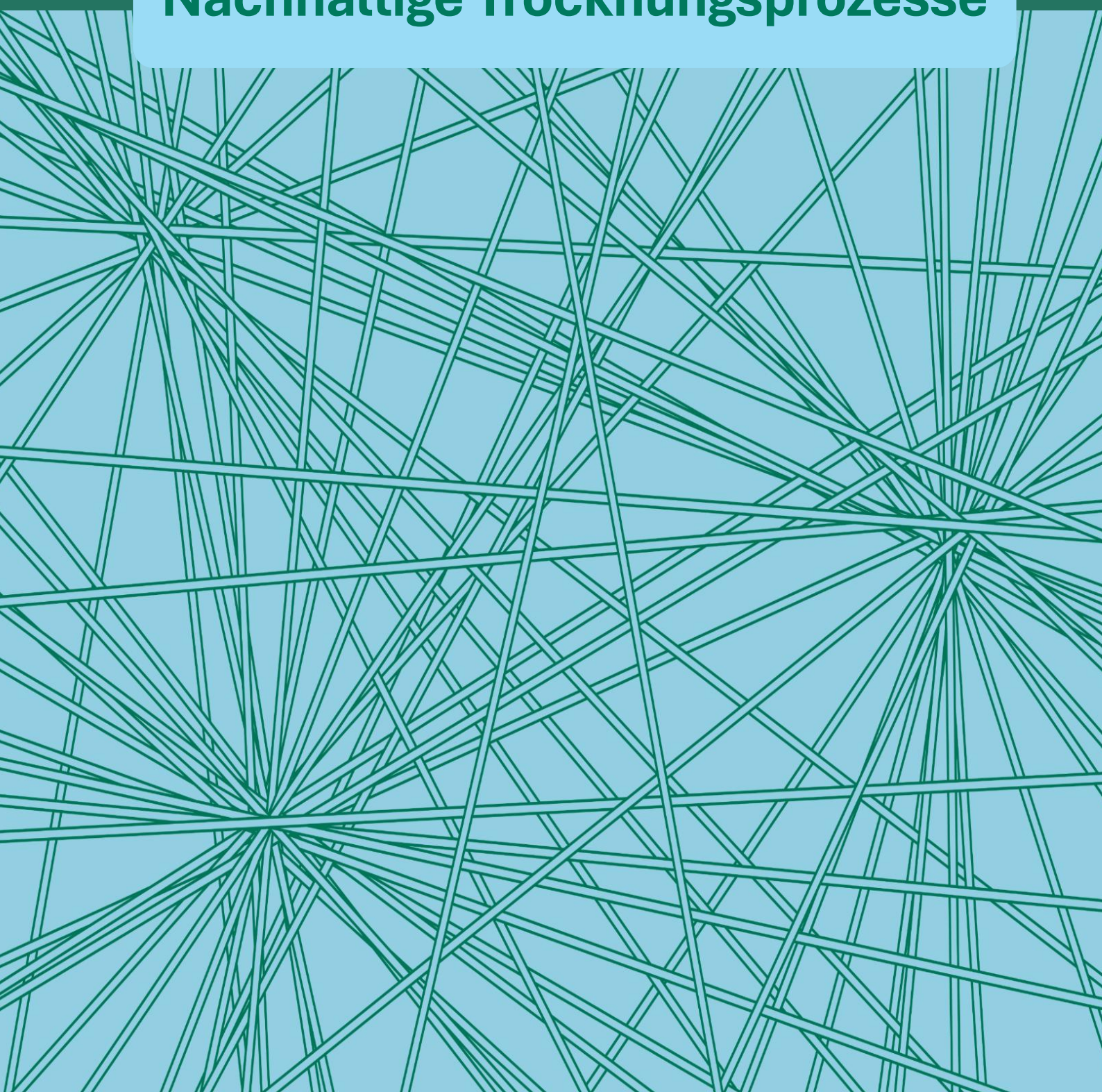




White Paper

Nachhaltige Trocknungsprozesse



Einleitung

Zusammenfassung

Für Unternehmen in der Lebensmittelverarbeitung bietet die Trocknung ein großes Potenzial zur **Energie- und Kosteneinsparung sowie Qualitätserhöhung**. Die Hauptentfernung von Wasser bleibt meist durch bewährte Verfahren wie Kontakt- oder Konvektionstrocknung bestehen, doch lohnt sich Investitionen in **vorgelagerte Schritte**. Vorbehandlungen wie die Vorkonzentration oder Maßnahmen zur Verringerung der Wasserbindung im Produkt können den Energiebedarf deutlich senken und die ernährungsphysiologischen Eigenschaften des Endproduktes verbessern. Wer den Trocknungsprozess ganzheitlich betrachtet und optimiert, steigert nicht nur die Effizienz, sondern leistet auch einen Beitrag zur Umweltverträglichkeit, ausgewogener Ernährung und langfristigen Wettbewerbsfähigkeit.

Ziele dieses White Papers

- Die Lesenden verschaffen sich einen umfassenden **Überblick**, mit welchen Methoden die Nachhaltigkeit während Trocknungsprozessen verbessert werden kann. Die Methoden sind umsetzbar in der Schweiz oder Umgebung.
- Die hier vorgestellten Ansätze fokussieren sich darauf, wie die thermische Belastung von Lebensmitteln über den Trocknungsprozess hinweg reduziert werden kann und unterstützen die Lesenden bei der **Entscheidungsfindung**, ob und welche Verarbeitungsschritte sinnvoll sein können. Erste Abschätzungen hinsichtlich **Skalierung und Wirtschaftlichkeit** können erfolgen.
- Das White Paper erläutert die wichtigsten Grundlagen und Konzepte der Trocknung. Diese unterstützen die Lesenden dabei, **spezifischere Prompts für KI Anfragen** zu erstellen, eigene **Fragestellungen klarer einzugrenzen** und **Lösungen herzuleiten**.

Systemgrenzen

In diesem White Paper wird nicht näher auf die Möglichkeiten eingegangen von unterschiedlichen Energiequellen. Ausgenommen ist auch die Trocknung von Lebensmitteln über Sonnenenergie, da diese in der Schweiz wenig relevant ist. Das White Paper thematisiert die thermischen Trocknungsmethoden auf der Ebene der Energieübertragung und vergleicht diese bezüglich Nachhaltigkeit, geht jedoch nicht auf einzelne Technologien ein, in welchen sich diese Methoden innerhalb unterscheiden (bspw. Bandtrocknung versus Batchtrocknung). Das White Paper kann keine absoluten Zahlen vorweisen (bspw. zum Energieverbrauch von Methoden), da jeder Trocknungsprozess sehr einzigartig ist und stark abhängig vom Ausgangsprodukt, dem gewünschten Produkt und den Trocknungsparametern.

Impressum

Veröffentlichungsdatum: 20.10.2025

Veröffentlichungsort: www.zhaw.ch/cirvalis

Autorenschaft: ZHAW, Institut für Lebensmittel- und Getränkeinnovation, Forschungsgruppe Lebensmitteltechnologie, Projektteam Cirvalis

Kontakt: knowledge-hub@zhaw.ch

Finanzierung: Wir danken der Seedling Foundation für die Finanzierung des Projektes Cirvalis.

Disclaimer: Alle Inhalte wurden mit grösstmöglicher Sorgfalt erstellt. Texte, Abbildungen und Daten unterliegen dem Urheberrecht. Die Verwendung oder Vervielfältigung ist nur mit Quellenangabe gestattet. Wo nicht anders genannt, steht dieses Werk unter der Lizenz [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/), [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	2
1. Grundlagen der Trocknung.....	4
1.1. Bedeutung der Trocknung in der Lebensmittelverarbeitung	4
1.2. Komplexität der Trocknung – Masse- und Energieübertragung	4
1.3. Trocknungsgeschwindigkeiten sind nicht linear	5
1.4. Relevante Definitionen und Konzepte im Bereich Trocknung	5
2. Thermische Trocknungsmethoden im Überblick	7
2.1. Definition Nachhaltige Trocknungsprozesse	9
3. Reduktion Energieverbrauch – Lösungsansätze.....	10
3.1. Vorkonzentration mittels nicht-thermischer Verfahren.....	11
3.2. Tools und Entscheidungshilfen für Vorkonzentrationsmethoden.....	11
3.3. Vorbehandlung zur Erhöhung des Gehalts an freiem Wasser	14
3.4. Tools und Entscheidungshilfen für Vorbehandlungsmethoden	14
3.5. Elektrotechnische Erwärmungsverfahren.....	17
3.6. Tools und Entscheidungshilfen für Vorbehandlungsmethoden	17
4. Verbesserte Qualität	19
4.1. Erhöhte Sicherheit und Haltbarkeit.....	19
4.2. Typische Qualitätsveränderungen	19
4.3. Technologische Herausforderung: Klebrige Produkte	19
4.4. Qualitätssteigerung durch angepasste Trocknung	21
5. Zusätzliche Wertschöpfung und Vermeidung von Foodwaste	22
5.1. Trocknung von Nebenströmen für eine vereinfachte Weiterverwendung	22
5.2. Design von neuen Trocknungsprozessen und Auswahl der geeigneten Methoden	22
5.3. Tools und Entscheidungshilfen für das Design von neuen Prozessen	23
6. Fazit und Empfehlungen.....	25
6.1. Prioritäten in Kürze	25
6.2. Empfehlungen nach Zielgruppe.....	25
7. Literaturverzeichnis	26

1. Grundlagen der Trocknung

1.1. Bedeutung der Trocknung in der Lebensmittelverarbeitung

Getrocknete Zutaten und Produkte sind in der Lebensmittelherstellung sehr beliebt – Beispiele sind Milchpulver, Trockenei oder Proteinisolate, aber auch Backmischungen, Trockenhefe oder Babynahrung. Dem Lebensmittel wird Feuchtigkeit entzogen, welche somit nicht mehr für chemische und mikrobiologische Reaktionen zur Verfügung steht. Die relevante Grösse bei der Trocknung ist dabei nicht die Feuchtigkeit bzw. der Wassergehalt, sondern der **aw Wert** (Wasseraktivität) des Produktes – der Gehalt an frei verfügbarem Wasser [1, 2]. Die Wasseraktivität beschreibt die Reaktionsfähigkeit des Lebensmittels, welche somit als Grösse gilt, um den Verderb abzuschätzen.

Die Trocknung von Lebensmittel hat zwei entscheidende Vorteile:

1. **Verlängerte Haltbarkeit:** Verhinderung Wachstum von Mikroorganismen und enzymatischen Reaktionen (hohe Lebensmittelsicherheit und lange Haltbarkeit)
2. **Vereinfachte Lagerung:** Reduziertes Volumen (ausser bei Gefriertrocknung) und Lagerung möglich bei Raumtemperatur (vereinfachter Transport und unkomplizierte Lagerung)

1.2. Komplexität der Trocknung – Masse- und Energieübertragung

Im Unterschied zu anderen Verfahren - wie beispielsweise der klassischen Pasteurisierung - wird bei der Trocknung vorhandenes Wasser nicht nur erwärmt, sondern muss zusätzlich verdampft werden. Rein thermodynamisch gesehen benötigt der Verdampfungsschritt den siebenfachen Energiebedarf der Erhitzung, wie das folgende Beispiel illustriert:

Energiebedarf für Trocknung:

Erhitzung von 1kg Wasser von 25°C auf 100°C: 315 kJ Phasenübergang bei 100°C von flüssig zu gasförmig: 2260 kJ. Total: 2576 kJ/kg oder auch 0.715 kWh

Beim Trocknen wandert das freie Wasser aus dem Inneren eines Lebensmittels an seine Oberfläche, wo es schließlich verdunstet [3]. Der entstehende Dampf wird von der Umgebungsluft aufgenommen und abtransportiert.

Physikalisch gesehen bewegt man für diesen Prozess gleichzeitig eine **Masse** (das Wasser) sowie **Hitze** (Energie), wobei die Hitze von einem externen Heizmedium (Luft/Kontaktfläche) ins Lebensmittel gelangt und die Masse über ein externes Trocknungsmedium (Luft) abgeführt wird [4].

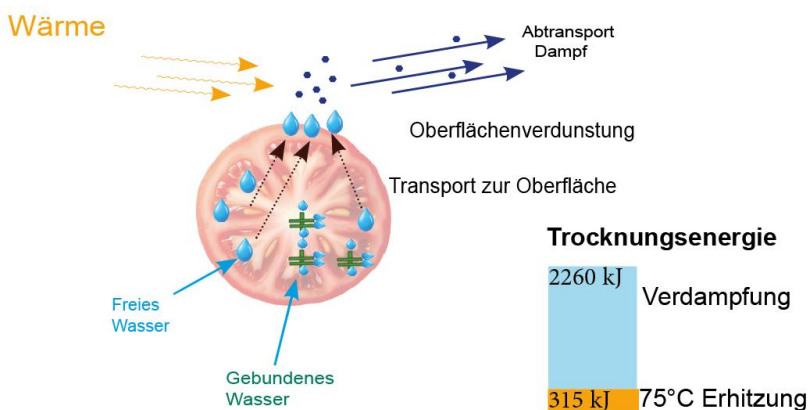


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Trocknung von Lebensmitteln

1.3. Trocknungsgeschwindigkeiten sind nicht linear

In Lebensmitteln liegt Wasser in unterschiedlichen Formen vor. Am einfachsten und schnellsten ist eine Trocknung, wenn sich das Wasser auf der Oberfläche des Lebensmittels befindet. Diese sogenannte **Haftflüssigkeit** kann leicht entfernt werden, da sie gut verfügbar vorliegt. In dieser Phase ist die Geschwindigkeit der Trocknung konstant und entspricht einer Oberflächentrocknung [5].

Nun spielt der **Gesamtgehalt an frei verfügbarem Wasser** und dessen Transport zur Oberfläche des Lebensmittels ebenfalls eine Rolle. Sobald die Haftflüssigkeit verdunstet ist, hängt die Trocknungsgeschwindigkeit mehrheitlich von der Diffusionsgeschwindigkeit und der Verdunstung von Quellwasser ab. In dieser Phase sind die Stoff- und Wärmetransportwiderstände höher, dadurch wird mehr Energie und Zeit benötigt, um die Lebensmittel weiter zu trocknen und die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt ab [5].

1.4. Relevante Definitionen und Konzepte im Bereich Trocknung

Trocknung Lebensmittel: Frische Lebensmittel werden während einer Trocknung von einem a_w Wert von 0.8 -1.0 auf idealerweise 0.25-0.4 gesenkt, was je nach Produkt einer Restfeuchte von zB 12-14% (Getreidekörner) oder < 5% (Milchpulver) entsprechen kann [4]. Durch die Trocknung entsteht ein Produkt, das fest ist und in verschiedenen Partikelgrößen vorliegt - von groben Stücken bis zu feinen Pulvern.

Prinzip der Trocknung: Beim Trocknen wandert das Wasser aus dem Inneren eines Lebensmittels an seine Oberfläche, wo es schließlich verdunstet [3]. Der entstehende Dampf wird von der Umgebungsluft aufgenommen und abtransportiert. Physikalisch gesehen bewegt man für diesen Prozess gleichzeitig eine Masse (das Wasser) sowie Hitze (Energie), wobei die Hitze von einem externen Hitzemedium (häufig Luft) ins Lebensmittel gelangt [4].

Wasseraktivität a_w : Die Wasseraktivität a_w beschreibt die Verfügbarkeit von freiem Wasser für chemische Reaktionen und physikalische Effekte [6, 7]. Um den Verderb durch Mikroorganismen und enzymatische Reaktionen zu kontrollieren, genügt es, die entsprechenden a_w Werte zu unterschreiten. Für die Minimierung von Lipidoxidationen und nichtenzymatische Bräunung besteht ein Optimumbereich (siehe Darstellung unten). Der stabile Bereich für Lebensmittel bezüglich Sicherheit und Qualität bewegt sich bei trockenen Lebensmitteln zwischen 0.25-0.4:

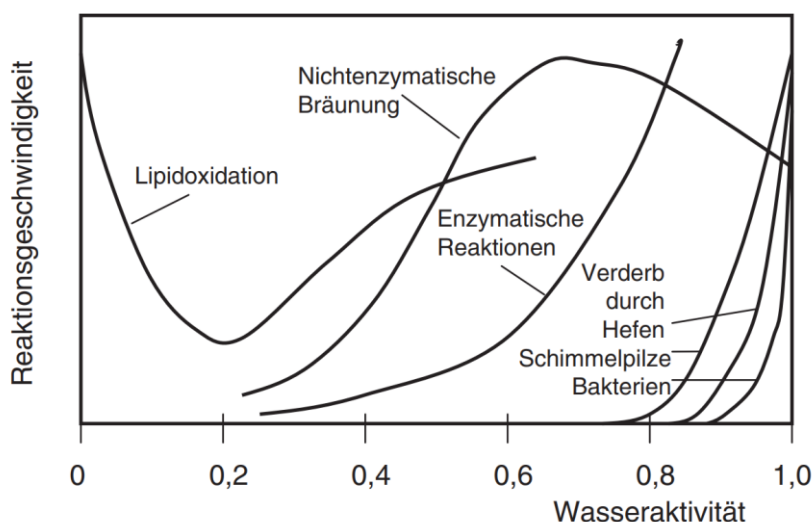


Abbildung 2: Qualitätsveränderungen von Lebensmitteln abhängig von der Wasseraktivität

Spezifische Wärmekapazität: Benötigte Energie, um ein Material (zb Wasser) um 1°C bzw 1K zu erwärmen.

- Cp Wasser: 4.2 kJ/(kg*K)
- Cp Wasserdampf: 1.87 kJ/(kg*K)
- Cp Eis: 2.06 kJ/(kg*K)

Latente Wärme: Benötigte Energie, um den Phasenübergang eines Materials zu vollziehen, zB Wasser in Dampf umwandeln

- Wasser (Bei 100°C und 1 bar für): 2260 kJ/kg

Beispiel Energiebedarf Berechnungen:

- 1kg flüssiges Wasser von 25°C auf 100°C erhitzen, benötigt 4.2 kJ/(kg*K) * 75K * 1kg = 315 kJ
- 1kg Wasserdampf benötigt für die gleiche Erwärmung von 75K also 1.87 kJ/(kg*K) * 75K * 1kg = 159 kJ
- 1kg flüssiges Wasser bei 25°C zu verdampfen, benötigt 315kJ für die Erwärmung + 2260 kJ für den Phasenübergang der Verdampfung. Total also 2576 kJ.

Glasübergangstemperatur: Amorphe Feststoffe gehen von einem glasigen in einen gummiartigen, klebrigen Zustand über, wenn ihre Glasübergangstemperatur überschritten werden. Tiefe Glasübergangstemperaturen bestehen bei kleinen Molekülen wie Einfachzuckern und Säuren, weshalb Lebensmittel mit einem hohen Anteil dieser Bestandteile besonders schwierig zu trocknen sind (T_g Glucose 31°C, Fructose 5°C oder Zitronensäure 11°C) [8] [9, 10].

Im Gegensatz dazu haben gute Trägerstoffe eine Glasübergangstemperatur über 100°C und eignen sich somit, um die Klebrigkeit bei der Trocknung zu vermindern (T_g Molkenprotein 127°C, Maltodextrin DE 9-14 141°C, Lactose 101°C) [8]. Eine Herausforderung bei Lebensmitteln ist, dass sie aus unterschiedlichen Komponenten bestehen und die Vorhersage der Glasübergangstemperatur bei mehr als zwei Komponenten schwieriger wird. Für solche komplexen System eignet sich die Couchman-Karasz Gleichung [11]:

$$T_g = \frac{\sum_i^n W_i T_{gi} \Delta C_{pi}}{\sum_i^n W_i \Delta C_{pi}}$$

Wobei W_i der Massenanteil, T_{gi} die Glasübergangstemperatur und ΔC_{pi} die Änderung der Wärmekapazität beim Glasübergang der Komponente i darstellen. Die T_g und ΔC_p der einzelnen Komponenten werden üblicherweise mit DSC gemessen [8, 11]

Sticky Point Temperature: Sticky Point liegt über T_g (meist 10-20°C) und verändert sich mit dem vorhandenen Wasser (amorphes Material, instabil) . Wenn Feuchtigkeit von nur 5% zugegeben wird, sinkt die Sticky Point Temperatur bei Fruchtpulvern bereits um 30 °C und das Material (zb Schokolade) wird klebrig. .

$$T_g = \text{SUM} (W_i * T_{g_i} * C_{p_i}) / \text{Sum} (T_{g_i} * C_{p_i})$$

2. Thermische Trocknungsmethoden im Überblick

Um Lebensmittel industriell zu trocknen, sind verschiedene Technologien im Einsatz. Die häufigsten sind Walzentrocknung, Sprühtrocknung, Ofentrocknung, Bandtrocknung und die Gefriertrocknung [12]. Diese Technologien unterscheiden sich hinsichtlich:

- 1) **Art der Hitzeübertragung/Trocknungstechnologien:** die Lebensmittel werden entweder über Luftströmung (Konvektion) oder durch den Kontakt mit einer heissen Oberfläche (Konduktion/Kontakt) so lange erhitzt, bis das Wasser die Verdampfungstemperatur erreicht und in seine Gasphase übergeht. Im Spezialfall der Gefriertrocknung wird das Wasser direkt vom gefrorenen Zustand unter Vakuum verdampft (Sublimation) [5]. Nicht thermische Verfahren bieten weitere Möglichkeiten, um die Lebensmittel mittels elektromagnetischer Energie zu erhitzen [13].
- 2) **Kontinuität:** Die Technologien sind entweder Batch basiert oder kontinuierlich. Eine Ofentrocknung kann zum Beispiel als Batch in einem Hordentrockner erfolgen, oder kontinuierlich auf einer Band- oder Wirbelschichttrocknung

Welche Trocknungstechnologie am geeignetsten ist bezüglich Prozesseffizienz und Qualität des Endproduktes hängt massgeblich von den **Eigenschaften der Lebensmittel** ab: Festigkeit, Trockensubstanzanteil, Inhaltsstoffe, Temperatur-Feuchte-Profil und Schichtdicke/Stückgrösse [5]. Weiter gibt es erwünschte Eigenschaften für das Produkt, beispielsweise die Löslichkeit eines Pulvers, welche die Wahl der Trocknungsmethode beeinflusst.

Tabelle 1: Lebensmitteln und deren gängigen Trocknungsverfahren nach Schuchmann and Schuchmann 2005

Festigkeit	Produktstruktur	Lebensmittel	Typische Methoden
Fest	Intakte Zellverbände	Obst, Gemüse, Fleisch, Kaffeesatz, Apfeltreber	Ofentrocknung/Wirbelschichttrocknung, Gefriertrocknung
Viskos	Gelähnliche Struktur	Kartoffelpüree, Maissirup, Kaffee, Braumalz	Bandtrocknung (Ofentrocknung), Walzentrocknung
Flüssig	Lösungen oder Suspensionen	Milch, Saft	Sprühtrocknung, Gefriertrocknung

Nachfolgend findet sich eine Übersicht zu den fünf wichtigsten Trocknungstechnologien, welche derzeit relevant sind in der Lebensmittelindustrie. Um die verschiedenen Prozesse untereinander zu vergleichen, sowie mehr Informationen zum Energieverbrauch, Effekt auf Inhaltsstoffe oder Eignung für bestimmte Lebensmittelgruppen zu erhalten, sind im Dokument «Praxishilfen Nachhaltiger Lebensmittelprozesse» Informationen zu verschiedenen Eigenschaften aufgelistet.

Übersicht Thermische Trocknungstechnologien

	Lufttrocknung	Sprühtrocknung	Kontakttrocknung	Gefriertrocknung	Vakuumtrocknung
Kurzbeschreibung	Ein trockener Heissluftstrom wärmt das Produkt und transportiert die verdunstete Feuchtigkeit ab	Eine Flüssigkeit wird durch einen Zerstäuber in kleine Tropfen (um) zerstäubt und in einem Luftstrom getrocknet	Ein pastöses Produkt wird als dünner Film auf eine heisse Walze aufgetragen und getrocknet	Lebensmittel werden gefroren und das Wasser unter Vakuum durch Sublimation verdampft	Siedepunkt von Wasser wird über reduzierten Druck (Vakuum) erniedrigt. Dadurch verdampft das Wasser bei Temperaturen unter 100 Grad.
Vorteile	Einfache Handhabung und Technologie (insbesondere bei Ofentrocknung) geeignet für mechanisch empfindliche Produkte geringer Raumbedarf	Schonend Geeignet für grosse Volumen Erhaltung von Farbe und Sensorik Gute Löslichkeit	Caramelaroma (Bsp Milch) Energieeffizient (dank direkter Wärmeübertragung) Gute Rehydrierung Flexibel für versch. Lebensmittel von pastös bis flüssig Kocht Lebensmittel gleichzeitig Trocknung von klebrigen und schüttfähigen Lebensmitteln möglich *****	Sehr hohe Produktqualität (Erhaltung von hitzesensitiven Komponenten wie Farbe, Vitamine, Proteine) Geeignet für den Erhalt von förderlichen Mikroorganismen Erhalt von Form und Struktur Gute Rehydrierungseigenschaften	- schonend - kürzere Trocknungszeiten als ohne Vakuum
Nachteile	Lange Trocknungszeit Nicht uniforme Produktqualität	Verlust von latenter Hitze in der exhaust air Hitzerückgewinnung schwierig wegen feiner Partikelgrösse Oxidation von Fetten ungeeignet für hochviskose Produkte	Hohe Produkttemperatur Nicht geeignet für LM mit hohem Zucker- oder Salzanteil Mässiger Throughput Teilweise inhomogene Trocknung	häufig Batchverfahren Lange Prozessdauer Sehr teuer, nur geeignet für sehr hochwertige Produkte Verlust von Elastizität und Erhalt einer viskosen Struktur nach der Rehydrierung*	- tiefere Produktionsrate

Abbildung 3: Mehr Informationen zu technischen Eigenschaften und Einfluss auf Inhaltsstoffe der zu trocknenden Lebensmitteln zu den obigen Methoden sind zu finden im Zusatzdokument «Praxishilfen»

2.1. Definition Nachhaltige Trocknungsprozesse

Wer sich mit Trocknungsprozessen befasst, um diese nachhaltiger zu gestalten, hat verschiedene Möglichkeiten. Der heutige Stand der Technik bietet keine komplett neue Lösung, welche die oben beschriebenen thermischen Trocknungstechnologien ersetzt. Vielmehr liegen die Lösungsansätze in den Prozessschritten, welche der eigentlichen Trocknung vorgelagert sind. Eine gute Nachricht für all diejenigen, welche bestehende Anlagen besitzen.

Aus der Perspektive der Nachhaltigkeit hat die Trocknung von Lebensmitteln zwei Nachteile:

- Der hohe **Energieverbrauch**: Trocknungsprozesse sind für 20-25% des Energieverbrauchs in der Lebensmittelindustrie verantwortlich– und damit sehr relevante Treiber von Emissionen und Kosten [14]. Die grössten Verluste entstehen während der Hitzeübertragung und werden von auf 35-45% geschätzt [13].
- Die veränderte **Ernährungsqualität** (Verlust von Vitaminen, Veränderung Verdaulichkeit von Makronährstoffen)

Unter **nachhaltigen Trocknungsprozessen** verstehen wir Lösungen, welche zum Ziel haben, den Energieverbrauch zu reduzieren, Emissionen zu verringern, die Qualität zu verbessern (mit Fokus auf Ernährungseigenschaften oder Sicherheit) oder zusätzliche Wertschöpfung zu erzielen. In diesem White Paper gehen wir auf drei dieser insgesamt vier Lösungsansätze ein. Die Verringerung von Emissionen werden nicht besprochen, da sie in keinem direkten Zusammenhang mit den Lebensmitteln stehen. Es ist jedoch klar, dass dieser Lösungsansatz sehr wichtig und relevant ist in Bezug auf Emissionsverringern.



Abbildung 4: Strategien zur nachhaltigen Trocknung

3. Reduktion Energieverbrauch – Lösungsansätze

Es ist schwierig, die unterschiedlichen Prozesse und Verfahren untereinander zu vergleichen bezüglich Energieverbrauch. Zwar gibt es Möglichkeiten, über die Temperatur, Prozessdauer und die durchschnittliche Energieeffizienz einen Wert zu berechnen. Es gibt leider fast keine Literatur, wo das gleiche Lebensmittel auf unterschiedliche Art und Weise getrocknet und dabei der Energieverbrauch der verschiedenen Verfahren gemessen wurde. Es gibt aber auch die Möglichkeit, das Potential für Energieeinsparungen abzuschätzen über die physikalischen Prozessgrundlagen der Trocknung und zwar wie folgt in Tabelle 2: Potential für Energieeinsparungen in der Trocknung:

Tabelle 2: Potential für Energieeinsparungen in der Trocknung

Einflussfaktor	Abhängig von	Relevanz für Trocknung	Potential	Strategien
Gehalt an freiem Wasser	Ausgangsmaterial/ Lebensmittel	Initialgehalt an freiem Wasser oder benötigte Energie, um gebundenes Wasser frei verfügbar zu machen: aus Zellen (zB Früchte, Fleisch, Getreide) oder chemischen Strukturen (Faserstoffe, Proteine etc)	Hoch	Vorbehandlung, Vorkonzentrierung, mechanischer Zellaufschluss?
Wärmeübertragung	Eingesetzte Trocknungstechnologie	Verlust von Energie in Form von Abwärme während der Übertragung von Dampf/Kontaktmedium auf Lebensmittel	Hoch	Nicht thermische Energieübertragung z.B. durch Infrarotstrahlung
Phasenübergang	Umgebungsdruck	Latente Energie für den Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig. Benötigt sehr viel Energie, ist jedoch unumgänglich.	Mittel	Vakuum
Transport zur Oberfläche	Ausgangsmaterial / Lebensmittel	Mechanismen, um freies Wasser von der Produktmitte an die Oberfläche zu bewegen	Tief	Dünnere Schichtdicke Trocknungsgut, Porosität erhöhen

Relevante Lösungen setzen dort an, wo das Potential für die Energieeinsparungen hoch sind. Wie die obige Tabelle aufzeigt, bieten die Wärmeübertragung sowie der Gehalt an freiem Wasser das grösste Potential, um dem Trocknungsprozess hinsichtlich Energieverbrauch zu optimieren, zusätzlich ist die Verwendung von Vakuum interessant:

1. **Vorbehandlung und Vorkonzentrierung:** Durch geeignete Vorbehandlungen kann die Wasserbindung im Lebensmittel reduziert und der Gesamtwassergehalt vor dem eigentlichen Trocknungsschritt gesenkt werden.
2. **Nicht-thermische Energieübertragung:** Die Aufwärmphase kann durch Strahlung – beispielsweise solar oder elektromagnetisch – unterstützt werden, was eine effizientere Energieübertragung ermöglicht.
3. **Siedepunktsenkung:** Mittels Vakuum kann die Verdampfungstemperatur gesenkt werden, wodurch weniger Energie für die Wasserverdampfung benötigt wird.

3.1. Vorkonzentration mittels nicht-thermischer Verfahren

Bei der Vorkonzentrierung wird **frei verfügbares Wasser abgetrennt** über mechanische oder biochemische Prozesse und das Lebensmittel auf 30-50% Trockensubstanz konzentriert, bevor es in die Trocknungsanlage gelangt. In der Lebensmittelbranche werden entweder Separationsverfahren oder Konzentrationsverfahren angewendet. Auch thermische Methoden können zur Vorkonzentrierung verwendet werden und haben das Potential, Energie zu sparen (Praxisbeispiel: Fallfilmverdampfer für die Vorkonzentrierung von Milch) [4, 15, 16]. Auf diese gehen wir in diesem Paper jedoch nicht näher ein.

Tabelle 3: Unterschiedliche Methoden für nicht-thermische Vorkonzentrierung

Mechanismus für Entfernung von Wasser	Methoden
Biochemische Konzentrierung durch Dichteunterschied	Osmotische Dehydrierung, Umkehrosmose
Mechanische Abtrennung von Wasser durch Druck	Membrantechnologie, Sedimenter, Zentrifugen, Pressen

3.2. Tools und Entscheidungshilfen für Vorkonzentrationsmethoden

Als Tool und Entscheidungshilfe in der Praxis wurden sieben Technologien verglichen und die wichtigsten Eigenschaften zusammengefasst, welche zugänglich waren in der Literatur. Entstanden ist einerseits ein qualitativer Vergleich bezüglich Kriterien der Nachhaltigkeit, sowie ein Flowchart zur Abschätzung, ob und welche Methoden für das gewünschte Lebensmittel in Frage kommen

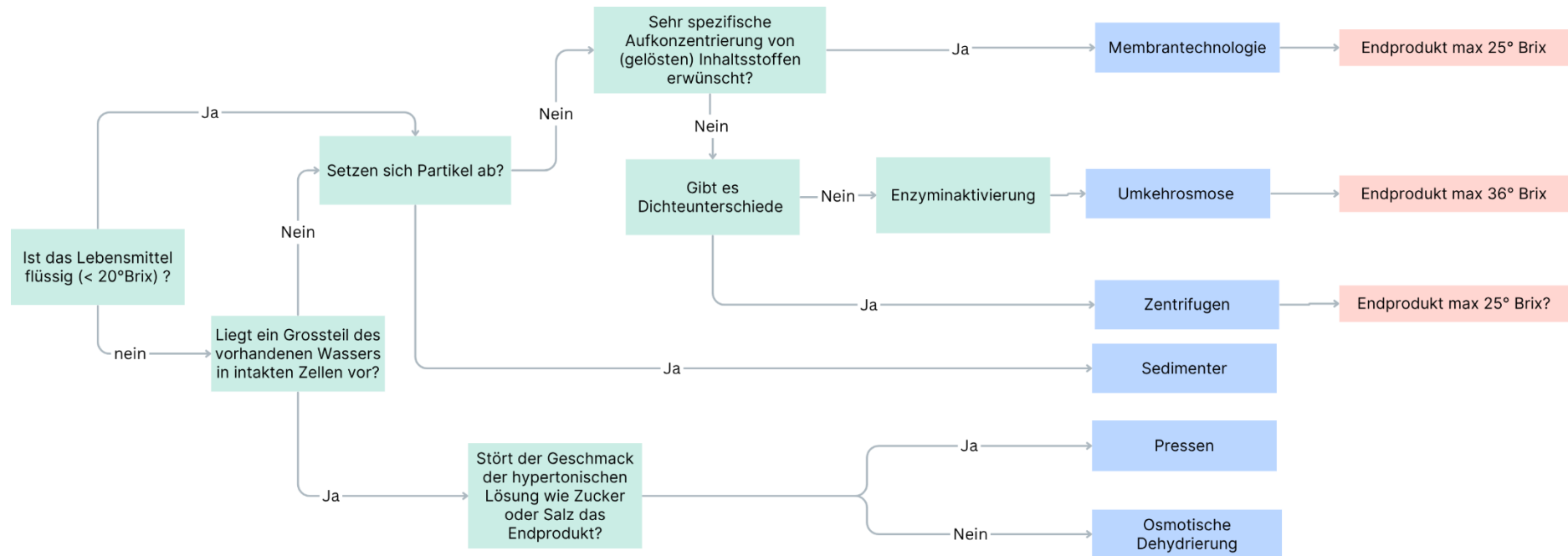
Übersicht Technologien bezüglich Nachhaltigkeit

	Geeignet für Flüssige LM	Geeignet für Feste LM	Ernährungsqualität	Energiesparpotential	FoodwastePotential
Vakuumkonzentration	Y	N	Gut	Mittel	Mittel
Membrantechnologie	Y	N	Sehr gut	Hoch	Mittel
Osmot. Dehydrierung	N	Y	Gut	Mittel	Hoch
Umkehrosmose	Y	N	Gut	Hoch	Tief
Sedimenter	Y	N	Sehr gut	Hoch	Mittel
Zentrifugen	Y	N	Sehr gut	Hoch	Mittel
Pressen	(Y)	Y	Sehr gut	Hoch	Hoch

Übersicht Technologien zur Vorkonzentration

	Vakuumkonzentration	Membrantechnologie	Osmotische Dehydrierung	Umkehrosmose	Sedimenter	Zentrifugen	Pressen
Funktionsweise	Lebensmittel werden in mehreren Stufen immer höher aufkonzentriert, dies jeweils unter Vakuum.	Flüssige Lebensmittel werden durch eine Membran gepresst, welche Partikel und Moleküle einer spezifischen Grösse zurückhalten. Die treibende Kraft ist eine Druckdifferenz.	Lebensmittel werden in eine hypertonische Lösung getaucht (z.B. Zucker oder Salzlösung). Durch den osmotischen Druck geht Wasser aus dem Lebensmittel in die Lösung über (und kleine Mengen der Lösung in das Lebensmittel hinein).	Gelöste Stoffe werden vom Wasser getrennt. Das flüssige Lebensmittel wird mit Druck durch eine halbdurchlässige Membran gepresst, welche grosse Moleküle (Proteine, Aromen, Zucker, Salze) zurückhält und kleine Moleküle durchlässt (Wasser, Alkohol). Das Wasser wandert dabei von einer hoch konzentrierten Lösung (Lebensmittel), in eine niedrig konzentrierte.	Nutzung der Schwerkraft, wobei schwere Partikel absinken und leichter Partikel in der Lösung bleiben oder aufschwimmen.	Bestandteile von Lebensmitteln werden basierend auf ihrer Dichte getrennt. Durch Rotation wird eine sehr hohe Kraft erzeugt (Zentrifugalkraft), welche die schwereren Bestandteil nach aussen drückt und leichtere in der Mitte bleiben. Es gibt Filter und Sedimenter Zentrifugen.	Mechanischer Druck wird ausgeübt, um Flüssigkeiten aus festen Lebensmitteln herauszupressen.
Vorteile	- Schonende Behandlung, Erhaltung von Aromastoffen - Rückgewinnung von Aromastoffen möglich - Effiziente Energienutzung durch Wärmerückgewinnung innerhalb des Prozesses	- keine Erhitzung - Tiefe Kosten - Easy Scale Up durch Multiplikation von Membranen - Aufkonzentrierung ohne Phasenübergang (kein Gefrieren oder Eindampfen nötig) - kleine Platzansprüche - Entfernung von Oxidationsprodukten und Schwermetallen möglich - sehr spezifische Trennung von Inhaltsstoffen möglich	- keine Erhitzung - einfache Skalierung und breite Anwendbarkeit - Reduktion der Trocknungszeit - bessere Textur	- keine Erhitzung - tiefe Investitionskosten - Beibehaltung aller relevanter Inhaltsstoffe inklusive Aromen - 3-4 fache Aufkonzentrierung der Feststoffe	- keine Erhitzung - geeignet für die Vorabscheidung von groben Feststoffen	- keine Erhitzung - geeignet für die Abtrennung kleiner Partikel zwischen 0.1 und 100 µm	- keine Erhitzung - einfache und günstige Technologie - geeignet, um Fettbestandteile zu gewinnen
Nachteile	- längere Trocknungsdauer aufgrund tieferer Temperaturen	- begrenzt ab gewissen Feststoffkonzentrationen - Fäulnis der Membran * (insbesondere durch suspendierte Partikel wie Fette oder Proteinteile) - nur bis ca 25° Brix Aufkonzentrierung möglich (ev. höher bei der Kombination versch. Membranen)	- Lebensmittel nimmt einen kleinen Teil der hypertonischen Lösung auf (häufig Zucker)	- Fäulnisphänomene an der Membran - limitiert durch osmotischen Druck (nicht höher als 22-30° Brix Konzentration möglich) - Vorbehandlung einer Enzyminaktivierung ist nötig - häufiges Ersetzen der Membran nötig - hoher Druck nötig - ungeeignet für Produkte mit hoher Konzentration von gelösten Stoffen - langsamer Durchfluss	- lange Prozesszeit		

Abbildung 5: Mehr Informationen zu technischen Eigenschaften und Einfluss auf Inhaltsstoffe der zu trocknenden Lebensmittel zu den obigen Methoden sind zu finden im Zusatzdokument «Praxishilfen»

Entscheidungshilfe Nachhaltige Trocknungsprozesse: **Vorkonzentrationsmethoden**

3.3. Vorbehandlung zur Erhöhung des Gehalts an freiem Wasser

Das Ziel der Vorbehandlungsmethoden ist, **die Zellstruktur und Wasserbindung zu beeinflussen**, um mehr Wasser frei verfügbar zu machen. Das Wasser kann sich entweder in **intakten Zellen** befinden oder **gebunden sein an biochemische Strukturen** wie Proteine oder Polysaccharide. In diesen Fällen muss zuerst die Bindung überwunden und das Wasser an die Oberfläche transportiert werden, wo es schliesslich verdampft werden kann [5, 18].

Bei der Vorbehandlung von Lebensmitteln wendet man unterschiedliche Methoden an, um Wasser aus bestehenden Verbindungen zu lösen. Je besser man weiss, wo und wie stark das Wasser im Lebensmittel gebunden ist, desto spezifischer kann man geeignete Verfahren auswählen, um diese Bindungen zu schwächen und das Wasser freizusetzen. In der nachfolgenden Tabelle sind die verschiedenen Verfahren aufgeführt:

Bemerkung: Es ist auch möglich, diese Bindungsarten durch Zufuhr von Hitze zu beeinflussen. Jedoch führt dies zu längeren Trocknungszeiten und somit wird das Lebensmittel länger hohen Temperaturen ausgesetzt [18].

Tabelle 4: Unterschiedliche Methoden zur Vorbehandlung von Lebensmitteln für eine Freisetzung von verfügbarem Wasser

Art der Wasserbindung	Bindungsstärke	Mechanismus	Methoden
Kapillar- oder Quellflüssigkeit in intakten Zellen	Mittelstarke Bindung	Zellwände aufbrechen	Pulsed Electric Field (PEF), Nassvermahlen, Biochemischer Aufschluss, Gefrieren, (Ultraschall)
Gebunden in biochemischen Strukturen	Starke Bindung	Biochemische Verbindungen auflösen	Biochemischer Aufschluss, Ultraschall, (PEF)

3.4. Tools und Entscheidungshilfen für Vorbehandlungsmethoden

Als Tool und Entscheidungshilfe in der Praxis wurden fünf Technologien verglichen und die wichtigsten Eigenschaften zusammengefasst, welche zugänglich waren in der Literatur. Entstanden ist einerseits ein qualitativer Vergleich bezüglich Kriterien der Nachhaltigkeit, sowie ein Flowchart zur Abschätzung, ob und welche Methoden für das gewünschte Lebensmittel in Frage kommen.

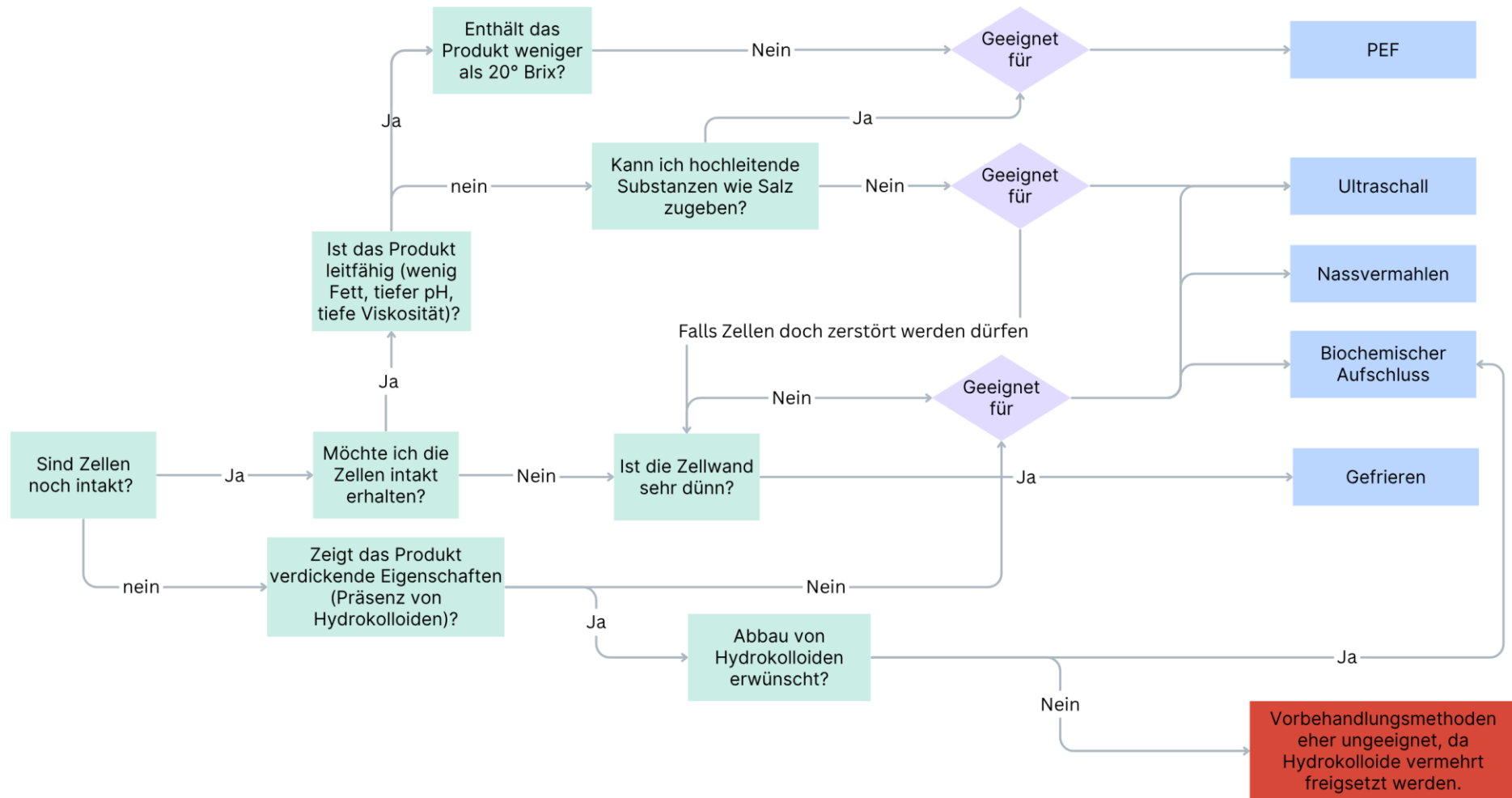
Übersicht Technologien bezüglich Nachhaltigkeit

	Geeignet für Flüssige LM	Geeignet für Feste LM	Ernährungsqualität	Energiesparpotential	Foodwaste
Gefrieren	Y	Y	Sehr gut	Gering	Sehr gering
PEF	Y	Y	Gut	Mittel	Gering
Biochem. Aufschluss	Y	N	Mittel	Sehr gut	Mittel
Ultraschall	Y		Mittel	Mittel	Mittel
Nassvermahlen	Y	Y	Gut	Mittel	Mittel

Ausschnitt Vergleich Technologien Vorbehandlung

	Gefrieren	PEF	Biochemischer Aufschluss	Ultraschall	Nassvermahlen
Funktionsweise	Lebensmittel werden gefroren bei 0 bis -18°C. Das darin enthaltene Wasser wird fest und bildet Eiskristalle.	Behandlung der Lebensmittel mit kurzen Hochspannungsimpulsen. Die Zellmembranen werden dadurch perforiert bis hin zu zerstört. Durch diese Behandlung kann das Wasser leichter aus den Zellen austreten.	Die Lebensmittel werden biochemisch aufgeschlossen über die Zugabe von Enzymen oder Fermentation mit Mikroorganismen. Als Vorbehandlungsmethode für die Trocknung ist insbesondere der Aufschluss von Zellwänden und -membranen relevant, wodurch das intrazelluläre Wasser einfacher austreten kann.	Lebensmittel wird mit Ultraschall Wellen behandelt (Strahlen mit tiefer Frequenz und hoher Intensität), wodurch Mikrokanäle entstehen. Ähnlich wie bei einem Schwamm kann das Wasser somit leichter austreten.	Zerkleinerung des Lebensmittels in kleinere Partikelgrößen bis hin zu Püre
Vorteile	- Schonend für Inhaltsstoffe - Bekannte und einfach skalierbare Technologie	- Produkt erhitzt nur wenig - Erhöht Ausbeute - Verbessert die Verarbeitbarkeit von Lebensmitteln durch eine Aufweichung der Textur (zB Kartoffeln schneiden) - Führt zu einem besseren Erhalt der Struktur von festen Lebensmitteln, vermindert Schrumpfen und erhöht Anzahl Poren - Erhöhter Stoff- und Wärmetransport, dadurch gelangt Wasser schneller an Oberfläche (verkürzte Zeit und niedrigere Temperatur) - Inaktivierung von Mikroorganismen und Enzymen (Ersatz Blanchieren) - Reduktion von Aflatoxinen	- Aufschluss von Zellwänden (zB Pektinabbau) - sehr spezifisch auf gewisse Inhaltsstoffe - Anreicherung gesundheitsfördernder Stoffe möglich (zB B12) - Reduktion der Filtrationszeit bis zu 50% bei Pektinentfernung in Fruchtsaft	- Geeignet für hitzesensitive Produkte - Signifikante Reduktion der Trocknungsenergie, speziell in Kombination mit Freeze Drying - Wenig Anpassungen nötig in existierenden Linien - Einfluss auf Enzymaktivität	- Vergrößerung der Oberfläche und somit Erhöhung der Trocknungsrate
Nachteile	- Hoher Energiebedarf für das Gefrieren und anschließende Tiefkühlagerung - Strukturelle Veränderungen durch Eiskristallbildung (zB Tropfsaft bei Auftauen, oberflächliche Austrocknung bis hin zu Gefrierbrand) - Entmischen von Lösungen bei langsamem Gefrieren	- Hohe Investitionskosten, teuer - Ungeeignet für Lebensmittel mit sehr hoher oder niedriger Leitfähigkeit (zB hohe Zuckerkonzentration) - Entstehung von Blasen und gelöstem Gas führen zum Abfall der Dielektrizität - Wenige Standardprotokolle vorhanden - Geschultes Personal nötig - Elektrolyse von Wasser in O₂ und H₂ führt zu sekundären Reaktionen (zB pH Wert Verschiebungen) - Molekularer Sauerstoff kann Oxidation verstärken	- Veränderung Sensorik (zB tieferer pH führt zu mehr Säure) - sehr spezifische Prozesskonditionen nötig (Temperatur, Zusatz von Salzen etc)** - Ungewisser Effekt auf die Trocknung durch die veränderte Zusammensetzung (positiv oder negativ)	- teure Technologie - schwieriges Scale-Up - Risiken für Mitarbeitende (Augen, Verbrennungen, Krebs)	- Kann die Wasserbindungskapazität von Ballaststoffen erhöhen und die anschließende Trocknung stören

Abbildung 6: Mehr Informationen zu technischen Eigenschaften und Einfluss auf Inhaltsstoffe der zu trocknenden Lebensmitteln zu den obigen Methoden sind zu finden im Zusatzdokument «Praxishilfen»

Entscheidungshilfe Nachhaltige Trocknungsprozesse: **Vorbehandlungsmethoden**

3.5. Elektrotechnische Erwärmungsverfahren

Thermische Trocknungsverfahren erfordern einen hohen Energieeinsatz – vor allem aufgrund **erheblicher Wärmeverluste** bei der Übertragung vom Trocknungsmedium (häufig Luft) auf das Produkt [13, 28, 29].

Bei den elektrotechnischen Verfahren wird die Wärme über elektromagnetische Strahlung oder durch Widerstand erzeugt und benötigt somit kein Trocknungsmedium. Durch diese direkte Einwirkung wird das Lebensmittel schneller und effizienter erhitzt und erleidet weniger Qualitätsverluste [29-31].

Elektrotechnische Verfahren werden in industriellen Trocknungsprozessen selten allein eingesetzt, sondern kombiniert mit thermischen Methoden. Dies führt zu einem synergistischen Effekt und Energieeinsparungen. Zum Beispiel sparte eine Hybridlösung aus Infrarot und Gefriertrocknung 18% des Energieaufwands ein im Vergleich zu Gefriertrocknung ohne Infrarot [28, 31].

Tabelle 5: Unterschiedliche elektrotechnische Erhitzungsverfahren

Mechanismus für Hitzeübertragung	Methoden
Elektromagnetische Wellen	IR, Mikrowelle
Ohm'scher Widerstand	Ohmic Heating

[6, 32-34]

3.6. Tools und Entscheidungshilfen für Vorbehandlungsmethoden

Als Tool und Entscheidungshilfe in der Praxis wurden drei Technologien verglichen und die wichtigsten Eigenschaften zusammengefasst, welche zugänglich waren in der Literatur. Entstanden ist einerseits ein qualitativer Vergleich bezüglich Kriterien der Nachhaltigkeit, sowie ein Flowchart zur Abschätzung, ob und welche Methoden für das gewünschte Lebensmittel in Frage kommen.

Übersicht Technologien bezüglich Nachhaltigkeit

	Geeignet für Flüssige LM	Geeignet für Feste LM	Ernährungsqualität	Energiesparpotential	Foodwaste
Infrarotstrahlung		Y	Gut	Gut	Mittel
Mikrowelle	Y	Y	Mittel	Gut	Gering
Ohmic Heating	Y	N	Gut	Sehr gut	Gering

Ausschnitt Vergleich Technologien Elektrotechnische Verfahren

	Infrarotstrahlung	Mikrowelle	Ohmic Heating
Funktionsweise	Wärmeenergie wird durch elektromagnetische Wellen im Infrarotbereich erzeugt. IR führt zur Vibration der Moleküle im Lebensmittel, wodurch diese sich durch Reibung erhitzen und das Wasser schliesslich verdampft.	Mikrowellenstrahlen dringen ins Lebensmittel ein. Die elektromagnetische Energie führt zur Rotation der Moleküle, wodurch diese erhitzen und das Wasser verdampft.	Strom wird durch das Lebensmittel geleitet. Durch den sogenannten Ohm'schen Widerstand des Lebensmittels wandelt sich die eingeleitete elektrische Energie in thermische Energie um.
Vorteile	- Gleichmässige Erhitzung des Lebensmittels (von der Oberfläche bis in den Kern) - Einfache Kontrolle der Lebensmittelltemperatur - Hohe Effizienz: hohe Hitzeübertragungsrate und direkter Energietransfer aufs Produkt (kein Erhitzungsmedium wie Luft nötig) - Verbesserte Trocknung dank erhöhter Eindringtiefe (bis 5cm) - Reduktion der Trocknungszeit - Hohe Produktqualität, wenn kombiniert mit anderen Trocknungsmethoden - Gut kombinierbar mit anderen Erhitzungs/Trocknungsmethoden - Einfache Handhabung	- Hohe Effizienz: hohe Hitzeübertragungsrate und direkter Energietransfer aufs Produkt (kein Erhitzungsmedium wie Luft nötig, kürzere Trocknungszeiten) - Energieeinsparungen insbesondere in Kombination mit thermischen Verfahren (32-71%) - Gute Strukturhaltung des Lebensmittels: Porosität, Rehydratation - Häufig kombiniert mit andere Trocknungsmethoden (verkürzt Trocknungszeit im Bereich 25-90% oder erhöht Trocknungsrate 32-71%)	- Schnelle und gleichmässige Erhitzung (insbesondere von flüssigen Lebensmitteln) - hohe Energieeffizienz (kein Restwärmeverlust, sobald Strom abgestellt wird) - je mehr Feuchtigkeit, desto effizienter - Kontrollierbar über Konduktivität - schnelle Stabilisierung von Strukturen (zB Schäumen, Teigen) - kein Fouling durch Wegfallen von heissen Oberflächen, entsprechend leichtere Reinigung - höhere Produktqualität dank kürzeren Erhitzungszeiten - Inaktivierung von Enzymen (und Mikroorganismen)
Nachteile	- Risiko von Produktüberhitzung - Limitierte Eindringtiefe der IR Strahlung - Limitierte Rehydrierungseigenschaften - Nicht geeignet für Trocknung von dicken Filmen oder grösseren Lebensmitteln - Schwierig, die richtigen Prozessparameter zu kontrollieren. Ideale Prozesstemperaturen und IR Intensität Einstellung schwierig	- Überhitzung von äusseren Strukturen (insbesondere Ecken), ausgeprägter am Ende der Trocknungszeit - Schwierig, die richtigen Prozessparameter zu finden - Fehlende Forschung im Industriemassstab	- Hohe Investitionskosten - Ungeeignet für LM mit hohem Fettanteil (wegen tiefer Konduktivität)

Abbildung 7: Mehr Informationen zu technischen Eigenschaften und Einfluss auf Inhaltsstoffe der zu trocknenden Lebensmitteln zu den obigen Methoden sind zu finden im Zusatzdokument «Praxishilfen»

4. Verbesserte Qualität

4.1. Erhöhte Sicherheit und Haltbarkeit

Die Trocknung ist ein Veredlungsschritt, der bezüglich Lebensmittelsicherheit Vorteile bietet: Das Trocknen von Lebensmitteln wird verlängert die Haltbarkeit eines frischen Lebensmittels von wenigen Tagen auf Wochen oder Jahre. **Der a_w Wert wird auf einen idealen Bereich zwischen 0.25-0.4 gesenkt**, um die mikrobiologischen und chemischen Prozesse zu minimieren und die Sicherheit zu gewährleisten [1, 2]:

- **Bakterienwachstum:** $a_w > 0.91$
- **Schimmelwachstum:** $a_w > 0.7$
- **Enzymatische Reaktionen:** $a_w > 0.4$
- **Fettoxidation:** $a_w < 0.2$

Bemerkung: Einige Lebensmittel müssen vor dem Verzehr wieder rehydriert werden, damit sie ihren Geschmack besser entfalten. Es gilt zu beachten, dass die Reaktionsfähigkeit dann wieder ansteigt. Sporen überleben den Trocknungsprozess und können bei der Rehydrierung auskeimen. Deshalb werden viele Lebensmittel vor der Trocknung zusätzlich pasteurisiert oder sterilisiert [1]. Dies geschieht wiederum häufig über thermische Verfahren und leistet einen zusätzlichen Beitrag zum Energieverbrauch.

4.2. Typische Qualitätsveränderungen

Durch die Trocknung verändern sich Produkteigenschaften, welche das Lebensmittel einzigartig machen. Die Trocknung kann neue und **interessante Eigenschaften hervorrufen**, welche bei den frischen Lebensmitteln nicht vorkommen. Allerdings gelten **zu starke Veränderungen meistens eher als unerwünscht**. Für die Kundenakzeptanz spielen folgende drei Aspekte eine Rolle, welche sich durch die Trocknung verändern [2]:

- **Ernährung:** die ernährungsphysiologischen Eigenschaften (Nährstoffhaltung, Bioverfügbarkeit)
- **Sensorik:** Der Geschmack und das Aussehen (Aroma, Farbe)
- **Struktur & Textur:** die strukturellen Eigenschaften und Textur (Löslichkeit, Knusprigkeit, Porosität, Hygroskopizität)

Als Faustregel gilt, dass man möglichst wenige Nährstoffe oder Aromen verlieren und sogenannt «**schonend**» trocknen möchte. Da die meisten Nährstoffe und Aromen jedoch bereits bei Temperaturen über 60°C degradieren, kann die Qualität hoch gehalten werden mittels Vakuum oder Gefriertrocknung [1, 9].

4.3. Technologische Herausforderung: Klebrige Produkte

Entsteht während oder nach der Trocknung klebriges Material, führt dies zu **hohen Verlusten** während der Produktion und einer **kurzen Haltbarkeit** des Produktes (insbesondere bei Produkten, welche rieselfähig sein sollten und nach kurzer Zeit «verblocken»).

Die Zusammensetzung der Lebensmittel spielt dabei eine entscheidende Rolle. Einfachzucker oder hohe Anteile an Säure – wie sie beispielsweise vorkommen in Früchten - erschweren die Herstellung von stabilen Trockenprodukten [41]. Dies hat zu tun mit der Glasübergangstemperatur T_G der Komponenten und dem sich verändernden Wassergehalt und Wasseraktivität während einer Trocknung [42].

- **Tiefe Glasübergangstemperaturen** bestehen bei kleinen Molekülen wie Einfachzuckern und Säuren, weshalb Lebensmittel mit einem hohen Anteil dieser Bestandteile besonders schwierig zu trocknen sind. Einige Beispiele von T_G [8, 43]:
 - Glucose 31°C
 - Fructose 5°C
 - Zitronensäure 11°C
- **Hohe Glasübergangstemperaturen** von über 100°C sind zu finden bei weniger schnell löslichen Verbindungen, welche gerne als Trägerstoff verwendet werden, um die Glasübergangstemperatur von Produkten zu erhöhen [8, 41]

- Molkenprotein 127°C
- Maltodextrin DE 9-14 141°C
- Lactose 101°C

Die Trocknung und Lagerung von Lebensmitteln sollte idealerweise unterhalb der Glasübergangstemperatur stattfinden. Eine Herausforderung bei Lebensmitteln ist, dass sie aus unterschiedlichen Komponenten bestehen und die Vorhersage der Glasübergangstemperatur bei nicht reinen Materialien schwieriger ist [8]. Um Klebrigkeit zu verhindern während und nach der Trocknung, gibt es folgende Möglichkeiten:

- **Wassergehalt/Wasseraktivität:** Je tiefer die Wasseraktivität, desto höher die Glasübergangstemperatur. Bei gewissen Zusammensetzungen reicht eine maximale Reduktion des Wassergehalts aus, um die Klebrigkeit zu kontrollieren [41]
- **Rezepturanpassung:** Klebrige Lebensmittel werden häufig mit Trägerstoffen versetzt, welche die Glasübergangstemperatur erhöhen [8, 44].
- **Technologie:** Es existieren auch technologische Lösungen wie zum Beispiel eine abweichende Geometrie der Sprühkammer für die Sprühtrocknung von zuckerhaltigen Materialien [45]
- **Trocknungstemperatur:** Trocknen unter der Glasübergangstemperatur ist möglich mithilfe von Vakuum.

4.4. Qualitätssteigerung durch angepasste Trocknung

Die weiteren **Möglichkeiten decken sich weitgehend mit den Strategien, um Energie zu sparen**; durch vorgelagerte Prozessschritte versucht man, die Lebensmittel nur möglichst **kurz den hohen Temperaturen** auszusetzen.

	Veränderung	Lösungsansätze
Ernährung	Lipidoxidation	- Produkt auf Ziel aw Werte zwischen 0.25-0.4 trocknen
	Verlust von hitzelabilen und wasserlöslichen Inhaltsstoffen (Antioxidantien, B und C Vitamine)	- Verdampfen unter Vakuum - Vorkonzentrationsmethoden (siehe Tabelle 3) - Vorbehandlungsmethoden (siehe Tabelle 4)
	Teils bessere Bioverfügbarkeit von Stärke und Proteinen bei milder Hitzeeinwirkung, jedoch Degradierung bei zu hohen Temperaturen/langer Aussetzung (Stärke Gelatinierung, Proteindegradation durch Maillardreaktionen[46])	- Verdampfen unter Vakuum - Vorkonzentrationsmethoden (siehe Tabelle 3) - Vorbehandlungsmethoden (siehe Tabelle 4)
Sensorik	Verlust von wasserlöslichen und flüchtigen Aromen (zb Fruchtester)	- aw Optimum: so hoch wie möglich (Sensorik) und so tief wie nötig (Sicherheit, Stabilität) - Verdampfen unter Vakuum - Vorkonzentrationsmethoden (siehe Tabelle 3) - Vorbehandlungsmethoden (siehe Tabelle 4)
Struktur und Textur	Entstehung von neuen Aromen durch die Erhitzung (zb Caramel)	
	Klebrigkeit	- Verdampfen unter Vakuum - Entfernung von Komponenten mit tiefer T _G wie Säuren oder Einfachzucker über Vorbehandlung (siehe Tabelle 4) - Zusatz von Trägerstoffen - aw Wert so tief wie möglich
	Löslichkeit	- Sprühtrocknung bevorzugen
	Viskositätsanstieg durch Gelierverhalten	- Entfernung involvierter Bestandteile wie Ballaststoffe über Vorbehandlungsmethoden (siehe Tabelle 4) - Temperaturen anwenden unter der Geliertemperatur - Auswahl einer Trocknungsmethode, welche mit viskosen Materialien funktioniert

5. Zusätzliche Wertschöpfung und Vermeidung von Foodwaste

Über Trocknungsverfahren können erwünschte Produkteigenschaften, lange Haltbarkeit und Lagerungsfähigkeit erzielt werden. Für Rohstoffe, welche eines oder mehrere der folgenden Kriterien erfüllen, sollte die Trocknung als geeigneter Veredlungsschritt geprüft werden:

- schnell verderblich
- instabil oder heterogen
- unerwünschte sensorische Eigenschaften (zb Bitterkeit)

Häufig stellt sich die Frage des Trocknungsprozesses bei der Entwicklung und Verarbeitung von neuen Lebensmitteln, im Innovationsbereich oder bei der Weiterverwertung von Nebenströmen.

5.1. Trocknung von Nebenströmen für eine vereinfachte Weiterverwendung

Typische Nebenströme entstehen während der Produktion und betreffen beispielsweise Molke aus der Käseherstellung, Trester oder Schalen bei der Verarbeitung von Früchten, Treber aus der Bierproduktion oder Gemüseabschnitte wie beispielsweise bei der Chipsherstellung.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Studien, in denen Nebenströme benutzt werden, um wertgebende Inhaltsstoffe zu extrahieren. Gerade Sprühtrocknung ist beliebt, um diese Inhaltsstoffe zu valorisieren, da diese mithilfe von Trägerstoffen eingekapselt und somit stabilisiert werden können. Untenstehend einige Beispiele von extrahierten Inhaltsstoffen und deren Herkunft aus Nebenströmen aus einer Review [44]:

- **Farbstoffe** wie Karotinoide (Karotten, Kürbis, Mango) , Lycopene (Tomaten Wassermelone, Grapefruit) oder Anthocyanine (Trauben, Rotkabis, Holunderbeeren)
- **Antioxidantien** wie Polyphenole (Olive, Zitruschale, Walnuss), Vitamine (Trester, Treber) oder Polyphenole (Eier, Gewürze)
- **Nutritional additives** wie Vitamine (Pfeffer, Zitrus, Presskuchen, Trester) oder Mineralien (Eierschalen)
- **Texturgebende Inhaltsstoffe** wie Geliermittel (Zitronenschalen) oder Emulgatoren (Eierindustrie, Zuckerbagasse)

5.2. Design von neuen Trocknungsprozessen und Auswahl der geeigneten Methoden

Beim Design von neuen Prozessen und innovativen Materialien gibt es die Möglichkeit, die Faktoren der Nachhaltigkeit von Anfang an zu berücksichtigen (Energie, Effizienz und Ernährungsqualität). Häufig sind neuartige Lebensmittel sehr komplex in der Weiterverarbeitung, da sie von Natur aus aussergewöhnliche Eigenschaften besitzen oder für einen sehr spezifischen Einsatzbereich getrocknet werden.

Die Trocknung führt zu einer Aufkonzentrierung, was im Beispiel von Nebenströmen häufig eine Herausforderung darstellt, da somit auch unerwünschte Aromen wie Bitterkeit sehr intensiv werden und den Einsatzbereich dadurch einschränken.

Wer sich damit befasst, ein neuartiges Lebensmittel zu trocknen oder auch eine bestehende Trocknung optimieren möchte, kann sich folgende Fragen stellen und mithilfe der hier zur Verfügung gestellten Praxishilfen einen Überblick verschaffen über die Möglichkeiten:

- 1) Wie ist das Produkt beschaffen?
- 2) Kann ich das Produkt vorbehandeln?
→ intakte Zellen (oder auch Strukturen wie Fasern) zerstören
- 3) Kann ich das Produkt aufkonzentrieren? Oder habe ich Störelemente (Hydrokolloide, Stärke, Faserstoffe die Wasser speichern)?
→ Fällen, separieren, nur bis vor Störung aufkonzentrieren, Abhängig von Viskosität für Endtrocknungsmethode

- 4) Ist es möglich, das Produkt elektrotechnisch zu erhitzen?
- 5) Limitieren mich Inhaltsstoffe, die ich erhalten muss?
Vitamine, Farbe, Proteine, Aromen → Grenzen kennen (Temperatur, Zeit, Konzentration)
- 6) Wie beeinflusst die Zusammensetzung meines Produkts den Prozess?
Zucker, Säuren → klebrig, Fett → Oxidation, weniger lange haltbar, Fett, Säuren → Leitfähigkeit erniedrigt, Stärke/Polysaccharide → quellen bei entsprechenden Temperaturen (viskosere Masse, verkleben), Proteine → denaturieren, können schrumpfen dabei (Rissbildung)
- 7) Habe ich eine Strukturanforderung an das Endprodukt?
Hygroskopizität, Löslichkeit, Partikelgrösse, Kristallisation → Technologie, Trägerstoff
- 8) Limitieren mich Stoffeigenschaften wie konzentrationsabhängige Gelierung oder Glasübergangstemperaturen?

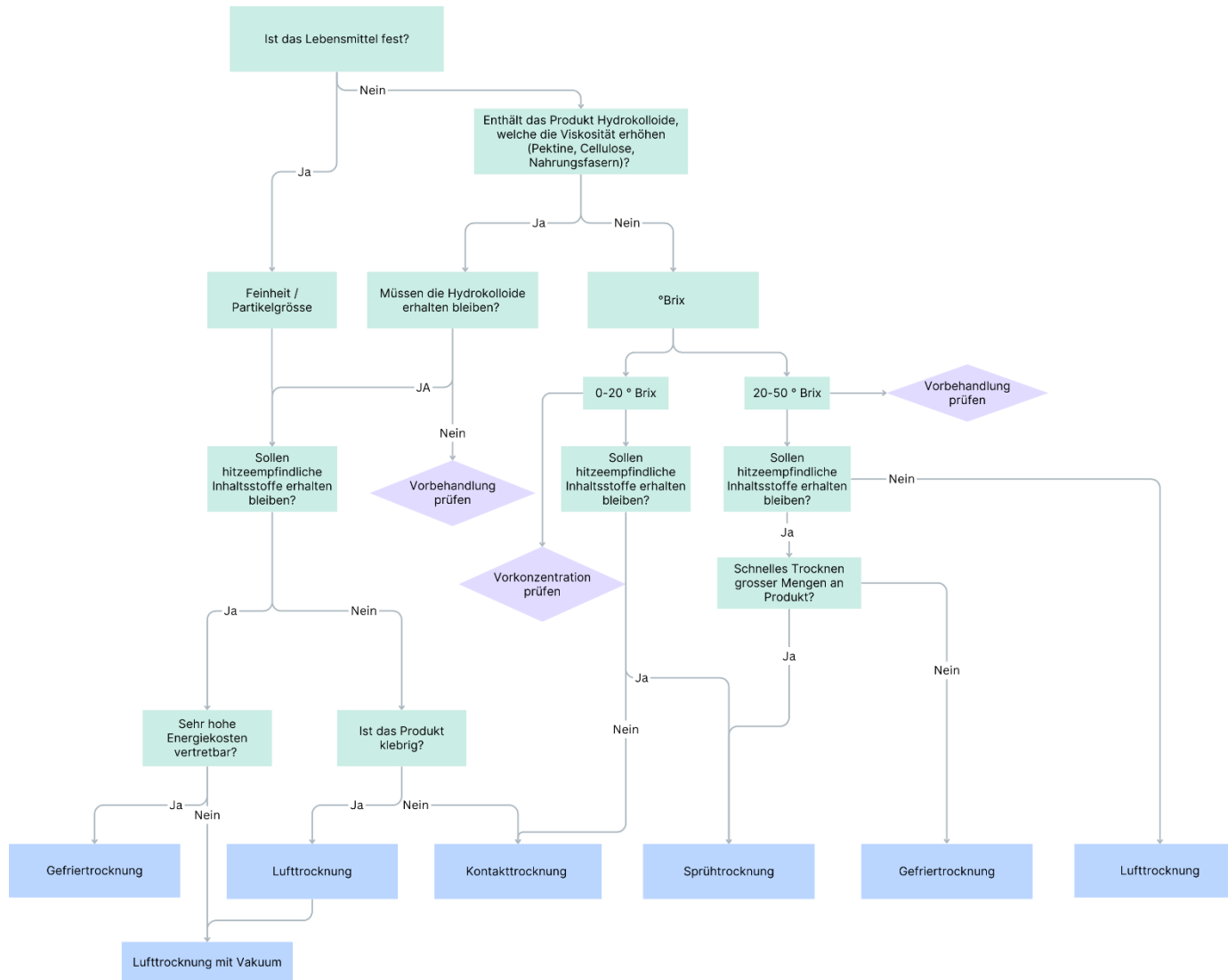
5.3. Tools und Entscheidungshilfen für das Design von neuen Prozessen

Als Tool und Entscheidungshilfe in der Praxis ist es wichtig, die Methode zu evaluieren mit der das Produkt am geeignetsten getrocknet werden kann. Vorgelagert sind die Überlegungen zu Vorbehandlungs- und Vorkonzentrationsmethoden sowie Einsatz von elektrotechnischen Erhitzungsverfahren.

Aufgrund der vorhandenen Literatur entstand der qualitative Vergleich bezüglich Kriterien der Nachhaltigkeit, sowie ein Flowchart für erste Abschätzungen und weitere Überlegungen bei der Trocknung von neuen Materialien. Eine weiterführende Tabelle mit mehr Kriterien, Literaturwerten und den entsprechenden Quellen ist im Dokument der «Praxishilfen für Nachhaltige Trocknungsprozesse» zu finden.

Übersicht thermische Trocknungstechnologien bezüglich Nachhaltigkeit

	Geeignet für Flüssige LM	Geeignet für Feste LM	Ernährungsqualität	Energiesparpotential	Foodwaste
Lufttrocknung	N	Y	Tief	Hoch	Gering
Sprühtrocknung	Y	N	Mittel	Mittel	Mittel
Kontaktrocknung	Y	N	Mittel	Mittel	Mittel
Gefriertrocknung	N	Y	Sehr hoch	Sehr Hoch	Sehr gering
Vakuumtrocknung	Y	Y	Hoch	Mittel	Gering

Entscheidungshilfe Nachhaltige Trocknungsprozesse: **Trocknungsmethode für (neue) Rohstoffe**

6. Fazit und Empfehlungen

Die Optimierung einer Trocknung bezüglich Nachhaltigkeit ist komplex – es gibt keine einzelne Technologie, die als Standard gilt. Entscheidend ist die ganzheitliche Betrachtung des Prozesses: Welche Teilschritte bieten das grösste Verbesserungspotenzial, und welches Ziel steht im Vordergrund?

Unternehmen verfolgen meist mehrere Ziele parallel – etwa Energieeinsparung, Optimierung der Produktqualität und Wirtschaftlichkeit, die nicht immer deckungsgleich sind. Verbesserungen entstehen oft durch zusätzliche nicht-thermische Schritte, welche die thermische Trocknungszeit verkürzen.

6.1. Prioritäten in Kürze

- **Energieverbrauch senken:** Wassergehalt vor der thermischen Trocknung mit nicht-thermischen Verfahren reduzieren (abhängig von Rohmaterial und Technologieverfügbarkeit)
- **Ernährungsqualität verbessern:** Thermische Belastung minimieren (Temperaturen > 80 °C vermeiden, effiziente Wärmeübertragung)
- **Vermeidung von Foodwaste:** neue Rohstoffe und Nebenströme mithilfe von Trocknung in die Lebensmittelwertschöpfungskette überführen. Geeignete Trocknungsmethode und Vorbehandlungskombination identifizieren und kombinieren

6.2. Empfehlungen nach Zielgruppe

- **Produzierende Betriebe:**
 - Haupttechnologie meist festgelegt → Potenzial in Vorbehandlung, Vorkonzentration und elektrotechnische Erhitzungsverfahren
 - **Empfehlung:** Technologien zur Vorbehandlung testen (Hochschulen, Hersteller von Trocknungsanlagen, Lohnverarbeiter), Offenheit gegenüber Innovation
- **Entwicklung neuer Trocknungsprozesse:**
 - Kombination thermischer und nicht-thermischer Schritte von Beginn an berücksichtigen.
 - **Empfehlung:** geringer Wassergehalt vor Trocknung sicherstellen, Technologien testen (Hochschulen, Hersteller von Trocknungsanlagen, Lohnverarbeiter), Offenheit gegenüber Innovation
- **Einkauf von Trockenprodukten:**
 - Hohe Qualität bei Verarbeitungsmethoden mit $T < 80\text{ °C}$ und kurzen Trocknungszeiten.
 - Geringe Emissionen bei Nutzung erneuerbarer Energien (elektrotechnische Energie, Sonnenenergie) sowie zusätzlichen Prozessschritten (Vorbehandlung, Vorkonzentration)
 - **Empfehlung:** Produkte bevorzugen mit hoher Ernährungsqualität, Hersteller priorisieren mit Nachhaltigkeitszielen, Austausch fördern zum Thema

7. Literaturverzeichnis

1. Alp, D., et al., *The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: a review*. European Food Research and Technology 2021 247:6, 2021-04-02. **247**(6).
2. E. Tsotsas, A.M., *Modern Drying Technology*. 2011.
3. Heldman, D.R. and R.W. Hartel, *Principles of Food Processing*. Food Science Texts Series, 1997.
4. Pouliot, Y., V. Conway, and P.-L. Leclerc, *Separation and Concentration Technologies in Food Processing*. Food Processing, 2014.
5. Schwister, K. and V. Lever, *Verfahrenstechnik für Ingenieure*. 2020.
6. Schuchmann, H.P. and H. Schuchmann, *Verfahren zur Reduktion des Wassergehalts von Lebensmitteln*. Lebensmittelverfahrenstechnik, 2005.
7. Labuza, T.P., et al., *Water Activity in Foods*. 2007.
8. Camino-Sánchez, F.J., H. López-López, and J.M. Gutierrez-Rodríguez, *The development and application of sticky-point models to spray drying processes for the manufacturing of nutritional powder products and infant formulas*. Journal of Food Engineering, 2020/08/01. **279**.
9. Samborska, K., et al., *Innovations in spray drying process for food and pharma industries*. Journal of Food Engineering, 2022/05/01. **321**.
10. Bhandari, B.R., *Food Drying Science and Technology*. 2007: DESTech Publications, Inc.
11. Couchman, P.R. and F.E. Karasz, *A Classical Thermodynamic Discussion of the Effect of Composition on Glass-Transition Temperatures*. May 1, 2002.
12. Jafari, S.M. and N. Malekjani, *Drying Technology in Food Processing - Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry*. 1 ed. 2023, Chantilly: Elsevier.
13. Martynenko, A.A. and G.N. Alves Vieira, *Sustainability of drying technologies: system analysis*. Sustainable Food Technology, 2023. **1**(5): p. 629-640.
14. Acar, C., I. Dincer, and A. Mujumdar, *A comprehensive review of recent advances in renewable-based drying technologies for a sustainable future*. Drying Technology, 2022. **40**(6): p. 1029-1050.
15. Kaur, D., et al., *Osmotic dehydration of fruits using unconventional natural sweeteners and non-thermal-assisted technologies: A review*. Journal of Food Processing and Preservation, 2022. **46**(12).
16. Jiao, B., A. Cassano, and E. Drioli, *Recent advances on membrane processes for the concentration of fruit juices: a review*. Journal of Food Engineering, 2004/08/01. **63**(3).
17. Moejes, S.N. and A.J.B.v. Boxtel, *Energy saving potential of emerging technologies in milk powder production*. Trends in Food Science & Technology, 2017/02/01. **60**.
18. Dziki, D. and D. Dziki, *Recent Trends in Pretreatment of Food before Freeze-Drying*. Processes 2020, Vol. 8, Page 1661, 2020-12-16. **8**(12).
19. Ramírez, C.A., M. Patel, and K. Blok, *From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry*. Energy, 2006/09/01. **31**(12).
20. I.G. Wenten, K., *Reverse osmosis applications: Prospect and challenges*. Desalination, 2016. **391**.
21. Pereira, R.N. and A.A. Vicente, *Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing*. Food Research International, 2010. **43**(7): p. 1936-1943.
22. Arshad, R.N., et al., *Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective*. Trends in Food Science & Technology, 2020/10/01. **104**.
23. Parniakov, O., et al., *Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016/06/01. **35**.
24. Augustin, M., et al., *Role of food processing in food and nutrition security*. TRENDS IN FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY, 2016. **56**: p. 115-125.
25. Moses, J.A., et al., *Novel Drying Techniques for the Food Industry*. Food Engineering Reviews, 2014. **6**(3): p. 43-55.
26. Merone, D., et al., *Energy and environmental analysis of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying of food*. Journal of Food Engineering, 2020/10/01. **283**.
27. Colucci, D., et al., *On the effect of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying on the antioxidant properties of eggplant*. Food Research International, 2018/04/01. **106**.
28. Sakare, P., et al., *Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances*. Food Engineering Reviews 2020 12:3, 2020-07-06. **12**(3).
29. Atuonwu, J. and S. Tassou, *Decarbonisation of food manufacturing by the electrification of heat: A review of developments, technology options and future directions*. Trends in Food Science & Technology, 2021. **107**: p. 168-182.
30. Timmermans, R.A.H., et al., *Comparing equivalent thermal, high pressure and pulsed electric field processes for mild pasteurization of orange juice. Part I: Impact on overall quality attributes*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011/07/01. **12**(3).
31. Huang, D., et al., *Application of infrared radiation in the drying of food products*. Trends in Food Science & Technology, 2021/04/01. **110**.

32. Salehi, F., *Recent Applications and Potential of Infrared Dryer Systems for Drying Various Agricultural Products: A Review*. International Journal of Fruit Science, 2020-07-02. **20**(3).
33. Obajemihi, O.I., J.-H. Cheng, and D.-W. Sun, *Novel sequential and simultaneous infrared-accelerated drying technologies for the food industry: Principles, applications and challenges*. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023-4-26. **63**(11).
34. L. M. Ahrne, N.R.P., N. Staack, and P. Floberg, *Microwave Convective Drying of Plant Foods at Constant and Variable Microwave Power*. Drying Technology, 2007. **25**(7-8).
35. Menon, A., V. Stojceska, and S.A. Tassou, *A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies*. Trends in Food Science & Technology, 2020. **100**: p. 67-76.
36. Cokgezme, O.F., et al., *Performance analyses for evaporation of pomegranate juice in ohmic heating assisted vacuum system*. Journal of Food Engineering, 2017/08/01. **207**.
37. Mohapatra, N., Sanwal, Kumari, Barik, Sahu, *Novel Drying Technologies | 3 | Future Crops and Processing Technology*. Future Crops and Processing Technologies for Sustainability and Nutritional Security, 2024/09/06.
38. Guo, Q., et al., *Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry*. Trends in Food Science & Technology, 2017/09/01. **67**.
39. Jiang, N., et al., *Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption*. LWT - Food Science and Technology, 2017/09/01. **82**.
40. Guo, Y., et al., *Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characterizations*. LWT, 2020/05/01. **126**.
41. Jaya, S., et al., *Glass Transition and Sticky Point Temperatures and Stability/Mobility Diagram of Fruit Powders*. Food and Bioprocess Technology 2007 2:1, 2008-01-25. **2**(1).
42. Roos, Y.H. and Y.H. Roos, *Glass Transition Temperature and Its Relevance in Food Processing*. Annual Review of Food Science and Technology, 2010/04/10. **1**(Volume 1, 2010).
43. Bhandari, B.R., N. Datta, and T. Howes, *Problems Associated With Spray Drying Of Sugar-Rich Foods*. Drying Technology, 1997-1-1. **15**(2).
44. Banožić, M., et al., *Spray Drying as a Method of Choice for Obtaining High Quality Products from Food Wastes—A Review*. Food Reviews International, 2023-05-19. **39**(4).
45. Poozesh, S., S.M. Jafari, and N.K. Akafuah, *Interrogation of a new inline multi-bin cyclone for sorting of produced powders of a lab-scale spray dryer*. Powder Technology, 2020/08/01. **373**.
46. Siddiqui, S.A., et al., *Impact of drying on techno-functional and nutritional properties of food proteins and carbohydrates - A comprehensive review*. Drying Technology, 2024-3-1. **42**(4).
47. Heindl, A., *Industrielle Bandtrockner in verschiedenen Industriebereichen und ihre*. Praxisbuch Bandtrocknung, 2016.
48. Raghavi, L.M., J.A. Moses, and C. Anandharamakrishnan, *Refractance window drying of foods: A review*. Journal of Food Engineering, 2018. **222**: p. 267-275.
49. Atuonwu, J.C. and S.A. Tassou, *Quality assurance in microwave food processing and the enabling potentials of solid-state power generators: A review*. Journal of Food Engineering, 2018/10/01. **234**.
50. Bernaert, N., et al., *Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing*. Trends in Food Science & Technology, 2019/02/01. **84**.
51. Galstyan, A.G., et al., *Effects of critical fluctuations of storage temperature on the quality of dry dairy product*. Journal of Dairy Science, 2019/12/01. **102**(12).
52. Calín-Sánchez, A., et al., *Comparison of Traditional and Novel Drying Techniques and Its Effect on Quality of Fruits, Vegetables and Aromatic Herbs*. Foods, 2020. **9**(9): p. 27.
53. Guo, Q., et al., *Drying technologies of novel food resources for future foods: Progress, challenges and application prospects*. Food Bioscience, 2024. **60**: p. 17.
54. Jangam, S.V., *An Overview of Recent Developments and Some R&D Challenges Related to Drying of Foods*. Drying Technology, 2011. **29**(12): p. 1343-1357.