur über die beschriebenen Verlängerung der Haltbarkeit für bestimmte Produkte. Es ist wichtig zu beachten, dass die ermittelten Haltbarkeitsverlängerungen in vergleichenden Studien erhalten werden. Produktvariationen und unterschiedliche Verarbeitungsroutinen beeinflussen das Ergebnis, sind aber nicht für die erreichten Verlängerungen der Haltbarkeit verantwortlich.

Tabelle 1.2: Verlängerung der Haltbarkeit für ausgewählte Fleisch- und Fischprodukte in Vergleichsstudien mit konventioneller Kältetechnik

Produkt	Lagertemperatur Superchilled	Steigerung der Haltbarkeit verglichen mit konventioneller Kühlung
Kabeljaufilet (Aquakultur)	-2.2 °C	+ 14 Tage
Schweinebraten	-2.0 °C	+ 14 Tage
Lachs (Aquakultur)	1.4 °C und -3.6 °C	+ 17 – 21 Tage
Geflügel	n.a.	+ 15 Tage
Lammhachse, frisch	-1.6 °C	+ 19 Tage

1.2. Das Potenzial des Superchillings für Bio-Lebensmittelhersteller

Die Kühlkette in der Industrie besteht heute aus dem Kühlen (+4 °C bis 8 °C) und Gefrieren (-20 °C bis 25 °C) von Lebensmitteln. Dies gilt sowohl für konventionelle als auch für Bio-Kühlketten. Die Einführung eines neuen Prozesses erfordert Geräte, die eine stabile Temperatur von etwa 2 °C liefern können, und zusätzlich einen Prozess für das Gefrieren der äußeren Schale. Die Bereitstellung der Kälte bei dieser Temperatur stellt keine technologische Herausforderung dar, erfordert jedoch modifizierte Kälteanlagen aus der Zulieferindustrie und die Bereitschaft, ein neues Konzept in den Kühlketten umzusetzen. Die zusätzlichen Verarbeitungseinrichtungen und geänderten Lagerbedingungen für Superchilling Produkte können ein Hindernis für die Umsetzung bei Kleinproduzenten darstellen. Innovative, neue Lösungen werden jedoch oft in kleinen oder mittleren Produktionsanlagen umgesetzt, da die Produktion flexibler ist und das Marktpotenzial für diese Produzenten vielversprechender ist.

Bisher wurden in der norwegischen Lebensmittelindustrie zwei Verarbeitungslinien das Superchilling von Fisch und Fleischprodukten implementiert, aber bisher wird das Konzept in Europa oder anderen Märkten nur in geringem Umfang eingesetzt. Das Superchilling kann in der Kühlkette für Bioprodukte auf unterschiedliche Weise und unter verschiedenen Aspekten eingesetzt werden:

1. Verlängerte Haltbarkeit: Der offensichtlichste Vorteil ist die längere Haltbarkeit von Superchilling Produkten im Vergleich zu herkömmlichen Kühlprodukten. Produkte mit langen Transportwegen oder starken saisonalen Schwankungen können offensichtlich von dieser Verlängerung profitieren. Darüber hinaus können Produkte, die nur in begrenzten Mengen produziert werden, ihre Verfügbarkeit auf dem Markt ausdehnen oder Fernmärkte erreichen. Die verlängerte Haltbarkeit ist vielleicht das wichtigste Potenzial für Bio-Fleisch- und Fischproduzenten. Mit dieser Technologie wird es möglich sein, weit entfernte Märkte zu erreichen, was ein wichtiger Aspekt ist, um die geografischen Langstrecken, insbesondere in Norwegen, zu überwinden. Damit können die Bioprodukte in Bezug auf Haltbarkeit und Qualität in den Supermärkten konkurrieren, da konventionelle Großherzeuger über ein besser entwickeltes

(und schnelleres) Vertriebsnetz verfügen.

- 2. Ersatz des Einfrierens von Lebensmitteln:** Die Überproduktion von Fleisch- und Fischprodukten wird oft eingefroren, um sie für zukünftige Verkäufe zu erhalten. In der Regel ist es jedoch möglich, einen höheren Preis für Frischprodukte zu erzielen, obwohl das Einfrieren und die Lagerung teuer ist. Das Superchilling-Konzept bietet die Möglichkeit, mindestens eine bestimmte Menge der Überproduktion ohne Gefrieren zu lagern und innerhalb einer angemessenen Zeit frisch zu verkaufen. Ein höherer Marktpreis kann erzielt werden, während gleichzeitig der Energiebedarf (zum Gefrieren) in der Produktion reduziert wird. Im oben genannten Fall für norwegisches Lammfleisch wurde der Energiebedarf der Produktion um 13 % reduziert, indem das Gefrieren teilweise durch das Superchilling ersetzt wurde.
- 3. Transport:** Hochwertige Fischprodukte, wie Atlantischer Lachs, werden recht häufig auf gekühltem Eis transportiert, entweder auf der Straße oder auch im Luftverkehr. Etwa 25-30 % des Transportgewichts sind Eis, während die restlichen 70-75 % des Transportgewichts das Wertprodukt sind. Der Transport von Eis ist sehr kostenintensiv und führt gleichzeitig zu Umweltbelastungen (Carbon Footprint). Durch die Verwendung eines supergekühlten Produktes kann die Notwendigkeit von Eis während des Transports reduziert oder vermieden werden. Das im Produkt vorhandene Eis wirkt als thermische Trägheit und sorgt für die notwendige Kühlung während des Transports. Durch die Anwendung dieses Konzepts ist es möglich, das Transportgewicht und -volumen um 25-30 % zu reduzieren. Oder mit anderen Worten: 4 Lkw-Ladungen mit Eiskühlung können auf 3 Lkw-Ladungen mit supergekühltem Produkt reduziert werden, während die gleiche Menge an verkäuflichen Produkt transportiert wird. Es ist zu beachten, dass dabei die verlängerte Haltbarkeit des transportierten supergekühlten Produkts verkürzt wird, da der Teil-Eisanteil während des Transports reduziert wird. Es wird aber auch eine längere Haltbarkeit im Vergleich zu traditionell gekühlt transportierten Produkten erreicht.
- 4. Kürzere Verarbeitungszeit:** Die konventionelle Kühlung ist ein zeitaufwendiger Vorgang, der in der Produktionslinie umgesetzt werden muss. Das Superchilling mit anfänglichem Schockfrostern kann die Prozesszeit verkürzen und die Produkttemperatur vor der Lagerung senken. Hierdurch ist es möglich, die Kapazität bestehender Produktionslinien zu erhöhen oder unterschiedliche Produktionskapazitäten auszugleichen.
- 5. Andere Effekte:** Das Superchilling ist eines der ersten Verarbeitungsverfahren in einer Produktionslinie und kann die Produktausbeute erhöhen, z.B. durch höhere Festigkeit vor dem Enthäuten (Stevik & Claussen, 2011) oder Entbeinen. Die Steifigkeit des Produktes ist bei Superchilling Produkten im Allgemeinen höher. Dies kann für das Produkthandling von Vorteil sein, z.B. beim Filetieren, Schneiden oder automatisierten Verpacken.

Das Konzept des Superchillings kann in bestehenden Produktionsanlagen durch die Implementierung eines Schockfrosters umgesetzt werden, welcher kontinuierlich betrieben werden kann. Die spezifische Kühlrate wird beschleunigt, da der Wärmeübergang und die Temperaturdifferenz beim Schockfrostern hoch sind. Daher ist es relativ einfach, supergekühlte Produkte herzustellen. Die entsprechende Lagerung erfordert jedoch eine Neugestaltung der bestehenden Lager- und Kühlsysteme. Die Temperatur der Kälteanlagen muss reduziert werden, aber noch wichtiger ist,

dass die Temperaturschwankungen und -verteilung in den Lagerräumen gering sind. Eine Temperaturschwankung von ± 1 Kelvin ist bei herkömmlichen Kühllagern Standard. Wenn ein supergekühltes Produkt solchen Schwankungen ausgesetzt ist, kann es zu einem kontinuierlichen Auftauen und Wiedereinfrieren des Eises innerhalb der Lebensmittelmatrix kommen. Dies hat einen schlechten Einfluss auf die Produktqualität und -stabilität. Die im Labor durchgeführten Untersuchungen weisen in der Regel eine Temperaturstabilität von $\pm 0,2$ Kelvin auf. Für industrielle Superchillingsysteme muss sorgfältig geprüft werden, welche Temperaturschwankungen akzeptabel sind. Es wird eine möglichst geringe Temperaturschwankung, der Einfluss von Temperaturschwankungen ist weiter zu untersuchen.

1.3. Herausforderungen des Superchillings

Für die Dimensionierung und Steuerung des Superchillingprozesses ist es wichtig, die richtige Kühlzeit und Temperaturverteilung zu berechnen (z.B. für Schockfroster), da die beim Superchilling entstehende Eismenge für den gesamten Prozess von großer Bedeutung ist. Die latente Wärme des Gefrierens führt zu einem starken Rückgang der Enthalpie im für den Prozess üblichen Temperaturbereich und kann daher schon bei geringen Temperaturänderungen zu einer signifikanten Veränderung des Eisanteils führen. Lebensmittelprodukte bestehen in der Regel aus einer komplexen Matrix aus Wasser, Eiweiß, Kohlenhydraten und Fetten, und das Wasser durch verschiedene Mechanismen gebunden. Allgemeine Gleichungen für die Berechnung haben daher immer einige Unsicherheiten. Zukünftige Arbeiten sollten verbesserte Berechnungsmethoden und Simulationswerkzeuge für die Superchilling zulassen. Dies ist besonders wichtig für Produkte, die in Form und Größe variieren.

Eine weitere Herausforderung ist die optimierte Bestimmung des erforderlichen Grades des Superchillings für eine ausreichende Verbesserung der Haltbarkeit bei gleichzeitiger Erreichung akzeptabler Qualitätsmerkmale. Die meisten Untersuchungen konzentrierten sich auf einen Eisanteil zwischen 10 % und 20 %, da die erreichte Qualitätsreduzierung (im Vergleich zu Kühlprodukten) gering war, während bei Eisanteilen über z.B. 30 % signifikante Tropfverluste auftreten. Die Lagertemperatur wurde eingestellt, um das Potenzial des Konzepts im Vergleich zur Kühllagerung aufzuzeigen. Für ein bestimmtes Produkt ist jeweils individuell festzulegen, welche Eisfraktion und Lagertemperatur im Hinblick auf reduziertes Bakterien- und Mikroorganismenwachstum und akzeptable Qualitätsänderungen optimal ist.

Die Industrie benötigt im Allgemeinen effektive und flexible Verarbeitungsanlagen, die ein hochwertiges Produkt erzeugen. Das Superchilling bietet der Industrie gewisse Möglichkeiten, aber die Frage ist, ob sie vielversprechend genug ist, um das Konzept wirtschaftlich interessant zu machen. Der Wechsel von der konventionellen Gefrier- und Kältetechnik zum Superchilling erfordert eine gewisse Risikobereitschaft. Das Superchilling wird auch genauere Informationen über Produktvariationen und -flüsse erfordern, was besonders für Kleinproduzenten eine Herausforderung darstellt. Darüber hinaus werden die Ausrüster der entsprechenden Technik höhere Anforderungen an die Energie- und Thermodynamikkompetenz erfüllen müssen. Es lässt sich zusammenfassen, dass, besonders am Anfang, der größte Teil der Technologie experimentell entwickelt wird.

Das Bewusstsein der Verbraucher für Superchilling Produkte ist derzeit gering (oder nicht vorhanden), und es könnte eine allgemeine Herausforderung sein, die Akzeptanz der Verbraucher für ein drittes Kühlkettenprodukt zu erreichen. Dieser Aspekt wird derzeit nicht bewertet.

1.4. Zusammenfassung

Die ökologische Produktion in Norwegen ist ein Nischenmarkt und nur 1,6 % der verkauften Produkte in Supermärkten sind biologisch. Bei Fleischerzeugnissen ist nur 1 % des Fleisches ökologisch und rund 50 % des produzierten ökologischen Fleisches werden unter konventionellen, nichtbiologischen Etiketten verkauft. Die Gründe für diese Entwicklung wurden nicht analysiert. Ein Grund dafür könnte der lange und zeitaufwändige Transport in der Kühlkette von kleinen oder mittleren Produzenten zum Endverbraucher sein. Die Verlängerung der Haltbarkeit durch das Superchilling von Bio-Fleisch- und Fischprodukten könnte dazu beitragen, den Markt mit frischen, hochwertigen Bio-Produkten zu versorgen. Die erhöhte Verfügbarkeit von Bio-Fleisch und -Fischprodukten auf dem Markt kann die zukünftige Verbrauchernachfrage auslösen und dazu beitragen, den Marktanteil von Bioprodukten zu erhöhen.

Das kontrollierte partielle Einfrieren oder Superchilling von Lebensmitteln kann zu einer erheblichen Verlängerung der Haltbarkeit während der Kühlkette führen. Zwischen 10 % und 20 % des Wassergehalts des Lebensmittels werden gefroren, und das Eis fungiert als thermische Trägheit bei Lagerung und Transport. Superchilling Produkte haben im Allgemeinen eine längere Haltbarkeit und die Technologie weist ein gutes Potenzial für den Einsatz in der Kühlkette auf, da die Produktqualität mit der von Kühlprodukten vergleichbar ist. Das industrielle Superchilling kann auch den Einsatz von Gefrieren/Auftauen als Produktionspuffer reduzieren und damit Arbeits-, Energiekosten und Produktgewichtsverluste reduzieren.

Superchilling Produkte behalten die Qualitätsparameter, die üblicherweise mit frischen/aufgetauten Produkten in Verbindung gebracht werden. Während der Lagerung kann es jedoch zu einer gewissen Zunahme der Produkttropfverluste kommen. Die Implementierung des Superchillings in industriellen Prozessanlagen und Routinen erfordert eine strenge Temperaturkontrolle in der Kühlkette. Das Verständnis und die Quantifizierung thermophysikalischer Prozesse an und innerhalb der Lebensmitteloberfläche sind wichtig für die optimale Auslegung von Superchilling Anlagen und Verpackungssystemen für Lebensmittelprodukte.

Das Konzept des Superchillings ist ein neues und verbessertes Kühlkettenverfahren, das darauf abzielt, die Haltbarkeit von Kühlprodukten zu verlängern und durch partielles Einfrieren ein frisches Aussehen zu erhalten. Dies erfordert die Implementierung eines neuen Temperaturniveaus (bei ca. 2°C) für die Lagerung von Produkten in der Kühlkette. Um eine ausreichende Prozesskontrolle zu erreichen, wird empfohlen, in den ersten Segmenten der Produktionslinie eine schnelle partielle Gefrierung zu implementieren. Vielversprechende Ergebnisse wurden beim Spreng- oder Prallfrostverfahren erzielt. In der Literatur werden für bestimmte supergekühlte Fleisch- und Fischprodukte erhebliche Verlängerungen der Haltbarkeit nachgewiesen. Das Konzept kann als Ersatz für den Transport auf Eis genutzt werden, was sich direkt auf die CO₂-Bilanz im Verkehrssektor auswirken wird. Das Superchilling hat das Potenzial, die Auswirkungen der derzeit verschwendeten Fleisch- und Fischmengen erheblich zu reduzieren; insbesondere in einkommens-

starken Regionen mit bereits bestehenden Kühlketten, die damit einen wesentlichen Beitrag zur globalen Ernährungssicherheit leisten. Für die industrielle Umsetzung können bestehende oder modifizierte Geräte aus der heutigen Kühlkette verwendet werden, das Superchilling erfordert jedoch eine verbesserte Prozesskontrolle.

Die Forschung und Entwicklung hat das Potenzial dieser Technologie eindeutig identifiziert, insbesondere für Fleisch (Huhn, Lamm, Schwein) und Fisch (Lachs, Kabeljau). Allerdings hat die Branche diese Technologie trotz der klaren Vorteile, der relativ einfachen Implementierung auch in bestehende Produktionslinien und der hohen technologischen Verfügbarkeit bisher kaum beachtet. Die ersten industriellen Implementierungen haben positive Auswirkungen auf Haltbarkeit, Produktqualität, Produktionsertrag, Energiebedarf und Produktionskosten gezeigt.

1.5. Referenzen

Claussen, I. C. (2011). Superchilling concepts enabling safe, high quality and long term storage of foods 11th International Congress on Engineering and Food (ICEF11) *Procedia Food Science* 1 (2011) 1907-1909.

Duun, A. S. and T. Rustad (2007). „Quality changes during superchilled storage of cod (*Gadus morhua*) fillets.“ *Food Chemistry* 105(3): 1067-1075.

Duun, A. S., et al. (2008). „Quality changes during superchilled storage of pork roast.“ *LWT - Food Science and Technology* 41(10): 2136-2143.

Duun, A. S. and T. Rustad (2008). „Quality of superchilled vacuum packed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets stored at -1.4 and -3.6 °C.“ *Food Chemistry* 106(1): 122-131.

Erikson, U., et al. (2011). „Superchilling of rested Atlantic salmon: Different chilling strategies and effects on fish and fillet quality.“ *Food Chemistry* 127(4): 1427-1437.

FAO (2013). Food wastage footprint: Impacts on natural resources, Summary Report Food and Agricultural Organization of the United Nations.

Friestad, E. and T. Rustad (2014). Superkjølt lam: Studier av proteolytiske enzymer. Superchilled Lamb: Studies of Proteolytic Enzymes, Institutt for bioteknologi.

Hemmingsen, A. K. T., et al. (2004). „Challenges in distribution of fresh food.“ *Scandinavian Refrigeration* 5: 40-45.

Magnussen, O. M., et al. (2008). „Advances in superchilling of food - Process characteristics and product quality.“ *Trends in Food Science & Technology* 19(8): 418-424.

Magnussen, O. M. (1993). Energy consumption in the cold chain . Proceedings IIR - Commissions B1, B2, D1, D273. Palerston North, New Zealand

Kaale, L. D., et al. (2011). „Superchilling of food: A review.“ *Journal of Food Engineering* 107(2): 141-146.

Norwegian Research Council (2016). „Optimal verdikjede for ferskt lam (project 210643) <https://www.forskingsradet.no/prosjektbanken/#!/project/210643/no>.“

Stevik, A. M., et al. (2010). „Ice fraction assessment by near-infrared spectroscopy enhancing automated superchilling process lines.“ *Journal of Food Engineering* 100(1): 169-177.

Stevik, A. M. and I. C. Claussen (2011). „Industrial superchilling, a practical approach.“ *Procedia Food Science* 1: 1265-1271.

Tolstorebrov, I., et al. (2014). „A DSC study of phase transition in muscle and oil of the main commercial fish species from the North-Atlantic.“ *Food Research International* 55(0): 303-310.

Valentas, K. J. (1997) Handbook of food engineering practice / edited by Kenneth J. Valentas, Enrique Rotstein, R. Paul Singh.

2. Superchilling von Bio-Schweinefleisch und Lachs

SINTEF Energy Research, Trondheim, Norwegen
Bantle et al.

2.1. Einleitung

Die ökologische Produktion in Norwegen ist ein Nischenmarkt und nur 1,6 % der verkauften Produkte in Supermärkten sind biologisch. Bei Fleischerzeugnissen ist nur 1 % des Fleisches ökologisch und rund 50 % des produzierten ökologischen Fleisches werden unter konventionellen, nichtbiologischen Etiketten verkauft. Ein Grund dafür könnte der lange und zeitaufwändige Transport in der Kühlkette von kleinen oder mittleren Produzenten zum Endverbraucher sein. Die Verlängerung der Haltbarkeit durch die Superkühlung von Bio-Fleisch- und Fischprodukten könnte dazu beitragen, den Markt mit frischen, hochwertigen Bio-Qualitätsprodukten zu versorgen. Die erhöhte Verfügbarkeit von orangenen Fleisch- und Fischprodukten auf dem Markt kann die zukünftige Verbrauchernachfrage auslösen und dazu beitragen, den Marktanteil von Bioprodukten zu erhöhen.

Das kontrollierte partielle Einfrieren oder Superkühlen von Lebensmitteln kann zu einer erheblichen Verlängerung der Haltbarkeit während der Kühlkette führen. Zwischen 10 % und 20 % des Wassergehalts des Lebensmittels werden gefroren und das Eis fungiert als thermische Trägheit bei Lagerung und Transport. Supergekühlte Produkte haben im Allgemeinen eine längere Haltbarkeit und die Technologie weist ein gutes Potenzial für den Einsatz in der Kühlkette auf, da die Produktqualität mit Kühlprodukten vergleichbar ist. Das Superchilling in der Industrie kann auch den Einsatz von Gefrieren/Auftauen für Produktionspuffer reduzieren und damit Labour, Energiekosten und Produktgewichtsverluste reduzieren.

Das Konzept der Superkühlung ist ein neues und verbessertes Kühlkettenverfahren, das darauf abzielt, die Haltbarkeit von Kühlprodukten zu verlängern und durch partielles Einfrieren ein frisches Aussehen zu erhalten. Dies erfordert die Implementierung eines neuen Temperaturniveaus (bei ca. 2°C) für die Lagerung von Produkten in der Kühlkette. Um eine ausreichende Prozesskontrolle zu erreichen, wird empfohlen, in den ersten Segmenten der Produktionslinie eine schnelle partielle Gefrierung zu implementieren. Vielversprechende Ergebnisse wurden beim Spreng- oder Prallfrostverfahren erzielt. In der Literatur werden für bestimmte supergekühlte Fleisch- und Fischprodukte signifikante Verlängerungen der Haltbarkeit nachgewiesen. Das Konzept kann als Ersatz für den Kühltransport genutzt werden, was sich direkt auf die CO₂-Bilanz im Verkehrssektor auswirken wird. Die Superkühlung hat das Potenzial, die Auswirkungen der derzeit verschwendeten Fleisch- und Fischmengen erheblich zu reduzieren, insbesondere in Regionen mit hohem Einkommen und bereits bestehenden Kühlketten, indem sie wesentlich zur globalen Ernährungssicherheit beiträgt. Für die industrielle Umsetzung können bestehende oder modifizierte Anlagen aus der heutigen Kühlkette verwendet werden, aber die Superkühlung erfordert eine verbesserte Prozesskontrolle.

Die Forschung und Entwicklung hat das Potenzial dieser Technologie eindeutig identifiziert, insbesondere für Fleisch (Huhn, Lamm, Schwein) und Fisch (Lachs, Kabeljau). Allerdings hat die Branche diese Technologie trotz der klaren Vorteile, der relativ einfachen Implementierung auch

in bestehende Produktionslinien und der hohen technologischen Verfügbarkeit etwas übersehen. Die ersten industriellen Implementierungen zeigen positive Auswirkungen auf Haltbarkeit, Produktqualität, Produktionsausbeute, Energiebedarf und Produktionskosten.

Ziel des SusOrganic-Projekts ist es, das Konzept der Superkühlung für biologische Fleisch- und Fischprodukte zu untersuchen und das Potenzial des Konzepts für Bio-Produzenten aufzuzeigen. Die vorliegende Studie fasst die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zusammen und konzentriert sich auf die erreichbaren Haltbarkeitsverlängerungen. Zwei verschiedene Produkte wurden untersucht: Bio-Schweinekotelett und Lachsfilets. Die Produkte wurden von lokalen Bio-Produzenten aus Norwegen geliefert.

2.1.1. Superchilling von Bio-Lachsfilets

Die Experimente wurden an 1-2 kg Lachsfilets durchgeführt, die von SALMAR, Frøya, Norwegen, geliefert wurden. Der in den aktuellen Experimenten verwendete Fisch wurde geschlachtet und vor der Strenge filetiert. Für den Lagertest wurden Filets von Bio-Lachs mit Haut verwendet. Direkt nach der Schlachtung und dem Filetieren wurde der gekühlte Fisch auf Eis an das Labor von SINTEF Energy Research/NTNU geschickt, wo er nach 24 Stunden im Vorstufenzustand ankam. Die Lachsfilets wurden unmittelbar nach der Ankunft verarbeitet und die Superchilling wurde innerhalb von 24 Stunden nach der Schlachtung im Pre-Rigor-Zustand durchgeführt.

Die Filets wurden in Stücke von 300 g geschnitten und erhielten dann eine Prüfnummer. Die Probe wurde dann in ein Stück von 100 g (nr1m) für die Mikroanalyse und die restlichen 200 g (nr1p) für die Messung der physikalischen Eigenschaften unterteilt. Alle Teile wurden vor der Lagerung vakuumverpackt. Proben für mikrobiologische Analysen wurden in Stücke von 100 g vakuumverpackt geschnitten und mit Lagertemperatur und Probennummer nummeriert. Die Schneidvorgänge wurden mit sterilen Handschuhen und desinfizierten Messern durchgeführt. Die Proben für die Mikroanalyse wurden vakuumverpackt an ein unabhängiges Institut für Analysen geschickt und die Analyse wurde innerhalb von 3 Stunden nach Lieferung durchgeführt. Eine Anzahl von 3 Parallelen wurde für die Mikroanalyse und für die physikalischen Eigenschaften ab Tag 0 herausgenommen. Tag 0 bezieht sich auf den Tag, an dem die frischen Lachsfilets in die Schränke gelegt wurden.

Es wurden zwei verschiedene Verarbeitungsmethoden der Superkühlung durchgeführt:

1. Verfahren 1: Die Proben wurden in 200 g Stücke geschnitten, ohne Vakuum-Plastikbeutel supergekühlt, dann hautnah mit einem feuchtigkeitsabsorbierenden Baumwollstück vakuumverpackt und unter den jeweiligen Lagerbedingungen gelagert.
2. Verfahren 2: Die Proben wurden in 200 g Stücke geschnitten, hautnah mit einem feuchtigkeitsabsorbierenden Baumwollstück vakuumverpackt, dann supergekühlt und unter den jeweiligen Lagerbedingungen gelagert.

Beide Methoden wurden in ersten Versuchen verglichen und für die vorliegende Untersuchung wurde die zweite Methode aus hygienischen Gründen eingesetzt.

Für die Superkühlung wurde ein Prallfroster (Frigoscandia, Modelllabor) bei -37°C mit einer Retentionszeit von 2 Minuten verwendet, wodurch gemäß der vorherigen Forschung zur Superküh-

lung von Lachs ein Eisgehalt von ca. 15 % erreicht wurde. Der Eisanteil im supergekühlten Lachs wurde mit einer kalorimetrischen Methode gemessen (Haugland, Aune & Hemmingsen, 2005). Die kalorimetrischen Messungen wurden in Stahlthermoskannen (Finemech Inc., Cylindrical Dewar Container, Portola Valley, USA) durchgeführt, die mit 1,5-2,5 Liter temperiertem Wasser (~35°C) gefüllt waren. Etwa 0,25-0,30 kg Produkt (Lachs oder Schweinefleisch) wurden direkt nach der Superkühlung gewogen. Dann wurde ein Thermoelement (Agilent Technologies Inc., Agilent 34970A, Santa Clara, USA) in das Filetstück/den Filetkern eingesetzt und eines in der Nähe der Filetoberfläche platziert, bevor das Filet in die Thermoskanne gesenkt wurde. Die Thermoskope wurden dicht verschlossen, und die Systeme wurden für ca. 24 Stunden dem Temperatursgleich unter kontinuierlicher Protokollierung unterzogen. Die Analyse wurde an drei Parallelen für jede Eisebene durchgeführt. Basierend auf Temperaturdaten aus dem Ausgleichsprozess wurde die anfängliche Eisfraktion nach der Superkühlung mittels Enthalpiebilanzen berechnet.

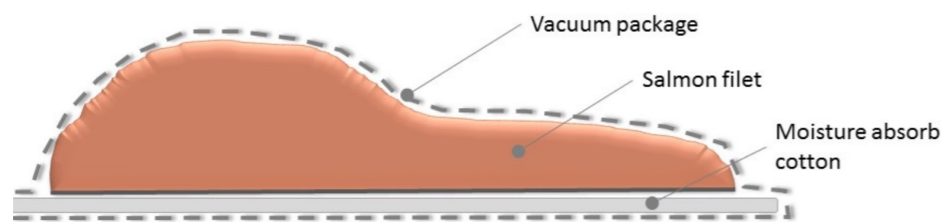


Abbildung 2.1: Verpackung für Lachsfilets in den durchgeführten Experimenten.

Alle Proben wurden in zwei verschiedenen Schränken (Termaks KB 8182) bei jeweils 1,5°C für die supergekühlten Proben und bei +3°C für die Standard-Lachsfilets gelagert. Während der Lagerung wurden montags und donnerstags bei beiden Temperaturen gelagerte Proben zur mikrobiologischen Analyse (Gesamtzahl) und zu physikalischen Eigenschaften (Farbe, Wasserhaltevermögen, Tropfverlust und Wassergehalt) entnommen. Es wurden 3 parallele Analysen von jeder Temperatur (n=3) durchgeführt. Die mikrobiologischen Analysen wurden von einem zertifizierten externen Labor (Analysesenteret, Trondheim/Norwegen) durchgeführt.

Tabelle 2.1: Experimenteller Aufbau zur Superkühlung von Bio-Lachs.

Experimenteller Aufbau		Proben á 200g				Mikrobio.
Tag	Temp.	Farbe	Wasserhalteverm.	Tropfverlust	Wassergehalt	Bakterien
0	0	X	X	X	X	X
4	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C	X	X	X	X	X
8	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C	X	X	X	X	X
12	-1,5 °C	X	X	X	X	X

	+3 °C	X	X	X	X	X
15	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C	X	X	X	X	X
18	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C					
21	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C					

2.2. Superchilling biologischer Schweinekoteletts

Die Experimente wurden an 300 - 400 g Schweinekoteletts von GRØSTADGRIS AS, Undrumsdal, Norwegen, durchgeführt. Das Fleisch der in den aktuellen Experimenten verwendeten Bio-Schweine wurde bei einem Metzger in der Nähe des Hofes geschlachtet und zubereitet. Das Fleisch wurde 7 Tage nach der Schlachtung im Labor von SINTEF Energy Research/NTNU mit einer empfohlenen Haltbarkeit von 10 Tagen bei +4°C gelagert.

Bei SINTEF wurden die Schweinehälften einzeln in Vakuumbutel mit einer Absorberfolie verpackt, dann vakuumiert, im Prallfroster unterkühlt und dann mit einer Prüfnummer (Verfahren 2) versehen. Eine Anzahl von 3 Parallelen wurde für die Mikroanalyse und für die physikalischen Eigenschaften ab Tag 0 entnommen. Tag 0 bezieht sich auf den Tag, an dem die Schweineläden in die Schränke gestellt wurden.

Tabelle 2.2: Versuchsaufbau zum Superchilling von biologischem Schweinekotelett.

Experimenteller Aufbau		Proben á 200g			Mikrobio.	
Tag	Temp.	Farbe	Wasserhalteverm.	Tropfverlust	Wassergehalt	Bakterien
0	0	X	X	X	X	X
3	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C	X	X	X	X	X
6	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C	X	X	X	X	X
10	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C	X	X	X	X	X
17	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C	X	X	X	X	X
20	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C					
24	-1,5 °C	X	X	X	X	X
	+3 °C					

Vor der Lagerung wurde die Hälfte der Proben in einem Prallfroster (Labormodell) bei 37°C für 2,5 Minuten unterkühlt, wobei gemäß früherer Untersuchungen zur Unterkühlung von Schweineläden, wie vorstehend beschrieben, ein Eisgehalt von ca. 15 % erreicht wurde.

Nach der Superkühlung wurden die Proben in zwei verschiedenen Schränken (Termaks KB 8182) bei jeweils -1,5°C für die supergekühlten Proben und bei +3°C für den Rest gelagert. Während der Lagerung wurden montags und donnerstags bei beiden Temperaturen gelagerte Proben für mikrobiologische Analysen (Gesamtzahl) und physikalische Eigenschaften (Farbe, WHC, Tropfverlust) entnommen, 3 parallele Analysen von jeder Temperatur (n=3). Die mikrobiologischen Analysen wurden von einem zertifizierten externen Labor (Analysesenteret, Trondheim) durchgeführt.

2.3. Mikrobiologische Analyse

Das mikrobiologische Wachstum während der Lagerung wurde mit der Methode NMKL96 für CFU (colony forming unit) gemessen. Verdünnungen der Rohmaterialprobe wurden in Eisen-Agar-Platten geformt und 72 Stunden lang bei 20°C inkubiert. Die Anzahl der Kolonie bildenden Einheiten wird auf Platten gezählt, die zwischen 25 und 250 Kolonien enthalten. (n=3 für jede Probe).

2.4. Physikalische Eigenschaften

2.4.1. Anfangswassergehalt

Der anfängliche Wassergehalt wurde durch Trocknen von ca. 10 g zerkleinertem Produkt in einem Konvektionsofen auf ein konstantes Gewicht bei 105°C für 24 Stunden bestimmt. Die Gewichts-differenz vor und nach der Trocknung wurde als Gesamtwassergehalt der Probe genommen. Aus sechs Replikaten wurden Mittelwerte berechnet.

2.4.2. Wasserhaltevermögen

Zur Messung des kapazitiven Wasserspeichers wurde die Fischmenge aus 3 Parallelen in einer Küchenmaschine zusammengemischt und anschließend in 3 Proben mit 1 g Produkt auf dem Filterpapier aufgeteilt. Dann wurde 1 kg Behälter 10 Minuten lang an das Produkt gedrückt.

Dann wurden die Nassfilterpapiere vor und nach dem Pressvorgang gewogen und dann die Wassermenge berechnet.

2.4.3. Farbe

Die Oberfläche des Produkts wurde entfernt, bevor eine Probe für Farbanalysen entnommen wurde. Die Farbe (L, a*, b*) wurde mit einem Hunter Lab gemessen. Die Farbe der Proben wurde durch die Messung der Helligkeit (L), Rötung (a*) und Gelbheit (b*) definiert. Die Proben wurden mit durchschnittlich 3 Replikaten gescannt und de-terminiert. Das Gerät wurde vor jedem Testlauf kalibriert. Die gesamten Farbänderungen wurden durch die Delta-E-Beziehung gemäß der folgenden Gleichung ausgedrückt:

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}$$

2.4.4. Tropfsaftverlust

Beim Verpacken der Proben wurde das Gewicht von Fisch, Vakuumbbeutel und Absorber gewogen. Als die Proben für die Prüfung geöffnet wurden, wurde das neue Gewicht von Fisch, Beutel und Absorber erneut notiert. Anschließend wurde der Tropfverlust basierend auf der Gewichts-differenz berechnet.

2.5. Ergebnisse für die Superkühlung von Lachsfilets

Die Lagertemperatur hat einen großen Einfluss auf die Haltbarkeit der frischen Lachsfilets, und um dies zu untersuchen, wurden während der Lagerung bei verschiedenen Temperaturen mikrobiologisches Wachstum, Tropfverlust, Farbveränderung und Wasserhaltevermögen (WHC) bewertet. Die Versuche mit normalem gekühltem Bio-Lachs endeten immer früher wegen des häufigen Verderbs während der Lagerzeit.

2.5.1. Mikrobiologische Analyse

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Analyse (CFU) während der Lagerung sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Qualitätsgrenze von 107 CFU/g stellt ein übliches mikrobiologisches Qualitätsmaß dar, oberhalb dessen Lebensmittel als genussuntauglich angesehen werden.

Die Ergebnisse zeigen einen erwarteten Anstieg der mikrobiologischen Zählungsentwicklung für beide Lagerbedingungen. Wie erwartet, sind die CFU-Werte für unterkühlte Lachsproben im Vergleich zu hohen Kühltemperaturen deutlich niedriger. Der CFU-Wert für die bei +3°C gelagerten Proben übertraf bereits am Tag 14 die Qualitätsgrenze. Dies ist die gängige Haltbarkeit von Lachsfilets, die unter normalen Kühlbedingungen gekühlt werden.

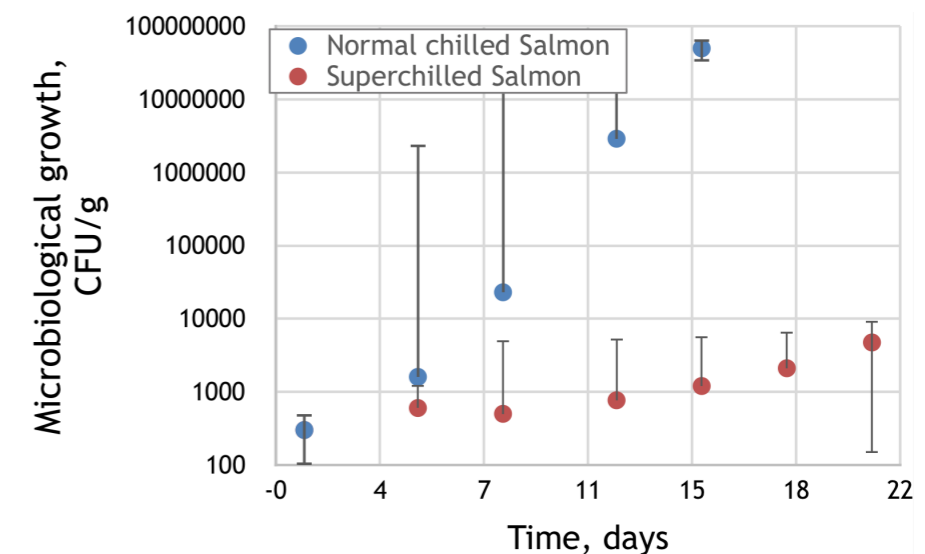


Abbildung 2.2: Anzahl der Kolonie bildenden Einheiten (CFU) in Lachsfilets bei der Lagerung von frischen, gekühlten und supergekühlten Lachsfilets, die nach Verfahren 1 verarbeitet wurden, mit einem Eisgehalt von 15% (rot) bei -1,5°C und gekühlten Referenzproben bei +3°C (blau).

2.6. Physikalische Eigenschaften

2.6.1. Anfangswassergehalt

Der Anfangswassergehalt für Bio-Lachse wurde auf 69,5 % auf nasser Basis berechnet (n=6). Der durchschnittliche Anfangswassergehalt für Bio-Lachse wurde auf 69,5 % berechnet.

2.6.2. Tropfsaftverlust

Die Ergebnisse der Tropfverluste während der Lagerung sind in Bild 2.3 dargestellt. Die Kurven zeigen die Gewichtsreduzierung in % vom Tag Null (100 %). Die Werte sind der Mittelwert aus 3 Parallelen, aus jeder Temperaturung. Die Trends der Tropfverluste sind bei beiden Lagertemperaturen nahezu gleich. Supergekühlter Lachs zeigte zu Beginn der Lagerzeit einen leicht erhöhten Tropfverlust, gegen Ende werden die Unterschiede im Tropfverlust jedoch ausgeglichen.

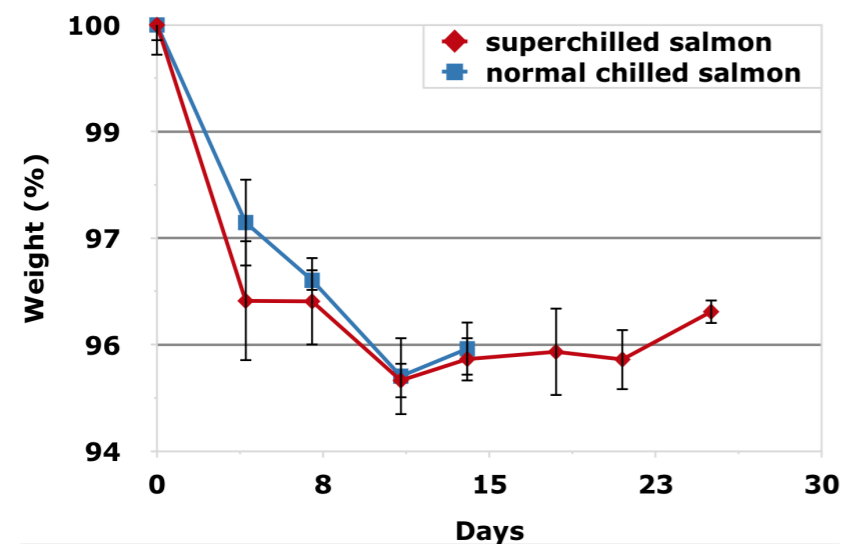


Abbildung 2.3: Prozentualer Tropfenverlust bei supergekühlten Bio-Lachsfilets mit einem Eisgehalt von 15% (rot) bei -1,5°C und gekühlten Referenzproben bei +3°C (blau).

2.6.3. Wasserhaltevermögen

Die Ergebnisse der WHC (Wasserspeicherkapazität) während der Lagerung sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Dann wurden die Nassfilterpapiere gewogen und die Wassermenge berechnet. Die Kurven zeigen die Gewichtsreduzierung in % vom Startgewicht. Es zeigt sich, dass die Wasserspeicherkapazität von normalem Kühllachs im Vergleich zu supergekühltem Lachs geringer ist.

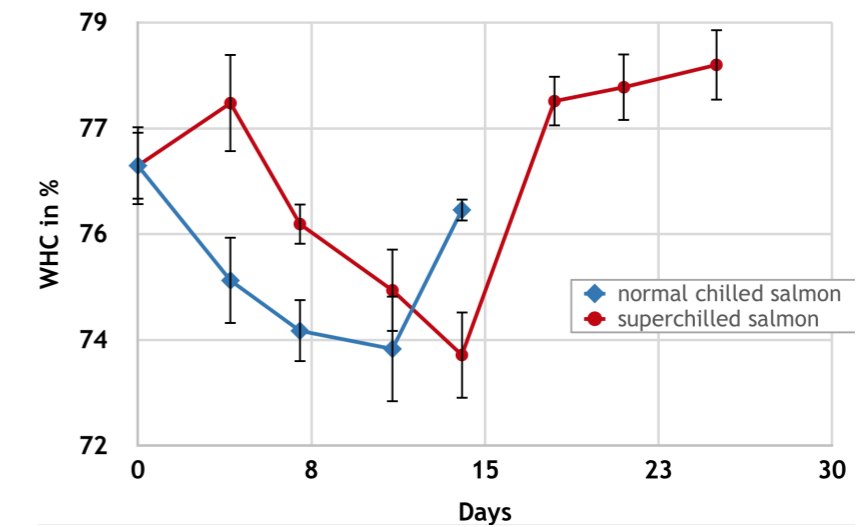


Abbildung 2.4: Perzentile Wasserspeicherkapazität von supergekühlten organischen Lachsfilets mit einem Eisgehalt von 15% (rot) bei -1,5°C und gekühlten Referenzproben bei +3°C (blau).

2.6.4. Farbe

Die der Farbmessungen während der Lagerung sind in Abbildung 2.5 und 2.6 dargestellt. Die Kurven sind der Durchschnitt von 3 parallelen Proben. Die Oberfläche des Fischfilet wurde entfernt und dann wurde eine neue Scheibe aus der Probe in das Farbinstrument (Hunter Lab) gelegt. Die Werte stammen aus der L-Skala (hell vs. dunkel), der a-Skala (rot vs. grün) und der b-Skala (gelb vs. blau). Aus diesen Werten wurde das Delta E mit Gleichung 1 berechnet. Die Unterschiede sind zu Beginn der Lagerzeit am größten, nähern sich aber während der Lagerzeit.

Der Farbunterschied zwischen normal gekühltem und supergekühltem Bio-Lachs war nur gering und zeigte insgesamt keinen klaren Trend.

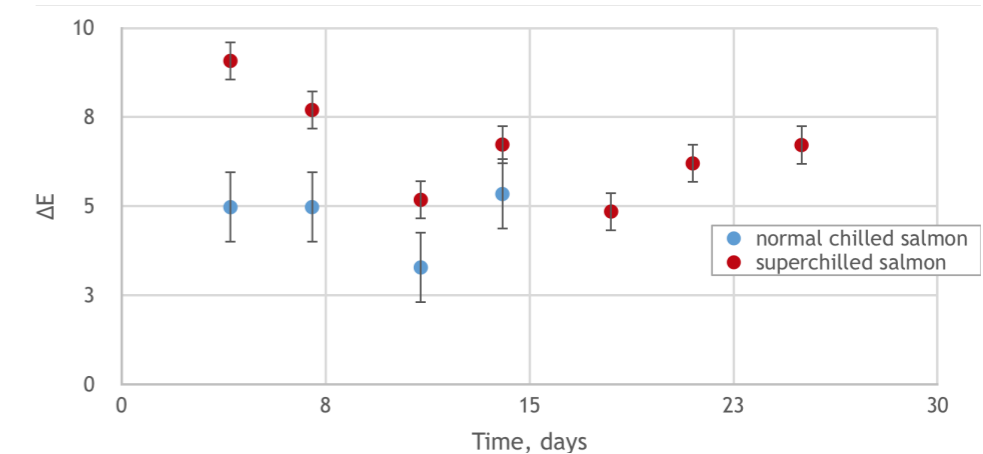


Abbildung 2.5: Farbänderungen L^*a^*b (ausgedrückt als Delta E) für normale gekühlte und supergekühlte Lachsfilets mit einem Eisgehalt von 15% (rot) bei -1,5°C und gekühlte Referenzproben bei +3°C (blau).

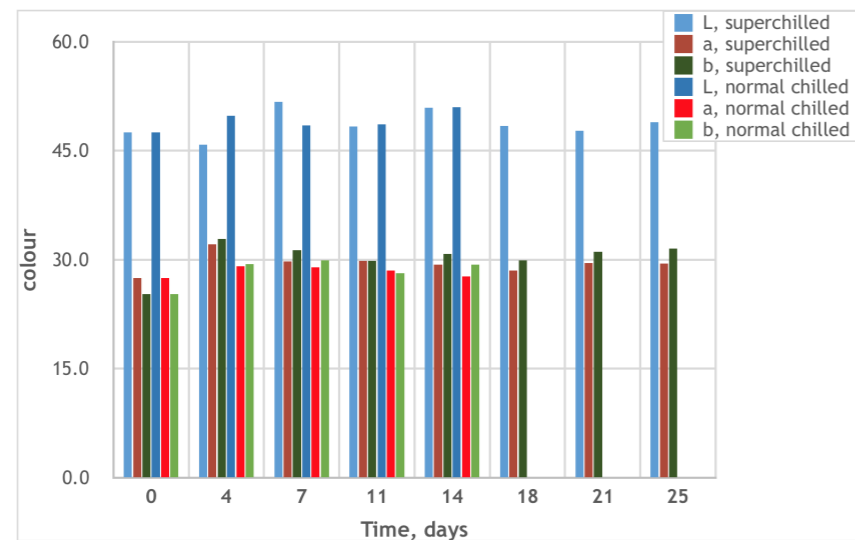


Abbildung 2.6: Farbänderungen in den Hunter-Koordinaten L*a*b für normale gekühlte und supergekühlte Bio-Lachsfilets mit einem Eisgehalt von 15% (rot) bei -1,5°C und gekühlte Referenzproben bei +3°C (blau).

2.7. Ergebnisse für normal gekühltes und supergekühltes Schweinekotelett

2.7.1. Mikrobiologische Analyse

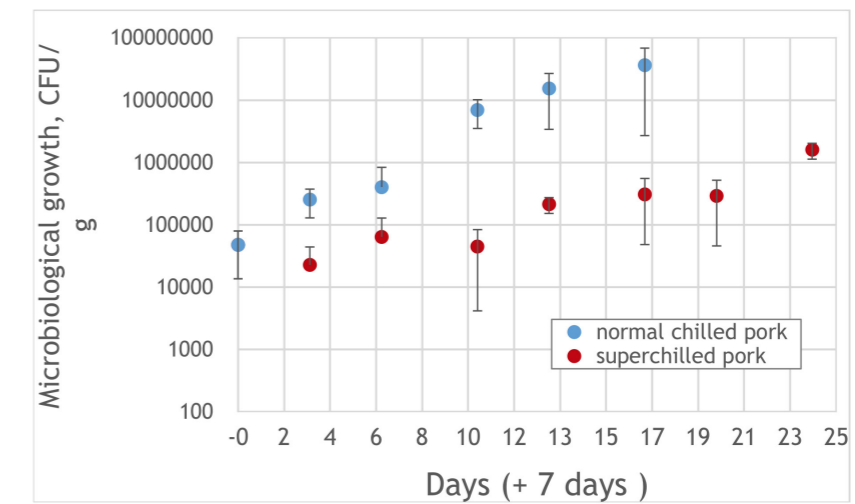
Die Ergebnisse der mikrobiologischen Analyse (CFU) während der Lagerung sind in Abbildung 2.7 dargestellt. Die Qualitätsgrenze von 107 CFU/g stellt ein übliches mikrobiologisches Qualitätsmaß dar, oberhalb dessen Lebensmittel als genussuntauglich angesehen werden. Das normal gekühlte Schweinekotelett überschritt nach ca. 8-9 Tagen die Taktzahl. Dies war kürzer als erwartet, da die allgemein akzeptierte Haltbarkeit von Schweinefleisch 14 Tage beträgt.

Der Lieferant hat jedoch angegeben, dass er die Schweine zu einem Schlachthof schicken muss und dass die entbeinten Tiere dann nach etwa 3 Tagen unter gekühlten Bedingungen an ihn zurückgebracht werden. Der Grund dafür ist, dass das KMU keine Infrastruktur (und Lizenz) für die Schlachtung besitzt.

Erst nach 3 Tagen wird das Fleisch dann weiterverarbeitet und an den Kunden verschickt. Das bedeutet, dass das Produkt beim Markteintritt bereits 7 Tage alt ist und die Zeit für den Verkauf des Produkts entsprechend verkürzt wird. Dieser Zeitraum sollte den Diagrammen hinzugefügt werden (Abbildung 10.7-10.11). Dies erklärt die dokumentierte kürzere Haltbarkeit.

Abbildung 2.7 zeigt jedoch, dass die Haltbarkeit von supergekühltem Schweinefleisch um rund 14 Tage verlängert wurde, obwohl das Produkt bereits 7 Tage alt ist.

Abbildung 2.7: Anzahl der Kolonie bildenden Einheiten im Schweinefleisch mit einem Eisgehalt von x (rot) und gekühlter Referenzprobe bei +3°C während der Lagerung.



2.8. Physikalische Eigenschaften

2.8.1. Wassergehalt

Der anfängliche Wassergehalt für Bio-Schwein wurde auf nasser Basis berechnet (n=3). Der durchschnittliche Anfangswassergehalt für Bio-Schweinefleisch wurde auf 63,4 % berechnet.

2.8.2. Tropfsaftverlust

Die Ergebnisse der Tropfverluste während der Lagerung sind in Bild 2.8 dargestellt. Die Kurven zeigen die Gewichtsreduzierung in Prozent vom Tag Null (100 %). Die Werte sind der Durchschnitt aus 3 Parallelen, von jeder Temperatur. Die Trends der Tropfverluste sind bei beiden Lagertemperaturen nahezu gleich. Supergekühltes Schweinekotelett zeigte jedoch einen höheren Tropfverlust als normales gekühltes Schweinefleisch. Dies lässt sich durch die Gefrierschäden am Produkt während des teilweisen Einfrierens erklären.

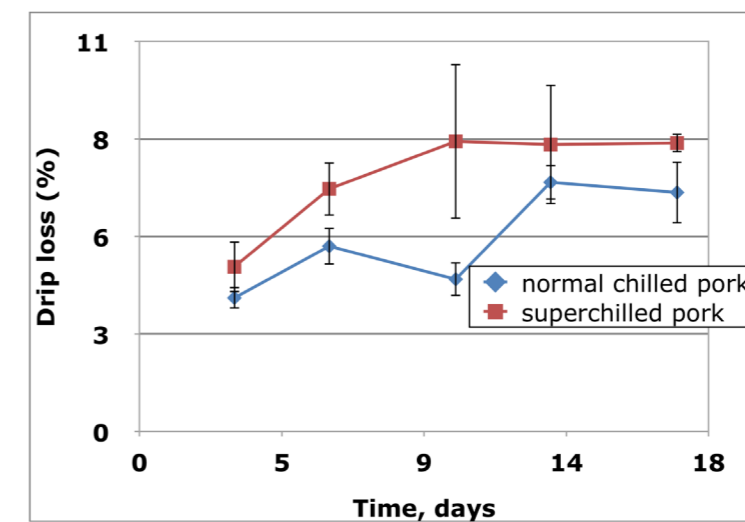


Abbildung 2.8: Tropfverlust während 17 Tagen der Lagerung bei +3°C für normale, gekühlte Proben und bei -1,7°C, supergekühlte Proben.

2.8.3. Wasserhaltevermögen

Die Ergebnisse der WHC (Wasserspeicherkapazität) während der Lagerung sind in Bild 2.9 dargestellt. Die Kurven zeigen die Gewichtsreduzierung in % vom Startgewicht. Aus den Kurven ist ersichtlich, dass das Ergebnis der Produktlagerung bei + 3°C ein leicht reduzierter WHC ist als das Produkt aus der Lagerung bei -1,5°C. Dieser Trend entspricht dem dokumentierten geringeren Tropfverlust von normal gekühltem Schweinefleisch.

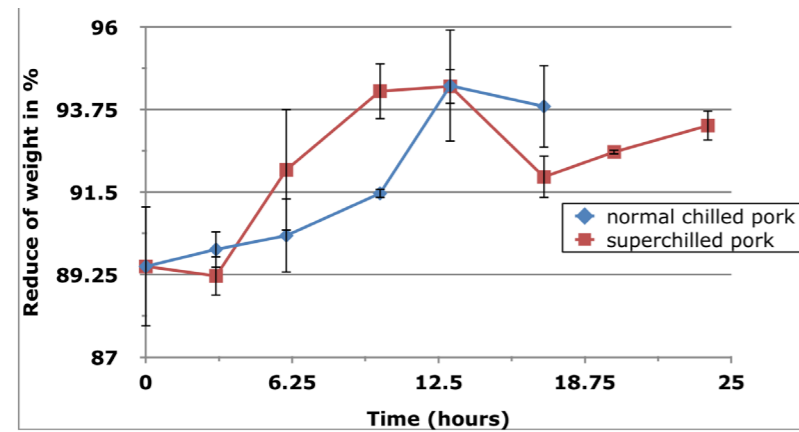


Abbildung 2.9: Percentile Wasserhaltekapazität supergekühltem Bio-Schweinekotelett mit einem Eisgehalt von x% (rot) gelagert bei -1.5°C und gekühlte Referenzbeispiele gelagert bei +3°C(blau)

2.8.4. Farbe

Die Ergebnisse der Farbmessungen während der Lagerung sind in Abbildung 2.10 und 2.11 dargestellt. Die Kurven sind der Durchschnitt von 3 parallelen Proben. Die Werte stammen von der L-Skala (hell vs. dunkel), der a-Skala (rot vs. grün) und der b-Skala (gelb vs. blau). Aus diesen Werten wurde das Delta E mit Gleichung 1 berechnet.

Die Unterschiede sind zu Beginn der Lagerzeit am größten, nähern sich aber während der Lagerzeit.

Die dokumentierten Farbveränderungen bei Bio-Schweinekotelett waren nur gering und es war nicht möglich, einen klaren Trend zu dokumentieren. Die Farbunterschiede lassen sich wahrscheinlich besser durch externe Faktoren erklären, z.B. durch Stresspegel beim Schlachten und nicht durch die Superchilling-Anwendung.

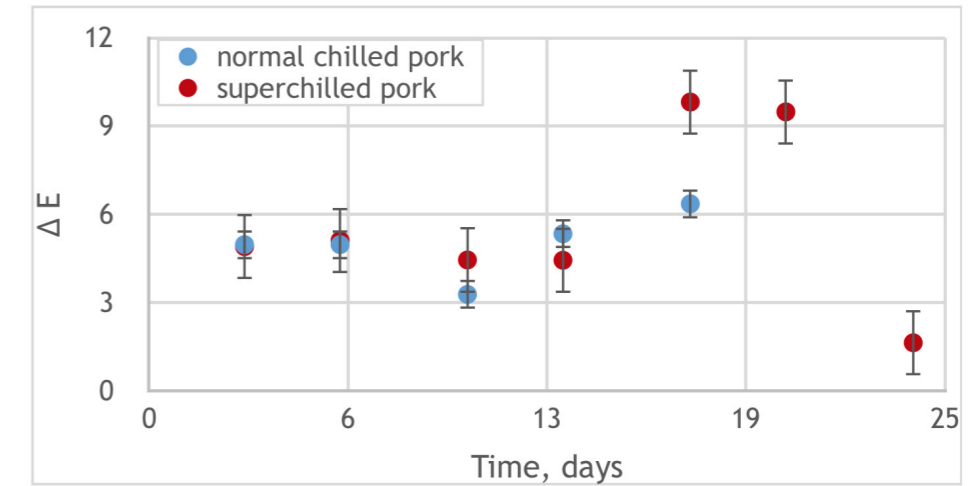


Abbildung 2.10: Farbänderungen L*a*b (ausgedrückt als Delta E) für normal gekühltes und superchilling Schweinefleisch.

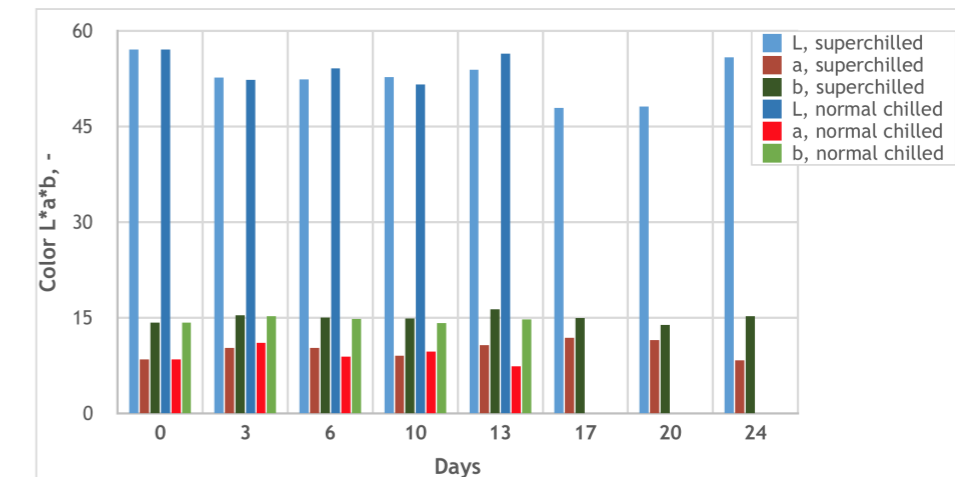


Abbildung 2.11: Farbänderungen in Hunterkoordinaten L*a*b für normal gekühltes und supergekühltes Schweinekotelett

2.10. Zusammenfassung

Bioprodukte haben im Allgemeinen die gleiche Haltbarkeit wie nichtökologische Produkte und werden auch unter den gleichen Bedingungen in der Kühlkette gelagert. Das Konzept der Superkühlung wurde für ein Bio-Lachsprodukt und ein Bio-Schweineprodukt angewendet, die auf dem norwegischen und europäischen Markt allgemein erhältlich sind.

Für beide Produkte war es möglich, die Haltbarkeit um 14 Tage zu verlängern, bezogen auf die Haltbarkeit des Produkts in der normalen Kühlkette. Ähnliche Haltbarkeitsverlängerungen sind für gängige Fisch- und Fleischprodukte dokumentiert, und es scheint sicher zu sein, dass die Ergebnisse auf Bio-Produkte übertragbar sind. Mit anderen Worten, die Haltbarkeit des Produkts hängt hauptsächlich von den Bedingungen der Hygiene, der Verarbeitung und der Kühlkette ab und nicht vom biologischen Ursprung des Produkts. Es ist zu betonen, dass die dokumentier-

te Haltbarkeitsverlängerung von den Verarbeitungsbedingungen und der Hygiene der einzelnen Produktionsstätten abhängt. Einzelne Tests müssen vor Ort durchgeführt werden, um die absolute Haltbarkeit einer bestimmten hochgekühlten Produktionslinie zu dokumentieren. Das Potenzial der Superchilled ist jedoch eindeutig, dass die Haltbarkeit des Produkts um 14 Tage verlängert werden kann und sich damit verdoppelt. Die Technologie kann daher für KMU von besonderem Interesse sein, um die Marktverfügbarkeit ihrer Bio-Produkte zu erhöhen.

Es war auch möglich, die Haltbarkeit eines bereits 7 Tage alten Produkts zu verlängern. Dieser Aspekt der Superkühlung wurde bisher von anderen Forschern nicht untersucht. Dieser Ansatz könnte von Interesse sein, um das Marktrisiko für Bioprodukte zu erhöhen, wenn es nicht möglich ist, es innerhalb der ersten Tage nach der Schlachtung zu verkaufen.

Tabelle 2.2: Dokumentierte Haltbarkeit für Bio-Lachs und Bio-Schweinefleischprodukte.

Produkt	Haltbarkeit bei +3°C	Haltbarkeit Superchilling (-1.5°C, 15% Eis)
Lachs	14 Tage	28 Tage (+14 Tage)
Schweinefleisch	14 Tage	28 Tage (+14 Tage)

Die Qualität von Lebensmitteln ist schwer zu definieren, und verschiedene Hersteller werden individuelle Qualitätsparameter festlegen. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Farbe des Produkts als Qualitätsparameter bewertet. Es gab keinen großen oder signifikanten Unterschied zwischen der Farbe von normal gekühltem und supergekühltem Lachs und Schweinefleisch.

Ein weiterer untersuchter Qualitätsaspekt war der Tropfverlust und die Wasserspeicherkapazität, die eine Indikation der Texturveränderungen geben. Tropfverlust und Wasserhaltevermögen sind miteinander verbundene Aspekte und sollten gemeinsam bewertet werden. Supergekühlte Bio-Produkte weisen einen erhöhten Abtropfverlust und eine reduzierte Wasserspeicherkapazität auf. Der Grund dafür ist die Gefrierschädigung des Produktes während des teilweisen Einfrierens unter Superkühlbedingungen. Die Wirkung ist in der Literatur für Tiefkühlprodukte dokumentiert und steht im Allgemeinen in keinem Zusammenhang mit dem biologischen Ursprung. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten das Potenzial des Superchilling-Konzeptes für Bioprodukte. Die erforderliche Technologie ist auf dem Markt verfügbar und kann in der ökologischen Produktion eingesetzt werden.

2.10. Referenzen

Bantle, Michael; Claussen, Ingrid Camilla; Tolstorebrov, Ignat. Superchilling of organic Food : part 1: Concept, State-of-the-Art and Potential for small scale implementation. Trondheim: SINTEF Energi 2016 (ISBN 978-82-594-3671-9) SINTEF Energi. Rapport(TR A7583)

Haugland, A., Aune, E. J., & Hemmingsen, A. K. T. (2005). Superchilling - innovative processing of fresh food. In Eurofreeze 2005: Individual Quick Freezing of Foods, Sofia, Bulgaria.

II. II GEFRIEREN

3. Einfluss der Gefrier- und Gefriereschwindigkeit auf die Qualität von Bio-Äpfeln

Universität Teramo, Fakultät für Biowissenschaften, Agro-Lebensmittel und Umwelttechnologie
Pittia, P.

3.1. Einleitung

Die Aufmerksamkeit der Verbraucher für den Nährwert und den Gesundheitswert von Lebensmitteln nimmt zu. Das Hauptinteresse gilt Früchten als reiche Quelle essentieller Mikronährstoffe (z.B. Vitamin C und Folsäure) und anderen bioaktiven Verbindungen, einschließlich phenolischer Verbindungen, für die einige Studien eine chemoprotektive Rolle in der menschlichen Gesundheit nachgewiesen haben, wie epidemiologische Studien zeigen (Van Duyn und Pivonka, 2000). Seneszenz, Reife sowie mikrobielle Kontamination und Wachstum beeinträchtigen schnell den Nährwert von frischem Obst und verschiedene Konservierungsmaßnahmen stehen nun zur Verfügung, um die Qualität und Sicherheit der frischen Produkte zu erhalten. Unter den verschiedenen Techniken ist das Gefrieren als eines der wichtigsten Verfahren zur Langzeitkonservierung und -lagerung von Obstprodukten anerkannt (Silva et al. 2009). Gefriertemperaturen verursachen den Phasenübergang des freien und gefrierbaren Wassers in Eiskristalle, wodurch es immobilisiert wird, und chemische, biochemische Veränderungen werden deutlich verlangsamt, und das mikrobielle Wachstum ist begrenzt, wodurch der Nähr- und Gesundheitswert erhalten werden konnte.

Rohes Obst und Gemüse weist im Verhältnis zu seinem Gewicht große Mengen an Wasser auf (85-90 %), so dass die durch das Einfrieren bedingte Änderung der Wasserphase diese Produkte zu mehr Wasser macht.

anfällig für Eiskristallbildung und Auftauen als andere Lebensmittel. Die Qualität von zellulären Lebensmitteln nach dem Auftauen ist stark mit der Integrität und Lebensfähigkeit von Gewebezellen korreliert. Die Bildung von Eiskristallen, die Wassermigration und die inhärenten Eigenschaften der Zellstruktur werden als Hauptfaktoren, die die Zellstruktur beim Einfrieren beeinflussen, betrachtet (Li et al., 2018). Tatsächlich sind Früchte aufgrund ihrer zellulären Strukturmerkmale weniger frostbeständig als Gemüse-Tische.

Gefrieren durch Eisbildung, Volumenausdehnung beim Gefrieren und Rekrystallisieren, könnte somit die Integrität der Zellwände beeinträchtigen, die pflanzliche Struktur schädigen und den Mangel an Produktintegrität feststellen und beim Auftauen zu übermäßiger Entwässerung oder Formverlust führen. Insgesamt kann dies einerseits die Textur und die sensorischen Eigenschaften beeinflussen, andererseits können die ernährungsphysiologischen und gesundheitlichen Eigenschaften von gefrorenem aufgetautem Obst und Gemüse als Teil seiner Mikronährstoffe im freigesetzten Wasser verloren gehen und enzymatische Reaktionen können durch die Schädigung der Pflanzenstruktur begünstigt werden, die die Aktivität erleichtern.

Zur Verbesserung der Qualität von Tiefkühlprodukten durch Inaktivierung oder Hemmung von Enzymen, die die Qualität des Produkts während des Gefrierens, der Lagerung im Gefrierfach

und nach dem Auftauen beeinträchtigen können, werden Vorbehandlungen von frischem Obst und Gemüse empfohlen, die am häufigsten zum Blanchieren (bei Gemüse) und Eintauchen in säure- und/oder zuckerhaltige Lösungen als Schutzmittel zur Senkung des pH-Wertes und/oder zur Reduzierung des gefrierbaren Wassers verwendet werden.

Bioprodukte im Vergleich zu integrierten oder konventionellen Produkten sind für das Fehlen und/oder das geringe Vorhandensein von Phytochemikalien und Umweltkontaminanten anerkannt. Das Einfrieren könnte eine interessante Konservierungstechnologie sein, die auch in der ökologischen Lebensmittelproduktion umfassender anwendbar ist und derzeit nur in begrenztem Umfang auf dem Markt erhältlich ist. Mehrere Gründe können die Anwendung dieser Technologie auf biologische Rohprodukte einschränken, einschließlich der begrenzten Informationen über ihre Eignung für die Verarbeitung.

Die Wirkung von biologischen Verfahren auf andere Qualitätsmerkmale der Bioprodukte, einschließlich der Nährstoffqualität in Bezug auf Makronährstoffe, Vitamine und Mineralien sowie der physikalischen, funktionellen und sensorischen Eigenschaften, ist jedoch noch in der Diskussion (Roussos und Gasparatos, 2009; Stracke et al., 2010; Brandt et al., 2011; Lima und Vianello, 2011).

Im Projekt SusOrganic wurde daher eine Studie entwickelt um folgendes auszuwerten:

- Wirkung von Vorbehandlungen, insbesondere Tauchen und Vakuumimprägnierung unter Verwendung von Lösungen aus Zitronensaft. Die Vakuumimprägnierung ist eine neue Technologie, die durch eine schnelle Druckreduzierung die Penetration von gelösten Stoffen und interessanten Verbindungen beschleunigen könnte.
- Effekt verschiedener Gefriergeschwindigkeiten

3.2. Experimentelles Design

3.2.1. Experiment 1: Wirkung von Vorbehandlungen Tauchen und Vakuumimprägnierung zur Verbesserung der Stabilität über die Lagerzeit

Die technologische Funktionalität von Bio-Äpfeln zum Gefrieren und Gefrierlagern und die Wirkung von Tauch- und Vakuumimprägnierungsvorbehandlungen auf die Äpfel (cv. Golden delicious) wurde untersucht, indem die Veränderungen der wichtigsten kompositorischen Qualitätseigenschaften bewertet und die physikalischen Eigenschaften (Farbe, Textur) bewertet wurden. Bio- (ORG) und konventionelle (CONV) Äpfel cv. Golden Delicious der Kategorie „extra“ mit gleicher Herkunft (Trentino-Südtirol, Italien) wurden auf einem lokalen Markt gekauft.

Sowohl die ORG- als auch die CONV-Äpfel wurden den beiden verschiedenen Vorbehandlungen unterzogen, nämlich Tauchen und Vakuumimprägnierung (738 mbar, 10 s) in Wasser (Kontrolle) oder organische Zitronensaftlösung 0,5% v/v (20 °C).

Nach der Vorbehandlung wurden die Apfelwürfel entleert und einschichtig in BOPP-Beutel (Folienstärke: 30 mm) verpackt und in einem Schockfroster (Forma, Thermo Scientific, Mailand, Italien) bei -40 °C gefroren, um hohe Gefrierzeiten zu erreichen. Die Analysen wurden nach 15, 30 und 300 Tagen Gefrierlagerung durchgeführt. Vor der Analyse wurden gefrorene Proben in einer Monoschicht bei 4 °C für 15 Stunden aufgetaut.

Folgende analytische und instrumentelle Analysen wurden durchgeführt: Feuchtigkeit, pH-Wert, °Bx, Textur, Stärkeindex, Farbe, organische Säuren, enzymatische Aktivität (Polyphenoloxidase, PPO), Gesamtphenolge (Neri et al., 2018, eingereicht).

3.2.2. Experiment 2: Auswirkung der Gefriergeschwindigkeit

Im Projekt SusOrganic wurde der Einfluss des Gefrierens und der Vielfalt der Bio-Äpfel auf die wichtigsten Qualitätsmerkmale untersucht. Insbesondere ORG-Äpfel zweier verschiedener Sorten (Golden Delicious und Royal Gala) wurden dem Gefrieren bei zwei verschiedenen Temperaturen (-18°C und -40°C) unterzogen und ihre wichtigsten Qualitätsmerkmale (Wasserverlust, Feuchtigkeit, Textur, Farbe) sowie die Rückhaltung von phenolischen Verbindungen bewertet. Die Wirkung des Eintauchens mit einer Lösung von Zitronensaft (Neri et al., eingereicht) wurde getestet. Zwei verschiedene Apfelsorten wurden berücksichtigt (Golden delicious und Royal Gala cv.) Zum Vergleich wurde die Studie auch an Äpfeln der gleichen Sorte durchgeführt, die jedoch nach konventionellen landwirtschaftlichen Methoden hergestellt wurden.

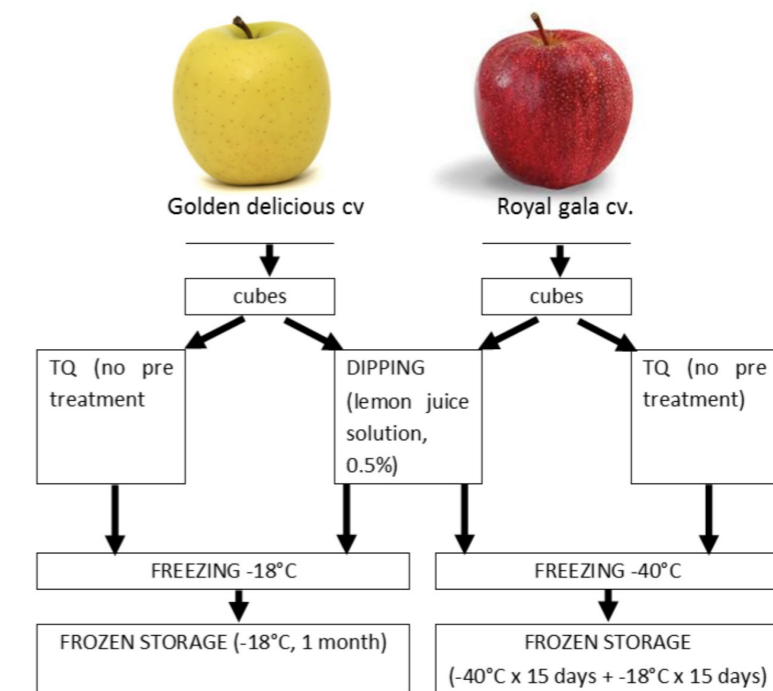


Abbildung 3.1: Versuchsplanung zur Auswirkung der Gefriergeschwindigkeit

Konventionelle (CONV) und biologische (ORG) Äpfel von zwei Sorten (cv. Golden delicious und Royal gala) wurden gleichzeitig in einem lokalen Supermarkt gekauft (Dezember 2017). Für diese Proben war es nicht möglich, zusätzliche Informationen über das Anbauggebiet und den Zeitpunkt der Abholung zu erhalten, die daher auch für dieselbe Sorte zwischen CONV und ORG unterschiedlich sein können.

Sowohl die ORG- als auch die CONV-Äpfel wurden geschält und in Würfel geschnitten (1 cm-Seite) und die Hälfte der Probe wurde einem Eintauchen in organische Zitronensaftlösung 0,5% v/v

(20 °C) unterzogen, und der restliche Teil blieb ohne Vorbehandlung.

Die Äpfel ORG und CONV, getaucht oder nicht, wurden in Plastikbeutel verpackt und dann in Schockfroster (Forma, Thermo Scientific, Mailand, Italien) bei - 18° und - 40°C gefroren, um Bedingungen mit niedriger und hoher Gefriereschwindigkeit zu reproduzieren. Bei -18°C gefrorene Äpfel wurden 30 Tage lang bei gleicher Temperatur gelagert, während bei -40°C gefrorene Äpfel zunächst 15 Tage lang bei gleicher Temperatur und dann für die restlichen 15 Tage bei -18°C (insgesamt: 30 Tage Lagerung) gelagert wurden.

Die folgende analytische und instrumentelle Analyse wurde an den frischen Apfelwürfeln und nach dem Tauchen und Gefrieren (30 Tage) durchgeführt: Feuchtigkeit, pH-Wert, °Bx, Textur, Farbe, Gesamtphenolge mit Methoden, wie in Neri et al., 2018 (eingereicht) beschrieben.

3.3. Ergebnisse (Experiment 1):

3.3.1. Charakterisierung von frischen Früchten: ORG vs. CONV

In Tabelle 11.1 wurden die Ergebnisse der chemischen und physikalischen Analysen an den Golden Delicious Äpfeln aus ökologischem und konventionellem Anbau dargestellt. Organische und konventionelle frische Äpfel zeigten ähnliche Werte von pH-Wert, löslichen Feststoffen, Reifegradindex und Stärkeindex, die insgesamt einen gleichen Reifegrad anzeigen. Darüber hinaus stimmen diese Ergebnisse mit denen überein, die in der Literatur von Salvatori et al. (1998) e Mújica Paz et al. (2003) für konventionelle Äpfel bei gleicher Apfelsorte veröffentlicht wurden.

Durch den Vergleich des Zuckergehalts von Bio- und konventionellen Äpfeln wurden die höchsten Mengen ($p < 0,01$) in den konventionell angebauten Äpfeln nachgewiesen. Auf der anderen Seite zeigten Bio-Äpfel einen höheren und niedrigeren Gehalt an Weinsäure und Ascorbinsäure als konventionelle Äpfel. Keine Unterschiede zwischen den ORG- und CONV-Äpfeln in der Polyphenoloxidase-Aktivität, während in ORG ein höherer Gesamtpolyphenolgehalt gefunden wurde als in CONV-Äpfeln in Übereinstimmung mit Daten über Golden Delicious-Äpfel anderer Autoren (Weibel et al., 2000; und Stracke et al., 2010).

Hinsichtlich Farbe und mechanischer Eigenschaften sind keine Unterschiede zwischen ORG- und CONV-Äpfeln nachgewiesen worden. Eine größere Festigkeit bei Bio-Äpfeln im Vergleich zu konventionellen Äpfeln wurde für „Golden Delicious“-Äpfel von Reganold et al. (2001) und Reig et al. (2007) berichtet.

3.3.2. Auswirkungen der Vorbehandlung von frischen Früchten

Die Vorbehandlung durch Eintauchen und Vakuumimprägnierung (VI) beeinflusste die Zusammensetzung der Apfelwürfel, die einen signifikanten ($p < 0,05$) Wassergewinn und einen Verlust an löslichen Feststoffen bestimmten. Beim Tauchen sind die Stoffübergänge auf osmotische und Diffusionserscheinungen zurückzuführen, die durch die Unterschiede in den löslichen Feststoffen zwischen den Äpfeln und der Imprägnierlösung (13,25 vs. 6,25 ° Brix) hervorgerufen werden. Im Gegenteil, während der VI-Behandlung werden diese Phänomene mit hydrodynamischen Mechanismen (HDM) und Verformungs-Relaxationsphänomenen (DRP) kombiniert, die durch den angewandten Unterdruck induziert werden, was die höchste Wasseraufnahme erklärt, die

sowohl bei den vakuumimprägnierten als auch bei den getauchten Proben zu verzeichnen ist. Hinsichtlich der Variation der löslichen Feststoffe wurden keine signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den mit verdünntem Zitronensaft imprägnierten Proben festgestellt. In der VI-behandelten Probe hätte die Zugabe von gelösten Stoffen zum Fruchtgewebe dem löslichen Feststoffverlust entgegenwirken können, der in diesem Fall auf den Verlust der nativen, inneren wässrigen Phase zurückzuführen ist, die in Abhängigkeit von der internen Gasausdehnung und dem Ausfluss aus den Poren des Apfelgewebes austritt.

Durch den Vergleich der Stoffaustauschdaten der ORG- und CONV-Proben bei gleichen Vorbehandlungsbedingungen wurde bei allen späten Proben eine geringste Variation sowohl des löslichen Fest- als auch des Wassergehalts beobachtet, und diese Ergebnisse erklären sich durch die geringste Porosität des konventionellen frischen Apfels, der den Austausch einschränkte.

Durch den Vergleich der Ergebnisse im Zusammenhang mit der Zitronensäureanreicherung der Apfelwürfel durch Imprägnierung mit verdünntem Zitronensaft kann beobachtet werden, dass sowohl die von ORG als auch von CONV verarbeiteten Proben einen Gehalt an dieser Säure zeigten, der deutlich ($p < 0,001$) höher war als die Kontrolle, unbehandelte Früchte und insbesondere die höchsten Werte wurden in den Bio-Früchten aufgrund ihrer höchsten Porosität gefunden.

Tabelle 3.1: Chemische und physikalische Eigenschaften von organischen und konventionellen Golden Delicious Äpfeln.

Eigenschaft / Parameter	Bio (ORG)	Konventionell (CONV)	Signifikanz
Lösliche Feststoffe (°Brix)	13.2 ± 0.3	13.5 ± 0.3	ns
Titrierbarer Säuregehalt (Kg Apfelsäure/ 100 Kg Probe)	0.33 ± 0.01	0.31 ± 0.01	ns
Reifegradindex	40.8	43.3	ns
Feuchtigkeitsgehalt (%)	85.6 ± 0.3	86.2 ± 0.4	ns
Stärkeindex	9	9	ns
Fest-Flüssigkeitsdichte (Kg /m3)	10.2	10.3	*
Fruchtdichte (Kg /m3)	0.804	0.810	*
Fruchtporosität (ε %)	25.3	24.5	*
Wasseraktivität (aw)	0.994 ± 0.002	0.991 ± 0.001	ns
pH	3.73 ± 0.02	3.77 ± 0.02	ns
Leichtigkeit (L*)	76.6 ± 1.9	76.3 ± 1.9	ns
Farbtonwinkel (h°)	91.5 ± 2.0	91.4 ± 2.1	ns
Maximalkraft (N)	243 ± 13	249 ± 20	ns
Gesamtpolyphenole (mg GAE g-1 dm)	5.61 ± 0.52	4.31 ± 0.22	*
Polyphenoloxidase (U g-1 dm)	10.6 ± 1.1	10.7 ± 0.3	ns

Ns=nicht significant. *, auf 0,05-Wahrscheinlichkeitsniveau.

3.3.3. Auswirkung der Vorbehandlung auf die Farbe der Frucht

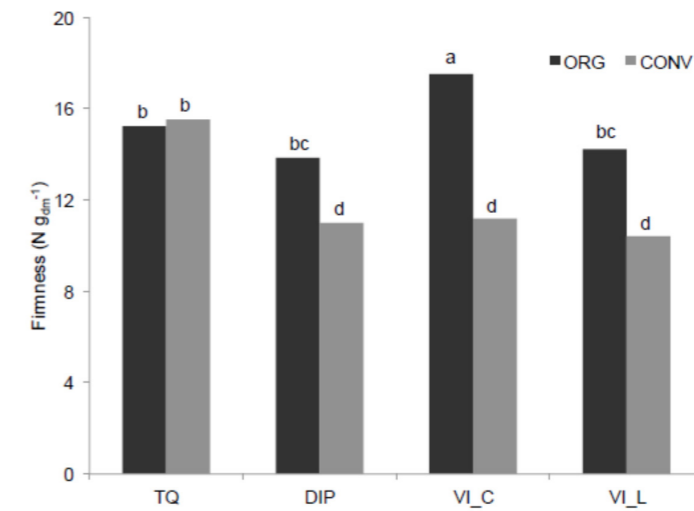
Nach dem Eintauchen zeigten die Proben eine positive Variation ($p < 0,5$) sowohl der Parameter L^* (Helligkeit) als auch h° (Farbtonwinkel, Index der Farbigkeit) in Bezug auf die unverarbeiteten Äpfel.

Nach dem, was in anderen Studien beobachtet wurde (Neri et al., 2016; Fito und Chiralt, 2000), führten die VI-Behandlungen zu einer Reduktion des L^* -Parameters, der auf die Abnahme des Reflexionsvermögens der Pflanzenmatrix als Effekt des Luft-Wasser-Austauschs zurückzuführen ist, der während der VI-Behandlung stattfindet. Die VI-Behandlung ergab keine Änderung der h° -Werte bei Verwendung von Wasser als Imprägniermittel und dies in Übereinstimmung mit anderen Studien (Neri et al., 2016; Perez-Cabrera et al., 2011). Wie auch immer, wenn die Zitronensaftlösung verwendet wurde, wurde eine Erhöhung des h° -Parameters beobachtet, die wahrscheinlich auf den Beitrag einiger Farbverbindungen des Zitronensaftes zum Apfel zurückzuführen ist und/oder auf chromatische Veränderungen aufgrund der pH-Veränderung aufgrund der Säureanreicherung der Apfelmatrix.

3.3.4. Auswirkung der Vorbehandlung auf die Festigkeit von Äpfeln

In Abbildung 3.2 wird der Einfluss von Tauchen und Vakuumimprägnierung auf die Festigkeit der Apfelwürfel dargestellt. Nach der VI-Behandlung mit verdünntem Zitronensaft zeigten die ORG-Proben Festigkeitswerte, die mit frischen Früchten vergleichbar sind, während die höchsten Werte an der wasserimprägnierten Probe (VI_C) gemessen wurden. Dieses Ergebnis ist auf den Luftwasserersatz zurückzuführen, den die VI_C-Behandlung in größerem Umfang ausgelöst hat als die einfach eingetauchten. Im Gegenteil, die Festigkeit der CONV-Äpfel wurde, unabhängig von der angewandten Vorbehandlung, durch Vorbehandlung negativ beeinflusst. Da ORG und CONV Frischfrüchte gleiche Anfangsfestigkeitswerte hatten, konnten die durch die Verarbeitung beeinträchtigten unterschiedlichen Effekte durch die unterschiedliche Porosität der Früchte und/oder durch Unterschiede in der Zellwandkomposition erklärt werden. Diese Phänomene könnten für die höchste Festigkeit der ORG-Proben nach der Behandlung verantwortlich sein; diese Proben sind in der Tat deutlich stärker von Umweltbelastungen betroffen als die, die mit herkömmlichen Methoden angebaut werden (Asami et al 2003).

Abbildung 3.2: Festigkeit von Bio- (ORG) und konventionellen (CONV) Äpfeln. TQ: unverarbeitet; DIP; eingetaucht in verdünntem Zitronensaft; VI_C: vakuumimprägniert in Wasser; VI_L: vakuumimprägniert in verdünntem Zitronensaft. Unterschiedliche Buchstaben stehen für statistisch signifikante Unterschiede bei $p < 0,05$



3.3.5. Wirkung der Vorbehandlung auf bioaktive Verbindungen

Die ORG-Äpfel zeigten eine Tendenz zu höheren phytochemischen Konzentrationen im Vergleich zu den konventionell hergestellten Äpfeln. Darüber hinaus wurde vor dem Einfrieren ein höherer Gehalt an gesamten phenolischen Verbindungen sowohl in ORG als auch in CONV VI-vorbehandelten Äpfeln gefunden, aber nur für ORG-Äpfel waren diese Unterschiede statistisch signifikant ($p < 0,05$). Diese Ergebnisse können auf das größere Vorhandensein von Polyphenolen und anderen bioaktiven Verbindungen aus Zitronensaft in dieser Probe zurückzuführen sein, die während der Vorbehandlung der Imprägnierung in die Pflanzenmatrix eindringen. Dieses Produkt entstand durch enzymatische und oxidative Reaktionen, die zur Bildung von braunen Verbindungen mit hoher Kettenbruchaktivität führen.

Diese Hypothese wurde durch höhere Werte der in-vitro-antioxidativen Aktivität des Vakuums bestätigt, das mit Zitronensaftproben beider Arten von Äpfeln imprägniert ist.

3.3.6. Einfluss von Gefrieren und Gefrierlagerung auf die Farbe

Insgesamt wurde die Farbe von gefrorenen Äpfeln nach dem Auftauen durch das Einfrieren und die gefrorene Lagerzeit aufgrund der auftretenden Bräunungsreaktion negativ beeinflusst. Darüber hinaus waren die L^* - und h° -Daten von gefrorenen Äpfeln durch die Anbaumethode, die Vorbehandlung und die Lagerzeit signifikant beeinflusst ($p < 0,001$ Level). Die Vorbehandlung mit Zitronensaftzugabe wirkte sich positiv auf die Farbe der gefrorenen, aufgetauten Äpfel aus, da sie sowohl die pH-Absenkung als auch die antioxidative Wirkung von Ascorbinsäure und Zitronensäure auf die enzymatische Aktivität beeinflusst.

3.3.7. Einfluss von Gefrieren und Gefrierlagerung auf die Festigkeit

Sowohl die ORG- als auch die CONV-Probe zeigten beim Auftauen einen drastischen Festigkeitsverlust innerhalb des ersten Monats der Gefrierlagerung, während bis zu 10 Monate der Gefrierlagerung nur eine begrenzte zusätzliche Erweichung beobachtet wurden. Dieses Ergebnis steht

im Einklang mit anderen Studien an anderen Gemüsesorten (Neri et al., 2014) und ist ein Index für das Erreichen eines Gleichgewichtszustands in der gefrorenen Matrix, der die Zelldomane und -strukturen nicht weiter beeinträchtigt. Der negative Effekt, der durch Gefrieren und Gefrierlagerung auf die mechanischen Eigenschaften des Apfelgewebes beeinträchtigt wird, wird hauptsächlich durch die mechanische Schädigung durch Eisbildung, Kristallwachstum und die damit verbundenen potenziellen Belastungen, die die Zellwandmembranen sowie die durch Pektin vermittelten Zellverbindungen beeinträchtigen, verursacht (Neri et al., 2014). Durch den Vergleich der Ergebnisse an den ORG- und CONV-Äpfeln konnte festgestellt werden, dass erstere eine höhere Festigkeitsretention zeigten als die letzteren ($p < 0,05$). Statistische Analysen zeigten einen positiven Effekt von Vakuumimprägnierungsvorbehandlungen auf die mechanischen Eigenschaften der ORG-Tiefkühläpfel, während kein Effekt auf die CONV-Proben festgestellt wurde.

3.3.8. Effect of freezing and frozen storage on bioactive compounds

Nach 300 Tagen gefrorener Lagerung (10 Monate) zeigten die Ergebnisse einen Rückgang des Gesamtpolyphenolgehalts und der antioxidativen Aktivität beider Äpfeltypen und aller Vorbehandlungen. Bei gleicher Vorbehandlung und Einfrierzeit zeigten die ORG-Äpfel, die von einem höheren Polyphenolgehalt ausgingen, einen ähnlichen Verlust dieser Bioaktivstoffe wie CONV und nach 10 Monaten wurde somit ein insgesamt höherer $p < 0,05$ Gehalt in den entsprechenden Proben gefunden.

3.4. Ergebnisse (Experiment 2):

3.4.1. Charakterisierung von frischen Früchten: ORG vs. CONV

In Tabelle 3.2 sind die Ergebnisse der chemischen und physikalischen Analysen an den beiden verschiedenen Apfelsorten (GD und GR), sowohl CONV als auch ORG, dargestellt.

Innerhalb jeder Sorte ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Apfeleigenschaften von CONV und ORG zu beobachten, insbesondere bei der Festigkeit. In RG-Äpfeln konnte ein signifikanter Unterschied auch beim Gehalt an löslichen Feststoffen ($^{\circ}\text{Bx}$) beobachtet werden. Bei GD-Äpfeln unterscheiden sich die für diese Studie verwendeten Chargen signifikant von den Ergebnissen der vorangegangenen Experimente, was sich in einem deutlich geringeren Gehalt an Polyphenolen und bei den ORG-Äpfeln auch in der Festigkeit zeigt.

Während Unterschiede zwischen GD und RG, die naturgemäß durch unterschiedliche zusammengesetzte, physikalische und sensorische Eigenschaften gekennzeichnet sind, erwartet wurden, deuten die Unterschiede zwischen CONV und ORG in derselben Sorte darauf hin, dass die Äpfel wahrscheinlich in unterschiedlicher Zeit produziert und von den Feldern gesammelt wurden und somit nicht die gleiche Lagerzeit haben und/oder unter verschiedenen Umweltbedingungen gelagert wurden. Während der Lagerung werden verschiedene Stoffwechselwege, die mit der Reifungsmodalität verbunden sind, die Struktur- und Qualitätseigenschaften der Äpfel und deren Raten durch verschiedene Faktoren wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und At-

mosphärenzusammensetzung beeinflusst. Darüber hinaus ist bekannt, dass RG ein Apfel ist, der während der Reifung zur Mehligkeit neigt und seine charakteristische Frische verliert (Piazza und Giovenzana 2015; Saei et al., 2011).

Tabelle 3.2: Chemische und physikalische Eigenschaften von organischen und konventionellen Golden Delicious (GD) und Royal Gala (RG) Äpfeln

Eigenschaft / Parameter	Golden delicious cv.		Royal Gala cv.	
	Bio (ORG)	Konventionell (CONV)	Bio (ORG)	Konventionell (CONV)
Lösliche Feststoffe ($^{\circ}\text{Brix}$)	13.0 \pm 0.2	13.1 \pm 0.1	11.3 \pm 0.1	13.0 \pm 0.2
Feuchtigkeitsgehalt (%)	87.4 \pm 0.1	86.4 \pm 0.1	89.5 \pm 0.1	87.9 \pm 0.1
pH	3.79 \pm 0.03	3.41 \pm 0.01	3.67 \pm 0.03	3.89 \pm 0.04
Leichtigkeit (L*)	54.02 \pm 1.1	55.1 \pm 1.9	53.9 \pm 1.3	52.9 \pm 3.1
Farbtonwinkel (h $^{\circ}$)	85.9 \pm 1.6	87.9 \pm 1.8	88.6 \pm 2.3	85.2 \pm 1.2
Maximalkraft (N)	159.7 \pm 13.6	284.2 \pm 9.6	368.4 \pm 18.6	151.1 \pm 9.9
Gesamtpolyphenole (mg GAE g $^{-1}$ dm)	3.34 \pm 0.01	1.57 \pm 0.29	2.03 \pm 0.06	9. \pm 0.05

3.4.2. Auswirkung der Gefrierate auf die Qualität der Äpfel CONV und ORG

Die Ergebnisse wurden signifikant durch die anfänglichen Eigenschaften der frischen Früchte beeinflusst, und die Wirkung der unterschiedlichen Gefriereschwindigkeit, die durch das Einfrieren bei -18°C und -40°C erzielt wurde, war schwer zu verdeutlichen.

Insgesamt zeigten Äpfel, die bei -40°C gefroren wurden, beim Auftauen eine etwas geringere Wasserfreisetzung, ohne dass es zu Trends aufgrund von Anbaumethoden und Sorten kam. Hinsichtlich der Festigkeit wurde je nach Apfelsorte ein anderes Ergebnis erzielt (Abbildung 3.3). Im Falle des Golden delicious zeigten die bei -40°C gelagerten Proben einen etwas höheren Erweichungseffekt als die bei -18°C verarbeiteten, während bei der Royal Gala mit begrenzten Unterschieden zwischen ORG- und CONV-Produkten ein gegenteiliges Ergebnis beobachtet wurde. Das Schnellgefrieren, während es angewendet wird, um die Keimbildung bei kleinen Kristallen zu begünstigen und die Geschwindigkeit des Wachstums von Eiskristallen zu verringern, kann in einigen Fällen die strukturellen Eigenschaften beeinträchtigen, indem es Risse und die entsprechenden strukturellen Eigenschaften verursacht.

Was den Polyphenolgehalt nach 30 Tagen Lagerung der unterschiedlich verarbeiteten Äpfel betrifft, so ist die Rückhaltung (%), berechnet in Bezug auf den Wert des entsprechenden Frischprodukts) in Abbildung 3.4 dargestellt. In diesem Fall wurde ein positiver Effekt des Schnellgefrie-

rens beobachtet, aber die Entität war je nach Apfelsorte und Anbauart unterschiedlich (CONV vs. ORG). Im Falle der GD war der Effekt zwischen CONV und ORG gleich, während für Rg der positive und in diesem Fall signifikante ($p < 0,05$) Effekt nur für das CONV-Produkt nachgewiesen wurde. Unterschiede im Reifegrad und in den strukturellen Eigenschaften der beiden Apfelsorten, unabhängig von ihrer Anbauart, können die Wirkung der Gefriertrate sowie die Rückhaltung und den Schutz bei der Lagerung dieser sekundären Stoffwechselprodukte unterschiedlich stark beeinflussen.

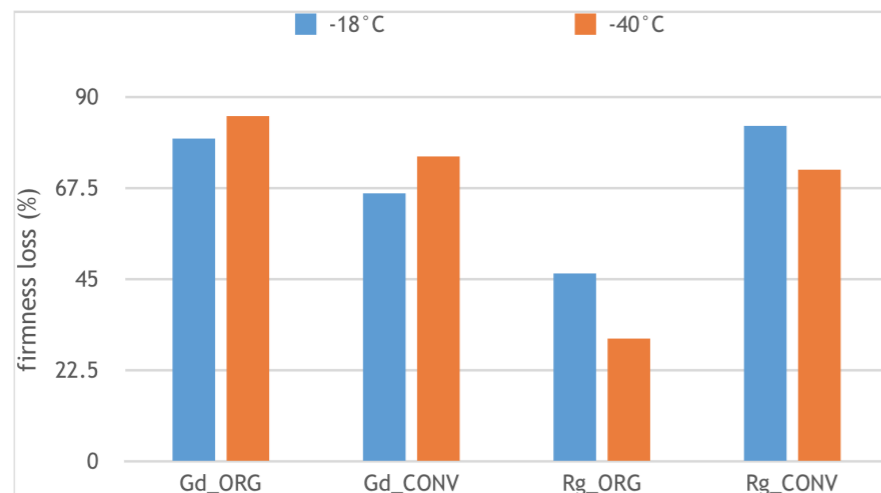


Abbildung 3.3: Verlust der Festigkeit (% bezogen auf den Wert des entsprechenden Frischprodukts) von Golden delicious (Gd) und Royal Gala (Rg) Apfelwürfeln, Bio (ORG) und konventionellen (CONV) Äpfeln, die nach dem Einfrieren nicht bei -18°C und -40°C eingetaucht und 30 Tage lang bei -18°C oder -40°C gelagert werden.

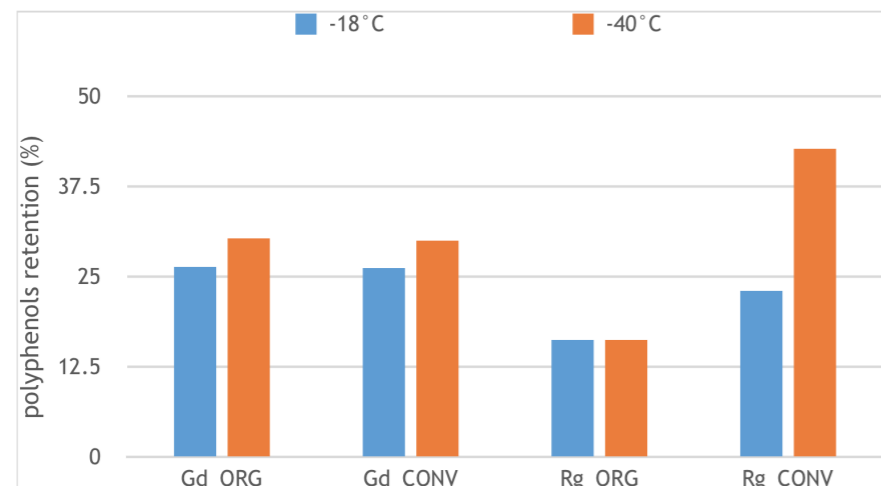


Abbildung 3.4: Aufbewahrung von Polyphenolen (% bezogen auf den Wert des entsprechenden Frischprodukts) aus Golden Delicious (Gd) und Royal Gala (Rg) Apfelwürfeln, Bio (ORG) und konventionellen (CONV) Äpfeln, die nach dem Gefrieren nicht bei -18°C und -40°C eingetaucht und 30 Tage lang bei -18°C oder -40°C gelagert werden.

Die Wirkung des Eintauchens in die Zitronensaftlösung in Kombination mit der unterschiedlichen Gefriergeschwindigkeit zeigte sich vor allem an der Farbe der unterschiedlich gefrorenen und gelagerten Apfelwürfel, indem die Bräunung leicht begrenzt wurde (L^* und Farbtonwinkel). Bei anderen Qualitäts-Prometern (Polyphenolgehalt, Festigkeit) wurden keine weiteren signifikanten Effekte beobachtet.

3.5. Zusammenfassung

3.5.1. Experiment 1

Diese Studie wurde an Äpfeln durchgeführt, die aus biologischem und konventionellem Anbau derselben Sorte mit gleichem Reifegrad stammen. Insgesamt zeigten sie zunächst nur begrenzte Unterschiede in den organischen Säuren und im Zuckergehalt, die mit einer unterschiedlichen Rate der Stoffwechselwege während der Reifung korreliert werden konnten. Der Gesamtpolyphenolgehalt von ORG war bei organischen Äpfeln höher, da die Pflanze auf biotische und abiotische Belastungen reagierte, während keine Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften der Früchte beobachtet wurden, abgesehen von der Porosität, die bei ORG-Äpfeln höher war. Die Verarbeitung betraf sowohl Bio- als auch konventionelle Äpfel, aber nach der Verarbeitung zeigten Bio-Äpfel einen höheren Polyphenolgehalt und eine höhere mechanische Festigkeit als konventionelle Äpfel.

Auf der anderen Seite zeigten konventionelle Äpfel aufgrund der Verarbeitung geringere Farbabweichungen, aber die Unterschiede der Farbtonwerte von CONV und ORG waren begrenzt und es wurden keine Unterschiede in der Helligkeit beobachtet.

Insgesamt ermöglicht dieser Teil der Studie, die technologische Eignung der ORG-Äpfel zu bestätigen, die eingefroren werden sollen, und das Einfrieren kann den Inhalt und die Qualitätseigenschaften der ersten frischen Früchte bewahren.

3.5.2. Experiment 2

Der Einfluss der Gefriertrate auf die Qualitätseigenschaften von Äpfeln wurde an zwei verschiedenen Apfelsorten (Golden delicious und Royal gala) ORG und CONV untersucht.

Die Ergebnisse zeigten, dass dieser Prozessparameter unter den in dieser Studie angewandten Versuchsbedingungen einige interessante Qualitätsmerkmale (z.B. Farbe, Festigkeit, Polyphenolgehalt) in einem Maße beeinflussen könnte, das stark von den ursprünglichen Qualitätsmerkmalen des frischen Produkts abhängt.

Reifegrad, Lagerzeit und Lagerbedingungen, unabhängig von den landwirtschaftlichen Verfahren (CONV vs. ORG), beeinflussen die technologische Leistungsfähigkeit und Eignung der Rohstoffe zum Gefrieren.

3.6. Referenzen

Andrews, P.K., Fellman, J.K., Glover, J.D., & Reganold, J.P. (2001). Soil and plant mineral nutrition and fruit quality under organic, conventional, and integrated apple production systems in Washington State, USA. *Acta Horticulture*, 564, 291-298.

Arlai, A., Nakkong, R., Samjamin, N., & Sitthipaisarnkun, B. (2012). The Effects of Heating on Physical and Chemical Constitutes of Organic and Conventional Okra. *Procedia Engineering*, 32, 38-44.

Asami, D.K., Hong Y., Barrett, D.M., & Mitchell, A.E. (2003). Comparison of the Total Phenolic and Ascorbic Acid Content of Freeze-Dried and Air-Dried Marionberry, Strawberry, and Corn Grown Using Conventional, Organic, and Sustainable Agricultural Practices. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 1237-1241

Brandt, K., Leifert, C., Sanderson, R., & Seal, C.J. (2011). Agroecosystem Management and Nutritional Quality of Plant Foods: The Case of Organic Fruits and Vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 30, 177-197.

Fito, P., & Chiralt, A. (2000). Vacuum impregnation of plant tissues. In S. M. Alzamora, M. S. Tapia, & A. Lopez-Malo (Eds.), *Minimally processed fruits and vegetables: Fundamental aspects and applications* (pp. 189-204). Gaithersburg: Aspen Publication.

Li D., Zhu Z., Da-Wen S. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. *Trends in Food Science & Technology* 75 (2018) 46–55

Lima, G.P.P., & Vianello, F., (2011). Review on the main differences between organic and conventional plant-based foods. *International Journal of Food Science & Technology*, 46, 1–13.

Mùjica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E., & Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering*, 57, 305-314.

Neri, L., Di Biase, L., Sacchetti, G., Di Mattia, C., Santarelli, V., Mastrocola, D., & Pittia, P. (2016). Use of vacuum impregnation for the production of high quality fresh-like apple products. *Journal of Food Engineering*, 179, 98-108.

Neri, L., Hernando, I., Pérez-Munuera, I., Sacchetti G., Mastrocola D., & Pittia, P. (2014). Mechanical properties and microstructure of frozen carrots during storage as affected by blanching in water and sugar solutions. *Food Chemistry*, 144, 65-73.

Perez-Cabrera, L., Chafer, M., Chiralt, A., & Gonzalez-Martinez, C. (2011). Effectiveness of antibrowning agents applied by vacuum impregnation on minimally processed pear. *LWT- Food Science and Technology*, 44, 2273-2280.

Piazza L., Giovenzana V. Instrumental acoustic-mechanical measures of crispness in apples. *Food Research International*, 69, 209-215, 2015.

Reganold, J.P., Glover J.D., Andrews, P.K., & Hinman H.R. (2001). Sustainability of three apple production system. *Nature*, 410, 926-930.

Reig, G., Larrigaudi ere, C. & Soria, Y. (2007). Effects of organic and conventional growth management on

apple fruit quality at harvest. *Acta Horticulturae*, 737, 61-65.

Roussos, P.A., & Gasparatos, D. (2009). Apple tree growth and overall fruit quality under organic and conventional orchard management. *Scientia Horticulturae*, 123, 247-252 Stracke et al., 2010;

Saei A., Tustin D.S., Zamani Z., Talaie A., Hall A.J. Cropping effects on the loss of apple fruit firmness during storage: The relationship between texture retention and fruit dry matter concentration. *Scientia Horticulturae* 130 (2011) 256–265.

Salvatori, D., Andres, A., Chiralt, A., & Fito, P. (1998). The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering*, 21, 59-73.

Silva C.L.M., Goncalves E.M., Brandao T.R.S. Freezing of Fruits and Vegetables. Ch 8, In *Frozen food science and technology* (Evans J.A. ed.) 2008 Blackwell Publishing Ltd, pp. 165-183.

Stracke, B.A., Rufer, C.E., Bub, A., Seifert, S., Weibel, F.P., Kunz, C., & Watzl, B. (2010). No effect of the farming system (organic/conventional) on the bioavailability of apple (*Malus domestica* Bork., cultivar Golden Delicious) polyphenols in healthy men: a comparative study. *European Journal of Nutrition*, 49, 301-310.

Van Duyn, M.A.; Pivonka, E. Overview of the health benefits of fruit and vegetable consumption for the dietetics professional: Selected literature. *J. Am. Diet. Assoc.* 2000, 100, 1511–1521.

Weibel, F.P., Bickel, R., Leuthold, S., & Alfoldi, T. (2000). Are Organically Grown Apples Tastier and Healthier? A Comparative Field Study Using Conventional and Alternative Methods to Measure Fruit Quality. *Acta Horticulturae*, 517, 417-426.

II IV EMPFEHLUNGEN ZUM KÜHLEN UND GEFRIEREN

Universität Kassel, Department for Agrar- and Biosystemtechnik, Deutschland
Sturm, B.

4. Hauptgründe für die Anwendung niedriger Temperaturen auf Lebensmittel

Die Kühlung verringert gleichzeitig die Aktivität von Mikroorganismen und die Rate der chemischen Reaktionen innerhalb eines Produkts. Dadurch kann die Haltbarkeit und die damit verbundene Lebensmittelsicherheit deutlich erhöht werden. Es ist jedoch wichtig zu verstehen, dass chemische Reaktionen nicht vollständig gehemmt werden, d.h. auch im gefrorenen Zustand treten weitere Veränderungen in der Produktzusammensetzung auf.

Der Einfluss von Kühlen und Gefrieren auf die Verlängerung der Haltbarkeit und die daraus resultierende Produktqualität hängt stark von der Lagertemperatur (bei Kühlung) und der Gefriereschwindigkeit Lagertemperatur und den Auftaubedingungen beim Gefrieren ab.

Darüber hinaus sind kalte Temperaturen für die Herstellung bestimmter Produkte wie z.B. Speiseeis notwendig.

- Erhöhte Stabilität während der Lagerung (temperaturabhängig)
 - Kühlen
 - Kurzzeitlagerung von z.B. Obst, Gemüse, Milch, Fleisch, Getränke, etc.
 - Kombination mit kontrollierter Atmosphäre möglich Apfel- oder Kartoffellagerung über mehrere Monate hinweg
 - Gefrieren
 - Langzeit Lagerung
 - Wichtigste Niedertemperaturbehandlung, da während der Lagerung nur sehr geringe Qualitätsverluste auftreten.
- Vorteilhafte Temperaturen für die Herstellung von Lebensmitteln
 - Kühlen
 - Milch-, Getränke-, Fett- und Fleischindustrie, Backwarenindustrie
 - Gefrieren
 - Haltbarmachung durch Tiefgefrieren oder Gefriertrocknung
 - Handgemachte Eiscreme

4.1. Gefrieren

Wasser ist der Hauptbestandteil von Lebensmitteln. Es wirkt als Lösungsmedium und enthält Salz, Polyaccharide und andere lösliche Substanzen (z.B. Proteine, Kohlenhydrate). Daher ist zu beachten, dass:

- Das Gefrierverhalten sich vom vorhandenen Wasser ableitet
- Das Gefrierverhalten vom Produkt abhängt
 - Der Zusammensetzung
 - Der Stückgröße
 - Der Gefriermethode und -geschwindigkeit (Technologie und Einstellungen)

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die anfänglichen Wassergehalte für mehrere tierische und pflanzliche Produkte:

Tabelle 4.1: Wassergehalt von pflanzlichen und tierischen Produkten (angepasst an BerkelyWellness, 2001 und FAO, 2018)

Product	Water content (%)
Lettuce	95
Tomatoes	94
Water melon	92
Mushroom	91
Strawberries	89
Broccoli	89
Peaches	89
Apples	86
Bananas	75
Eggs	75
Beef	75
Pork	75
Chicken	75

4.1.1. Gefriergeschwindigkeit

Im Allgemeinen lassen sich zwei Arten von Gefriermechanismen unterscheiden: langsames und schnelles Einfrieren. Im Folgenden wird ein direkter Vergleich der Auswirkungen dieser beiden Methoden auf die Produktqualität gegeben. Abbildung 4.2 zeigt einen Vergleich des Kristallwachstums beim langsamen und schnellen Einfrieren und zeigt die sehr schädliche Wirkung des langsamen Einfrierens im Vergleich zum schnellen Einfrieren.

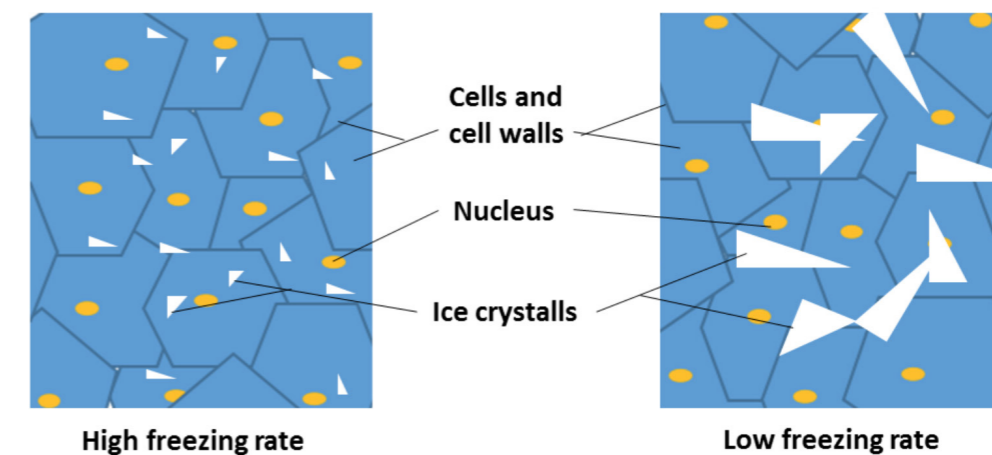


Abbildung 4.2: Kristallwachstum in Abhängigkeit von der Gefriereschwindigkeit

4.1.1.1. Langsames Gefrieren

- Geringer Temperaturunterschied zwischen Lebensmittel und Gefrierschrank
 - Geringe Anzahl an Eiskristallen
 - Langsames Wachstum zu großen Kristallen möglich
- Während des Gefrierens
 - Hoher Gewichtsverlust (bis 7%), besonders im kritischen Bereich (-0,5°C bis -5/-7°C)
 - Hohe Konzentration von Substanzen in der Restflüssigkeit führt zu hoher Enzymaktivität

Schnelle Abbaureaktionsrate!
- Nach dem Auftauen
 - Deutlicher Flüssigkeitsverlust und Texturveränderung durch Zellkollaps

4.1.1.2. Schnelles Gefrieren

- Großer Temperaturgradient zwischen Lebensmittel und Gefrierschrank
 - Bildung einer großen Anzahl von Eiskristallen
 - Schnelles Wachstum zu vielen kleinen Kristallen
 - Der kritische Temperaturbereich der Kristallisation wird schnell überschritten.
 - Geringe oder keine Zerstörung von Gewebe- oder Zellstrukturen
- Während des Gefrierens
 - Geringe Gewichtsverluste (1%)
- Nach dem Auftauen
 - Gringere Verluste an Flüssigkeit oder Texturveränderungen durch weniger zellkollapse

4.2. Qualitätsrelevante Aspekte beim Einfrieren

Wie bereits erwähnt, reduziert das Einfrieren die Geschwindigkeit der chemischen Veränderungen und reduziert und/oder hemmt die Aktivität von Mikroorganismen. Die meisten Mikroorganismen ruhen jedoch erst im gefrorenen Zustand und sind nach dem Auftauen wieder aktiv.

4.2.1. Mikroorganismen

- Wasser ist für die Aktivität und das Wachstum von Mikroorganismen unerlässlich.
 - Aber: Kryophile Mikroorganismen können sich von Tiefkühlprodukten ernähren!
- Wachstumsstopp von Mikroorganismen
 - 7° C für Bakterien (90% des Wassers sind gefroren)
 - 10 bis -15° C für Hefen und Schimmelpilze
- Die Gesamtzahl der Mikroorganismen wird durch das Einfrieren reduziert.
 - Absenken der Temperatur
 - Bildung von Eiskristallen

- Verringerung des Feuchtigkeitsgleichgewichts: $a_w = f(T)$

- Die Schädigung von Mikroorganismen hängt ab von:

- Art des Mikroorganismus
- Art der Nahrung
- Gefrierprozess
- Überlebensrate 50 - 90%.
- Nach dem Auftauen werden in der Regel die Reproduktion und Verstoffwechslung fortgesetzt.

4.2.2. Enzymaktivität

Enzyme sind relativ unempfindlich gegen Frost, aber sehr empfindlich gegen Hitze. Daher wird in gefrorenen Produkten die Enzymaktivität nur reduziert, nicht vollständig gestoppt. Dies kann zu folgendem führen:

- Enzymatische Reaktionen möglich
 - Kontakt mit Sauerstoff
 - Konzentrierte Restflüssigkeit beim Gefrieren
- Diese Reaktionen können dazu führen, dass
 - Bräunung (Pfersiche)
 - Abbau von Ascorbinsäure
 - Geschmacksveränderungen
 - Abbau von Fetten
- Gegenmaßnahmen
 - Blanchieren
 - Sehr tiefgefroren, um die Enzymaktivität zu minimieren.
 - Dichte Verpackung (undurchlässig für Sauerstoff, Luft)

Die praktische Haltbarkeit (Practical storage life, PSL) hängt von der Art der jeweiligen Lebensmittel ab. Eine Übersicht über ausgewählte Lebensmittel (in Monaten für verschiedene Lagertemperaturen) ist in Tabelle 4.2 dargestellt:

Tabelle 4.2: PSL für verschiedene Produkte und Temperaturen in Monaten (modifiziert von WFLO, 2008)

Produkt	Temp.		
	-10°C	-15°C	-20°C
Mageres Fleisch	5-21	10-37	13-49
Fettes Fleisch	6-17	10-27	13-40
Magerer Fisch	2-6	4-12	6-20
Obst & Beeren	3-17	17-70	over 70
Gemüse	3-10	8-20	21-70

4.3. Gefrierbrand

Die Verbrennung von Gefriertruhen ist ein Problem der Lebensmittelqualität, kein Problem der Lebensmittelsicherheit. Es erscheint als graubraune lederartige Flecken auf Tiefkühlkost. Sie entsteht, wenn Luft die Oberfläche des Lebensmittels erreicht und das Produkt austrocknet. Dies kann passieren, wenn Lebensmittel nicht sicher in luftdichte Verpackungen verpackt sind. Dies kann auch geschehen, wenn die Luft nicht aus der Verpackung entfernt wird und/oder die tatsächliche Temperatur im Gefrierschrank stark schwankt. Potentielle Konsequenzen:

- Agglomeration von Strukturelementen und Interaktion von Makromolekülen
- Denaturierung von Muskelproteinen
- Kristallisation von Polysacchariden
- Irreversible Austrocknung des Produktes, keine vollständige Rekonstitution möglich.

Um die Erhaltung der Qualität zu gewährleisten, müssen daher die folgenden Maßnahmen ergriffen werden:

- Verwenden Sie luftdichtes Verpackungsmaterial.
- Entfernen Sie die gesamte Restluft aus dem Paket, bevor Sie es einfrieren.
- Stellen Sie sicher, dass die Temperatur im Gefrierschrank nicht von der eingestellten Temperatur von mehr als $\pm 2^{\circ}\text{C}$ abweicht, um Verdampfung und Kondensation von Wasser aus dem Produkt zu vermeiden.

4.4. Auftauen

Wie im vorherigen Kapitel dargestellt, ist es von großer Bedeutung, ein schnelles Einfrieren zu gewährleisten, um eine maximale Erhaltung der Produktqualität zu erreichen. Beim Auftauen hängt der Ansatz direkt von der weiteren Verwendung der Produkte ab. Generell kann gesagt werden, dass die Zeit zwischen dem Auftauen und dem Verbrauch minimal sein sollte. Folgende Aspekte sind zu berücksichtigen

- Einfluss des langsamen Gefrierens auf den Abbau während und nach dem Auftauen
 - Aufgrund von Zellrupturen, Enzymaktivität im gesamten Produkt
 - Erhöhte Degradationsrate
 - Blanchieren vor dem Einfrieren inaktiviert Enzyme.
 - Der Abbau wird reduziert.

Der Einfluss von Gefrieren und Auftauen ist schwer zu trennen.

4.4.1. Schnelles Auftauen

Das schnelle Auftauen ist für Produkte geeignet, die für den sofortigen Gebrauch bestimmt sind und bei denen die kleinen Abmessungen so klein sind, dass die Mitte des Produkts die Solltemperatur schnell genug erreicht:

- Gemüse
 - Beginnen Sie mit dem Kochen im gefrorenen Zustand
- Kleine Portionen von Fleisch, Fisch, Geflügel, die direkt in der Pfanne gebraten werden.
 - Dicke Stücke: Der Kern ist noch gefroren, während die Oberfläche bereits überkocht ist.

4.5. Tierische Produkte

Bei Fleisch und Fisch müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden, um eine optimale Qualitätserhaltung nach dem Auftauen zu gewährleisten, wie im Folgenden beschrieben.

4.5.1. Fleisch

- Schnelles Auftauen nach dem Einfrieren von Rindfleisch vor der Rigor Mortis führt zu einer „Taurigor“.
 - Zähes Fleisch wegen extremer Kontraktionen
 - Unzureichende Wasserbindungseigenschaften
 - Hohe Tropfsaftverluste (30 – 40%)
- Langsames Auftauen bei 0 - 5° C reduziert den Tropfverlust deutlich.
 - Schnelle Glykolyse
- Empfindlichkeit in Bezug auf Tropfverlust
 - Rindfleisch ist sehr empfindlich
 - Kalb und Lamm deutlich weniger empfindlich
 - Schweinefleisch ist weniger anfällig

4.5.2. Fisch

- Schnelles Einfrieren ganzer Fische vor dem Rigor Mortis
 - Reduziertes „gaping“
- Erfordert langsames auftauen
 - Genug Zeit, einen Rigor Mortis zu entwickeln
- andernfalls
 - starkes Schrumpfen
 - Tropfsaftverluste

- „gaping“

- Stark von der jeweiligen Fischart abhängig

4.6. Gefriertechnologien

Gefriertechnologien können in der Regel nach der Betriebsart und der Art der Wärmeübertragung klassifiziert werden. Die Wahl der geeigneten Technologie ist von großer Bedeutung, um sowohl eine hohe Qualitätserhaltung als auch die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu gewährleisten:

- Funktionsweise
 - Batch Prozess
 - Kontinuierlicher Prozess
- Kälteübertragung
 - Konvektion (e.g. Kalte Luft)
 - Konduktion (Kontakt)
 - Bedampfung (e.g. flüssiger Stickstoff, L-N₂, LIN)
- Anwendung hängt ab von
 - Produkttyp: fest, flüssig, halbfest, Paste
 - Größenordnung (geometrisch)
 - Erforderliche Gefrierate

4.6.1. Konduktion

- Geringe Temperaturdifferenz zwischen Luftstrom und Produkt
- Technologie und Prozess
 - Diskontinuierlich (Batch)
 - Plattenfroster (älteste Konstruktion); Hydraulikdruck
 - Guter Kontakt zwischen Platte und Produkt erforderlich
 - Nur für Produkte mit ebener Oberfläche geeignet
 - Kontinuierlich
 - Rollengefrierschrank
 - Fließband, von unterhalb gekühlt

4.6.2. Konvektion

- Hohe Temperaturdifferenz zwischen Kaltluftstrom und Produkt

(geringer Wärmeübertragungskoeffizient)

- Technologie und Betrieb
 - Diskontinuierlich (Batch)
 - Gefriertrockner, Gefrierschränke mit Top-Opening, Haustür, Räume
 - Kontinuierlich
 - Gefriertunnel, Produkt auf Trays oder Bändern bewegt
 - Wirbelschichtfroster
 - Frei fließende Produkte im Kaltluftstrom
 - E.g. Erbsen, Mais, Bohnen, kleine feste Produkte

4.6.3. Frosten in verdampfenden Flüssigkeiten

- Sehr großer Wärmedurchgangskoeffizient
 - Große Volumen, schneller Prozess
 - Meißt Flüssigstickstoff
 - TB at 1 bar: -196° C
 - Trockeneis (festes CO₂)
 - T_{subl.} : -78 °C
 - Ausstattung
 - Geringe Investitionen, hohe Betriebskosten
- N₂ or CO₂ = Störfälle (incidentals)

4.7. Zusammenfassung

Die Qualitätserhaltung bei Tiefkühlware hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren innerhalb der verschiedenen Prozessschritte ab. Bei einigen Produkten wie Erbsen oder Bohnen ist es notwendig, die enzymatische Aktivität nach dem Auftauen durch Blanchieren vor dem Auftauen zu hemmen.

Der Gefrierschritt, unabhängig vom Produkt, muss so schnell wie möglich durchgeführt werden, um das Wachstum großer Eispartikel zu verhindern, die die Zellstruktur zerstören. Andernfalls kommt es zu Zellrupturen, erhöhten Abbaureaktionen und erhöhten Tropfverlusten nach dem Auftauen.

Vermeiden Sie eine Überlastung der Gefriereinheit:

- Überlastung führt zu einer verminderten Gefriereschwindigkeit (langsames Einfrieren)
- Wenn die Ware bereits im Gefrierschrank vorhanden ist
 - Die Gefriertemperatur steigt vorübergehend an (bis die Frischware die Solltemperatur erreicht), was sich negativ auf die bereits gelagerten Produkte auswirkt.

Die Verpackung muss luftdicht sein und die gesamte Luft muss vor dem Einfrieren aus der Verpackung entfernt werden, um Gefrierbrand zu vermeiden. Die Temperaturschwankungen der Gefrierereinheit müssen so gering wie möglich gehalten werden, um Verdampfung und damit Kondensation von Wasser auf der Partikeloberfläche zu vermeiden.

Die angewandte Auftaustrategie hängt direkt von der Art des Produktes, dem Verwendungszweck nach dem Auftauen und der Partikelgröße ab.

Nützliche Links:

<https://www.gcca.org/>

<http://www.fao.org/docrep/008/y5979e/y5979e00.htm#Contents>

4.8. Referenzen

Berkely Wellness, University of California (2001): How much water is in your food? <http://www.berkeleywellness.com/healthy-eating/food/article/how-much-water-your-food>.

FAO, 2018. Composition of Meat. http://www.fao.org/ag/againfo/themes/en/meat/backgr_composition.html

WFLO, 2008. Frozen foods handling and Storage. WFLO Commodity Storage Manual. <http://www.cold.org.gr/library/downloads/Docs/FrozenFoodsHandling.pdf>