

Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Studiengang „Food Chain Environments“
SS 2025-26

Masterarbeit zum Thema

Etablierung einer kontinuierlichen Verfahrensweise für gepulste elektrische Felder zur Anwendung an verschiedenen Lebensmittelmatrizes

Zur Erlangung des akademischen Grades:

Master of Science (M. Sc.)

URN-Nr.:

urn : nbn : de : gbv : 519-thesis-2025-0214-0

Verfasser: Jakob Awe

Betreuer: Prof. Dr. Michael Sandmann
Prof. Dr. Marco Ebert

Neubrandenburg, den 24.03.2026

Abstract

The following thesis is about the establishment of a continuous process for pulsed electric fields (PEF) applied to various food matrices. The main objective was to realize an Up-scaling from laboratory to pilot-plant scale with relevant flow rates to provide a foundation for both further research and small-scale industrial applications for microbial inactivation. In this context, the influence of process parameters, food matrix (lupin-based milk alternative and beer wort) and the specific resistance of two microorganisms (*Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*) were investigated. A significant part of the study involved also a recipe development of the included milk alternative as no commercial product was available at the time of this study.

It was found that a stable, milk alternative based on lupins with a cow milk and soy drink like viscosity of 2,11 mPa·s could be produced using 0,01 % gellan gum, 4 % of maltodextrin, 3 % of coconut fat and a lupin extract (1:11).

Despite technical difficulties regarding the electrode configuration during this study, a stable system including a Supply tank, a pump, a diaphragm valve, the continuous PEF-Unit (PEF-Pilot Dual; Elea Technology GmbH) and a tempering unit was successfully established for a flow rate of 50 l/h.

The microbiological analyses showed a highly significant correlation ($p < 0,005$) between specific energy input (60, 80, 100 and 120 kJ/l) and microbial reduction at 24 kV/cm. However, it was found in that study under the given parameters that the inactivation was not solely caused by the specific energy but also by a proportional increase in temperature up to 72,4 °C, resulting in a synergistic hurdle effect. At 120 kJ/l, a complete reduction of over 3,65 log (Lupin-based milk alternative and beer wort with *E. coli*) to over 5,19 log (lupin-based milk alternative with *S. cerevisiae*) were achieved.

While a significant higher reduction was observed in the lupin-based milk alternative compared to beer wort ($p = 0,00165$), no significant difference was found between the resistance of *E. coli* and *S. cerevisiae* ($p = 0,167$). Both experiments showed similar log-reductions at same specific energy input.

Keywords: pulsed electric fields (PEF), continuous processing, scale up, inactivation of microorganisms, beer wort, lupin-based beverage, recipe development

Danksagung

Vorab möchte ich Herrn Prof. Dr. Michael Sandmann für die Vermittlung sowie Betreuung dieser Arbeit danken. Einen großer Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr. Marco Ebert.

Ebenfalls gilt mein Dank den wissenschaftlich-technischen Mitarbeitenden der Hochschule Neubrandenburg. Ohne die Hilfe und Unterstützung von Frau Gabriele Kulik, Frau Andrea Winkler, Frau Dipl.-Ing. Viola Hoffmann, Herrn Martin Hinderlich (M. Sc.) und Herrn Christian Foth wäre die Erarbeitung der Themen nicht so einfach und bereichernd geworden.

Den größten Dank möchte ich jedoch meiner Ehefrau Sarah Awe sowie meinen Schwiegereltern Frank Awe und Sylke Awe aussprechen. Ohne ihren Rückhalt und ihre Unterstützung wäre die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract

Danksagung

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Symbole

1	Einleitung	1
2	Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1	Hochspannungsimpulsbehandlung in der Lebensmittelindustrie	3
2.1.1	Hintergrund und Funktionsweise	3
2.1.2	Genereller Aufbau eines PEF-Systems	7
2.1.3	Relevante Faktoren & Parameter zur Inaktivierung von Mikroorganismen	9
2.1.4	Anwendungsfelder in der Lebensmittelindustrie und Biotechnologie	14
2.2	Herstellungsprozess von Bier und pflanzlichen Milchalternativen	18
2.2.1	Herstellung von Bier	18
2.2.2	Herstellungsprozess von Milchalternativen auf Basis von Hülsenfrüchten ..	21
3	Material und Methoden	25
3.1	Versuchsplanung und Projektübersicht	25
3.2	Versuchsaufbau und Durchführung	28
3.2.1	Herstellung Bierwürze.....	28
3.2.2	Herstellung des Lupinendrinks.....	33
3.2.2.1	Rezepturenentwicklung im Labormaßstab – Phase 1.....	33
3.2.2.2	Rezepturenentwicklung im Labormaßstab – Phase 2.....	37
3.2.2.3	Technikumsmaßstab – Phase 1	40
3.2.2.4	Technikumsmaßstab – Phase 2	45
3.2.3	PEF-Behandlung – Phase 1	46
3.2.3.1	Wasserversuche	46
3.2.3.2	Versuch Bierwürze.....	48
3.2.4	PEF-Behandlung – Phase 2	49
3.2.4.1	Testversuch Wasser – Escherichia coli	49

3.2.4.2	PEF-Behandlung der hergestellten Medien	49
3.2.5	Vor- & Nachbereitung für mikrobiologische Untersuchungen & Analysen ...	50
3.2.5.1	Herstellung der Nährböden, Reagenzien und Inokula	50
3.2.5.2	Beimpfen und Inkubieren der Platten.....	52
3.2.5.3	Gesamtkeimzahlbestimmung und Bestimmung der Keimreduktion	53
3.2.6	physikochemische Untersuchungen	55
3.2.6.1	Stammwürzegehalt	55
3.2.6.2	Viskosität	56
3.2.6.3	pH-Wert	58
3.2.6.4	Leitfähigkeit	58
3.2.6.5	Restfeuchte	59
3.2.7	Statistische Auswertung	59
4	Ergebnisse und Auswertung	60
4.1	Herstellung der Bierwürzen	60
4.2	Herstellung der Lupinendricks	60
4.2.1	Rezepturenentwicklung im Labormaßstab – Phase 1.....	60
4.2.2	Rezepturenentwicklung im Labormaßstab – Phase 2.....	64
4.2.3	Herstellung Lupinendrink im Technikumsmaßstab – Phase 1	65
4.2.4	Herstellung Lupinendrink im Technikumsmaßstab – Phase 2	67
4.3	PEF-Behandlung – Phase 1	68
4.3.1	Technischer Aufbau.....	68
4.3.2	Wasserversuch – Inbetriebnahme und Einarbeitung	69
4.3.3	PEF-Behandlung	70
4.4	PEF-Behandlung – Phase 2	71
4.4.1	Keimreduktion.....	71
4.4.2	Allgemeiner Einfluss der spezifischen Energie bzgl. Keimreduktion	77
4.4.3	Vergleich Lupinendrink – Bierwürze	78
4.4.4	Vergleich <i>Escherichia coli</i> – <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	79

5	Diskussion	81
5.1	Herstellung Bierwürze.....	81
5.2	Herstellung des Lupinendrinks.....	82
5.2.1	Rezepturenentwicklung im Labormaßstab – Phase 1.....	82
5.2.2	Rezepturenentwicklung im Labormaßstab – Phase 2.....	83
5.2.3	Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab – Phase 1.....	84
5.2.4	Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab – Phase 2.....	85
5.3	Technischer Aufbau sowie PEF-Behandlung Phase 1	86
5.4	PEF-Behandlung Phase 2	88
5.4.1	Prozessstabilität, Prozessparameter und mikrobiologische Ergebnisse	88
5.4.2	Einfluss der spezifischen Energie auf die Keimreduktion im Allgemeinen ...	89
5.4.3	Einfluss der Lebensmittelmatrix auf die Keimreduktion von <i>E. coli</i>	90
5.4.4	Vergleich der keimspezifischen Resistenz gegenüber spezifischer Energie	91
6	Zusammenfassung und Ausblick	93
7	Literaturverzeichnis.....	96
8	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	102
9	Anhangsverzeichnis.....	106

Verzeichnis Abkürzungen, Formelzeichen, Einheiten und Symbolen

CCP	critical control point
HACCP	Hazard analysis and critical control points
LEH	Lebensmitteleinzelhandel
LOD	Limit of Detection
PEF	Pulsed-Electric-Field
PFN	pulse-forming-network (dt. „Impulsformungsnetzwerk“)
A	Ampere
d	Tage, Abstand [cm]
E	elektrische Feldstärke [kV/cm]
f	Frequenz [Hz]
Hz	Hertz
I	elektrische Stromstärke [A]
kJ/l	Kilojoule pro Liter (Einheit für die spezifische Energie)
kJ/kg	Kilojoule pro Kilogramm (Einheit für die spezifische Energie)
kV/cm	Kilovolt pro Zentimeter (Einheit für die elektrische Feldstärke)
KbE	Keimbildende Einheiten
KbE/ml	Keimbildende Einheiten pro Milliliter
ml	Milliliter
mS/cm	Millisiemens pro Zentimeter
mV	Millivolt
N	Drehzahl [min^{-1}]
n	Pulsanzahl
Q, $\dot{V}$, $\dot{m}$	Durchfluss [l/h; kg/h]
s	Sekunden
U	elektrische Spannung [V]
V	Volt; Volumen [l]
W	spezifische Energie [kJ/kg, kJ/l]
μs	Mikrosekunden
σ	Standardabweichung; Leitfähigkeit [mS/cm]

ρ	Dichte [kg/m^3 , g/cm^3]
η	Viskosität [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]
$\emptyset$	Durchmesser/Mittelwert
τ	Pulsdauer [s]
c_p	spezifische Wärmekapazität [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
$^{\circ}\text{P}$	Grad Plato (Einheit für Stammwürzegehalt)
ΔT	Temperaturunterschied [K]

1 Einleitung

Der steigende Bedarf an qualitativ hochwertigen, gleichzeitig frischen und nährstoffschonend verarbeiteten Lebensmitteln ist für die globale Lebensmittelindustrie eine große Herausforderung (Raso et al., 2022). Während konventionelle thermische Verfahren zur Haltbarmachung von Lebensmitteln zwar eine sehr große mikrobiologische Sicherheit gewähren, führen diese doch oft zu unerwünschten Beeinträchtigungen von sensorischen und nutritiven Eigenschaften, wie z.B. der Kochgeschmack bei Milch oder der Verlust von thermolabilen Vitaminen in Säften (Kantala et al., 2022). Um den Bedarf an oben genannten Lebensmittel zu decken, haben in den letzten Jahrzehnten non-thermale Technologien erheblich an Bedeutung gewonnen (Raso et al., 2022). Eine mitunter sehr vielversprechende Methode ist dabei die Behandlung mit gepulsten elektrischen Feldern (PEF, Abk. für pulsed electric fields), welche mehrere Vorteile gegenüber thermalen Behandlungsmethoden aufweist (Lytras et al., 2024). Anwendung findet diese Methode u. a. in der Getränkeindustrie zur Inaktivierung von pathogenen Mikroorganismen in Frucht- oder Gemüsesäften (Töpfl et al., 2005) oder in der gemüseverarbeitenden Industrie, um das Schnittbild zu verbessern und Energie einzusparen (DLG, 2018).

Das physikalische Grundprinzip beruht dabei auf dem Phänomen der Elektroporation, wobei das behandelnde Lebensmittel mit sehr kurzen elektrischen Pulsen einem elektrischen Feld ausgesetzt ist. Dadurch wird eine Spannung induziert, welches das Transmembranpotential in den pflanzlichen, tierischen oder bakteriellen Zellen erhöht. Aufgrund dessen entstehen entlang der Membran in der Lipiddoppelschicht Poren, die je nach Höhe der Feldstärke reversible oder irreversible sind. Im letzten Fall führt dies zum Zelltod (DLG, 2018).

Die Effektivität von gepulsten elektrischen Feldern, vor allem zur Inaktivierung bestimmter Mikroorganismen, ist bereits in vielen verschiedenen Studien nachgewiesen. Was bei der Betrachtung der einzelnen Reviews, Studien und Versuche aber auffällt, ist, dass viele der genutzten Volumina (Batch-Verfahren) bzw. Durchflussraten (kontinuierliche Verfahren) relativ gering sind und zwischen wenigen Millilitern und einigen Litern liegen. Außerdem liegt der Fokus oft auf Frucht- bzw. Gemüsesäften sowie auf verschiedenen Milchprodukten. Im Vergleich dazu ist die Anzahl von Studien mit anderen Lebensmittelgruppen, wie pflanzlichen Milchalternativen oder alkoholischen Getränken, deutlich geringer (Niu et al., 2020; Nabilah et al., 2022; Lytras et al., 2024). Das Ziel dieser Arbeit ist es

daher, mögliche Wissenslücken bezüglich Effektivität einer PEF-Behandlung zur Inaktivierung von Mikroorganismen anhand mehrerer Lebensmittelmatrizes zu schließen und gleichzeitig eine Möglichkeit zum „Scale-up“ vom Labormaßstab zum Technikumsmaßstab mit einer höheren Durchflussrate für kontinuierliche Prozesse zu schaffen.

Aus diesem Ziel lässt sich für diese Arbeit die Forschungsfrage ableiten, inwieweit sich eine kontinuierliche Verfahrensweise zur Keimreduktion mittels gepulster elektrische Felder (PEF) erfolgreich vom Labormaßstab in den Technikumsmaßstab übertragen lässt. Hinzuzufügen ist dazu die spezifische Forschungsfrage, inwiefern die Lebensmittelmatrix (Lupinendrink und Bierwürze) sowie die Zielorganismen die Keimreduktion unter den gegebenen Bedingungen beeinflussen aber auch, in welchem Maße die Prozessparameter mit der Keimreduktion korrelieren.

Da zurzeit kein Lupinendrink kommerziell zu erwerben ist (Stand 2025), wird für diese Arbeit, auf Basis einer selbst entwickelten Rezeptur, gleichermaßen die Forschungsfrage eingebaut, inwiefern die Rezeptur konzipiert werden muss, damit der Lupinendrink unter den Bedingungen einer kontinuierlichen PEF-Behandlung eine ausreichende Prozessstabilität im Bezug zur Pumpbarkeit besitzt und ähnliche rheologische Eigenschaften wie Kuhmilch oder kommerzielle Milchalternativen vorweist.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Hochspannungsimpulsbehandlung in der Lebensmittelindustrie

2.1.1 Hintergrund und Funktionsweise

Die Hochspannungsimpulsbehandlung, auch bekannt als Pulsed Electric Fields oder Behandlung mit gepulsten elektrischen Feldern, stellt ein innovatives, nicht-thermisches Verfahren in der Lebensmittelindustrie und Bioverfahrenstechnik zum Zellaufschluss tierischer oder pflanzlicher Zellen durch kurze, energiereiche elektrische Pulse dar (DLG, 2024). Den Ursprung hatte dieses Verfahren vor ca. 100-120 Jahren, als mit Gleich- und Wechselströmen verschiedene Lebensmittel behandelt wurden, um Keime abzutöten oder bessere Extraktionsergebnisse zu erzielen. Diese damalige Prozedur ist heutzutage bekannt als Ohm'sches Erhitzen. Im Verlaufe des 20. Jahrhundert und nach weiteren technischen Entwicklungen und Versuchen, vorrangig in der damaligen UdSSR und später in Deutschland, wurde dann der Begriff „Pulsed-Electric-Fields“ etabliert (Raso et al., 2022).

In der Lebensmittelindustrie findet die Hochspannungsimpulsbehandlung heutzutage in vielen Branchen Anwendung. Neben der Gemüseindustrie für Kartoffeln oder andere Gemüsearten, zählen dazu auch die Getränke- und Fleischindustrie sowie die spezielle Biotechnologie. Grundsätzlich wird das Verfahren eingesetzt, um pathogene und unerwünschte Mikroorganismen zu inaktivieren oder die Extraktion bzw. den Stoffaustausch wertvoller Inhaltsstoffe zu verbessern. Weitere Anwendungsfelder beziehen sich auf Texturverbesserungen sowie -erhalt beim Blanchieren oder Trocknungsprozessen (DLG, 2024).

Die Funktionsweise einer Behandlung mit pulsierenden elektrischen Feldern besteht durch die schlagartige Entladungen eines integrierten Kondensators, wodurch Hochspannungsimpulse generiert werden, welche dann über eingebaute Elektroden an das zu behandelnde Produkt übertragen werden (SKLM, 2007). Der primäre Wirkmechanismus dabei ist die sogenannte Elektroporation (Saulis, 2010). Zellen, egal ob pflanzlichen, tierischen oder bakteriellen Ursprungs, besitzen eine semipermeable Membran, bestehend aus einer Doppellipidschicht aus Phospholipiden, und wahlweise Proteinkomplexen, die als Tunnel und Pumpen für verschiedene, spezifische Moleküle fungieren. Hauptaufgabe dieser Zellmembran ist der Schutz vor äußerlichen Einflussfaktoren sowie Stofftransport (Kotnik et al., 2012). Das Grundprinzip des Stofftransports beruht auf dem sogenannten

Transmembranpotential bzw. der Membranspannung (Witt et al., 2021), welche alle Zellen, aufgrund eines Konzentrationsgradienten von geladenen Ionen über die gesamte Membran, ausbilden. Der Stofftransport erfolgt dann durch eine Änderung des Konzentrationsgradienten von Ionen, u. a. ausgelöst durch Ionenpumpen, wodurch sich entweder verschiedene Tunnel (Proteinkomplexe) oder die Membran selbst öffnet und Poren bildet. (Warren & Payne, 2015). Diese Porenbildung kann wiederum durch das Anlegen eines externen elektrischen Feldes erzeugt werden, wodurch eine Spannung induziert wird und es zu einer Änderung des Membranpotentials kommt. Dieser Prozess nennt sich Elektroporation bzw. Elektropermeabilisierung, welcher in 4 Schritte gegliedert werden kann (DLG, 2018).

(1) Steigerung des Membranpotentials durch Erzeugung und Anlegen eines externen elektrischen Feldes

Das Ruhepotential zwischen der Zellmembran liegt bei ca. -40 bis -70 mV (Warren & Payne, 2015). Beim Anlegen eines elektrischen Feldes kommt es zur Bewegung der elektrischen Laden innerhalb der Zelle, was zu einer Steigerung des Membranpotential führt, welches bis zu 1 V erreichen kann (Witt et al., 2021).

(2) Porenformation

Durch die Erhöhung des Membranpotential und Erreichen eines kritischen Wertes kommt es zur Bildung von hydrophilen Poren innerhalb der Zellmembran (Saulis, 2010). Faktoren wie die Zellgröße und -form, Medium sowie Prozesskonditionen (Temperatur, pH-Wert) sind ausschlaggebend für den kritischen Wert. Zum Beispiel sinkt die benötigte Feldstärke zur Porenbildung bei höheren Temperaturen, da es zur Senkung der Viskosität der Phospholipide kommt. Die Membran ist dementsprechend flüssiger und der Energieeintrag zur Porenbildung ist geringer (Witt et al., 2021). In der Regel liegt dieser Wert zwischen 0,2 und 1 V (Chen et al., 2006).

(3) Entwicklung der Poren

Innerhalb des Prozesses, welche ein paar Nano- bis Millisekunden andauern kann, verändern sich die Poren je nach Feldstärke, Pulsform, Dauer und Höhe des Energieeintrag. Je höher die elektrische Feldstärke, desto mehr Poren werden gebildet. Außerdem gilt, Pulse, welche eine Dauer im Bereich von Nanosekunden aufweisen, erzeugen mehr kleinere Poren in größerem Maße (Witt et al., 2021).

(4) Nachlaufphase

Nachdem es durch die Einwirkung des elektrischen Feldes zur Porenbildung kam, sind folgende Zustände zu beobachten: (a) Schließung der Poren, (b) Ausströmen von interzellulären Bestandteilen und (c) Einstromen von extrazellulären Bestandteilen (Saulis, 2010). Punkt (a) fällt unter den Begriff reversible Elektroporation, bei dem sich die hydrophilen Poren nach kurzer Zeit wieder schließen. Punkt (b) und (c) fallen unter die Begrifflichkeit irreversible Elektroporation, wobei sich die hydrophilen Poren zu hydrophoben umwandeln, welche nicht mehr geschlossen werden können. Dieser irreversible Vorgang führt zu einer dauerhaften Schädigung der Zellen, wodurch die Zelle abstirbt oder keine Vermehrung mehr stattfinden kann (DLG, 2018).

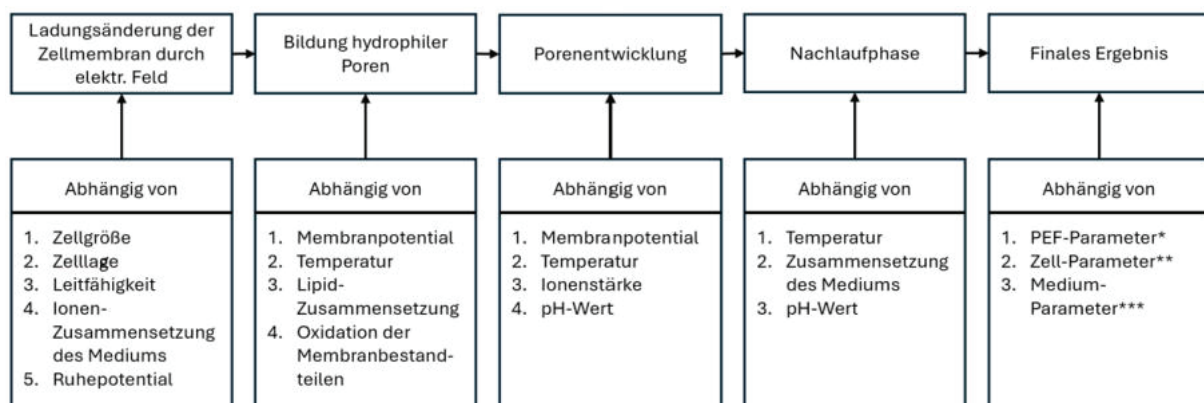


Abb. 1: Hauptphasen der Einwirkung eines elektrischen Feldes auf die Zellmembran (Saulis, 2010) * wie Pulsamplitude, -dauer, -form, -anzahl, Feldstärke, Energieeintrag, Behandlungszeit ** wie Größe, Form, Lage, Leitfähigkeit *** wie Temperatur, Zusammensetzung, Dicke/Größe, Leitfähigkeit, Ionenstärke, pH-Wert

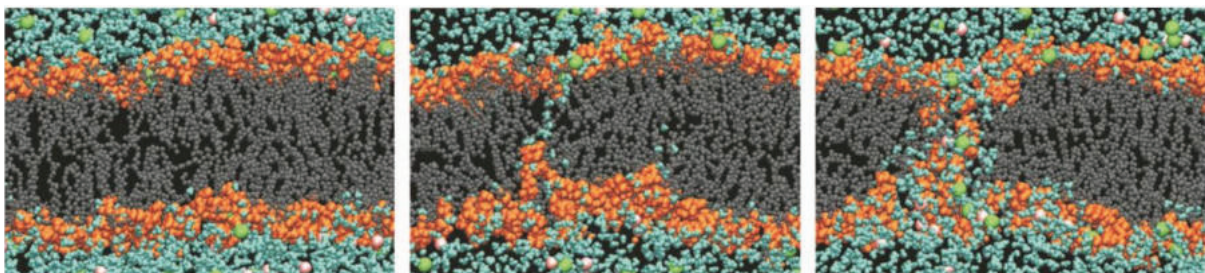


Abb. 2: Simulation einer sich öffnenden Pore in der Zellmembran bei Einwirkung eines elektrischen Feldes. Links: Geschlossene/intakte Zellmembran. Mitte: Phospholipide (grau-orange) weichen zur Seite, Wassermoleküle dringen ein (blau). Rechts: Pore vergrößert sich weiter und Natrium-Ionen (grün) können eindringen. (Kotnik et al., 2012)

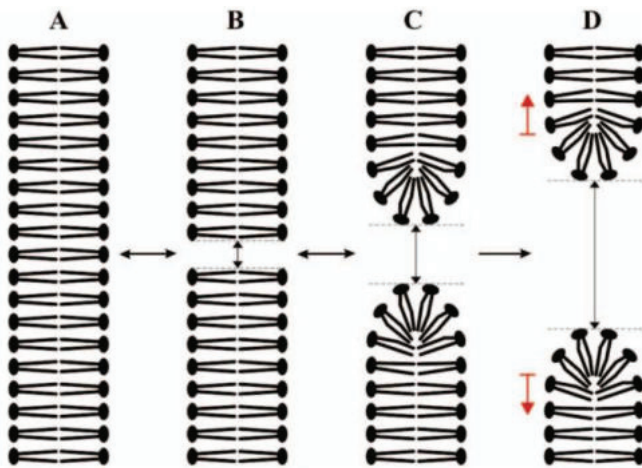


Abb. 3: Darstellung der Elektroporation an der Zellmembran. A: Doppellipidschicht ohne Poren. B: Doppellipidschicht mit hydrophober Pore. C: Entstehung einer reversiblen, hydrophilen Pore. D: Entstehung einer irreversiblen, hydrophilen Pore. (Kotnik et al., 2012)

Die Bildung von reversiblen oder irreversiblen Poren ist grundsätzlich abhängig von der Behandlungsintensität (elektr. Feldstärke sowie Anzahl und Dauer der elektr. Pulse), der Produktspezifikation und der Beschaffenheit der jeweiligen Zelle (Größe, Form, Lage, Leitfähigkeit) (siehe Abb. 1, S. 1). Bei relativ kurzen Pulsen (1-100 μ s) und einer Feldstärke im Bereich von 0,1-1 kV/cm kommt es zu einer reversiblen Permeabilität von pflanzlichen Zellen, was bedeutet, dass zwar Poren gebildet werden, diese sich aber nach einer gewissen Zeit wieder schließen (siehe Abb. 3, S. 6). Ab 0,5-3 kV/cm kommt es zu einer irreversiblen Elektroporation in pflanzlichen sowie tierischen Zellen. Bakterien sind hingegen deutlich resistenter und müssen mit einer Feldstärke von 10 bis 15 kV/cm behandelt werden, um eine irreversible Porenbildung hervorzurufen (Töpfl, 2006), wobei die Art der Mikroorganismen (Typ, Größe, Form, Aufbau Zellwand) eine sehr wichtige Rolle spielt (Aronsson et al., 2001). Die Reihenfolge der Resistenz gegenüber einer Behandlung mit PEF bezüglich Mikroorganismen ist: Sporen $\rightarrow$ Gram-positive MO $\rightarrow$ Gram-negative MO $\rightarrow$ Hefen, wobei Sporen die höchste Resistenz aufweisen (Nabilah et al., 2022; Aronsson et al. 2001). Eine eingehendere Erklärung der einzelnen Faktoren und Parameter zur Inaktivierung von Mikroorganismen wird im Kapitel 2.1.4 „Relevante Parameter zur Inaktivierung von Mikroorganismen“ beschrieben.

2.1.2 Genereller Aufbau eines PEF-Systems

Im Allgemeinen besteht ein PEF-System aus einem Hochspannungsgenerator, einem Energiespeicher in Form von Kondensatoren, einem Strombegrenzer und einem elektrischen Schalter zur Entladung der gespeicherten Energie. Diese Bauteile lassen sich unter dem Begriff „pulse-forming-network“, kurz PFN, zusammenfassen. Aufgrund der starken Hitzeentwicklung ist außerdem ein Kühlsystem notwendig, um den Generator herunterzukühlen. Steuerungssysteme zur Überwachung technischer Parameter, wie Spannung, Strom, Durchfluss oder Temperatur, sind weitere Bestandteile eines PEF-Systems (Mohamed & Eissa, 2012). Je nach Verwendungszweck können weitere Bauteile angebracht werden. So muss für eine kontinuierlich wirkende Verfahrensweise eine Pumpe vorgeschaltet werden. Für eine Vortemperierung auf eine gewünschte Behandlungstemperatur sowie das Abkühlen nach der Behandlung sind Wärmetauscher zu installieren (Abb. 4) (DLG, 2018).

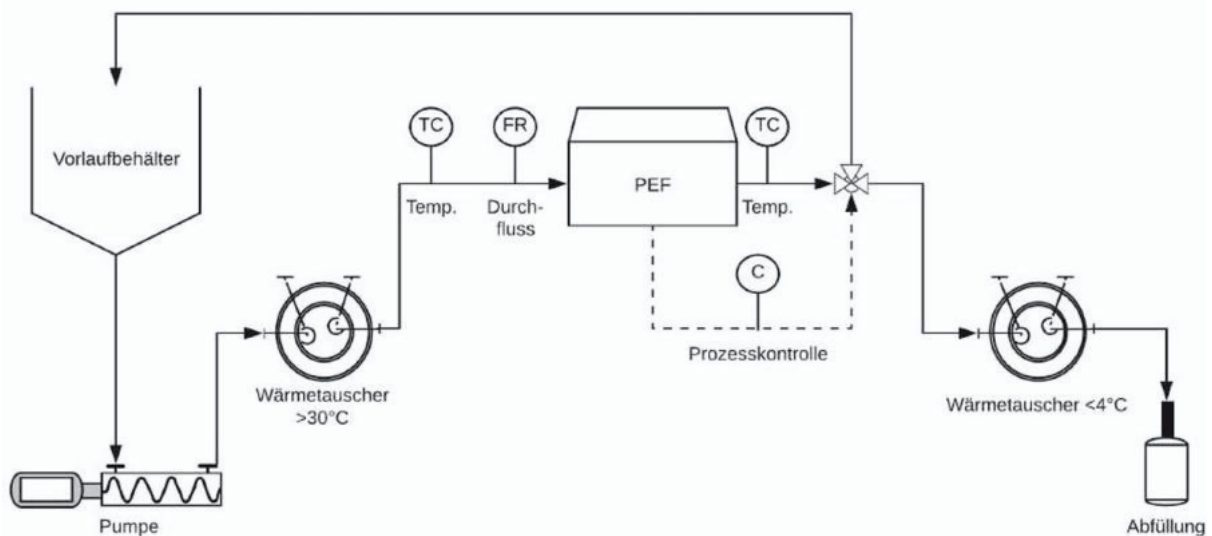


Abb. 4: Vereinfachtes Fließschema eines kontinuierlichen PEF-Systems zur Keimreduktion von Flüssigkeiten (DLG, 2018)

Neben dem PFN ist die Behandlungskammer ein weiterer wichtiger Bestandteil eines PEF-Systems. Sie besteht aus mindestens zwei Elektroden sowie einem Isolator, welcher die Elektroden voneinander trennt (Witt et al., 2021). Man unterscheidet dabei zwischen zwei Varianten, dem Batch-Verfahren (chargenweise) und der kontinuierlichen Behandlung, welche eine weitere Verrohrung benötigt, damit das Produkt durch die Kammer strömen kann. Batch-Systeme werden grundlegend für feste oder halbfeste/stückige

Suspensionen verwendet, wohingegen kontinuierliche Systeme für flüssige sowie stückige Suspensionen geeignet sind (Mohamed & Eissa, 2012).

Das Design bzw. die Anordnung der Komponenten muss präzise ausgewählt werden, um homogene elektr. Felder zu gewährleisten und um Toträume zu vermeiden. Im Falle eines kontinuierlichen Systems darf die Verrohrung diesbezüglich keine Krümmungen aufweisen. Sollten inhomogene Felder auftreten, kann dies entweder zu geringen oder zu hohen Energieeinträgen führen. Bei Ersterem werden Mikroorganismen nicht ausreichend abgetötet, was zu einer Rekontamination führt. Bei einem zu hohen Eintrag kommt es zu einer starken Temperaturerhöhung, wodurch temperaturempfindliche Inhaltsstoffe zerstört werden können.

Insgesamt gibt es 3 verschiedene Elektrodenanordnungen: parallel, coaxial und kolinear (Abb. 5, S. 9). Die parallele Bauweise ist eine einfache Konfiguration, welche aus zwei parallelen Elektroden, die voneinander durch einen Isolator getrennt sind, besteht. Parallele Konfigurationen sind dabei durch große Elektrodenoberflächen und geringe spezifischen elektr. Widerstand gekennzeichnet, was zu einem homogenen elektr. Feld führt, welches aber wiederum durch erhöhte Elektrodenkorrosion limitiert ist. (Witt et al., 2021; Raso et al., 2016). Anwendung findet diese Art von Elektroden-Anordnung vor allem in Batch-Systemen (Mohamed & Eissa, 2012). Die coaxiale Bauweise besteht aus einer inneren sowie äußeren zylindrischen Elektrode, welches es dem Produkt ermöglicht, zwischen beiden entlang zu strömen. Aufgrund der kleinen Öffnung ist diese Art nicht für Produkte mit einer mittleren bis hohen Viskosität geeignet. Beim kolinearen Aufbau werden eine Reihe von hohlen, zylindrischen Elektroden durch Isolatoren getrennt. Aufgrund der großen Öffnung können Produkte mit hohen Viskositäten behandelt werden. Um die Inaktivierung von Mikroorganismen zu steigern, ist es nötig, mehr Elektroden zu nutzen, was die Behandlungsdauer erhöht und dafür sorgt, dass mehr Zellen dem elektrischen Feld ausgesetzt sind. Im Gegensatz zur parallelen Konfiguration wird bei dem kolinearen Aufbau ein geringerer Strom benötigt. Durch die Anzahl mehrerer Isolatoren und Elektroden kommt es aber zu einem weniger homogenen elektr. Feld. Für kontinuierliche Systeme werden eher die beiden letzteren Konfigurationen angewandt (Witt et al., 2021; Raso et al., 2016).

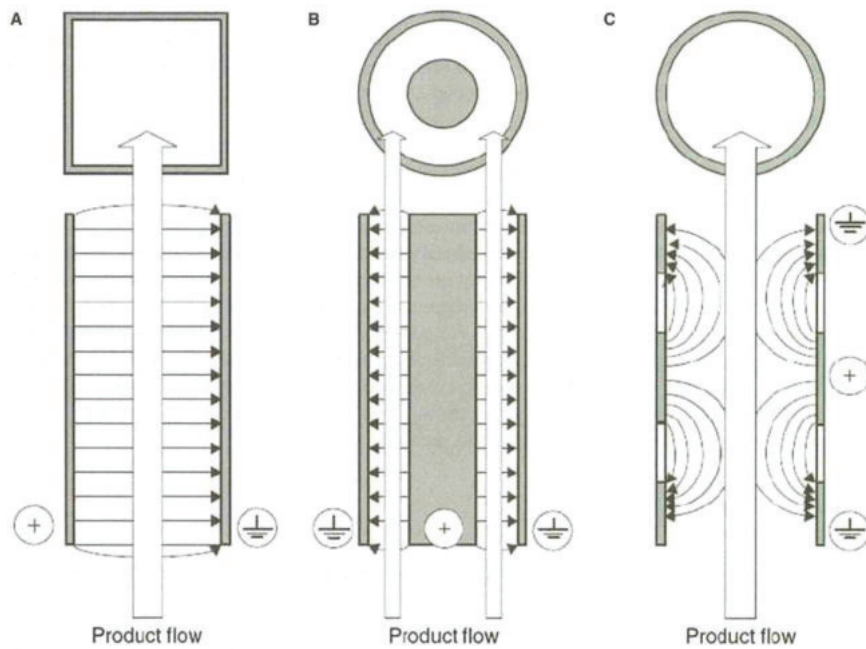


Abb. 5: Konfigurationen von Elektroden-Anordnungen in einer Behandlungskammer (A) Parallel, (B) Koaxial, (C) Kollinear. (Witt et al., 2021).

2.1.3 Relevante Faktoren & Parameter zur Inaktivierung von Mikroorganismen

Die Wirksamkeit der Behandlungen mit gepulsten elektrischen Feldern zur Inaktivierung von pathogenen Mikroorganismen wird durch ein komplexes Zusammenspiel mehrerer Faktoren und Parameter bestimmt (Lytras et al., 2024). Wie eingangs beschrieben, lassen diese sich in drei Kategorien unterteilen (Tab. 1).

Tab. 1: Zusammenfassung beeinflussender Faktoren/Parameter zur Inaktivierung von MO (Witt et al., 2021)

Kategorie	Kritische Faktoren/Parameter	Effekt auf die Inaktivierung
Prozess	Elektr. Feldstärke	Erhöhung
	Spezifische Energie	Erhöhung
	Pulsform	Ordnung nach Effektivität: Os- zillierend < Exponentiell abfal- lend < Rechteck
Produkt	Behandlungstemperatur	Erhöhung

	Leitfähigkeit	Abhängigkeit zwischen Generator und Durchfluss
	pH-Wert	↓ pH-Wert = ↑ Inaktivierung*
	Ionenstärke	↓ Ionenstärke = ↑ Inaktivierung
Mikroorganismus	Typ	Anfälligkeit: Hefen < Gram-negativ < Gram-positiv < Sporen
	Wachstumsphase	Anfälligkeit: logarithmisch < stationär

* pH-Wert hat keinen Einfluss auf die Effektivität einer PEF-Behandlung; gilt als zusätzliche Hürde für Vermehrung/Überleben einiger MO

Die elektr. Feldstärke E [kV/cm] ist mitunter die wichtigste Stellgröße, welche die Inaktivierung von Mikroorganismen bestimmt, da erst ab einem bestimmten Wert (abhängig von Zellart und -typ) eine irreversible Porenformation vonstattengehen kann (Raso et al., 2022). Für die Etablierung in die Lebensmittelindustrie ist dies ein wichtiger „critical control point“ im HACCP-System, um sicherzustellen, dass die Behandlung nachweislich funktioniert und für eine ausreichende Reduktion sorgt. Zum Beispiel benötigen kleinere Zellen eine höhere Feldstärke als größere Zellen. Eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke führt zu einer effektiveren Behandlung, welche aber aufgrund der elektrischen Durchschlagfestigkeit des Produkt limitiert ist. Zu hohe Werte (ab 60-80 kV/cm) können entweder Überschläge/Lichtbögen auslösen, die die Elektroden beschädigen können, oder zu einer Zersetzung des Produkt in ungewollte chemische Stoffe führen.

Die elektr. Feldstärke ist der Quotient aus der angelegten Spannung U [kV] und dem Elektrodenabstand d [cm] (Töpfl, 2006; Witt et al., 2021).

$$E = \frac{U}{d}$$

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Effektivität und Effizienz einer PEF-Behandlung ist die spezifische Energie W_s [kJ/kg, kJ/l], also die Energie die pro Masse- oder Volumeneinheit eingetragen wird, da sie unter anderem die thermische Belastung der Behandlung

auf das Produkt bestimmt und gleichermaßen ein Maß für die Wirtschaftlichkeit darstellt, da damit die Kosten pro Behandlung berechnet werden können. Eine Abhängigkeit besteht dabei zur Pulsenergie W_{Puls} [J], zur Frequenz f [Hz] und zum Durchfluss $\dot{m}$ [kg/h] bzw. $\dot{V}$ [l/h]. Die elektrische Energie lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$W_s = \frac{W_{Puls} * f}{\dot{m}}$$

$$W_s = \frac{W_{Puls} * f}{\dot{V}}$$

Die Pulsenergie W_s ist wiederum abhängig von der Spannung U [V], vom Strom I [A] sowie der Pulsdauer bzw. Pulsbreite τ [s], wofür gilt:

$$W_{Puls} = U * I * \tau$$

Eine Erhöhung der spezifischen Energie korreliert mit einer höheren Inaktivierung, da die Wahrscheinlichkeit und Dauer einer Porenbildung zunimmt. Gleichzeitig sorgt zu viel eingetragene Energie zu einer Temperaturerhöhung, durch das Prinzip der Joule'schen Erwärmung, die die Qualität des Produktes beeinträchtigt. Die Temperaturerhöhung ΔT [K] ist dabei direkt proportional zur spezifischen Energieeintragung W_s [kJ/kg] und abhängig von der spezifischen Wärmekapazität c_p [kJ/(kg*K)] des zu behandelnden Produktes. Berechnen lässt sie die mögliche Temperaturerhöhung folgend:

$$\Delta T = \frac{W_s}{c_p}$$

Laut Studien reichen meist Energieeinträge zwischen 40 und 150 kJ/kg bzw. kJ/l für eine ausreichende Inaktivierung. Des Weiteren gilt, dass bei konstantem Energieeintrag eine höhere Feldstärke effektiver ist als eine Erhöhung der spezifischen Energie (Töpfl, 2006; Jäger, 2012; Witt et al., 2021, Lytras et al., 2024).

Die Pulsdauer bzw. Pulsbreite τ ist des Weiteren abhängig von der Pulsform. Grundsätzlich gibt es vier verschiedene Pulsformen: unipolare/bipolare Rechteckpulse und unipolare/bipolare exponentielle Pulse (Abb. 6).

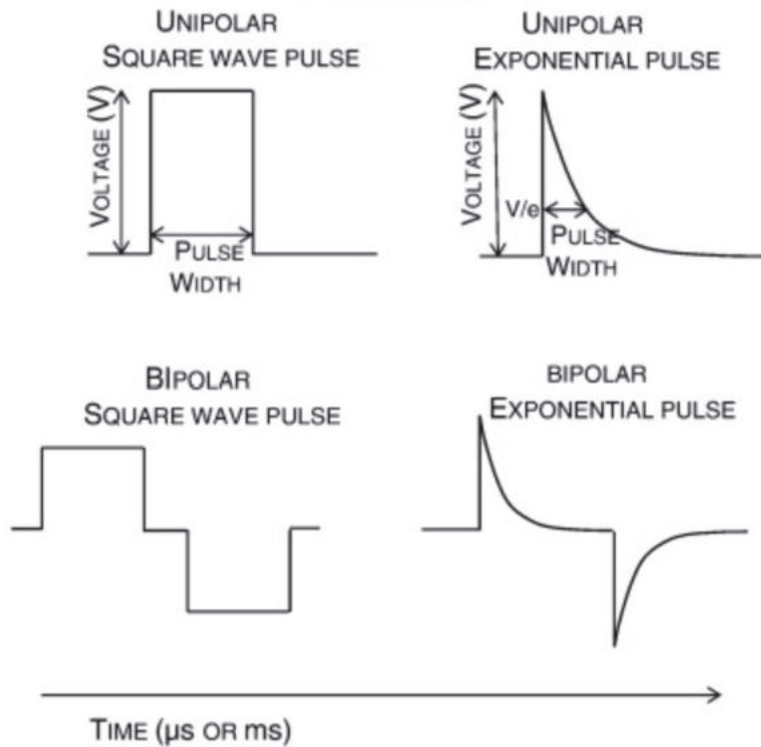


Abb. 6: Darstellung der unipolaren/bipolaren Rechteckpulsform (links oben/unten) und unipolaren/bipolaren exponentiellen Pulsform (rechts oben/unten) (Raso et al., 2016)

Rechteckpulse sind gegenüber den exponentiellen Pulsen deutlich energieeffizienter, da diese die erforderliche Feldstärke zur irreversiblen Porenbildung über die gesamte Pulsdauer halten können. Es wurde ermittelt, dass exponentielle Pulsformen eine um 62% geringere Energieeffizienz aufweisen, als Rechteckpulse. Außerdem führt der lange Auslaufbereich dieser Pulsform zu einer zugeführten Energie, die zu gering für eine Inaktivierung wäre und trotzdem zum Erwärmen des Mediums führt. (Raso et al., 2016; Töpfl, 2006; Töpfl et al., 2006a; Raso et al., 2022)

Neben der elektrischen Feldstärke ist die Behandlungszeit t [s] ein weiterer ausschlaggebender Parameter, welcher die Letalität einer PEF-Behandlung bestimmt. Die Behandlungszeit ist als die effektive Gesamtzeit definiert, in welcher die Mikroorganismen der Behandlung bzw. dem elektrischem Feld ausgesetzt sind. Sie ist das Produkt aus der Pulsdauer bzw. Pulsbreite τ [s] und der Anzahl der Pulse n .

$$t = \tau * n$$

Die Anzahl der Pulse lässt sich dabei aus der Frequenz f [Hz] und der Verweilzeit t_{verweil} [s] des Mediums in der Behandlungskammer ermitteln:

$$n = f * t_{\text{Verweil}}$$

Die Verweilzeit ist wiederum der Quotient aus dem Volumen V [l] der Behandlungskammer und dem Durchfluss $\dot{m}$ [kg/h] bzw. $\dot{V}$ [l/h].

$$t_{\text{Verweil}} = \frac{V_{\text{Kammer}}}{\dot{m}} * 3600$$

$$t_{\text{Verweil}} = \frac{V_{\text{Kammer}}}{\dot{V}} * 3600$$

Die Behandlungszeit kann verlängert werden, indem die Anzahl der Pulse oder die Pulsdauer/-breite erhöht wird. Eine längere Behandlungszeit bedeutet eine erhöhte Inaktivierung. Da aber gleichzeitig die spezifische Energie erhöht wird, aufgrund des Zusammenhanges mit der Pulsbreite und der Frequenz, erhöht sich gleichermaßen auch die Temperatur, was zu unerwünschten Nebenwirkungen bezüglich Qualität führen kann (Jäger, 2012; Witt et al., 2021, Raso et al., 2022, Lytras et al., 2024).

Wie im Kapitel 2.1.1 „Hintergrund und Funktionsweise“ bereits beschrieben, ist die Prozesstemperatur eine weitere wichtige Stellgröße, um u. a. die Wirtschaftlichkeit und Effizienz zu verbessern. Durch eine Temperaturerhöhung des zu behandelnden Mediums auf über 30 °C wird die Lipiddoppelschicht der Membran der Mikroorganismen flexibler, wodurch weniger Energie zur Porenbildung nötig ist (Witt et al., 2021).

Die elektrische Leitfähigkeit σ [S/m] des Mediums hat wiederum einen Einfluss auf die elektrische Feldstärke sowie die thermische Belastung dessen. Die Leitfähigkeit ist umgekehrt proportional zum elektrischen Widerstands R [Ω] der Behandlungskammer.

$$\sigma = \frac{1}{R}$$

Liegt eine hohe Leitfähigkeit des Mediums vor, sinkt damit der elektrische Widerstand. Aufgrund des Zusammenhanges des elektrischen Widerstandes mit der Spannung führt dies im Inneren der Behandlungskammer zu einem Spannungsfall, der mit einer Erhöhung des elektrischen Stroms kompensiert werden müsste. Folgendermaßen sinkt die elektrische Feldstärke und damit theoretisch die Effektivität zur Inaktivierung. Bezüglich des Einflusses der Leitfähigkeit auf die Inaktivierung von Mikroorganismen gibt es aber unterschiedliche Bewertungen. Im Gegensatz dessen sollte die Leitfähigkeit auch nicht zu gering sein, da dadurch ein zu hoher Widerstand entsteht, welcher den Stromfluss begrenzt. Da die Pulsenergie W_{Puls} proportional zum Strom sinkt und damit auch die

spezifische Energie W_s verringert wird, müsste die Frequenz oder Durchfluss gesenkt werden (Jäger, 2012; Raso et al., 2022).

Bzgl. des pH-Wertes lässt sich des Weiteren sagen, dass nicht in allen Fällen eine Senkung dessen zu einer Erhöhung der Keimreduktion führt. Studien haben ergeben, dass im Allgemeinen Gram-positive Bakterien bei einem neutralen pH-Wert eine höhere Resistenz gegenüber einer PEF-Behandlung vorweisen als in einem sauren Milieu. Gram-negative Bakterien hingegen sind bei niedrigeren pH-Werten resistenter als bei einem neutralen pH-Wert. Für Hefen und Schimmelpilzen wurde dabei kein signifikanter Unterschied zwischen niedrigem oder neutralem pH-Wert gemessen (Raso et al., 2022; Lytras et al., 2024).

Aufgrund genannter Parameter und Faktoren, welche wichtig sind für eine effektive PEF-Behandlung, umfasst die industrielle Integration verschiedene Punkte. Zum einen ist eine automatisierte Abfolge von Vorwärmung, sensorischer Überwachung und Kühlung von Nöten, wobei die PEF-Behandlung als finaler Inaktivierungsschritt den zentralen CCP im HACCP-System darstellt. Die Überwachung der CCP sollte sich primär auf die elektrische Feldstärke, die spezifische Energie und die Prozesstemperatur fokussieren, da diese Parameter die Letalität bestimmen und aufgrund dessen innerhalb validierter Sicherheitsgrenzwerte liegen müssen. Zum anderen sollten Sensoren zur technischen Kontrolle kontinuierlich Spannung, Strom, Pulsfrequenz sowie die Durchflussrate messen. Da der spezifische Energieeintrag immer zu einer gewissen Temperaturerhöhung führt, kann ein Abgleich mit dem berechneten Joule'schen Temperaturanstiegs mit der realen Auslasstemperatur als weitere zusätzliche Validierung angesehen werden. Um mögliche Fehlbehandlungen, Kontaminationen oder Mischphasen zu entfernen, ist es außerdem ratsam, ein Auslassventil zu installieren, um die Produktsicherheit zu gewährleisten (Witt et al., 2021).

2.1.4 Anwendungsfelder in der Lebensmittelindustrie und Biotechnologie

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, kommt eine Behandlung mit gepulsten elektrischen Feldern in der Lebensmittelindustrie sowie in der Biotechnologie in verschiedenen Bereichen vor. Grundlegend ist das Ziel ist entweder ein Stoffaustausch (Extraktion oder Einbringen von Stoffen in eine Zelle), Textur- bzw. Konsistenzverbesserungen oder eine Keimreduktion bzw. -abtötung von pathogenen oder lebensmittelverderblichen

Mikroorganismen (DLG, 2024). Die Nutzung bietet aber auch weitere Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren bezüglich der Inaktivierung von Keimen. So können bei thermischen Behandlungen, wie z.B. Pasteurisation oder Sterilisation, Veränderungen im Lebensmittel auftreten, die sich negativ auf die Qualität ausüben, wie z.B. Geschmack, Farbe oder Textur. Durch die Behandlung mit kurzen Hochspannungsimpulsen entfällt der direkte Einsatz von hohen Temperaturen, wodurch diese Effekte nicht mehr auftreten (Mohamed & Eissa, 2012). Gleichzeitig bleiben wichtige Nähr- und Inhaltsstoffe wie Vitamine und sekundäre Pflanzenstoffe (Carotinoide, Anthocyane, Polyphenole, etc.) aber erhalten (Alkanan et al., 2024). Des Weiteren sorgen PEF-Behandlungen zu einer signifikanten Reduktion des Energieverbrauches, der CO₂-Emissionen und des Wasserverbrauches gegenüber konventionellen thermischen sowie mechanischen Verfahren in der Lebensmittelindustrie, Abwasserbehandlung und der Biotechnologie. Studien ergaben z.B., dass bei der Pasteurisation von Fruchtsäften mittels gepulsten elektrischen Feldern der Stromverbrauch um 20 %, der Gasverbrauch um 60 %, CO₂-Emissionen um ca. 30 % und der Wasserverbrauch um 25 % im Vergleich zur traditionellen Hochtemperatur-Kurzzeit-Pasteurisation gesenkt werden können. Dies trifft aber nur zu, wenn die Behandlungstemperatur über 30 °C liegt (Landi et al., 2025). Es wurde u. a. bestätigt, dass bei einer Erhöhung der Behandlungstemperatur von 35 zu 55 °C die benötigte elektrische Energie zur Inaktivierung von *Escherichia coli* in Orangensaft um 6 log-Stufen von über 100 auf 40 kJ/kg gesenkt werden konnte. Zwar erreichte die Ausganstemperatur des Produkts 66 °C, die benötigte Energie belief sich aber auf 357 kJ/kg im Gegensatz zu ungefähr 700 kJ/kg bei der konventionellen Wärmebehandlung (Töpfl et al., 2006b).

Weitere Möglichkeiten der Energieeinsparung sind in der Kartoffelindustrie zu finden. Herkömmlicherweise werden Kartoffel für die Herstellung von Pommes zunächst erhitzt, um diese weicher für die Weiterverarbeitung zu machen und Enzyme zu inaktivieren. Durch die Nutzung von gepulsten elektrischen Feldern kann der Wasser- und Energieverbrauch um 90 % gesunken werden. Weitere Vorteile für die Kartoffelindustrie sind die Verringerung von Brüchen der Pommes durch die erhöhte Flexibilität, ausgelöst durch das Öffnen der Zellmembran, sowie die Reduzierung des Fettgehaltes um 10 % aufgrund der geringeren Oberfläche der Pommes, da ein verbesserter glatterer Schnitt möglich ist (DLG, 2024).

Für die Herstellung von verschiedenen Säften aus Früchten oder Gemüse bietet der Einsatz von PEF-Systemen ein weiteres Vorteil. Durch den Zellaufschluss bei geringen Feldstärken von 0,5 – 3 kV/cm kann die Saftausbeute signifikant gesteigert werden. Bei der

Behandlung von Orangen, Pomelo oder Zitronen mit einer Feldstärke von 3 kV/cm wurde eine Steigerung um 25 %, 37 % und 59 % erzielt (Kantar et al., 2018). Für Tomatensaft stieg die Ausbeute um 20,5 % bei einer Feldstärke von 0,5-2,5 kV/cm (Andreou et al., 2020). Aber auch für die Herstellung von Olivenöl kann eine Behandlung mit gepulsten elektrischen Feldern die Ausbeute steigern. Bei der herkömmlichen Variante werden meist Enzyme eingesetzt, um die Zellen aufzuschließen und das Öl aus dem Trester zu extrahieren. Mit einer PEF-Behandlung entfällt dieser Einsatz und durch den schonenden Zellaufschluss ohne Wärme können Ölausbeuten von bis zu 90-93 % im Vergleich zu 80 % ohne PEF-Einsatz erreicht werden, was einer Steigerung von 10-13 % entspricht (DLG, 2024).

Ein weiteres Anwendungsbeispiel bezüglich Extraktion findet sich in der Herstellung von Wein wieder. Im Allgemeinen lässt sich dies in mehrere Schritte einteilen: Reinigung, Entrappung, Mazeration, Pressen, Fermentieren sowie Haltbarmachung und Abfüllung. Die Mazeration stellt dabei einen wichtigen Schritt bezüglich Extraktion und Farbgebung dar, welcher dafür sorgt, dass z.B. Polyphenole aus der Maische herausgelöst werden und dem Wein Farbe geben. Dieser Vorgang dauert herkömmlicherweise aber ca. 10-12 Tage. Durch eine Vorbehandlung der Maische mit gepulsten elektrischen Feldern kommt es zu vermehrter Öffnung von Traubenzellen, wodurch ein leichter Stoffaustausch erfolgen kann. Die Mazurationszeit kann somit auf 5-6 Tage reduziert werden. Dies sorgt nicht nur für einen höheren Gehalt an Polyphenolen sondern auch für eine Steigerung der Kapazität sowie Senkung von Energiekosten (DLG, 2024).

Letztlich finden sich in Trocknungsprozessen (Heißluft, IR-Konvektion, Vakuum, Gefrier-trocknung) von Gemüse, Obst oder Fleischprodukten weitere Möglichkeiten PEF-Systeme zu integrieren. Durch den Einsatz werden nicht nur Kosten durch verkürzte Zeiten gesenkt, sondern auch durch geringere Temperaturen. Grund dafür sind die durch die Behandlung mit gepulsten elektrischen Feldern geöffneten Zellporen, welche einen besseren und schnelleren Wasseraustritt aus dem Lebensmittel ermöglichen (DLG, 2018). Ohne diese Behandlung sorgen die intakten Zellwände für einen hohen Diffusionswiderstand, was zu einer längeren Trocknungszeit und höheren Temperatur führt (Nowak & Jakubczyk, 2022). So konnte bei der Gefriertrocknung von Äpfeln eine Behandlung mit 0,8 kV/cm eine 57 % (Lammerskitten et al., 2019), bei Karotten in Heißluft und 1-2,5 kV/cm 45 % (Kim et al., 2023) und bei Zwiebeln mit normaler Konvektion eine 32 % (Ostermeier et al., 2020) kürzere Trocknungszeit erzielt werden.

In der Biotechnologie werden PEF-Systeme vorwiegend für verbesserte Stoffwechselaktivitäten und den Zellaufschluss von Mikroorganismen und Algen angewendet (DLG, 2018). Aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung ist es unabdingbar genügend Nährstoffe zur Verfügung zu stellen und gleichzeitig die planetaren Grenzen einzuhalten. Die Nutzung von Mikroalgen und Mikroorganismen kann diesem Problem Abhilfe schaffen, da diese, vor allem Algen, ein hochwertiges Nährstoffprofil aufweisen. Darunter fallen Proteine, Farbstoffe, Antioxidantien, Vitamine, Mineralstoffe und lebenswichtige Fettsäuren (StMELF, 2025). Zwar gibt es bereits verschiedene Möglichkeiten die Nährstoffe und weitere Bestandteile aus den Zellen zu extrahieren (DLG, 2024), mit dem Einsatz von PEF-Systemen kann der Ertrag aber weitestgehend gesteigert werden. Dafür werden geringe Feldstärken genutzt, welche eine Stressreaktion der Mikroorganismen auslösen. Dadurch wird wiederum der Stoffwechsel erhöht und es kommt zur schnelleren Fermentation, zur Metabolisierung weiterer Substanzen oder zur Erhöhung der Konzentration gewünschter Stoffe wie Farbstoffen, Antioxidantien, Fettsäuren oder Aminosäuren (Kantar & Koubaa., 2022; Su et al., 2024). Mithilfe geringer Feldstärken, die nur reversible Poren erzeugten, erreichten z.B. Laktobazillen die logarithmische Phase eine Stunde früher als die Kontrollprobe. Eine weitere unabhängige Studie ergab bei einer Behandlung mit 5 kV/cm eine Erhöhung der Milchsäureproduktion. Des Weiteren waren Hefezellen bei einer Feldstärke von 0,1–6 kV/cm in der Lage 2,33–3,98x schneller Fruktose zu verstoffwechseln (Kantar & Koubaa, 2022). Ein Review von Xiao et al. (2025) bestätigt den Nutzen und die Vorteile der Nutzung von gepulsten elektrischen Feldern, dass mit diesem Verfahren die Ausbeute verschiedener Stoffe wie Polysaccharide, Proteine, Polyphenole, Öle und Lipide signifikant gesteigert werden können.

Wie eingangs beschrieben, eignen sich Hochspannungsimpulsbehandlungen auch zur Inaktivierung und Abtötung von pathogenen Mikroorganismen. Die zugrunde liegende Funktionsweise wurde bereits im Kapitel 2.1.1 erläutert. In der aktuellen Forschung wird PEF als eine der vielversprechendsten Technologien zur non-thermalen Inaktivierung eingestuft. Verschiedene Institutionen, Forschende und Unternehmen konnten bereits die Effektivität an verschiedenen Lebensmitteln und Mikroorganismen nachweisen (Barba et al., 2015; Peng et al., 2020). Die wesentlichen Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren liegen in der geringeren thermischen Belastung der Lebensmittel, signifikant kürzeren Behandlungszeiten sowie der prinzipiellen Eignung für kontinuierliche Prozessführungen (Bhat et al., 2019). Darüber hinaus zeigen PEF-Behandlungen, die eine mikrobielle Inaktivierung erreichen, keine bis geringere sensorische Veränderungen als

thermische Pasteurisierungen (Lasekan et al., 2016; Brito et al., 2024). Lebensmittel können eine Vielzahl an Mikroorganismen beherbergen, die entweder qualitätsmindernd wirken (z.B. *Saccharomyces* und *Lactobacillus*) oder als pathogene Erreger (z.B. *Salmonella*, *Escherichia coli*, *Campylobacter* und *Listeria*) ein erhebliches Sicherheitsrisiko für den Menschen darstellen. Tabelle 41 (Anhang 1) bietet dazu eine kleine Zusammenfassung verschiedener Studien zur Inaktivierung von Mikroorganismen in unterschiedlichen Matrices. Grundlegend ist zu sagen, dass durch variierte Prozessparameter in diversen Lebensmittelmatrixen eine log-Reduktion von 0,2–6,38 erreicht werden kann. Ausschlaggebend sind dabei aber verschiedene Faktoren, wie Prozessparameter und Beschaffenheit und Art der Mikroorganismen (Lytras et al., 2024). Ergänzend zu den im Anhang gelisteten Daten zeigen weitere Studien die Effektivität der Haltbarmachungsmethode. Beispielsweise konnte *Escherichia coli* sowie *Pseudomonas* spp. in Milch bei einer Feldstärke von 35 kV/cm, einer Behandlungstemperatur von 55 °C und einer Pulsdauer von 40 µs um 6 log-Stufen reduziert werden (Walter et al., 2016). In einem Sojadrink gelang es, die Konzentration von *Escherichia coli* um 5,20 und von *Staphylococcus aureus* um 3,51 log-Stufen zu senken (Li et al., 2013). Für Fruchtsäfte, wie etwa Apfelsaft, wurde bei 30 kV/cm und 200-400 Pulsen eine vollständige Reduktion von Hefen, Schimmelpilzen und mesophilen Bakterien erreicht (Dziadek et al., 2019). Auch bei der Stabilisierung von Bier ist die Wirkung von PEF bei Feldstärken von 35-45 kV/cm (*Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus plantarum*, *Bacillus subtilis*, *Salmonella enterica*) vergleichbar mit der thermalen Pasteurisierung bei 76 °C und 30 s Haltezeit (4,0-8,4 log-Stufen). Die Behandlungszeiten betrugen je nach Probe 402-2296 µs und es wurde eine spezifische Energie im Bereich von 530-2339 kJ/l eingetragen (Walkling-Ribeiro et al., 2011). Weitere Versuche mit Bier bestätigen Reduktionen zwischen 3 und 5,8 log-Stufen (Milani & Silva, 2022).

2.2 Herstellungsprozess von Bier und pflanzlichen Milchalternativen

2.2.1 Herstellung von Bier

Bier ist eine Sammelbezeichnung für ein aus stärkehaltigem Getreide durch alkoholische Gärung gewonnenes, kohlenensäurehaltiges Getränk, bei welchem für die Herstellung generell noch Hopfen und Hefen zugegeben werden (Wingender et al., 2015). Nach der Bierverordnung BierV bzw. dem vorläufigem Biergesetz VorlBierG (§9 Abs. 1) dürfen zur Herstellung von Bier nur Gerstenmalz, Hopfen, Hefe und Wasser verwendet. Je nach Art

der Hefe unterscheidet man zwischen untergärigem (z.B. Pils, Lagerbier, Export) oder obergärigem (z.B. Weizenbier, Altbier, Kölsch) Bier.

Um aus den Rohstoffen ein aromatisches, alkoholhaltiges Getränk herzustellen, sind mehrere Vorgänge nötig. Dazu gehören die Malzbereitung, die Würzebereitung inkl. Maischen und die Bierbereitung (Haupt- mit Nachgärung). Da Getreide größtenteils aus Stärke und hochmolekular Kohlenhydrate sowie nur einen geringen Anteil vergärbaren Zucker (ca. 2 %) besteht, welche die Hefen zur alkoholischen Gärung benötigen, muss dieser vorerst durch sogenanntes Mälzen behandelt werden. Dazu lässt man eingeweichte Gerste bei 12-18 °C keimen bis ein gewünschtes Maß an Enzyymbildung und Lösungsvorgängen in der Gerste erreicht ist. Die gebildeten Enzyme sind für das spätere Maischen wichtig, da diese langkettige Kohlenhydrate zu Einfachzucker abbauen. Nach dem Keimen wird das so gewonnene Grünmalz bei 85-100 °C getrocknet. Die Höhe der Temperatur ist dabei ausschlaggebend für die Bildung von Maillard-Produkten und die Farbe des Malzes, welches sich wiederum auf den Geschmack und die Farbe des Bieres ausübt (Wingender et al., 2015; Hamatschek, 2021; Brücklmeier, 2022) .

Nach der Malzbereitung erfolgt die Würzebereitung, welche in mehrere Teilvorgänge gegliedert ist. Zuerst muss das Grünmalz geschrotet werden, damit die Kohlenhydrate im späteren Verlauf besser ausgewaschen werden. Des Weiteren dient das Schrot, bzw. die Spelzen der Gerste, beim Abläutern als Filterschicht, wobei auf eine optimale Partikelgröße geachtet werden muss. Bei einer zu starken Zerkleinerung werden mehr Bitter-, Gerb- und Farbstoffe freigesetzt, die sich negativ auf das Endprodukt ausüben können. Außerdem können die feinen Partikel die spätere Filterschicht verdichten, wodurch die Läuterung zu lange andauert und die Würze langsamer abläuft. Eine zu grobe Zerkleinerung bedeutet wiederum weniger freigesetzte Kohlenhydrate in der Maische, welcher von den Hefen verstoffwechselt werden können. Im nächsten Schritt findet das Einmaischen statt, bei dem das geschrotete Malz mit Brauwasser vermischt und erhitzt wird. Das Ziel des Maischevorgangs ist, die Kohlenhydrate durch die vorhandenen Enzyme zu spalten, wobei ein bestimmtes Temperatur-Zeit-Programm beachtet werden muss. Unterteilt wird der Vorgang in sogenannte Rasten. In erster Linie erfolgt bei einer Einmaischtemperatur von 35 °C das Herauslösen der Kohlenhydrate und der Enzyme. Danach wird die Temperatur auf 47-53 °C erhöht und gehalten, um die Eiweißrast zu starten, bei welchem die eingebrachten Proteasen die stickstoffhaltigen Substanzen in Aminosäuren spalten. Darauf folgend findet, bei 61-63 °C, die Maltoserast statt, bei welcher die Stärke durch β -Amylase in vergärbaren Malzzucker und andere Einfachzucker umgewandelt wird. Nach

einer bestimmten Haltezeit erfolgt eine weitere Temperaturerhöhung auf ca. 70-73 °C, bei welchem dann α -Amylasen die restlichen Stärkemoleküle in Dextrine umwandeln. Zur Überprüfung, dass genügend Stärke abgebaut wurde, sollte eine Iodprobe erfolgen. Insofern kein blau-violetter Farbumschlag zu sehen ist, ist der Maischeprozess abgeschlossen und die Maische kann auf die Abmaischtemperatur (78 °C) erhöht werden, um das Abläutern zu starten. Dieser Vorgang dient zu einer Fest-Flüssig-Trennung durch einen sogenannten Läuterbottich, welcher die Würze mittels Druck und der Filterschicht von den festen Bestandteilen der Gerste trennt. Gegebenenfalls kann durch Nachgießen mit heißem Brauwasser Restzucker aus dem Birtreber ausgeschwemmt und der Würze zugeführt werden. Nach dem Läutern erfolgt das Würzekochen für 90-120 min bei 100 °C mit dem Ziel, die Würze auf den gewünschten Extraktgehalt bzw. Stammwürzegehalt [°P] zu konzentrieren. Durch die lange Kochzeit wird die Würze nebenbei steril und die vorhandenen Enzyme zerstört. Des Weiteren erfolgt während des Würzekochens die Zugabe von Hopfen. Um ein breites Spektrum an Geschmack- und Aromastoffen einzubringen, werden zwei Arten von Hopfen genutzt. Zum einen Bitterhopfen, welcher anfangs hinzugegeben wird, und zum anderen Aromahopfen, dessen Zugabe erst am Ende erfolgt, da sich die Aromen sonst verflüchtigen würden. Zum Schluss der Würzebereitung erfolgt eine weitere Filterung (Whirlpool), um koagulierte Eiweiße sowie die Hopfenbestandteile herauszutrennen, und die Kühlung, um die Würze für die darauffolgende Gärung auf Temperatur zu bringen (Narziss et al., 1992; Narziss, 2005; Wingender et al., 2015; Kunze, 2016; Brücklmeier, 2022; Rimbach et al., 2025).

Durch den Zusatz von Bierhefen wird dann die Hauptgärung eingeleitet, welche bei ca. 4-9 °C stattfindet und 8-10 Tage andauert. Danach sollten etwa 90 % des Stammwürzegehalts durch die alkoholische Gärung zu Ethanol und CO₂ umgewandelt worden sein. Das sogenannte Jungbier wird danach in Tanks oder Fässern abgefüllt und für die Nachgärung gelagert, um die Restwürze zu verwerten. Bei untergärigen Bieren dauert die Nachgärung und Reifung ca. 1-4 Monate bei 0-2 °C an, obergärige Biere werden hingegen nur 1-3 Tage bei 18-25 °C nachgegoren. Nach Beendigung der Reifung wird das Bier unter Gegendruck abgefüllt und durch Membranfiltration oder Erhitzung entkeimt (Rimbach et al., 2025).

Nachfolgende Abbildung stellt den generellen Ablauf der Bierherstellung dar.

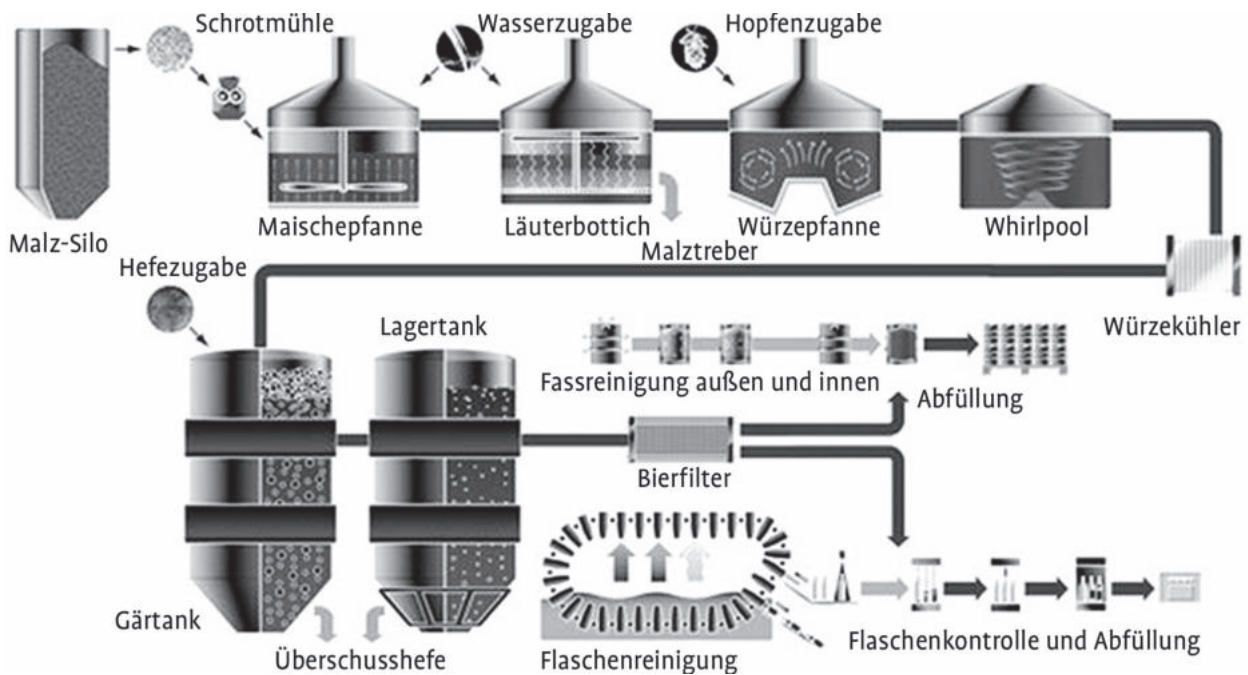


Abb. 7: Grundlegender Brauprozess vom Einmaischen bis zur Abfüllung (Hamatschek, 2021)

2.2.2 Herstellungsprozess von Milchalternativen auf Basis von Hülsenfrüchten

Neben Kuhmilch gibt es eine Vielzahl von pflanzlichen Milchersatzprodukten, die aufgrund ethischer oder gesundheitlicher Gründe der Konsumierenden seit Jahren immer mehr an Bedeutung gewinnen (McClements et al., 2024). Solche Pflanzendrinks können entweder aus Getreide (Hafer, Reis, Hirse), aus Nüssen (Mandeln, Haselnuss) oder Hülsenfrüchten (Soja, Erbsen, Lupinen) hergestellt werden. Im Allgemeinen unterscheiden sich diese pflanzlichen Alternativen erheblich hinsichtlich ihrer Nährstoffe und Zusammensetzung von Kuhmilch sowie untereinander, weswegen z.B. häufig verschiedene Zusätze hinzugefügt werden (VerbraucherService Bayern im KDFB e.V., 2025). Grundsätzlich sollten Pflanzendrinks so hergestellt werden, dass sie der Kuhmilch in den ernährungsphysiologischen, physikochemischen und sensorischen Eigenschaften ähneln, vor allem, um als gute Alternative zu Milch- und Milchprodukten zu dienen. Ein wichtiger Aspekt ist die Simulierung der kolloidalen Eigenschaften von Kuhmilch und die daraus resultierenden technischen (notwendigen) Verfahren, wie z.B. das cremige Mundgefühl oder die Verhinderung des Aufrahmens durch Fettkügelchen. Zur Herstellung von Pflanzendrinks gibt es dafür im Allgemeinen zwei Ansätze: Die Nutzung, Vermahlung und anschließende Fraktionierung von ganzen Pflanzensamen oder das Emulgieren von

extrahierten Ölen und Emulgatoren auf pflanzl. Basis mit Wasser und anderen Bestandteilen. Für Letzteres werden für das entsprechende Endprodukt die jeweiligen Pflanzenöle mit Wasser und Emulgatoren sowie Zusätzen (Vitamine, Aromen, Konservierungsmittel) vermischt und anschließend mehrmals homogenisiert, bis die finale Größe der Fetttropfchen erreicht ist. Eine schematische Darstellung dieses Herstellungsverfahrens ist nachfolgend abgebildet (McClements et al., 2024).

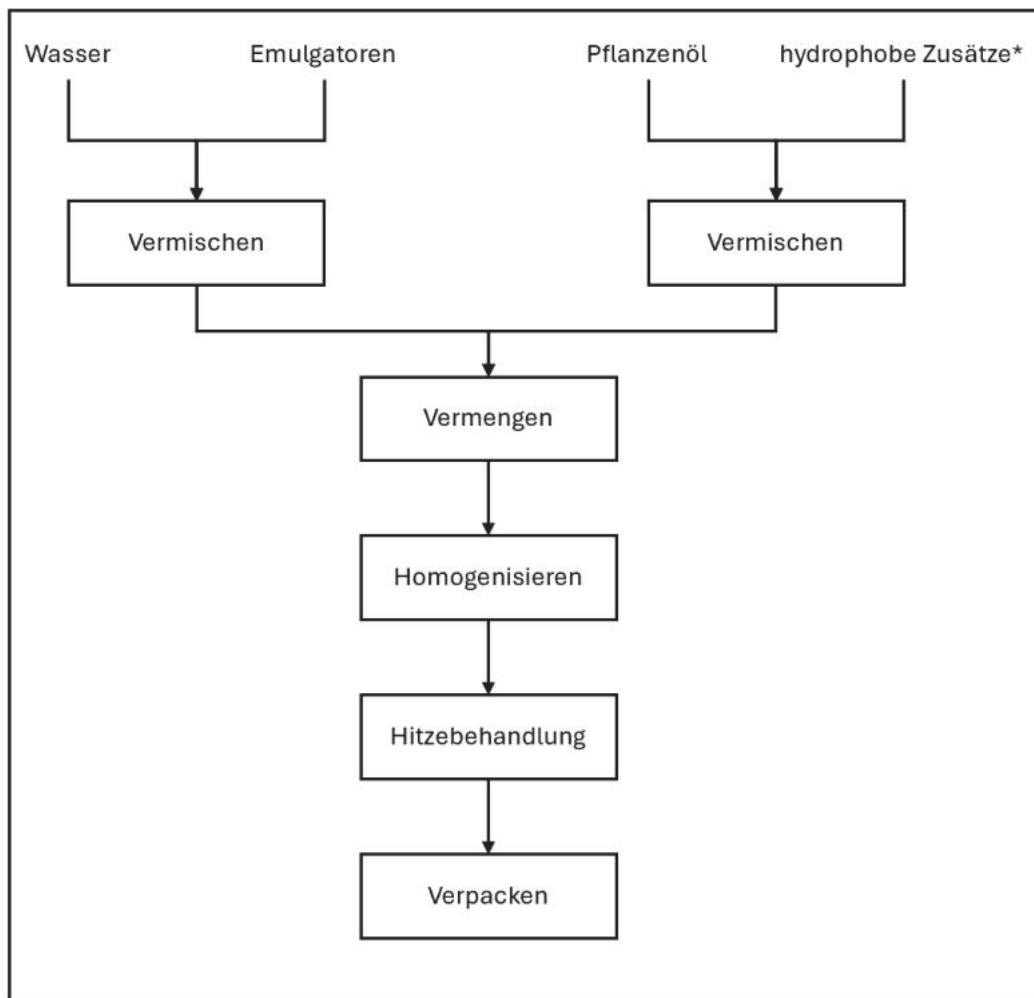


Abb. 8: Grundlegender Herstellungsprozess eines Pflanzendrink mittels Pflanzenöl, Emulgatoren und Zusätzen (McClements et al., 2024)

Innerhalb der Herstellung von Pflanzendrinks aus den ganzen Samen bzw. jeweiligen Pflanzenbestandteilen gibt es je nach verwendeter Pflanze aufgrund unterschiedlicher Stärke-, Protein- und Fettgehalt zwar Unterschiede, der grundlegende Prozess bleibt aber gleich (Xie et al., 2023). Dieser ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt. Das Ausgangsprodukt, z.B. Sojabohne oder Lupinensamen, wird zunächst in wässriger Lösung über einen bestimmten Zeitraum eingeweicht, um das Gewebe für den späteren

Verfahrensschritt aufzulockern und die Extraktion zu verbessern (McClements et al., 2024). Außerdem reduziert es die benötigte mechanische Kraft zum Zerkleinern und verbessert die Extraktion der nährwertgebenden Komponenten. Je nach Einweichetemperatur kann der Prozess wenige bis mehrere Stunden andauern (Xie et al., 2023). Unter anderem sind Methoden bekannt, die ein Einweichen der Samen für 24 h bei Raumtemperatur vorsehen (Hermann, 2009). Im nächsten Schritt wird das eingeweichte Pflanzenmaterial mit weiterem Wasser mechanisch zerkleinert, um das Gewebe aufzubrechen und die Bestandteile wie Ölkörper, Stärkekörner und Zellwandfragmente freizusetzen (McClements et al., 2024). Das Verhältnis vom Pflanzenmaterial zur Wassermenge ist je nach Ausgangsprodukt unterschiedlich, liegt aber zwischen 1:2 bis 1:10 (Yao et al., 2022; Daryani et al., 2024).

Da für dieses Verfahren aber eine größere Menge Wasser und weitere verschiedene Apparaturen und Geräte benötigt werden (Kintek Solution, 2025), kann anstelle der Nassvermahlung auch eine Trockenvermahlung genutzt werden. Hierzu wird das Ausgangsprodukt zunächst zu einem feinen Pulver verarbeitet und anschließend mit Wasser vermengt, um die Stoffe herauszulösen. Durch die Trockenvermahlung ist es möglich, ein Produkt mit höherer Qualität an Proteinen, Kohlenhydraten, Fetten und Mineralien mit einem geringeren Energieverbrauch herzustellen. Da aber durch die Agglomeration des Pulvers, der starken Staubbildung und das Absetzen von Feststoffen aus der Suspension ein Anteil vor und während dem Homogenisierens verloren geht, wird trotz der Energieersparnis häufiger auf die Nassvermahlung gesetzt (Daryani et al., 2024). Die Partikelgröße sollte dabei nicht größer als 1 µm sein und keine höhere Dichte als die kontinuierliche Phase aufweisen, da sie sich sonst im Endprodukt absetzen könnten. Eine Partikelgröße ab 50 µm sorgt außerdem für ein unerwünschtes raues Mundgefühl (McClements et al., 2024).

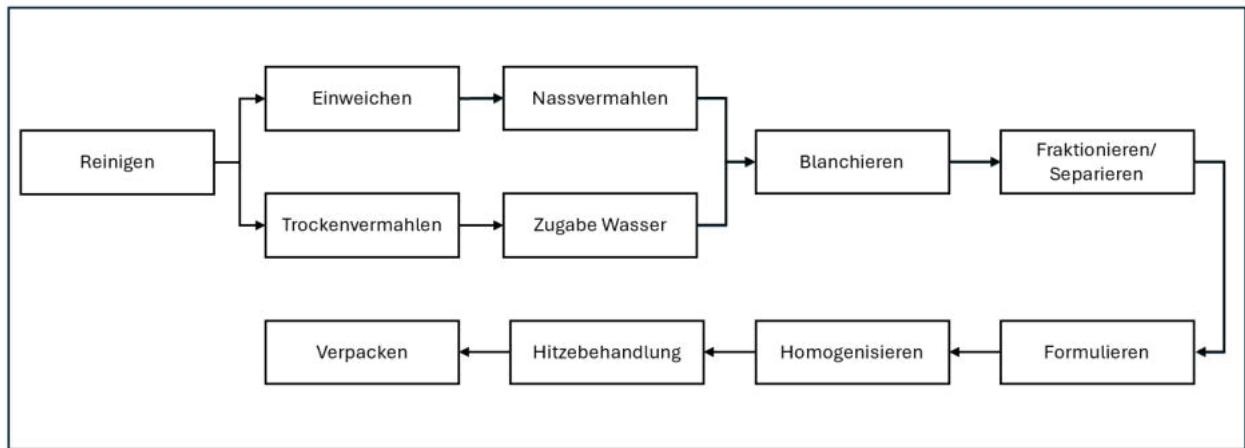


Abb. 9: Allgemeiner Herstellungsprozess eines Pflanzendrinks mit Nassvermahlung oder Trockenvermahlung (Daryani et al., 2024)

Nach der Nassvermahlung bzw. Trockenvermahlung erfolgt die Extraktion der wertgebenden Komponenten durch Blanchieren, wodurch auch Antinährstoffe, wie Trypsin-Inhibitoren oder Phytate, und Enzyme zerstört werden. Um nachfolgend die Flüssigkeit von den Feststoffen zu trennen, werden entweder Zentrifugen, Dekanter oder Separatoren verwendet (Xie et al., 2023). Anschließend erfolgt die Zugabe von möglichen Zusatz- oder Inhaltsstoffen, wie Emulgatoren, Stabilisatoren, Verdickungsmittel, Farbstoffen, Fetten, Zucker und/oder Konservierungsmittel, um ein stabiles, lagerfähiges Endprodukt zu erhalten. Schlussendlich wird der Pflanzendrink noch homogenisiert, hitzebehandelt und verpackt (McClements et al., 2024).

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsplanung und Projektübersicht

Wie eingangs beschrieben, befasst sich diese Arbeit mit der Etablierung einer kontinuierlich wirkenden Verfahrensweise für gepulste elektrische Felder zur Anwendung an verschiedenen Lebensmittelmatrixen. Ein zentraler Fokus liegt dabei auf der Übertragung von Ergebnissen aus dem Labormaßstab in den Technikumsmaßstab, um die eventuellen Limitationen oft geringerer Durchflussraten vieler Studien zu überwinden und möglicherweise eine höhere industrielle Relevanz abzubilden bzw. eine Grundlage für weitere Studien oder Versuche zu bilden, die gleichermaßen höhere Durchflussraten für kontinuierliche Prozesse zur Inaktivierung von Mikroorganismen nutzen wollen.

Als Versuchsanlage wurde die Behandlungsanlage „PEF-Pilot Dual“ der Firma Elea Technology GmbH aus Quakenbrück eingesetzt, welche eine Behandlung mit einer Durchflussrate von bis zu 250 l/h ermöglicht. Dies ist für das angesetzte Ziel dieser Arbeit mehr als ausreichend. Die PEF-Behandlungen wurden mit einer rechteckigen Pulsform in einem kollinearen Elektrodenaufbau bei einem Elektrodenabstand von 1 cm durchgeführt.

Aufgrund der Komplexität der Anlagenparameter und der notwendigen Prozessstabilität wurden die ersten Versuchsreihen mit Wasser durchgeführt. Außerdem diente es dazu, ein grundlegendes Verständnis für die möglichen Wechselwirkungen der verschiedenen Parameter zu erlangen, die Handhabung der Behandlungsanlage zu verinnerlichen und einen generellen Versuchsaufbau zur Inaktivierung zu erstellen sowie im späteren Verlauf einen Vergleich bezüglich der Produkteigenschaften, verwendeten Mikroorganismen und angewandten Prozessparametern zu ziehen. Für die eigentliche Zielstellung wurden dann zwei unterschiedliche Medien ausgewählt, die eigenhändig hergestellt worden sind - Bierwürze und Lupinendrink.

Die Entscheidung für Bierwürze anstelle von Bier begründet sich durch den deutlich höheren Zeitaufwand für Gärung und Reifung des Bieres, welcher den zeitlich vorgeschriebenen Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte. Außerdem ist in fertigem Bier gelöstes CO₂ vorhanden, welches die Behandlung in der Anlage negativ beeinträchtigen würde. Die resultierende Schaumbildung während des kontinuierlichen Prozesses führt dazu, dass das Medium die Behandlungszelle nicht mehr vollständig und homogen ausfüllt. Dies erhöht u. a. das Risiko von elektrischen Überschlüssen, welche die Elektroden

beschädigen können, und einer weniger homogenen Ausbildung der elektrischen Feldstärke (Töpfl et al., 2005; Töpfl, 2006; Raso et al., 2022). Die Herstellung der Bierwürze basiert auf einem Rezept für ein Pils mit einer Stammwürze von ca. 12 %.

Da für Lupinendrink in Deutschland derzeit kein kommerzieller Anbieter existiert (Stand 2025), wurde für die Herstellung eine eigene Rezeptur entwickelt, die auf verschiedenen Patenten zur Herstellung von Soja- und Lupinendrink (Kort, 1989; Bremer, 1991; Hermann, 2009; Eisner et al., 2015) und auf verfahrenstechnischen Quellen zur Herstellung von pflanzlichen Milchalternativen (McClements et al., 2024) beruht. Der Unterschied dazu basiert grundlegend auf den verwendeten Geräten und Zusatzstoffe zur Stabilisierung des Getränks, da für die Patente und in der einschlägigen Literatur meist Homogenisatoren verwendet worden sind, die für die Arbeit nicht zur Verfügung standen. Als Stabilisatoren wurde für die Rezeptur Gellan und Maltodextrin ausgewählt, da diese oft in verschiedenen pflanzlichen Milchalternativen im LEH eingesetzt werden. Dazu gehören z. B. verschiedene Soja-, Hafer- und Mandeldrinks von alpro (Danone Deutschland GmbH) oder auch Produkte des ehemaligen Produzenten „Prolupin GmbH“, welcher Lupinendrink herstellte. Beide Stabilisatoren verhindern das Absetzen von Partikeln und sorgen für eine cremigere Konsistenz (FAO, 1997; Pollmer, 2014; Europäische Kommission, 2025). Zusätzlich wurde Kokosfett als Lipidkomponente hinzugegeben, um die Emulsionsstabilität und das Mundgefühl typischer Milchalternativen nachzubilden (McClements et al., 2024). Das Ziel dieser Rezepturentwicklung war dabei nicht die Konzeption eines marktreifen Endproduktes, sondern diente vielmehr der Herstellung eines prozessstabilen Mediums, welches mit einer Pumpe für den kontinuierlichen Prozess förderbar ist und gleichzeitig ähnliche Eigenschaften hinsichtlich Viskosität wie gängige Milchalternativen aufweist. Daher entfallen auch jegliche sensorische und physikochemische Tests sowie umfassende Abläufe der Produktentwicklung als iterativer Prozess. Um die Rezeptur für die eigentliche Behandlung im Technikumsmaßstab zu testen, wurde diese zunächst im Labormaßstab mit wenigen Litern hergestellt und im Anschluss hochskaliert. Die Rezeptentwicklung gliederte sich dabei in verschiedene Phasen. Diese dienten u. a. dazu, geeignete Apparaturen und Geräte zur Herstellung zu finden. Da für diesen Teil der Arbeit auch die Reproduzierbarkeit der Versuche im Vordergrund steht, wurden dann für die Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab industriennahe Standardanlagen eingesetzt, die sich von den im Labormaßstab verwendeten Geräten unterscheiden.

Hinsichtlich der mikrobiologischen Zielorganismen war ursprünglich die Verwendung von *Escherichia coli* K12, *Saccharomyces cerevisiae*, *Staphylococcus carnosus* und *Lactobacillus plantarum* vorgesehen. Für jeden Mikroorganismus sollte jeweils eine Charge von ca. 24 Litern hergestellt werden, in welcher dann die Mikroorganismen inokuliert werden sollten. Während der Versuchsdurchführung und Validierung dessen mit Wasser wurde jedoch ein technischer Defekt an der Anlage identifiziert, der dafür sorgte, dass bei den ersten Versuchsreihen kaum bis keine Inaktivierung stattfinden konnte, obwohl laut Literatur mit entsprechend eingestellten Parametern damit gerechnet werden sollte. Infolgedessen wurde die Versuchsplanung angepasst und die Untersuchung aufgrund zeitlicher Einschränkungen auf *E. coli* und *S. cerevisiae* begrenzt. Daraus resultiert gleichermaßen der Aufbau des Ergebnisteils dieser Arbeit in PEF-Behandlung Phase 1 sowie Phase 2.

Zur Untersuchung der Inaktivierungsrate der PEF-Behandlung wurden drei bzw. vier unterschiedliche Parametereinstellungen definiert. In der ersten Phase war es bei gleichbleibender spezifischen Energie 6, 12 und 24 kV/cm. Für Phase zwei wurden die Parameter getauscht, sodass ab diesem Punkt bei gleichbleibender Feldstärke von 24 kV/cm die Keimreduktion durch 60, 80, 100 und 120 kJ/l untersucht wurde. Die Probenzahl n pro Versuchsreihe wurde auf fünf festgelegt, um jeweils eine unbehandelte Nullprobe als Referenz mitzuführen. Zusätzlich wurde eine Materialkontrolle integriert, um eine Kontamination durch die NaCl-Lösung aus der Versuchsreihe auszuschließen. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wurde eine Dreifachbestimmung der jeweiligen Behandlungsstufen durchgeführt.

Basierend auf den Literaturwerten, die von einer durchschnittlichen Inaktivierungsrate von 3 bis 5 log-Stufen durch die PEF-Behandlung ausgehen, wurde beschlossen, die Anfangskeimzahl der jeweiligen Medien auf 10^4 bis 10^5 KbE/ml einzustellen, jeweils unter der Annahme, dass bei der Herstellung der Inokula eine Gesamtkeimzahl der entsprechenden, spezifischen Wachstumsbildung der Mikroorganismen erreicht wird. Unter der Annahme einer Reduktion auf eine Endkeimzahl von ca. 10^1 KbE/ml in der höchsten Behandlungsstufe wurde eine Dezimalverdünnungsreihe von 10^{-1} bis 10^{-4} gewählt. Daraus ergab sich schlussendlich ein Bedarf von 63 Agarplatten pro Versuchsdurchlauf (5 Probensätze $\cdot$ 3 Replikate $\cdot$ 4 Verdünnungsstufen, zuzüglich 3 Platten für die Materialkontrolle). Es wurde dabei keine Verdünnungsreihe für die Materialprobe durchgeführt, da diesbezüglich nur überprüft werden sollte, ob eine Kontamination vorlag oder nicht.

Alle weiteren Informationen bzgl. Versuchsaufbau, verwendete Geräte und Anlagen sowie Durchführungen sind in den nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

3.2.1 Herstellung Bierwürze

Für die Herstellung der Bierwürze wurde für diese Arbeit die Brauereianlage „Braxonia 20 T Serie“ (Rational Beratungsges. mbH / ROSOMA GmbH, 1996) (siehe Abb. 10 & 11) verwendet, an welcher, nach Herstellervorgaben, eine Wasser- sowie Druckluftversorgung angebracht worden sind. Ein externes Kühlsystem war nicht nötig, da die Würze nicht für die Hefezugabe heruntergekühlt werden musste.



Abb. 10: Brauereianlage „Brixonia 20 T Serie“ (Rational Beratungsges. mbH / ROSOMA GmbH, Deutschland, Rostock 1996). Auf der Anlage links: Maische-/Würzepfanne, rechts: Läuterbottich sowie firmeneigener Volumenmessstab (eigene Aufnahme)



Abb. 11: Einsätze für die Brauereianlage. Links: Whirlpooleinsatz, Rechts: Siebboden mit Aufhackwerk (eigene Aufnahme)

Zusätzlich zur Brauereianlage wurde ein Computer zur Temperatureinstellung und zur Zuschaltung von Pumpen und Rührwerk verwendet. Die Steuerung und Kontrolle erfolgte dabei durch eine firmeninterne Software.

Eine Zusammenfassung aller verwendeten benötigten Anlagen, weiteren Kleingeräte und Materialien zur Herstellung einer Bierwürze ist in nachfolgender Tabelle (Tab. 2) dargestellt.

Tab. 2: Verwendete Anlage, Geräte sowie Materialien für die Bierwürze-Herstellung

Verwendete Anlagen/Geräte/Materialien	Firma/Hersteller
Brauereianlage „Braxonia 20 T Serie“ + Software + Einsätze	Rational Beratungsges. mbH / ROSOMA GmbH, Deutschland, Rostock 1996
Computer	/
Waage – ADE EHQ1-40	ADE Germany GmbH & Co. KG, Neuer Höltingbaum 15, Hamburg

Waage - Entris II BCE6200-1S	Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Otto-Brenner-Straße 20, Göttingen
digitales Dichtemessgerät EasyDens	Anton Paar ConsumerTec GmbH, Anton-Paar-Straße 20, Graz
Edelstahleimer 10 l	/
Kunststoffeimer 40 L	/
Schüsseln klein/groß	/
Abfüll-/Backschaufel	/
Kochlöffel	/
Schöpfkelle	/
Jodlösung	/

Die verwendeten Rohstoffe sowie Mengen für die Bierwürze für ca. 24 l sind in nachstehender Tabelle (Tab. 3) aufgelistet.

Tab. 3: Verwendete Rohstoffe sowie Hersteller und Menge zur Herstellung der Bierwürze

Rohstoff	Hersteller + MHD	Menge
Wasser, deionisiert	/	ca. 30 l
Pilsner Malz	Malzfabrik Weyermann GmbH & Co. KG, Brennerstrasse 17-19, Bamberg, MHD: 14.04.2027	5 kg
Aromahopfen - Hallertauer Perle 6,8 %	Online-Shop Brauen.de, Straße des 17. Juni 14, Dresden, MHD: 31.12.2027	14 g
Bitterhopfen - Hallertauer Magnum 13,3 %	Online-Shop Brauen.de, Straße des 17. Juni 14, Dresden, MHD: 31.12.2027	9 g

Abbildung 12 stellt den gesamten Herstellungsprozess in einem Fließdiagramm dar.

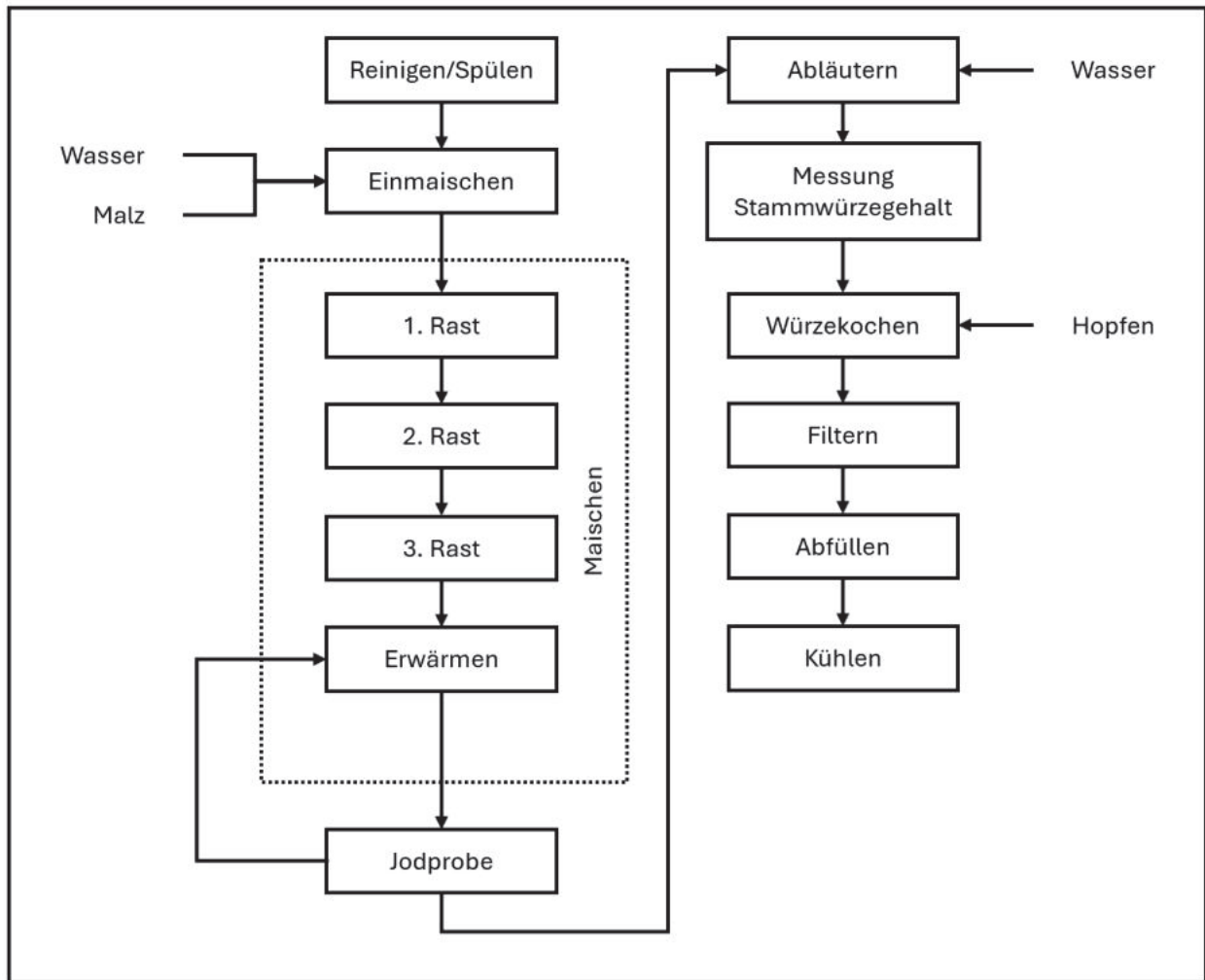


Abb. 12: Fließdiagramm zur Durchführung der Herstellung von Bierwürze

Die Herstellung erfolgte unter Verwendung eines beigefügten Benutzerhandbuches der Brauereianlage.

Zuerst wurde Anlage laut Herstellervorgaben gereinigt und ausgespült. Nach Sicherstellung, dass alle Ventile geschlossen waren, wurden 22 l deionisiertes Wasser in die Maische-/Würzepfanne gefüllt und auf eine Temperatur von 35 °C erwärmt. Das fertige Malzschrot wurde abgewogen und bei Erreichen dieser Solltemperatur von 35 °C hinzugegeben und solange mit dem Rührwerk vermischt, bis eine gute Verteilung des Malz im Wasser vorlag.

Danach erfolgte der Maischeprozess bzw. die einzelnen Rasten. Dazu wurde die Maische auf die jeweiligen Rasttemperaturen erwärmt und gehalten. Die erste Rast (Eiweißrast) erfolgte bei 55 °C und einer Haltezeit von 10 min, die zweite Rast (Maltoserast) mit 62 °C und 25 min Haltezeit und die dritte Rast (Endverzuckerungsrast) mit 72 °C und

ebenfalls 25 min Haltezeit. Im Anschluss wurde die Maische auf die Abläuterungstemperatur von 78 °C erwärmt und 20 min gehalten, wobei eine kleine Menge für die Jodprobe entnommen wurde. Die dabei resultierende Gelbfärbung diente als Indikator für die Abwesenheit von Reststärke, woraufhin der Prozess fortgesetzt werden konnte.

Zum anschließendem Abläutern wurde der Siebboden in den Läuterbottich eingesetzt. Nach dem Ausschalten der Heizung und dem Öffnen des mittleren Ventils der Maische-/Würzepfanne wurde die Vorwürze in den Läuterbottich überführt und mit dem zugehörigen Deckel fest verschlossen. Nach einer Ruhezeit von 5 min und dem Schließen des vorher geöffneten Ventils wurde die Vorwürze mittels Druckluft in die gereinigte Maische-/Würzepfanne zurückgedrückt. Um möglichen Restzucker aus dem Treber zu extrahieren, wurden 2 l Wasser in den Läuterbottich zugegeben und die Schritte wiederholt, bis das Endvolumen bei ca. 22 l lag. Des Weiteren wurden zur Überprüfung des Herstellungsprozesses der Stammwürzegehalt der Vorwürze bestimmt. Im Anschluss wurde der Treber entfernt und der Läuterbottich gereinigt.

Für den nächsten Prozessschritt, dem Würzekochen, wurde die Solltemperatur der Maische-/Würzepfanne auf 100 °C eingestellt, das Rührwerk eingeschaltet und der Bitterhopfen hinzugegeben. Die Würze wurde dann für 60 Minuten gekocht. 15 min vor dem Ende der Kochzeit wurde zusätzlich der Aromahopfen beigegeben. Nach Abschluss der Kochzeit wurde erneut der Stammwürzegehalt gemessen und das Volumen durch die Zugabe von Wasser angepasst, um sowohl das Zielvolumen als auch die angestrebte Stammwürzekonzentration einzustellen.

Abschließend erfolgte das Filtern der Würze, um Malz-, Hopfen- und denaturierten Eiweißreste abzutrennen. Hierzu wurde der Whirlpooleinsatz in den Läuterbottich gesteckt und der Deckel locker aufgesetzt. Durch das Öffnen des mittleren Ventil floss die Würze dann wieder in den Läuterbottich. Nach einer Ruhezeit von 20 min wurde der am Whirlpooleinsatz befestigte Schlauch vorsichtig in die Würze gehängt, der Läuterbottich fest verschlossen und die Würze mittels Druckluft wieder zurückbefördert. Nach einer finalen Bestimmung des Stammwürzegehalts wurde die Würze abgefüllt und in einen Kühlraum (4 °C) gestellt.

3.2.2 Herstellung des Lupinendrinks

3.2.2.1 Rezepturenentwicklung im Labormaßstab – Phase 1

Die Phase 1 beschreibt die Durchführung zur Rezepturenentwicklung sowie die Auswahl geeigneter Gerätschaften. Tabelle 4 listet die für die Rezeptur verwendeten Rohstoffe bzw. Zutaten auf.

Tab. 4: Verwendete Rohstoffe/Zutaten für Rezeptentwicklung

Rohstoff/Zutat	Hersteller
Bio Lupinensamen 1kg	Bio Bäckerei Spiegelhauer oHG, Sonnenhofstr. 1, Lohmen, MHD: 10.08.2026
Bio Maltodextrin	FeelWell GmbH, Bahnhofsstr. 11, Gnarrenburg, MHD: 27.03.2026
Gellan (E418) – High acyl	Würzteufel GmbH, Robert-Bosch-Str. 18, Empfingen, MHD: 05.03.2026
Kokosfett - Palmin	Peter Kölln GmbH & Co. KGaA, Westerstraße 22-24, Elmshorn, MHD: 22.08.2026
Wasser	/

Zur Bestimmung der Mengen an Stabilisatoren im fertigen Rezept wurden zunächst zwei Versuchsreihen durchgeführt. Versuchsreihe 1 beinhaltete ein Lupinendrink mit jeweils gleichem Maltodextringehalt und unterschiedlichem Gellangehalt und Versuchsreihe 2 hingegen unterschiedliche Maltodextringehalte bei gleichbleibendem Gellangehalt. Die Tabellen 5 und 6 stellen die genauen Mengen dar.

Tab. 5: Verwendete Mengen an Stabilisatoren der Versuchsreihe 1 – Phase

	Malto- dextringe- halt [%]	Gellange- halt [%]
Probe 1.1	6	0,02
Probe 2.1	6	0,03
Probe 3.1	6	0,04
Probe 4.1	6	0,05
Probe 5.1	6	0,06

Tab. 6: Verwendete Mengen an Stabilisatoren der Versuchsreihe 2 – Phase 1

	Malto- dextringe- halt [%]	Gellange- halt [%]
Probe 1.2	2	0,03
Probe 2.2	3	0,03
Probe 3.2	4	0,03
Probe 4.2	5	0,03
Probe 5.2	6	0,03

Für die Herstellung der Prototypen wurde für die meisten Herstellungsschritte ein Thermomix TM5 (Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG) verwendet. Darunter zählen die Zerkleinerung der vorgeweichten Samen, das Mischen der Zutaten und das Erhitzen bzw. die Wärmebehandlung. Zum Blanchieren der eingeweichten und zerkleinerten Samen wurde ein Kochfeld mit Kochtopfen verwendet. Für das Filtern kamen in den ersten Versuchen handelsübliche Geschirrtücher und Trichtersiebe zum Einsatz, um die Flüssigkeit von den Feststoffen zu trennen. Tabelle 7 beinhaltet dazu alle verwendeten Geräte und Materialien. Abbildung 13 veranschaulicht das Fließdiagramm zum Herstellungsprozess.

Tab. 7: Verwendete Geräte und Materialien zur Herstellung eines Lupinendrink-Prototyps – Phase 1

Geräte	Hersteller
Thermomix TM5	Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG, Rauental 38, Wuppertal
Waage - Entris II BCE6200-1S	Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Otto-Brenner-Straße 20, Göttingen
Präzisionswaage - Voyager	OHAUS Europe GmbH, Heuwinkelstr. 3, Nänikon, Schweiz
Kochtöpfe 5 l	/
Geschirrtücher	/
Kochlöffel	/
Schöpfkelle	/
Trichtersieb	/
Edelstahleimer 10 l	/
Laborflaschen	/

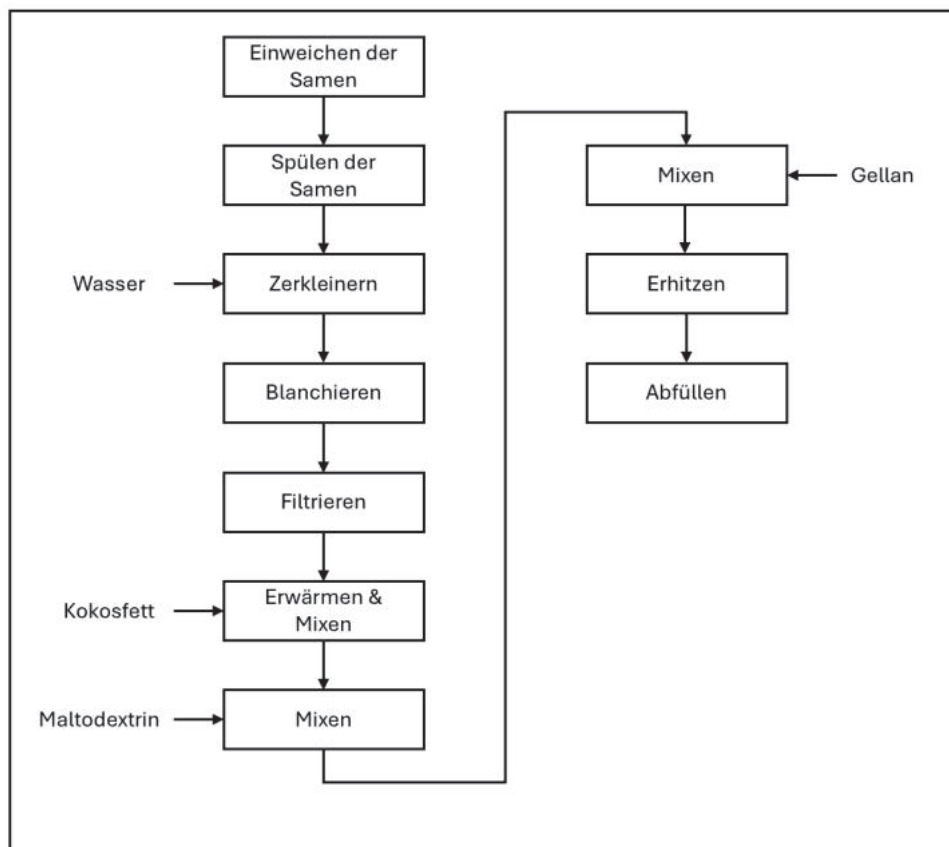


Abb. 13: Fließschema zur Herstellung des Lupinendrink-Prototyps – Phase 1

Im ersten Schritt wurden 1 kg Lupinensamen zum Einweichen mit 4 l Wasser in einen Edelstahlimer gefüllt und über Nacht für ca. 20 h bei 10 °C gelagert. Am nächsten Tag wurde das Restwasser entfernt und die eingeweichten Samen gewaschen, um Verunreinigungen und Fremdkörper zu entfernen. Im Thermomix TM5 wurden die Lupinensamen dann mit ca. 11,3 l Wasser auf Stufe 8 für 90 s zerkleinert, um auf ein Verhältnis von 1:14 (Samen/Wasser) zu kommen. Die Menge Wasser, die die Samen durch das Einweichen aufgenommen haben, sind mit einberechnet. Die Menge an Wasser beruht dabei auf der Annahme, dass durch das Filtern mit dem Geschirrtuch weniger Flüssigkeit abgetrennt wird und für den Versuch min. 10 l benötigt werden. Anschließend erfolgte das Blanchieren der Suspension in mehreren Kochtöpfen bei 95 °C und 30 min Haltezeit sowie das Filtern mit einem Geschirrtuch und einem Trichtersieb. Dafür wurden für beide Versuchsreihen jeweils kleinere Mengen in ein Geschirrtuch gefüllt und per Hand ausgedrückt. Im letzten Schritt wurden alle Zutaten miteinander einzeln vermengt, vermischt und erhitzt. Die für die jeweiligen Proben verwendeten Mengen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tab. 8: Eingesetzte Zutatenmenge für Versuchsreihe 1 und 2 – Phase 1

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2
Zutat	Menge [g/l]	Menge [g/l]
Lupinenflüssigkeit	920	x [*]
Kokosfett	30	30
Maltodextrin	50	x ^{**}
Gellan	x ^{**}	0,2

*Die Menge an Lupinenflüssigkeit ergab sich aus der Differenz von 1 l Gesamtmenge sowie der eingesetzten Maltodextrin- und Kokosfettmenge (siehe Tab. 5)

**die genauen Mengen entsprechen jeweils den Angaben aus Tab. 5 & 6)

Dafür wurde zunächst die Lupinenflüssigkeit mit dem Kokosfett im Thermomix auf 40 °C erwärmt und vermischt, bis das Fett vollständig geschmolzen war. An dieser Stelle erfolgte die Entnahme einer Referenzprobe, welche weder Maltodextrin oder Gellan enthält. Danach wurden jeweils die entsprechenden Mengen Maltodextrin zugegeben und das Rührwerk auf Stufe 5 gestellt und für 30 s gemixt. Im Anschluss erfolgte die Zugabe des Gellans und eine Erhöhung der Rührwerksgeschwindigkeit auf Stufe 8 für 90 s, um alle Zutaten stark zu vermischen und eine homogene Verteilung zu erhalten. Zuletzt wurde der Lupinendrink auf 95 °C erhitzt und für 2 min gehalten. Die einzelnen Proben wurden in Flaschen abgefüllt und bei 4 °C gelagert.

Am nächsten Tag fand eine visuelle Untersuchung und eine Viskositätsmessung des Lupinendrinks sowie von Milch und von einem Sojadrink zum Vergleich statt. Die daraus resultierenden Ergebnisse führten zur Änderung der Rezeptur. Der nachfolgende Abschnitt setzt an dieser Rezepturänderung an und beschreibt die Durchführung zu einer Entwicklung eines Lupinendrink-Prototypens mit verbesserter Rezeptur.

3.2.2.2 Rezepturentwicklung im Labormaßstab – Phase 2

Basierend auf den Ergebnissen der ersten Phase wurden die Mengen der eingesetzten Stabilisatoren angepasst. Hinsichtlich des nicht signifikanten Einflusses von Maltodextrin auf die Viskosität wurde die verwendete Menge auf 4 % festgelegt. Diese Durchführung beinhaltet eine Versuchsreihe mit unterschiedlichem Gellan-Gehalt von 0,01-0,03 %. Zudem wurde das manuelle Filtrieren mit einem Geschirrtuch durch ein standardisiertes Trennverfahren, einer Laborzentrifuge, ersetzt, um die Fest-Flüssig-Trennung zu verbessern und bereits in diesem Verlauf eine Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Die verwendeten Geräte und Materialien sowie die genauen Mengenangaben sind in nachfolgenden Tabellen dargestellt. Abbildung 14 visualisiert den Herstellungsprozess als Fließschema.

Tab. 9: Verwendete Geräte und Materialien zur Herstellung eines Lupinendrink-Prototypens – Phase 1

Geräte	Hersteller
Thermomix TM5	Vorwerk Deutschland Stiftung & Co. KG, Rauental 38, Wuppertal
Waage - Entris II BCE6200-1S	Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Otto-Brenner-Straße 20, Göttingen
Präzisionswaage - Voyager	OHAUS Europe GmbH, Heuwinkelstr. 3, Nänikon, Schweiz
Kochtöpfe 5 l	/
Laborzentrifuge – Sigma 6K15	Sigma Laborzentrifugen GmbH, An der unteren Söse 50, Osterode am Harz
Kochlöffel	/
Schöpfkelle	/
Trichtersieb	/

Edelstahleimer 10 l	/
Laborflaschen	/

Tab. 10: Eingesetzte Zutatenmenge - Phase 2

Zutat	Menge [g/l]	Menge [%]	Hersteller
Lupinenflüssigkeit	920	92	Bio Bäckerei Spiegelhauer oHG, Sonnenhofstr. 1, Lohmen, MHD: 10.08.2026
Bio Maltodextrin	40	4	FeelWell GmbH, Bahnhofsstr. 11, Gnarrenburg, MHD: 27.03.2026
Gellan (E418) – High acyl	x*	x*	Würzteufel GmbH, Robert-Bosch-Str. 18, Empfingen, MHD: 05.03.2026
Kokosfett - Palmin	30	3	Peter Kölln GmbH & Co. KGaA, Westerstraße 22-24, Elmsborn, MHD: 22.08.2026

*die genauen Mengen entsprechen jeweils den Angaben aus Tab. 11

Tab. 11: Verwendete Mengen an Gellan - Phase 2

	Gellangehalt [%]
Probe 1	0,01
Probe 2	0,015
Probe 3	0,02
Probe 4	0,025
Probe 5	0,03

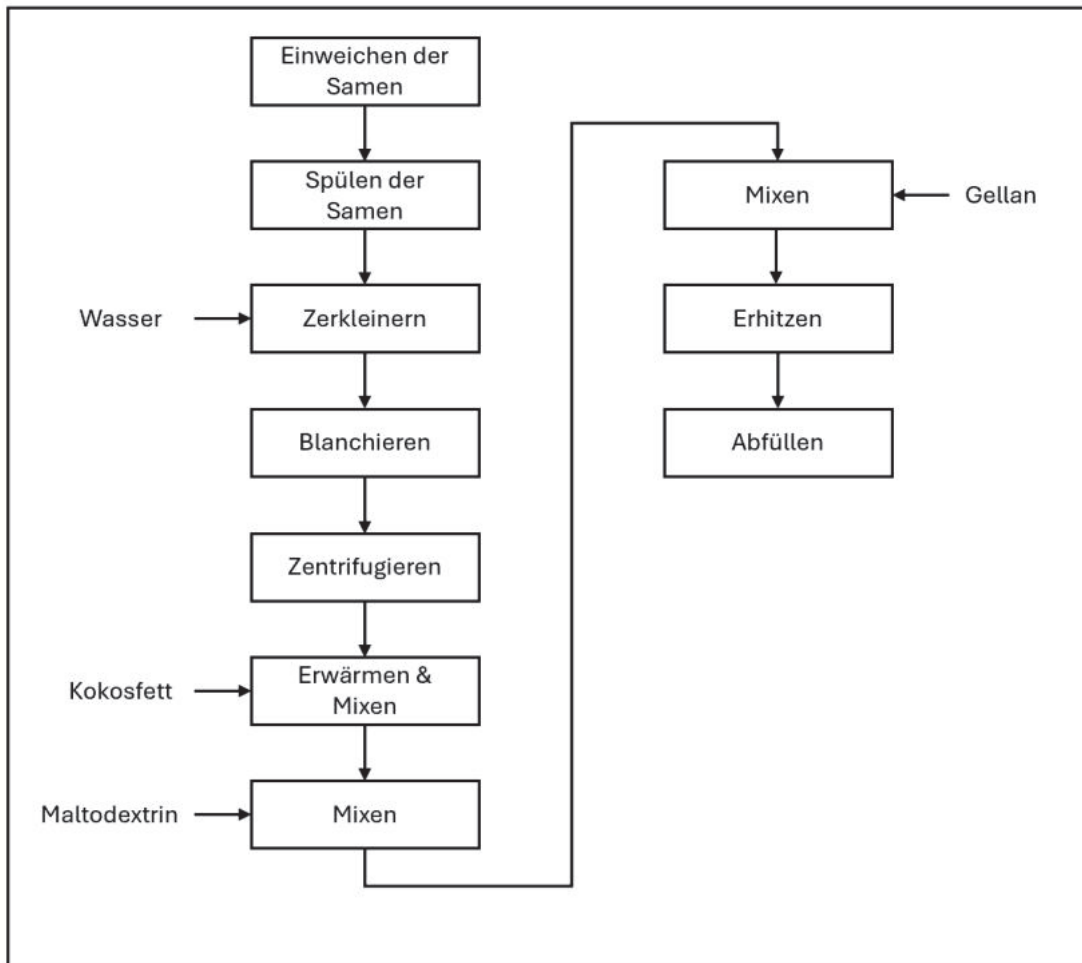


Abb. 14: Fließschema zur Herstellung des Lupinendrink-Prototyps – Phase 2

Die Herstellung des Lupinendrinks erfolgte analog zu dem im Kapitel 3.2.2.1 beschriebenen Verfahren, sodass im Folgenden nur der wesentliche Unterschied, dargelegt und beschrieben wird.

Hierzu wurden jeweils vier Zentrifugenbecher mit der Suspension befüllt und in das Gerät eingesetzt. Das Zentrifugieren fand jeweils über eine Dauer von 5 min bei einer Drehzahl n [min^{-1}] von 5000 min^{-1} und einer relativen Zentrifugalbeschleunigung (RZB) von 5087 statt. Nach Abschluss wurde der flüssige Überstand quantitativ aufgefangen und der Feststoff verworfen. Die Weiterverarbeitung schloss sich unmittelbar an den im vorher beschriebenen Herstellungsprozess aus Kapitel 3.2.2.1 an.

Am nächsten Tag erfolgte abermals eine visuelle Untersuchung und Viskositätsmessung, sowie eine Restfeuchtebestimmung. Aufgrund der erfolgreichen Ergebnisse wurde die finale Rezeptur für die Hochskalierung im Technikumsmaßstab festgelegt.

3.2.2.3 Technikumsmaßstab – Phase 1

Basierend auf den Ergebnissen und Auswertungen der zweiten Phase der Produktentwicklung wurde die finale Rezeptur, wie in Tab. 12 beschrieben, folgend definiert. Diese Zusammensetzung diente als verbindliche Grundlage für die anschließende Übertragung in den Technikumsmaßstab. In Anlehnung an die vorherigen Behandlungen der Bierwürze und den Wasserversuchen betrug das Zielvolumen des Ansatzes ca. 24 Liter. Aufgrund der zeitlichen Einschränkungen kam bereits dieser Lupinendrink für die Behandlung mit gepulsten elektrischen Feldern zum Einsatz.

Tab. 12: Finale Rezeptur - Lupinendrink

Zutat	Menge [%]	Hersteller
Lupinenextrakt	9,3	Brotbüro GmbH, Osterstraße 56, Hamburg, Deutschland, MHD: 10/2026, Charge: 2024-rr-bu
Bio Maltodextrin	4	FeelWell GmbH, Bahnhofsstr. 11, Gnarrenburg, MHD: 01.04.2026
Kokosfett - Palmin	3	Peter Kölln GmbH & Co. KGaA, Westerstraße 22-24, Elmshorn, MHD: 08.10.2026
Gellan (E418) – High acyl	0,01	Würzteufel GmbH, Robert-Bosch-Str. 18, Empfingen, MHD: 05.03.2026

Für ein Verhältnis (Samen/Wasser) von 1:11 werden für 3 kg Samen demnach 33 l Wasser benötigt.

Um die für die PEF-Versuche benötigten Probenmengen in konstanter Qualität und Menge bereitzustellen sowie eine allgemeine Reproduzierbarkeit zu ermöglichen, wurden zudem weitere Geräte und Anlagen ausgetauscht bzw. hinzugefügt. Da in dem benötigten Ausmaß eine Nassvermahlung, bzw. „Nasszerkleinerung“, der Lupinensamen nicht effizient ist, wurde anstelle des Thermomix TM5 eine Zentrifugalmühle zur Trockenvermahlung verwendet. Für einen kontinuierlicheren Prozess der Feststofftrennung wurde die Laborzentrifuge durch eine Kombination aus Packpresse und Separator ausgetauscht (Abb. 33 und 34, Anhang 5). Zum Erhitzen und Vermischen der Zutaten kam ein Kochkessel mit Rührwerk zum Einsatz (Abb. 35, Anhang 5). Da im späteren Verlauf festgestellt wurde, dass das Vermischen der Zutaten durch den Kochkessel unzureichend ist, erfolgte dieses zusätzlich mit einem Hochleistungs-Dispergiergerät. Aufgrund dessen gliedert sich der Versuch im Technikumsmaßstab abermals in zwei Phasen, wobei die letzte Phase die Fehler und technischen Probleme behebt, um die Reproduzierbarkeit sicherzustellen.

Alle verwendeten Geräte und Anlagen sowie Materialien sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tab. 13: Verwendete Geräte, Anlagen und Materialien zur Herstellung eines Lupinendrink-Prototypens – Phase 1

Geräte	Hersteller
Zentrifugalmühle – ZM 1000 + 12-Zahn-Rotor & 20 µm Lochring	RETSCH GmbH, Retsch-Allee 1-5, Haan, Deutschland
Vibrationsförderer für Zentrifugalmühle – DR1000	RETSCH GmbH, Retsch-Allee 1-5, Haan, Deutschland
Laborpresse/Packpresse – HPP 300	Wahler Maschinenbau GmbH, 71394 Kernen-Rommelshausen, Deutschland
POM-Block (Polyoxymethylen) für Presse	/
Presstücher	/
Edelstahlrahmen für Presse	/
Peristaltikpumpe – Masterflex L/S Cytotflow MF 77253-12	TECHLAB GmbH, Büchnerstraße 5, Braunschweig, Deutschland
Durchflussmessgerät – H250 PA Krohne	KROHNE Messtechnik GmbH, Ludwig-Krohne-Str. 5, Duisburg, Deutschland

Manometer	BUSSE Industrietechnik GmbH, Am Wiesenbusch 2, Gladbeck, Deutschland
Tellerseparator STC 3-03-107	GEA Westfalia Separator Group GmbH, Werner-Habig-Str. 1, Oelde, Deutschland
Waage – ADE EHQ1-40	ADE Germany GmbH & Co. KG, Neuer Höltingbaum 15, Hamburg, Deutschland
Waage - Entris II BCE6200-1S	Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Otto-Brenner-Straße 20, Göttingen, Deutschland
Präzisionswaage - Voyager	OHAUS Europe GmbH, Heuwinkelstr. 3, Nänikon, Schweiz
Kochkessel 75 l, mit Rührwerk	Polsinelli Enologia S.r.l Partita I.V.A, Via Carnello 323, Isola del Liri FR, Italien
Hochleistungs-Dispergiergerät – Ultra-Turrax T50 basic	IKA-Werke GmbH & Co. KG, Janke & Kunkel-Str. 10, Staufen, Deutschland
Kochtöpfe 15 l	/
Kochplatten	/
Kochlöffel	/
Schöpfkelle	/
Trichtersieb	/
Kunststoffeimer 40 l	/
Edelstahleimer 10 l	/

Für die Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab wurden zunächst ca. 3,1 kg Samen eingewogen und manuell von Fremdkörpern gereinigt. Die erhöhte Einwaage wurde gewählt, um mögliche Verluste beim Mahlen auszugleichen. Die Samen wurden anschließend in der Zentrifugalmühle mit einem 12-Zahn-Rotor und einem Lochring ($\varnothing 2\mu\text{m}$) bei 15.000 min^{-1} fein zermahlen. Als Dosierhilfe diente der Vibrationsförderer DR1000 mit einer Schwingamplitude von 90 % dazu, die Samen gleichmäßig in die Mühle zu führen. Das aufgefangene Mehl wurde dann mit 20 l Wasser eingemaischt und für 24 h bei $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ gelagert.

Am nächsten Tag erfolgte die Zugabe des restlichen Wassers (13 Liter) und die anschließende Erhitzung bei $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Kochkessel, wobei das Wasser zuerst erhitzt wurde, um

die Kochzeit aufgrund der Lagerung im Kühlraum zu verringern. Der gesamte Prozess dauerte fast 2 Stunden, da aufgrund des konvexen Bodens des Kochkessels die Wärmeübertragung minimiert war. Mithilfe des Ablassventils wurde dann der erhitzte Lupinenbrei abgelassen. Nach einer kurzen Abkühlphase erfolgte die Trennung der Flüssigkeit von den Feststoffen in Kombination durch die Packpresse und den Separator. Die nachfolgenden Tabellen listen die verwendeten Parameter und Anlagenspezifikationen beider Anlagen auf.

Tab. 14: Spezifikationen/Parameter für die Packpresse

Spezifikationen/Parameter	Wert
Durchmesser Zylinder (d) Packpresse	12,09 cm
Systemdruck (p_1)	20 bar
Maße Rahmen	20 cm · 20 cm ($a \cdot b$)
Pressdruck (p_2)	5,74 bar

Wobei gilt:

$$p_2 = \frac{p_1 * A_1}{A_2}$$

$$\text{Grundfläche Zylinder } A_1 = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$\text{Fläche Rahmen } A_2 = a * b$$

Tab. 15: Spezifikationen/Parameter für die Separatoranlage

Spezifikationen/Parameter	Wert
Durchflussrate	45 l/h
Drehzahl Pumpe	63 min ⁻¹
Druck Eingang	1 bar
Druck Ausgang	1,4 bar
Prozesstemperatur	35,8 °C

Für die Grobseparation wurden zunächst jeweils vier Edelstahlrahmen mit Presstüchern ausgelegt, mit dem Lupinenbrei befüllt und anschließend als Turm in die Packpresse gestellt. Der Systemdruck wurde stufenweise bis auf ein Maximum von 20 bar gesteigert, bis keine Flüssigkeit mehr austrat. Der spezifische Pressdruck auf die Pakete betrug ca. 5,74 bar (Tab. 14). Während das gewonnene Filtrat in einem Kunststoffeimer aufgefangen wurde, erfolgte am verbleibenden Presskuchen eine Restfeuchtebestimmung vor dessen Entsorgung. Zur darauffolgenden Feinseparation wurde die Flüssigkeit in die Separatoranlage überführt. Die Peristaltikpumpe wurde dafür mit einer Drehzahl von 63 min^{-1} betrieben und die Ventile soweit justiert bis sich ein Eingangsdruck von 1,0 bar und ein Gegendruck am Auslauf von 1,4 bar einstellte. Nach dem Starten des Separators wurde dann die feinseparierte, klare Flüssigkeit aufgefangen und den gereinigten Kochkessel überführt und auf $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt. Die Zugabe der restlichen Zutaten sowie weitere Erwärmung bzw. Erhitzung erfolgte nach den Prozessparametern der in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Verfahren. Da sich herausstellte, dass das Rührwerk für den Prozessschritt ungeeignet war, wurde wie zuvor beschrieben das Mischen und Homogenisieren mit dem Dispergiergerät vollzogen ($\text{Stufe } 6 / 10.000 \text{ min}^{-1}$). Der fertige Lupinen-
drink wurde schlussendlich abermals abgefüllt und für die PEF-Behandlung am darauffolgenden Tag bei $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gelagert.

Abbildung 15 stellt den für diesen Versuch genutzten Herstellungsprozess in einem Fließschema dar.

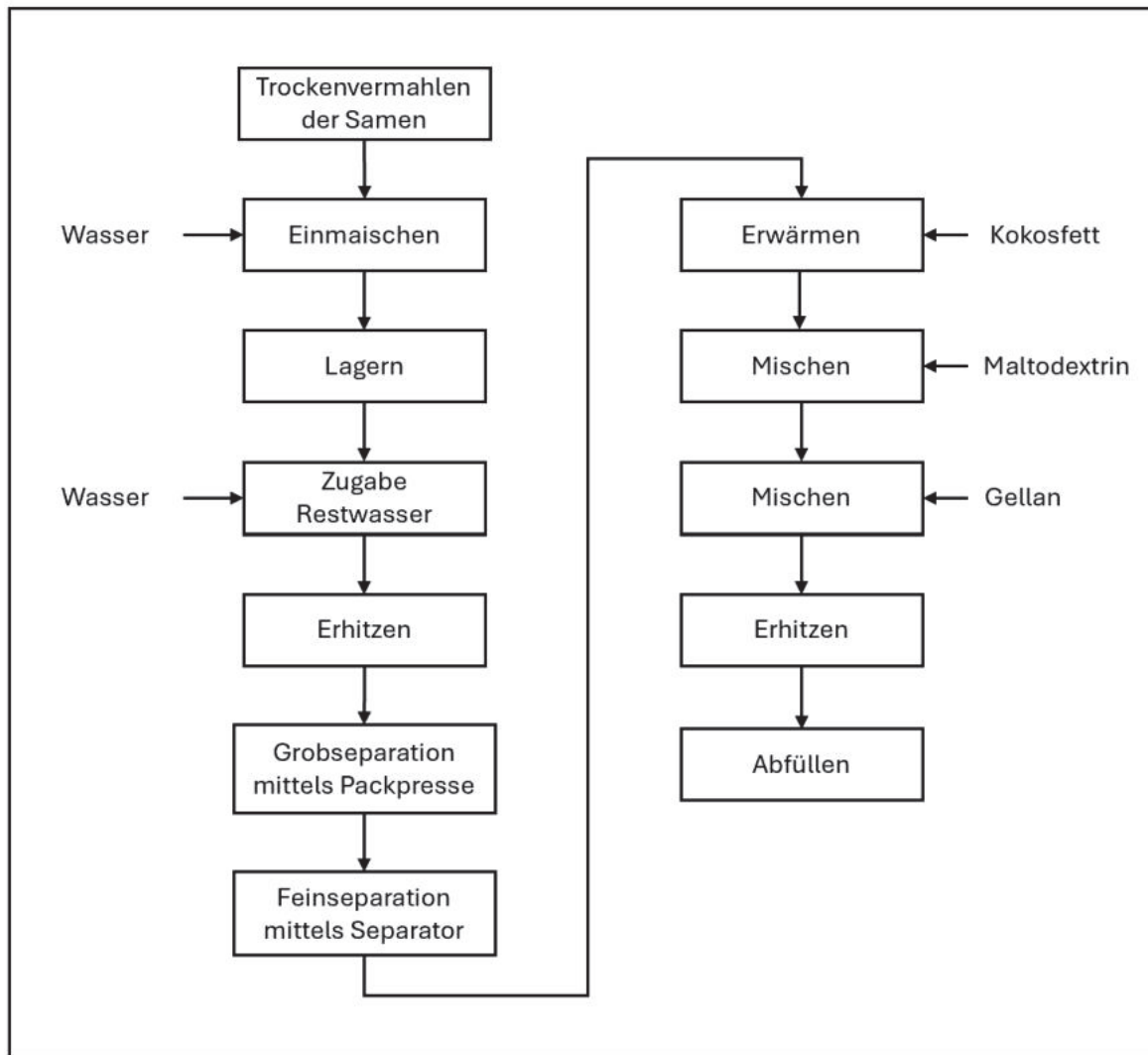


Abb. 15: Fließschema zur Herstellung des Lupinendrink im Technikumsmaßstab – Phase 1

3.2.2.4 Technikumsmaßstab – Phase 2

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, wurde die Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab ein weiteres Mal durchgeführt, um die technischen Probleme auszugleichen und eine Reproduzierbarkeit des Versuches zu gewährleisten. Hierfür wurde der Kochkessel vollständig aus dem Herstellungsprozess entfernt und gegen Kochtöpfe sowie dem Dispergiergerät ausgetauscht. Der gesamte Herstellungsprozess entspricht dem bereits in Kapitel 3.2.2.3 beschriebenen Verfahren. Bis auf den Austausch der Geräte wurden keine weiteren Änderungen vorgenommen. Daher ist in diesem Kapitel auf die ausführliche Beschreibung und Darstellung der verwendeten Geräte, Materialien, Zutaten u. s. w. verzichtet worden.

3.2.3 PEF-Behandlung – Phase 1

3.2.3.1 Wasserversuche

Tab. 16: Übersicht der verwendeten Geräte/Anlagen und Komponenten

Gerät/Anlage	Hersteller
PEF-Behandlungsanlage „PEF-Pilot Dual“ + Modulplatte Durchflusszelle DN10	Elea Technology GmbH, Niedersachsen- str. 5, Quakenbrück, Deutschland
Kreiselpumpe	KOCH Pumpentechnik-Vertriebs GmbH & Co. KG, Blumenstr. 17, Porta Westfalica, Deutschland
Temperiergerät – Regloplas P140smart	AIC Regloplas GmbH, Gewerbestr. 1, Pli- ening, Deutschland
2/2-Wege-Membranventil 673	GEMÜ Gebr. Müller Apparatebau GmbH & Co. KG, Gert-Müller-Platz 1, Kupferzell, Deutschland
Rohrleitungen und Schläuche (10er/25er)	/
Vorlaufbehälter 35 l	/

Mithilfe der technischen und wissenschaftlichen Mitarbeiter der Hochschule Neubrandenburg wurde zunächst das komplette Anlagensystem konfiguriert und aufgebaut. In der ersten Phase stand die allgemeine Handhabung der Anlage im Fokus. Hierbei wurden die Steuerungselemente, die Einstellungen der Parameter sowie die generelle Bedienung unter Verwendung von 24 l entmineralisiertem Wasser ohne Mikroorganismen erprobt.

Im Anschluss dessen, der Überprüfung der allgemeinen Funktionalität sowie mithilfe der Ergebnisse des ersten Versuches wurde ein Testlauf mit *Escherichia coli*-beimpften Wasser durchgeführt. Dafür wurden zuerst 24 l entmineralisiertes Wasser mit Kochsalz auf eine Leitfähigkeit von 1,6 mS/cm eingestellt, anschließend auf ca. 30 °C erwärmt, in den Vorlaufbehälter gefüllt und mit 2,4 ml Inokulum (*Escherichia coli*) beimpft, um auf einen Anfangskeimgehalt von $\times 10^5$ KbE/ml zu kommen, mit der Annahme, dass die Keimzahl des Inokulums bei $\times 10^9$ KbE/ml liegt. Nach einer Durchlaufzeit von 2 min mit einem eingestelltem Durchfluss von 1500 l/h, um eine ausreichende Durchmischung zu erzielen, und der Rückführung in den Vorlaufbehälter, wurde der Durchfluss mit dem

Membranventil auf 50 l/h gedrosselt und ein geeigneter Kunststoffbehälter zum Auffangen des behandelnden Mediums aufgestellt. Außerdem wurde das Quetschventil der Druckluftversorgung an der PEF-Anlage auf 2 bar eingestellt. Zur Untersuchung des Anfangskeimgehalt wurde zu diesem Zeitpunkt eine Probe (Nullprobe) entnommen. Zeitnah fand dann die Behandlung des Wassers mit den in Tabelle 17 beschriebenen Parametern statt. Nach jeder Anpassung der Prozessparameter und dem Start der Behandlung wurden ca. 2 l Medium abgewartet und verworfen, um sicherzustellen, dass das jeweilige zu beprobende Volumen aufgefangen wurde. Dadurch wurde gewährleistet, dass die entnommenen Proben repräsentativ für die jeweiligen eingestellten Prozessparameter waren und Vermischungen mit vorherigen Versuchsintervallen oder unbehandeltem Medium ausgeschlossen werden konnten. Die zugehörigen Proben wurden anschließend jeweils in sterilen Laborflaschen aufgefangen und gesammelt. Nach Abschluss des gesamten Versuches wurden diese dann in das mikrobiologische Labor gebracht und auf die Agarplatten aufgetragen. Im Anschluss des Versuches wurde das aufgefangene, beimpfte Medium sterilisiert und verworfen. Die Reinigung des gesamten Systems erfolgte nach derzeitigem Stand der industriellen Reinigung durch Natronlauge und Salpetersäure für jeweils 30 Minuten bei 65 °C und Zwischenspülen mit Wasser.

Tab. 17: Eingestellte Prozessparameter des ersten Wasserversuches

Prozessparameter	Werte
Feldstärke	0; 6; 12; 24 [kV/cm]
Elektrodenabstand	1 cm
Spez. Energie	5 kJ/l
Pulsweite	4 µs
Leitfähigkeit	1,6 mS/cm
Starttemperatur	30 °C
Durchfluss	50 l/h

3.2.3.2 Versuch Bierwürze

Nach der Auswertung der mikrobiologischen Untersuchungen der Wasserversuche fand in der darauffolgenden Woche die erste Behandlung einer Bierwürze mit gepulsten elektrischen Feldern statt.

Für die Behandlung am Folgetag wurde zunächst die gekühlte Bierwürze in der Brauereianlage auf 30 °C erwärmt und anschließend in den Vorlaufbehälter überführt. Nach der Beimpfung des Medium mit *Escherichia coli* sowie der Durchmischung mit einer Durchflussrate von 1500 l/h wurde der Durchfluss abermals auf 50 l/h gedrosselt. Der weitere Ablauf der Behandlung entspricht dem der Wasserversuche und erfolgte gemäß der in Kapitel 3.2.3.1 beschriebenen Vorgehensweise. Die Beimpfung des Mediums erfolgte mit einem Inokulationsverhältnis von $1:10^4$ ($V_{\text{Inokulum}}:V_{\text{Medium}}$)

Da die mikrobiologischen Ergebnisse des ersten Versuchsdurchlaufes mit Bierwürze von den in der Literatur beschriebenen Daten abwichen, wurde eine zweite Versuchsreihe mit *Escherichia coli* durchgeführt. Dies diente der Validierung der Ergebnisse sowie der Identifizierung möglicher systematischer Abweichungen. Die Herstellung der Bierwürze und anschließende Behandlung fand in der darauffolgenden Woche statt. Nach der Ergebnisbewertung der zweiten Versuchsdurchführung erfolgte die Behandlung mit *Saccharomyces cerevisiae* sowie *Staphylococcus carnosus* beimpfter Bierwürze. Die Durchführung entsprach den vorherigen Versuchsabläufen.

Tab. 18: Prozessparameter der *Bierversuche*

Prozessparameter	Werte
Feldstärke	24 kV/cm
Elektrodenabstand	1 cm
Spez. Energie	20; 40; 80; 120 [kJ/l]
Pulsweite	4 μ s
Starttemperatur	30-35 °C
Durchfluss	50 l/h

3.2.4 PEF-Behandlung – Phase 2

3.2.4.1 Testversuch Wasser – *Escherichia coli*

Aufgrund eines technischen Problems, welches sich erst nach der letzten Behandlung der Bierwürze mit *Staphylococcus carnosus* klarstellte und behoben wurde, folgt hier nun die Beschreibung der Durchführung des darauffolgenden Testversuches zur Überprüfung der Reparatur. Für die Verständlichkeit wird daher geraten, zuerst die Ergebnisse und Schlussfolgerung der vorherigen Versuche zu lesen (siehe Kapitel 4.3, S. 68 und Kapitel 5.3, S. 87).

Die Durchführung entspricht dem Ablauf der vorherigen Versuche und erfolgte gemäß der in Kapitel 3.2.3.1 beschriebenen Vorgehensweise, welche unter Begleitung des Servicetechnikers der Firma Elea Technology erfolgte. Die eingestellten Prozessparameter sind in nachstehender Tabelle (Tab. 19) dargestellt.

Tab. 19: Eingestellte Prozessparameter des *Testversuches mit Wasser*

Prozessparameter	Werte
Feldstärke	24 kV/cm
Elektrodenabstand	1 cm
Spez. Energie	20; 40; 80; 120 [kJ/l]
Pulsweite	4 µs
Starttemperatur	40 °C
Durchfluss	50 l/h

3.2.4.2 PEF-Behandlung der hergestellten Medien

Die Behandlungen mit der PEF-Anlage erfolgte immer am Tag nach der Herstellung der jeweiligen Medien. Zur Vorbereitung wurden zunächst die Medien auf eine Prozesstemperatur von ca. 40 °C erwärmt. Die Erwärmung der Bierwürze und der Lupinendricks fand jeweils in der zuvor mit Desinfektionslösung gereinigten Brauanlage statt, da diese zur Minimierung der Fremdverkeimung mit einem Deckel verschlossen werden konnte. Die erwärmten Medien wurden danach in den Vorlaufbehälter gefüllt und wieder mit einem Inokulationsverhältnis von 1:10⁴ beimpft. Die weitere Durchführung entspricht den Versuchen der ersten Phase, dessen Ablauf dem Kapitel 3.2.4.1 zu entnehmen ist.

Die eingestellten Prozessparameter sind in nachstehender Tabelle (Tab. 20) dargestellt.

Tab. 20: Prozessparameter für die Behandlung der Lupinendricks und der Bierwürze

Prozessparameter	Werte
Feldstärke	24 kV/cm
Elektrodenabstand	1 cm
Spez. Energie	60; 80; 100; 120 [kJ/l]
Pulsweite	4 μ s
Starttemperatur	40 °C
Durchfluss	50 l/h

3.2.5 Vor- & Nachbereitung für mikrobiologische Untersuchungen & Analysen

3.2.5.1 Herstellung der Nährböden, Reagenzien und Inokula

Tab. 21: Verwendete Materialien und Geräte zur Herstellung der Nährböden, Reagenzien und Inokula

Materialien/Geräte	Hersteller
CaSo-Agar	Carl Roth GmbH & Co. KG, Schömpferlenstr. 3-5, Karlsruhe, Deutschland Charge: 333341806
Sabouraud-2%-Glucose-Agar	Carl Roth GmbH & Co. KG, Schömpferlenstr. 3-5, Karlsruhe, Deutschland Charge: 394360811
Baird-Parker-Agar	AppliChem GmbH, Ottoweg 4, Deutschland Charge: 0Y005043
CaSo-Bouillon	AppliChem GmbH, Ottoweg 4, Deutschland Charge: 6P014160
Natriumchlorid 99,8%	Carl Roth GmbH & Co. KG, Schömpferlenstr. 3-5, Karlsruhe, Deutschland Charge: 146241755
Eigelb-Tellurit-Emulsion	Carl Roth GmbH & Co. KG, Schömpferlenstr. 3-5, Karlsruhe, Deutschland Charge: 215375889

Flaschenaufsatz-Dispenser – Brand Dispensette	Brand GmbH & Co. KG., Otto-Schott-Str. 25, Wertheim, Deutschland
Inkubationshaube TH30	Edmund Bühler GmbH, Schindäckerstr. 8, Bodelshausen, Deutschland
Waage BP 6100	Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Otto-Brenner-Straße 20, Göttingen, Deutschland
Autoklav – Laboklav	SHP Steriltechnik AG, Schloss Detzel 1, Haldensleben, Deutschland
Labor-Wasserbad – GFL 1002	GFL Gesellschaft für Labortechnik mbH, Schulze-Delitzsch-Str. 4, Burgwedel, Deutschland
Reagenzgläser	/
Reagenzglasständer	/
Stopfen	/
Rührbesteck	/
Messbecher	/
Impfösen	/
Petrischalen	/
Petrischalenständer	/
Bunsenbrenner	/
Bechergläser	/
Erlenmeyerkolben	/
Laborflaschen 250/500/1000 ml	/
Pipetten 5-50/100-1000 µl & 0,5-5 ml	/
Destilliertes Wasser	/

Die Herstellung der spezifischen Agarnährboden erfolgte gemäß den jeweiligen Herstellerangaben. Tabelle 22 listet die verwendeten Nährmedien und die dazu gehörigen Mikroorganismen auf. Die Pulver wurden dafür in entmineralisiertem Wasser gelöst und anschließend durch Autoklavieren sterilisiert. Die Herstellung der Kochsalzlösung (0,9%) für die Verdünnungsreihen erfolgte ebenfalls durch Einwaage, Lösung und anschließende Sterilisation im Autoklaven, wobei vorher jeweils 9 ml der Lösung in Reagenzgläser gefüllt wurde. Nach dem Autoklavieren wurden die Reagenzgläser zur Aufbewahrung bis zum Behandlungstag in die Kühlung (4 °C) gestellt. Die sterilisierten Nährmedien wurden hingegen zuerst auf 50 °C heruntergekühlt und anschließend in die Platten gegossen (ca. 20 ml). Dem Baird-Parker-Agar wurde zusätzlich vor dem Gießen eine Eigelb-Tellurit-

Emulsion nach Herstellerangaben hinzugegeben. Nach dem Erstarren des Agars wurden diese auch in die Kühlung gebracht und bis zum Behandlungstag gelagert, welcher zwei oder drei Tage später erfolgte.

Für das Inokulum, welches immer am selben Tag wie die Platten hergestellt wurde, wurde zunächst CaSo-Bouillon-Pulver abgewogen, in entmineralisiertem Wasser gelöst und anschließend im Autoklaven sterilisiert und bei 4 °C gelagert. Die Zugabe der Mikroorganismen in 50 ml CaSo-Bouillon zur Kultivierung erfolgte jeweils am Vortag des Behandlungstages. Die dafür verwendeten Kolonien stammten aus dem Bestand des Mikrobiologielabors der Hochschule Neubrandenburg oder wurden von einer qualifizierten Mitarbeiterin der Hochschule für die Versuche angefertigt. Nach der Zugabe wurde die Bouillon in einem Inkubationsschüttler (Inkubationshaube TH3) für 24 h und 130 min^{-1} und einer für die Mikroorganismen spezifischen Temperatur (Tab. 23) bebrütet.

Eine Darstellung der Mengenberechnung (ohne Herleitung/Formel) ist der Tabelle 55 (Anhang 4) zu entnehmen.

Tab. 22: Mikroorganismen und die dazu verwendeten Nährmedien

Mikroorganismus	Nährmedium
<i>Escherichia coli</i>	CaSo-Agar
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Sabouraud-2%-Glucose-Agar
<i>Staphylococcus carnosus</i>	Baird-Parker-Agar + Eigelb-Tellurit-Emulsion

Tab. 23: Temperatur zur Inkubation der Inokula

Mikroorganismus	Temperatur [°C]
<i>Escherichia coli</i>	37
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	30
<i>Staphylococcus carnosus</i>	37

3.2.5.2 Beimpfen und Inkubieren der Platten

Tab. 24: Verwendete Materialien und Geräte für das Beimpfen und Inkubieren

Materialien/Geräte	Hersteller
Pipetten 5-50/100-1000 µl & 0,5-5 ml	Brand GmbH & Co. KG., Otto-Schott-Str. 25, Wertheim, Deutschland
Reagenzglasschüttler – REAX top	Heidolph Scientific Products GmbH, Walpersdorfer Str. 12, Schwabach, Deutschland

<i>Escherichia coli</i> - K12	DSMZ – Deutsche Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen, Inhoffenstraße 7B, Brunswick, Deutschland DSM 498
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	DSMZ – Deutsche Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen, Inhoffenstraße 7B, Brunswick, Deutschland DSM 1333
<i>Staphylococcus carnosus</i>	DSMZ – Deutsche Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen, Inhoffenstraße 7B, Brunswick, Deutschland DSM 20501
Drigalski-Spatel	/
Ethanol	/
Bunsenbrenner	/
Vorbereitete Nährböden & NaCl-Lösung	/
Drehteller für Petrischalen	/
Brutschrank	/

Das Beimpfen der Agarplatten erfolgte nach dem Oberflächenausstrichverfahren. Zuerst wurde die Verdünnungsreihe hergestellt, indem jeweils 1 ml der Ausgangsprobe bzw. der Probe der vorherigen Verdünnungsstufe in ein Reagenzglas mit 9 ml-NaCl-Lösung pipetiert und mit dem Reagenzglasschüttler homogen verteilt wurde. Anschließend wurden 0,1 ml der entsprechenden Verdünnungsstufe auf die Mitte der Agaroberfläche aufgebracht und mithilfe des in Ethanol eingelegten, abgeflammt Drigalski-Spatels und einer Drehscheibe verteilt. Die beimpften Agarplatten wurden danach im Brutschrank inkubiert. Die Dauer sowie Temperatur der Bebrütung für die Mikroorganismen ist in Tab. 25 beschrieben.

Tab. 25: Verwendete Mikroorganismen sowie Inkubationstemperatur und -dauer

Mikroorganismus	Temperatur [°C]	Dauer [d]
<i>Escherichia coli</i>	37	1
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	30	2-4
<i>Staphylococcus carnosus</i>	37	2-4

3.2.5.3 Gesamtkeimzahlbestimmung und Bestimmung der Keimreduktion

Tab. 26: Verwendete Materialien und Geräte zum Auszählen der inkubierten Platten

Materialien/Geräte	Hersteller
Koloniezählgerät - 3.081 002	Schütt Labortechnik GmbH, Rudolf-Wissell-Str. 13, Göttingen, Deutschland

Stift	/
Inkubierte Platten	/

Nach der Inkubationsdauer der Platten wurden diese mithilfe eines Koloniezählgerätes ausgezählt und die Anzahl der KbE/ml nach der DIN EN ISO 7218 berechnet und ausgewertet. Dabei wurden nur Kolonien miteinbezogen, die in einem Bereich zwischen 10 und 300 lagen. Bei zwei aufeinanderfolgenden, auswertbaren Verdünnungsstufen wurde die Farmiloe-Formel verwendet. Die Mittelwert-gewichtete Gesamtkeimzahl N [KbE/ml] berechnet sich folgend:

$$N = \frac{\sum C}{V * [n_1 + (0,1 * n_2)] * d}$$

Wobei gilt:

$\sum C$	Summe von allen Kolonien der Platten von zwei aufeinander folgenden Verdünnungsstufen
V	pipettiertes Volumen einer Verdünnungsstufe auf die Platte in ml
n_1	Anzahl der auswertbaren Platten der niedrigsten Verdünnungsstufe (z. B. 10^{-2})
n_2	Anzahl der auswertbaren Platten der höheren Verdünnungsstufe (z. B. 10^{-3})
d	niedrigste Verdünnungsstufe (z. B. 10^{-2})

Bei Proben, bei welchen nur eine Verdünnungsstufe auswertbar war, wurde das arithmetische Mittel der Gesamtkeimzahl N [KbE/ml] mit folgender Gleichung ermittelt:

$$N = \frac{C}{V * d}$$

Wobei gilt:

C	gezählte Kolonien
V	pipettiertes Volumen einer Verdünnungsstufe auf die Platte in ml
d	Verdünnungsstufe der ausgewerteten Platte (z. B. 10^{-2})

Bei Proben, bei welchen keine Verdünnungsstufe auswertbar war, da die Koloniezahl unterhalb des festgelegten Bereiches (< 10) lag, wurden diese dennoch mit den Werten berechnet und mit dem Zusatz „geschätzte Keimzahl“ versehen.

Platten, welche aufgrund von Überwucherung oder Fremdverkeimung nicht auszählbar waren, wurden mit n. a. (nicht auswertbar) gekennzeichnet. Bei einer deutlich sichtbaren Keimzahl einer Platte von über 300 Kolonien wurde diese mit „>300“ beschrieben. Insofern bei einer Probe keine Kolonien gezählt werden konnten (= 0), wurde die Gesamtkeimzahl bzw. der Keimgehalt KbE/ml mit „< LOD“ angegeben.

Die Berechnung der Keimreduktion bzw. der log-Reduktionsstufe erfolgte über den Zehnerlogarithmus des Verhältnisses von Anfangskeimzahl und Endkeimzahl:

$$\log_{10} = \left(\frac{N_0}{N_e} \right)$$

Wobei gilt:

N_0 Ausgangskeimzahl/Keimzahl der Nullprobe

N_e Endkeimzahl/Keimzahl der jeweiligen behandelten Probe

Bei einer Gesamtkeimzahl unter der Nachweisgrenze (LOD) einer Probe wurde für die Berechnung der Keimreduktion mit einem Keimgehalt in Höhe von 100 KbE/ml gerechnet.

3.2.6 physikochemische Untersuchungen

3.2.6.1 Stammwürzegehalt

Tab. 27: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung des Stammwürzegehalts der Bierwürze

Gerät/Material	Hersteller
digitales Dichtemessgerät EasyDens	Anton Paar ConsumerTec GmbH, Anton-Paar-Straße 20, Graz
Plastikbecher	/
Schöpfkelle	/
Dosierspritze 10 ml	/

Die Messung des Stammwürzegehalts der Bierwürze erfolgte mithilfe eines digitalen Dichtemessgerätes „EasyDens“ der Firma Anton Paar ConsumerTex GmbH. Aufgrund der leichteren Handhabung wurde auf die standardmäßige Bestimmung durch das Spindeln verzichtet.

Hierfür wurde nach der Läuterung sowie nach dem Würzekochen jeweils eine Schöpfkelle von der (Vor-)Würze entnommen, auf 20 °C heruntergekühlt und mithilfe einer

Dosierspritze in das Gerät gespritzt. Mit einem Plastikbecher wurde die Würze aufgefangen und anschließend entsorgt.

Die Bestimmung durch das digitale Dichtemessgerät beruht auf dem Prinzip eines Biegeschwingers, wobei das Medium durch ein U-Rohr geleitet und elektrisch zum Schwingen gebracht wird. Durch die Messung der Schwingfrequenz kann die Dichte des Mediums bestimmt werden, worauf wiederum Rückschlüsse auf den Stammwürzegehalt gezogen werden können (Anton Paar GmbH, 2023).

3.2.6.2 Viskosität

Tab. 28: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung der Viskosität des Lupinendrinks sowie Sojadrink und Kuhmilch

Gerät/Material/Produkt	Hersteller
Dichtemessgerät Voyager	OHAUS GmbH, An der Johanneskirche 6, Giessen, Deutschland
Volumensenkörper 10 cm ³	OHAUS GmbH, An der Johanneskirche 6, Giessen, Deutschland
Kugelfallviskosimeter C (10°-Neigung)	Gebrüder Haake GmbH, Dieselstr. 4, Karlsruhe, Deutschland
Umwälzthermostat/Temperierbecken B3	Gebrüder Haake GmbH, Dieselstr. 4, Karlsruhe, Deutschland
Borosilikatglas-Kugel (Ø 15,60 mm ± 0,05; $\rho = 2,4 \text{ g/cm}^3$; $K = 0,09 \text{ mPa}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}$)	Gebrüder Haake GmbH, Dieselstr. 4, Karlsruhe, Deutschland
Borosilikatglas-Kugel (Ø 15,81 mm ± 0,01; $\rho = 2,4 \text{ g/cm}^3$; $K = 0,007 \text{ mPa}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}$)	Gebrüder Haake GmbH, Dieselstr. 4, Karlsruhe, Deutschland
Ni-Eisen-Kugel (Ø 15,60 mm ± 0,05; $\rho = 8,1 \text{ g/cm}^3$; $K = 0,09 \text{ mPa}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{s}$)	Gebrüder Haake GmbH, Dieselstr. 4, Karlsruhe, Deutschland
Bechergläser	/
Destilliertes Wasser	/
H-Milch 3,5 %	Sachsenmilch Leppersdorf GmbH, An den Breiten, Leppersdorf, Deutschland MHD: 29.12.25
Take it veggie - Veganer Sojadrink, ungesüßt	Soja Food GmbH, Kerkbreite 3, Beckum, Deutschland MHD: 16.06.25

Die Bestimmung der dyn. Viskosität erfolgte mithilfe eines Kugelfallviskosimeters und eines Dichtemessgeräts. Das Grundprinzip des Viskosimeters beruht dabei auf der Bestimmung der Fallzeit, die eine medienspezifische Kugel für eine geneigte und definierte

Messstrecke durch das Medium benötigt. Parallel dazu wurde die Dichte der Probenmedien (Lupinendrink, Sojadrink und Kuhmilch) nach dem Archimedischen Prinzip mithilfe des Dichtemessgeräts bestimmt.

Für die Dichte ρ [g/cm³] wurde hierzu zunächst die Masse m_1 [g] eines Senkkörpers mit einem Verdrängungsvolumen V [cm³] von 10 cm³ in Luft ermittelt. Anschließend erfolgte die Messung der Masse m_2 [g] des Senkkörpers im jeweiligen Probenmedium. Die gemessenen Werte wurden dann genutzt, um mit folgender Gleichung die Dichte zu berechnen:

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V}$$

Zur Ermittlung der jeweiligen Fallzeit wurde zunächst das Fallrohr mit den Medien randvoll und blasenfrei befüllt. Nach dem Einbringen einer medienspezifischen Kugel wurde das System fest verschlossen und das Viskosimeter mittels des Umwälzthermostats auf 20 °C temperiert. Die Auswahl der Kugel beruhte auf den im Benutzerhandbuch angegebenen Messbereichen der verschiedenen Kugeln. In Anlehnung an Literaturwerten für die dynamische Viskosität von Kuhmilch mit ca. 2 mPa·s (Beckh, 2025) wurde für diese sowie für den Sojadrink aufgrund ähnlicher Fließeigenschaft eine Borosilikatglas-Kugel (Ø 15,81 mm ± 0,01; $\rho = 2,4$ g/cm³; $K = 0,007$ mPa·s·cm³/g·s) verwendet. Für die Untersuchung des Lupinendrinks aus dem ersten Labormaßstabs (Phase 1), der eine puddingartige Konsistenz aufwies, wurde hingegen eine Nickel-Eisen-Kugel (Ø 15,60 mm ± 0,05; $\rho = 8,1$ g/cm³; $K = 0,09$ mPa·s·cm³/g·s) gewählt, um den Messbereich an die deutlich sichtbar höhere Viskosität anzupassen. Die weiteren Lupinendrinks aus den restlichen Versuchen wiesen eine augenscheinlich geringere Viskosität auf, weshalb hierfür wieder auf eine Borosilikatglas-Kugel (Ø 15,60 mm ± 0,05; $\rho = 2,4$ g/cm³; $K = 0,09$ mPa·s·cm³/g·s) zurückgegriffen wurde.

Nachdem die jeweilige Kugel zum ersten Mal durch das Fallrohr gegliedert war, wurde das Rohr um 180 °C gedreht. Gemessen wurde dann die Zeit, welche die Kugel für die Strecke vom ersten bis zum zweiten Messpunkt benötigte.

Die dynamische Viskosität η [mPa·s] berechnet sich aus dem Produkt der Fallzeit t [s], der Differenz aus der Kugeldichte ρ_1 [g/cm³] und der Dichte des Mediums ρ_2 [g/cm³] sowie der spezifischen Kugelkonstante K [mPa·s·cm³/g·s]:

$$\eta = t * (\rho_1 - \rho_2) * K$$

3.2.6.3 pH-Wert

Tab. 29: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung des pH-Wert der Bierwürze und des Lupinendrinks

Gerät/Material	Hersteller
Universalmessgerät WTW MultiLine P4	Xylem Analytics Germans Sales GmbH & Co. KG, Am Achalaich 11, Weilheim in Oberbayern, Deutschland
Destilliertes Wasser	/
Schöpfkelle	/
Plastikbecher	/

Die pH-Wert-Messung der Bierwürze sowie der Lupinendrinks erfolgte mittels eines Universalmessgeräts (WTW MultiLine P4). Hierzu wurde jeweils eine Probe nach dem Herstellungsprozess entnommen und auf 25 °C abgekühlt. Die Kalibrierung wurde vorher durch eine Mitarbeiterin der Hochschule Neubrandenburg vorgenommen. Die Messung erfolgte durch das Eintauchen der Sonde in das jeweilige Medium. Sämtliche Messungen erfolgten in Form einer Dreifachbestimmung.

3.2.6.4 Leitfähigkeit

Tab. 30: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung der Leitfähigkeit der Bierwürze und des Lupinendrinks

Gerät/Material	Hersteller
Universalmessgerät WTW MultiLine P4	Xylem Analytics Germans Sales GmbH & Co. KG, Am Achalaich 11, Weilheim in Oberbayern, Deutschland
Destilliertes Wasser	/
Schöpfkelle	/
Plastikbecher	/

Die Messung der Leitfähigkeit des Wassers, der Bierwürze sowie der Lupinendrinks erfolgte mittels eines Universalmessgeräts (WTW MultiLine P4). Hierzu wurde jeweils eine Probe nach dem Herstellungsprozess entnommen und auf 25 °C abgekühlt bzw. erwärmt. Die Kalibrierung wurde vorher durch eine Mitarbeiterin der Hochschule Neubrandenburg vorgenommen. Die Messung erfolgte durch das Eintauchen der Sonde in das jeweilige Medium. Sämtliche Messungen erfolgten in Form einer Dreifachbestimmung.

3.2.6.5 Restfeuchte

Tab. 31: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung der Restfeuchte des Lupinentresters

Gerät/Material	Hersteller
Schnellfeuchtemessgerät Moisture Analyzer MA 40	Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Otto-Brenner-Str. 20, Göttingen, Deutschland
Probenschalen - Alu	Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Otto-Brenner-Str. 20, Göttingen, Deutschland
Löffel	/
Pinself	/

Die Bestimmung der Restfeuchte des Trester aus der Herstellung des Lupinendrinks erfolgte jeweils mittels eines Schnellfeuchtemessgerät (MA 40). Hierzu wurden ca. $1,5 \text{ g} \pm 0,2$ gleichmäßig in eine Probenschale verteilt, in das Gerät gestellt und durch Infrarotstrahlung getrocknet. Die Differenz zwischen Einwaage und Trockenmasse ergab den prozentualen Feuchtegehalt der Probe, welches vom Gerät ermittelt wurde. Sämtliche Messungen erfolgten in Form einer Dreifachbestimmung.

3.2.7 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung für die Ergebnisse der Arbeit erfolgte mittels der rechnerischen Ermittlung des arithmetischen Mittelwertes, der Standardabweichung und der Varianzanalyse durch eine ein- sowie zweifaktorielle ANOVA ($\alpha = 0,05$ mit $n = 2$ bis 3). Die Ergebnisse der Ermittlung des arithmetischen Mittelwertes und der Standardabweichung wurden als Mittelwert $\pm$ Standardabweichung dargestellt.

Diese Daten wurden mit der Software Microsoft Excel (Version 2602) und dessen Statistik-Add-on ermittelt.

4 Ergebnisse und Auswertung

4.1 Herstellung der Bierwürzen

Die Ergebnisse zur Herstellung der Bierwürzen sind in ihrer Gesamtheit in nachfolgender Tabelle (Tab. 32) dokumentiert und dargestellt. Dazu gehören alle Versuche aus Phase 1 und Phase 2. Alle Werte der Einzelmessungen der physikochemischen Eigenschaften sind in Tab. 42-44 (Anhang 2) dargestellt. Die Parameter pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit wurden am Tag der Inokulation mit den Mikroorganismen bestimmt.

Tab. 32: Mengen und physikochemische Eigenschaften aller Bierwürzen

Versuch	Bierwürze 1	Bierwürze 2	Bierwürze 3	Bierwürze 4	Bierwürze 5
Mikroorganismus	<i>E. coli</i>	<i>E. coli</i>	<i>S. cerevisiae</i>	<i>Staph. carnosus</i>	<i>S. cerevisiae</i>
Gesamtmenge [l]	23,59	23,21	24,20	23,78	24,37
pH-Wert Ø	5,61 ± 0,01	5,54 ± 0,01	5,78 ± 0,04	5,52 ± 0,02	5,59 ± 0,02
Leitfähigkeit Ø [mS/cm]	1,75 ± 0,01	1,79 ± 0,00	1,88 ± 0,01	1,70 ± 0,02	1,93 ± 0,02
Stammwürzegehalt Ø [°Plato]	11,2 ± 0,06	11,5 ± 0,06	12,1 ± 0,06	11,1 ± 0,06	12,2 ± 0,06

Alle Abläufe zur Herstellung der Bierwürzen erfolgten ohne relevante Abweichungen oder Störungen, die einen Einfluss auf die physikochemischen Eigenschaften der Würzen hätten haben können.

Die pH-Werte der jeweiligen Bierwürze-Versuche lagen im Bereich von 5,52 bis 5,78. Die Leitfähigkeit wiederum im Bereich von 1,70 mS/cm und 1,93 mS/cm. Der Stammwürzegehalt war mit 11,1 °Plato bis 12,2 °Plato für ein Bier Pilsener Art repräsentativ und lag zwischen den angegebenen Werten aus der Brauanleitung. Die hergestellten Mengen für jeden einzelnen Versuch entsprachen, mit leichten Schwankungen, auch der Versuchsplanung (24 l).

4.2 Herstellung der Lupinendricks

4.2.1 Rezepturentwicklung im Labormaßstab – Phase 1

In der ersten Phase der Rezepturentwicklung stand die Bestimmung der Mengen der einzusetzenden Stabilisatoren (Gellan und Maltodextrin) und deren Einfluss auf die

Viskosität im Vordergrund. Hierzu wurde in zwei getrennten Versuchsreihen zum einen der Gellangehalt (0,02-0,06 %) bei konstantem Maltodextringehalt (6 %) und zum anderen der Maltodextringehalt (2-6 %) bei konstantem Gellangehalt (0,02 %) untersucht.

Die Herstellung der Lupinendricks für die Versuchsreihen 1 (Gellan) und 2 (Maltodextrin) verlief bis zur Fest-Flüssig-Trennung der Lupinensamen-Wasser-Suspension insofern ohne weitere Probleme. Die anschließende manuelle Filtration mithilfe eines Geschirrtuches stellte sich jedoch als kritischen Punkt heraus. Aufgrund des hohen mechanischen Drucks beim manuellen Pressen kam es vereinzelt zu Beschädigungen des Tuches sowie zum Austritt von Brei in die getrennte Flüssigkeit im Auffangbehälter. Trotz wiederholter Filtration konnte eine vollständige Abtrennung nicht gewährleistet werden. Infolgedessen verblieb ein erhöhter Anteil an Feststoffen in der aufgefangenen Flüssigkeit. Die fertigen Lupinendricks wiesen nach der Herstellung und dem Herabkühlen eine weißlich-gelbe Farbe auf. Die Begutachtung der jeweiligen Versuchsreihen am darauffolgenden Tag ergab keine visuelle Trennung der Bestandteile bis auf die Nullprobe, bei welcher sich der Drink deutlich in zwei Phasen aufgetrennt hat.

Der für den Lupinendrink im Labormaßstab zur Rezepturentwicklung wichtigste Untersuchungsparameter war die dyn. Viskosität. Dieser Parameter diente vorwiegend dazu, die Rezeptur zu verbessern, um im Anschluss einen geeigneten Lupinendrink für den Technikumsmaßstab und der späteren PEF-Behandlung herzustellen. Die Einzelwerte der Messungen zur Berechnung der Viskosität der Kuhmilch und des Sojadrinks sind in Tabelle 46 (Messung Gewicht Senkkörper) und in Tabelle 47 (Ermittlung Fallzeit) im Anhang 3 aufgelistet. Zur Berechnung der dyn. Viskosität für die Lupinendrink-Versuche 1 und 2 sowie der Nullproben sind nur die Viskositätswerte in nachfolgenden Tabelle 33 und 34 dargestellt, da die Daten zur Bestimmung der Dichte und die der Fallzeit nach der Berechnung abhandengekommen sind.

Tab. 33: dyn. Viskosität der einzelnen Proben aus Versuchsreihe 1 „Gellan“

Probe	Nullprobe	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1
Gellangehalt [%]	0	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Viskosität [mPa·s]	44,5	63,5	71	80	92,5	101

Tab. 34: dyn. Viskosität der einzelnen Proben aus Versuchsreihe 2 „Maltodextrin“

Probe	Nullprobe	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2
Maltodextringehalt [%]	0	2	3	4	5	6
Viskosität [mPa·s]	65,5	84	82,5	79	81	84

Die grafische Darstellung als Diagramm ist den folgenden Abbildungen 16 und 17 zu entnehmen.

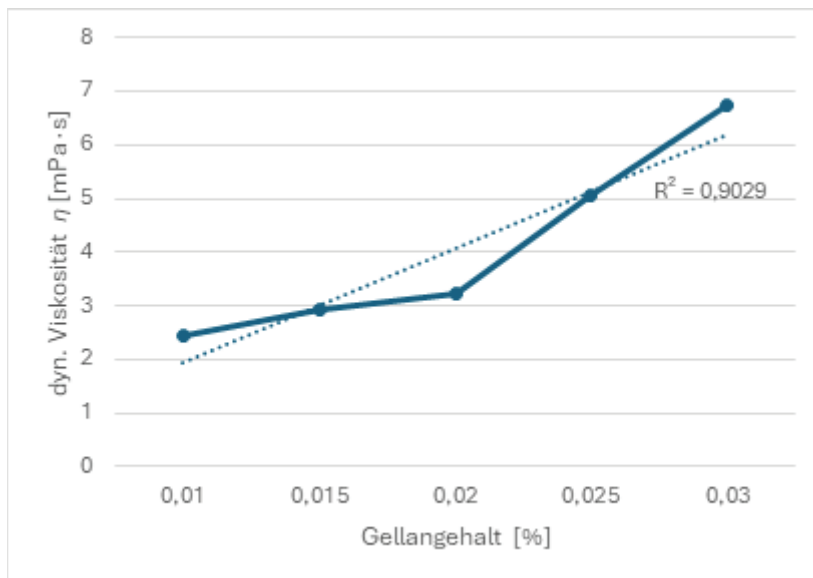


Abb. 16: Einfluss des Gellangehalts auf die dyn. Viskosität des Lupinendrinks mit 6 % Maltodextrin

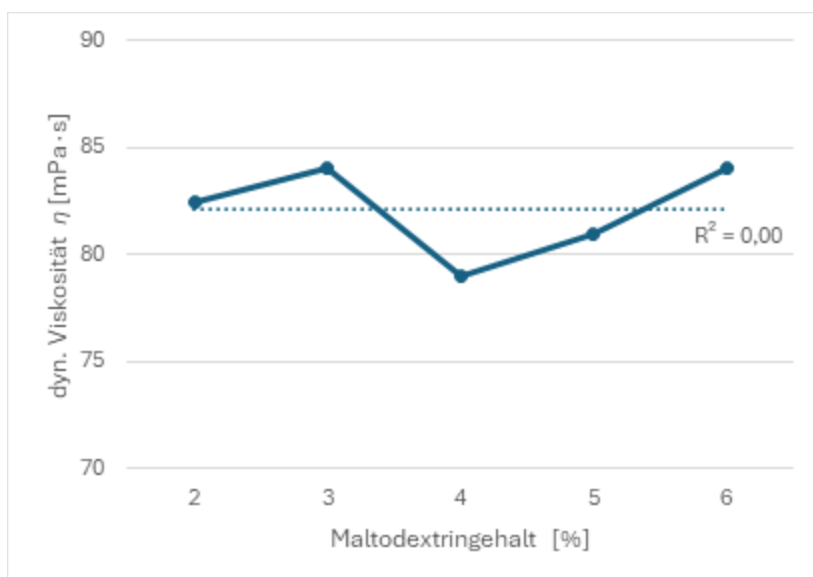


Abb. 17: Einfluss des Maltodextringehalts auf die dyn. Viskosität des Lupinendrinks mit 0,03 % Gellan

Die Untersuchungen der rheologischen Eigenschaften beider Versuchsreihen zeigt eine deutliche konzentrationsabhängige Zunahme der dynamischen Viskosität durch den Zusatz von Gellan bei einem konstanten Gehalt von 6 % Maltodextrin. Während bei einem Gellangehalt von 0,02 % die tiefste Viskosität mit 63 mPa·s gemessen wurde, führte eine Erhöhung zu einem nahezu linearen Anstieg der Viskosität bis zu einem Maximum von ca. 101 mPa·s bei 0,06 % Gellan. Die statistische Auswertung (siehe Tab. 69, Anhang 10) bestätigt den Trend als hochsignifikant ($p < 0,001$), wobei das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,99$ eine starke Korrelation zwischen Gellangehalt und Viskosität belegt. Im Gegensatz dazu zeigte die Versuchsreihe mit dem Maltodextringehalt zwischen 2 % und 6 % bei konstantem Gellangehalt keine Erhöhung der Viskosität. Die Messwerte schwanken hierbei zwischen 79 mPa·s und 84 mPa·s, ohne eine eindeutige Steigung vorzuweisen, was vermuten lässt, dass die Erhöhung des Maltodextringehalts zu keiner Erhöhung der Viskosität führt. Die statistische Auswertung ergab trotzdem ein signifikantes Ergebnis von $p = 0,013$ (Tab. 70, Anhang 10).

Die Viskositäten der Kuhmilch und des Sojadrinks ergaben sich durch die Berechnung mithilfe der in Kapitel 3.6.2.2 beschriebenen Gleichungen. Tabelle 35 stellt eine zusammenfassende Übersicht der berechneten Viskositäten dar.

Tab. 35: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten/berechneten Daten/Parameter

Probe	Gewicht Senk- körper [g]	Dichte Me- dium [g/cm ³]	Fallzeit Kugel [s]	dyn. Viskosität [mPa·s]
Kuhmilch 3,5 %	20,1924	1,0313	223,5	2,14
Sojadrink	20,3707	1,0135	192,0	1,86

Die Messungen ergaben für die Kuhmilch eine dyn. Viskosität von 2,13 mPa·s bei einer Dichte von 1,0313 g/cm³ und Temperatur von 20 °C. Der Sojadrink wies mit 1,87 mPa·s eine etwas niedrigere Viskosität bei einer Dichte von 1,0135 g/cm³ auf. Mit einer Viskosität von 44,5 und 65,5 mPa·s sind die beiden Nullproben deutlich dickflüssiger als die der Referenzmedien Kuhmilch und Sojadrink.

4.2.2 Rezepturentwicklung im Labormaßstab – Phase 2

In der zweiten Phase der Produktentwicklung wurde das Hauptaugenmerk auf die „Feinjustierung“ des Gellangehalts gelegt, um eine bestmögliche Annäherung an die Viskosität von Kuhmilch und Sojadrink zu erreichen. Basierend auf den Ergebnissen der ersten Phase wurde der Maltodextringehalt auf 4 % festgesetzt, während der Gellangehalt zwischen 0,01 und 0,03 % variiert wurde. Im Gegensatz zur ersten Versuchsdurchführung verliefen alle Prozessschritte ohne nennenswerte Probleme, die einen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften der Proben hätten haben können. Durch die Nutzung der Laborzentrifuge konnte eine sehr gute Trennung der Feststoffe von der Flüssigkeit erzielt werden. Die fertigen Lupinendricks wiesen nach der Herstellung und dem Herabkühlen eine gelblich-weiße Farbe auf. Die Begutachtung der jeweiligen Versuchsreihen am darauffolgenden Tag ergab keine visuelle Trennung der Bestandteile. Bei der Nullprobe haben sich am Boden leicht sichtbar ein paar Trubstoffe abgesetzt, welche sich nach leichtem Schütteln schnell verteilt haben (siehe Abb. 30, Anhang 5).

Alle Einzelwerte der Messungen zur Berechnung der Viskosität sind in Tabelle 47 (Messung Gewicht Senkkörper) und in Tabelle 48 (Ermittlung Fallzeit) im Anhang 3 aufgelistet. Die Viskositäten der jeweiligen Proben des Lupinendricks aus Phase 2 ergaben sich wiederum durch die Berechnung mithilfe der in Kapitel 3.2.6.2 beschriebenen Gleichungen. Die dazugehörigen Daten und berechneten Werte sind in nachfolgender Tabelle (Tab. 36) dargestellt.

Tab. 36: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten/berechneten Daten/Parameter des Lupinendricks – Rezepturentwicklung Phase 2

Gellangehalt [%]	Gewicht Senkkörper [g]	Dichte Medium [g/cm³]	Fallzeit Kugel [s]	dyn. Viskosität [mPa·s]
0,01	20,2951	1,0210	19,7	2,44
0,015	20,3012	1,0204	23,6	2,93
0,02	20,3175	1,0188	26,0	3,24
0,025	20,3340	1,0171	40,5	5,04
0,03	20,3428	1,0163	53,9	6,72
Nullprobe	20,4390	1,0066	12,2	1,53

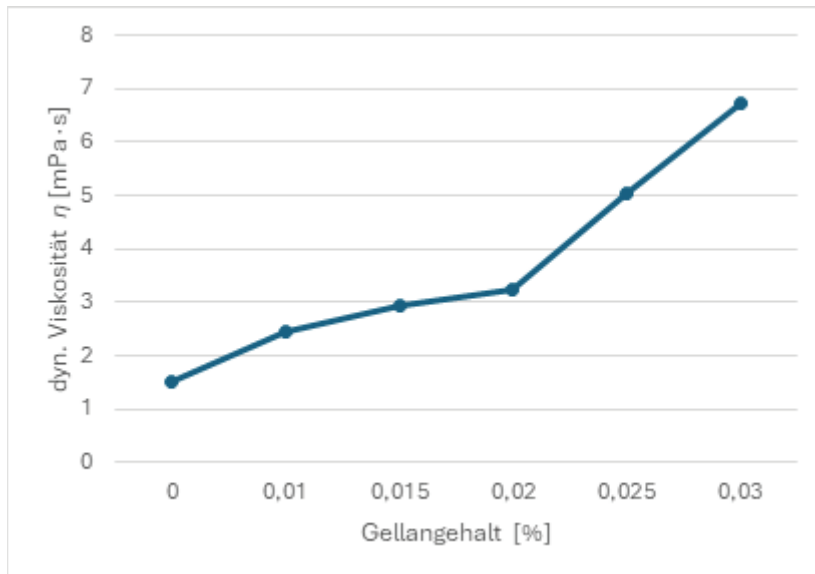


Abb. 18: Einfluss des Gellangehalts auf die dyn. Viskosität des Lupinendrinks mit 4 % Maltodextrin – Phase 2

Die Nullprobe wies bei 20°C eine dyn. Viskosität von 1,53 mPa·s vor. Mit steigendem Gellangehalt zeigte sich ein moderater Anstieg der Viskositäten (siehe Abb. 18). Die Probe 5 mit 0,03 % Gellan besaß die höchste Viskosität mit 6,72 mPa·s, die geringste Viskosität die Probe 1 (0,01 %) mit 2,44 mPa·s, gefolgt von Probe 2 (0,015 %) mit 2,93 mPa·s sowie Probe 3 (0,02 %) mit 3,24 mPa·s und Probe 4 (0,025 %) mit 5,04 mPa·s.

4.2.3 Herstellung Lupinendrink im Technikumsmaßstab – Phase 1

Für die Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab wurde eine Rezeptur genutzt, welche auf den Ergebnissen der Versuche im Labormaßstab beruhte. Mit dem vorangegangenen, festen Maltodextringehalt von 4 % aus der Phase 1 des Labormaßstabes wurde mit dem Abschluss der Phase 2 der Gellangehalt auf 0,01 % festgelegt. Neben dessen bestand der finale Lupinendrink aus 3 % Kokosfett und ca. 9,3 % Lupinenextrakt.

Die Einwaage der Lupinensamen betrug am ersten Versuchstag 3,108 kg. Nach dem Mahlprozess reduzierte sich das Gewicht aufgrund unzureichender Dichtheit der Mühle auf 3,021 kg. Durch die Zugabe des Wassers direkt danach sowie am Folgetag nach dem Einweichen wurde ein Gesamtgewicht von 36,11 kg eingestellt, um ein Mischungsverhältnis (Lupinensamen/Wasser) von ca. 1:11 zu erhalten. Nach der Fest-Flüssig-Trennung mittels Packpresse und Separator konnten 22,67 kg Flüssigkeit getrennt bzw.

aufgefangen werden, wobei ein Teil im System verbleiben musste und nicht ohne Mischphasen aufgefangen werden konnte. Dies entspricht, bezogen auf die Einwaage der Suspension, einem Massenverlust von 13,44 kg bzw. einer Ausbeute von 62,78 %. Die Restfeuchtebestimmung des Tresters ergab einen Wert von ca. 63,79 % $\pm$ 0,448 Restfeuchte (siehe Tab. 50, Anhang 3). Nach der Zugabe der restlichen Zutaten sowie dem Kochen betrug das Endgewicht 23,72 kg. Der pH-Wert des Lupinendrinks betrug 6,69 $\pm$ 0,02, die Leitfähigkeit 2,40 $\pm$ 0,01 mS/cm. Die Abbildungen 33 bis 36 im Anhang 5 zeigen einige der verwendeten Geräte sowie einzelne Prozessschritte.

Während der thermischen Behandlung der Lupinen-Wasser-Mischung vor der Fest-Flüssig-Trennung trat ein Problem auf, welches die Kochzeit auf über zwei Stunden verlängerte, anstelle der geplanten 30 min. Grund dafür war der konvexe Boden des Kochkessels, welches die Wärmeübertragung von der Heizplatte minimierte. Bei der Zugabe und Vermischen der Zutaten traten weitere Probleme auf, die eine gleichmäßige Homogenisierung verhinderte. Das auf dem Kochkessel integrierte Rührwerk konnte keine ausreichende Drehzahl sowie Drehmoment aufbringen, um die Zutaten genügend einzuarbeiten, welches im Labormaßstab mit dem Thermomix noch funktionierte. Um eine nachträgliche Homogenisierung zu ermöglichen, wurde ein Hochleistungs-Dispergiergerät eingesetzt. Wie in den Abbildungen 37 und 38 im Anhang 5 ersichtlich ist, konnte jedoch auch durch diese Maßnahme keine langfristige Stabilität erzielt werden. Zwar ließ sich durch Schütteln kurzzeitig eine visuelle Homogenität wiederherstellen, dennoch neigte der fertige Drink bereits nach 10 min zur schnellen Phasentrennung. Es schien aufgrund der unzureichenden Vermischung daher, dass nur ein Teil des Drinks durch das Gellan eine ausreichende Vernetzung der Matrix besaß.

Die Viskositätsmessung des im Technikum hergestellten Lupinendrinks erfolgte am darauffolgenden Tag durch eine wissenschaftliche Mitarbeiterin der Hochschule, da aufgrund des engen Zeitplans der Arbeit die PEF-Behandlung zeitnah erfolgen musste, trotz der deutlichen Phasentrennung des Drinks. Die durchschnittliche Viskosität des Lupinendrinks betrug laut Angaben 2,58 mPa·s. Eine Übermittlung der Daten der Dichtemessung und der Fallzeit fand leider nicht statt.

4.2.4 Herstellung Lupinendrink im Technikumsmaßstab – Phase 2

Die letzte Herstellung im Technikumsmaßstab für einen Lupinendrink umfasste, ausgehend von den Ergebnisse der ersten Phase des Technikumsmaßstabs, nur die Änderung zweier Prozessschritte, dem Kochen der Lupinen-Wasser-Mischung nach dem Einweichen sowie dem Kochen und Homogenisieren nach der Fest-Flüssig-Trennung. Anstelle des Kochkessels mit Rührwerk wurden mehrere größere Kochtöpfe und zur Homogenisierung ein Dispergiergerät verwendet. Die Menge an Lupinensamen, Wasser und den restlichen Zutaten wie Kokosfett, Maltodextrin und Gellan blieben gleich.

Die Einwaage der Lupinensamen für den zweiten Herstellungsversuch betrug 3,105 kg. Nach dem Mahlprozess reduzierte sich wieder das Gewicht auf 3,011 kg. Durch die Zugabe des Wassers direkt danach sowie am Folgetag nach dem Einweichen wurde ein Gesamtgewicht von 36,18 kg eingestellt, um ein Mischungsverhältnis (Lupinensamen/Wasser) von ca. 1:11 zu erhalten. Nach der Fest-Flüssig-Trennung mittels Packpresse und Separator konnten 21,81 kg Flüssigkeit getrennt bzw. aufgefangen werden. Dies entspricht, bezogen auf die Einwaage der Suspension, einem Massenverlust von 14,37 kg bzw. einer Ausbeute von 60,28 %. Die Restfeuchtebestimmung des Tresters ergab einen Wert von ca. 69,79 % $\pm$ 0,480 Restfeuchte (siehe Tab. 51, Anhang 3). Nach der Zugabe der restlichen Zutaten sowie dem Kochen betrug das Endgewicht 23,18 kg. Der pH-Wert des Lupinendrinks betrug 6,88 $\pm$ 0,05, die Leitfähigkeit 2,45 $\pm$ 0,01 mS/cm. Die Abbildungen 33 bis 36 im Anhang 5 zeigen einige der verwendeten Geräte sowie einzelne Prozessschritte.

Durch den Einsatz des Dispergiergerätes unter der Nutzung der Kochtöpfe konnte eine gleichmäßigere Vermischung der Zutaten erzielt werden. Trotzdem trennte sich der fertige Lupinendrink in zwei Phasen auf, auch wenn erst nach 60 min (siehe Abb. 39 und 40, Anhang 5). Dieser Zustand verblieb bis zum Folgetag.

Die Viskositätsmessung fand abermals am darauffolgenden Tag von einer wissenschaftlichen Mitarbeitern statt. Mit den Daten zur Dichtebestimmung und der Fallzeit gilt das Gleiche wie im vorherigen Versuch. Die durchschnittliche Viskosität des Lupinendrinks der 2 Phase des Technikumsmaßstab betrug laut Angaben 2,11 mPa·s.

4.3 PEF-Behandlung – Phase 1

4.3.1 Technischer Aufbau

Der Aufbau des Anlagensystems erfolgte in Anlehnung an den schematischen Aufbau von Witt et al. (2021). Die Konfiguration des Versuchsaufbaus umfasste die PEF-Behandlungsanlage, eine Förderpumpe, ein Membranventil, ein Vorlaufbehälter, ein Temperiergerät zur Kühlung der Anlage sowie verschiedene Rohrleitungen und -verschraubungen. Zusätzlich wurde die Anlage an einen Druckluftanschluss gekoppelt, um die notwendige Systemsteuerung zu gewährleisten. Die Temperatur-, Durchfluss- und Leitfähigkeitsmessung fand durch die in der PEF-Anlage eingebauten Messgeräte statt. Abbildung 19 zeigt die schematische Darstellung für diesen Aufbau. Abbildungen 41-42 (Anhang 6) zeigen den generellen Aufbau vor Ort.

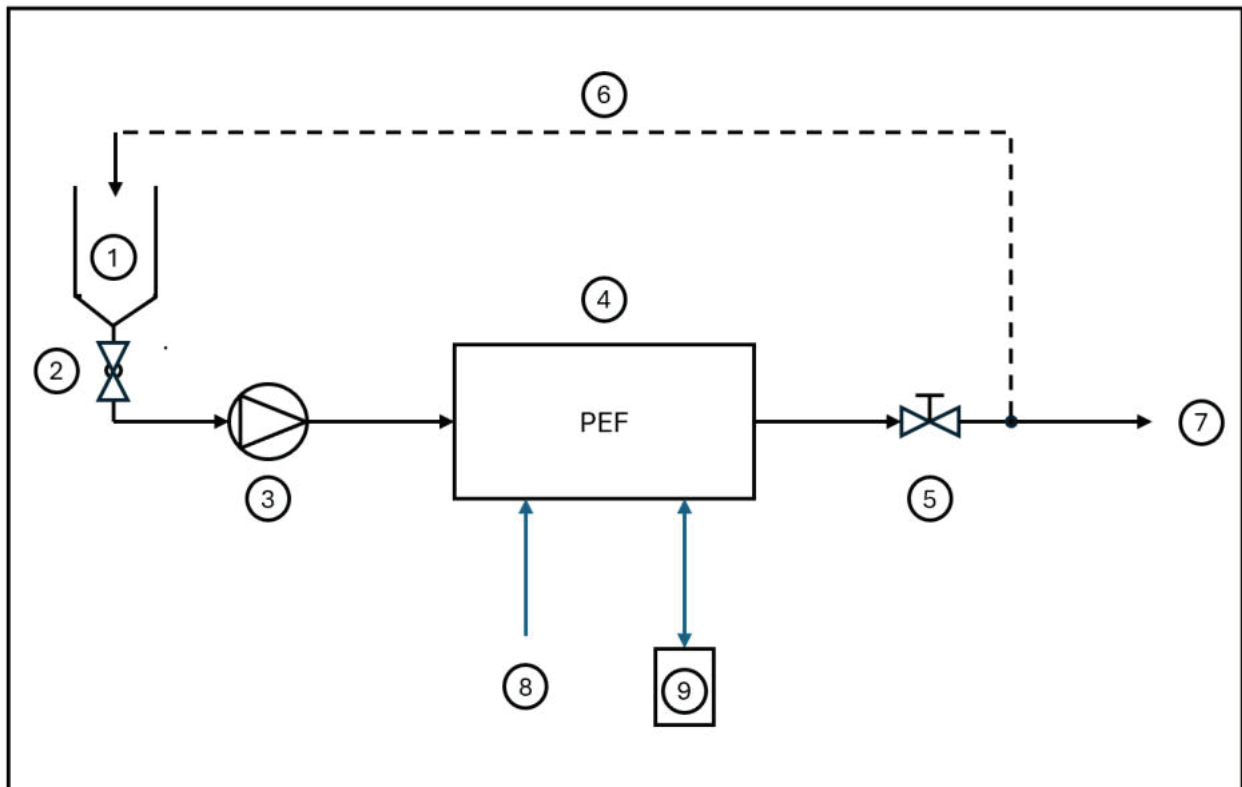


Abb. 19: Fließschema zum Aufbau des Anlagensystems - Wasserversuch. 1) Vorlaufbehälter, 2) Absperrventil 3) Kreislumpumpe, 4) PEF-Anlage, 5) Membranventil, 6) Rückfluss in Vorlaufbehälter, 7) Probenahme, 8) Druckluft, 9) Temperiergerät/Kühlung

Das Volumen des gesamten Anlagensystems umfasste ca. 39,20 l (mit Vorlaufbehälter). Die PEF-Anlage selbst hatte ein Fassungsvermögen von ca. 2,41 Litern. Die

Berechnungen erfolgten während des Aufbaus durch Ermittlung der Gesamtlänge der verschiedenen Rohrleitungen und des daraus resultierenden Volumens mit folgender Gleichung:

$$V = \pi * r^2 * h$$

Der Abstand der Minuspole zum Pluspol betrug dabei jeweils 8 cm. Bei einem Innendurchmesser von 1 cm und einer Gesamtlänge von 16 cm ist das effektive Behandlungsvolumen daher ca. 12,56 ml.

4.3.2 Wasserversuch – Inbetriebnahme und Einarbeitung

Durch die Inbetriebnahme und Einarbeitung der PEF-Anlage konnten verschiedene Rückschlüsse für die spätere Behandlung der beimpften Medien gezogen werden. Für die Funktionalität der Anlage spielte z.B. u.a. die Leitfähigkeit des Wassers eine wesentliche Rolle. Da zunächst nur entmineralisiertes Wasser genutzt wurde und dementsprechend die Leitfähigkeit sehr gering war, musste die Anlage eine sehr hohe Frequenz erzeugen, um die eingestellten spezifischen Energieeinträge zu ermöglichen. Diese wurden ab einer Feldstärke von 6 kV/cm und 5 kJ/l aber so hoch, dass sicherheitsbezogenen Grenzwerte der Anlage überschritten wurden und sich diese ausgeschaltet hat. Aus diesem Grund wurde für weitere Wasserversuche die Leitfähigkeit mithilfe von Kochsalz auf 1,5 bis 2,0 mS/cm erhöht.

Die ersten Versuche (ohne MO und Erhöhung der Leitfähigkeit) mit höheren Durchflussraten von > 150 l/h zeigten wiederum eine hohe Frequenzerzeugung auf, welche die Anlage versuchte aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeit zu kompensieren, um pro ml den gleichen Energieeintrag zu ermöglichen. Eine entsprechend hohe Durchflussrate für einen relativ großen Scale-up war aus technischen Gründen also nicht möglich. Des Weiteren waren im Technikum der Hochschule Neubrandenburg keine größeren Vorlaufbehälter vorhanden, um größere Mengen zu nutzen. Bei einem Testdurchlauf zur Probenahme mit dem Vorlaufbehälter mit 35 l war eine Durchflussrate von 50 l/h schlussendlich am handlichsten und am einfachsten zu realisieren.

4.3.3 PEF-Behandlung

Die mikrobiologischen Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen mit Wasser und Bierwürze sind in ihrer Gesamtheit im Anhang 7 dokumentiert und dargestellt. Auf eine weiterführende Berechnung und (statistische) Auswertung der Ergebnisse und Prozessparametern in Tabellenform und Grafiken wird jedoch verzichtet, da im Nachhinein festgestellt wurde, dass die Versuche inkonsistente und unlogische Ergebnisse erzielten. So fand sich z. B. auf sehr vielen Platten verschiedener Verdünnungsstufen oftmals eine Keimzahl von über 300 Keimen wieder oder sie waren gänzlich nicht auswertbar gewesen. Außerdem kam es zu einer Vermehrung von *Saccharomyces cerevisiae*, ausgehend von einer angenommen Anfangskeimzahl von $x \cdot 10^8$ KbE/ml, trotz Behandlung. Da dies nicht nur im ersten Wasserversuch auftrat, sondern auch in den darauffolgenden Bierversuchen, wurde von einem technischen Defekt der Anlage ausgegangen.

Infolgedessen wurde der Kontakt zu einem Servicetechniker der Firma Elea Technology hergestellt, welcher zeitnah die PEF-Anlage begutachtete. Er fand heraus, dass die Elektroden in der Anlage aus unerklärlichen Gründen beschädigt und korrodiert waren, wodurch eine sachgemäße Inaktivierung verhindert wurde. Des Weiteren überprüfte er den Anlagenaufbau, um weitere mögliche Einflussfaktoren zu finden. Unter anderem ergab nämlich der Blick auf die tatsächlich wirkenden Prozessparameter, dass diese nicht den eingestellten Parametern entsprachen und über die Behandlungszeit schwankten, wie z.B. der Durchfluss. So wurde zwar anfangs mit dem Membranventil eine Durchflussrate von ca. 50 l/h eingestellt, diese sank und stieg aber um ± 10 l/h. Es wurde von ihm daraufhin erläutert, dass die in dieser Arbeit verwendete Kreislumppe nicht optimal wäre und Probleme bei der Aufrechterhaltung der Durchflussrate bereite, für den Zweck aber ausreichend sei, vor allem, weil keine andere Pumpe im Technikum zur Verfügung stand. Um die Durchflussrate dennoch konstanter einstellen zu können, wurde das Membranventil versetzt. Die Schwankungen der Feldstärke (siehe Tabellen 57-62, Anhang 7) begründen sich laut dem Servicetechniker durch die physikalischen Wirkweisen der Anlage und seien nicht anders zu lösen.

Die Ergebnisse des Testversuches (Tab. 62, Anhang 7) bestätigten dann die fehlerhafte Behandlung durch die beschädigten Elektroden. Mit den neuen Elektroden im Einsatz konnte mit 24 kV/cm und ab 80 kJ/l eine vollständige Reduktion erzielt werden, ausgehend von einem Anfangskeimgehalt von $1,16 \cdot 10^5$. Die Behandlung mit 24 kV/cm und 120

kJ/l konnte nicht fortgeführt werden, da eine Störung auftrat, welche vom Servicetechniker aber beseitigt werden konnte. Da dies aber einen längeren Zeitraum beanspruchte, wurde die Beprobung weggelassen und ist daher nicht in der Tabelle 62 (Anhang 7) enthalten.

Neben der Reparatur und dem kleinen Umbau des Anlagensystems führte die Auswertung der ersten Versuchsreihe auch zu einer grundlegenden Anpassung der Versuchsplanung, da zum Anfang der Problembehebung davon ausgegangen wurde, dass die in der Versuchsplanung ausgewählten Prozessparameter ausschlaggebend für die geringe Inaktivierungsrate sei. Die Durchführung und (teilweise) Auswertung der Ergebnisse ergaben, dass eine Änderung der Versuchsplanung und damit einhergehenden Änderung der zu untersuchenden Prozessparameter zielführender für diese Arbeit wären, was im späteren Verlauf auch vom Servicetechniker bestätigt wurde. Daher wurde nicht mehr der Einfluss der elektrischen Feldstärke auf die Inaktivierungsrate untersucht, sondern dessen der spezifischen Energie bei gleichbleibender elektrischer Feldstärke (20; 40; 80; 120 kJ/l bei 24 kV/cm). Für die Versuche nach der Reparatur und Änderung der Versuchsplanung wurde der Einfluss der spezifischen Energie von 60, 80, 100 und 120 kJ/l bei einer Feldstärke von 24 kV/cm untersucht. Abbildung 44 (Anhang 6) stellt den finalen Aufbau dar.

Da aus zeitlichen und organisatorischen Gründen für die Masterarbeit nur noch wenig Zeit übrig blieb, wurde außerdem beschlossen, die zu untersuchenden Mikroorganismen zu reduzieren und nur noch einen Versuch mit *Escherichia coli*-beimpfter Bierwürze sowie zwei Versuche mit *Escherichia coli*- und *Saccharomyces cerevisiae*-beimpftem Lupinendrink durchzuführen.

4.4 PEF-Behandlung – Phase 2

4.4.1 Keimreduktion

Den nachfolgenden Tabellen 36 bis 38 sind die Gesamtkeimzahlen in KbE/ml, den dekadischen Logarithmus $\lg(N)$ der Keimzahl KbE/ml und der daraus resultierenden Keimreduktion $[\lg(N_0/N_e)]$ der jeweiligen Medien zu entnehmen. Die Prozessparameter der Behandlung der jeweiligen Behandlungsstufe sind in den Tabellen 66 bis 69 (Anhang 9) dargestellt. Die Verweilzeit t_{Verweil} , Anzahl der Pulse n und die Behandlungszeit t wurden dabei mit den in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Formeln berechnet. Die Tabellen 63 bis 65

(Anhang 8) stellen zusätzlich die Rohdaten der Keimzählung dar. Die Materialkontrolle (Kochsalzlösung) war bei allen Versuchen ohne jegliche Keime. Es ist daher davon auszugehen, dass eine Fremdverkeimung durch das Verdünnungsmedium auszuschließen ist.

Es ist anzumerken, dass für die Berechnung des dekadischen Logarithmus der Nullprobe (0 kJ/l) sowie der Keimreduktion der ersten Behandlungsstufe (60 kJ/l) des Versuches Bierwürze mit *Escherichia coli* die jeweiligen Gesamtkeimzahlen des Versuches Lupinendrink mit *Escherichia coli* für eine theoretische Basis verwendet worden sind, da aufgrund einer massiven Fremdverkeimung aller Platten der Nullprobe sowie der ersten Behandlungsstufe keine Gesamtkeimzahl bestimmt werden konnte. Generell gilt außerdem für alle Behandlungsstufen von allen Versuchen, dass für Gesamtkeimzahlen unter der Nachweisgrenze (<100 KbE/ml) mit 100 KbE/ml gerechnet wurde.

Aufgrund anlagenbedingter Schwankungen bei der Erzeugung des elektrischen Feldes wichen die gemessenen Werte für die Parameter Feldstärke und spezifische Energie geringfügig von den eingestellten Vorgaben ab. Die im Anhang 9 (Tab. 66 bis 68) aufgeführten Daten stellen Momentaufnahmen der geräteinternen Messung dar. Da sich diese Werte während der Behandlung stabil im Bereich der Soll-Vorgabe bewegten, wurde die Abweichung als vernachlässigbar eingestuft, weswegen in den Tabellen 37-39 die Soll-Werte angegeben sind.

Tab. 37: Ergebnisse Gesamtkeimzahl [KbE/ml], $\lg(N)$ [KbE/ml] und Keimreduktion [$\lg(N_0/N_e)$] – Lupinendrink mit *Escherichia coli* bei 24 kV/cm

spez. Energie [kJ/l]	Gesamtkeimzahl [KbE/ml] Ø	$\lg(N) \pm \sigma$ [KbE/ml]	Keimreduktion $\pm \sigma$ [$\lg(N_0/N_e)$]
0	$4,73 \cdot 10^5$	$5,65 \pm 0,20$	0
60	$9,33 \cdot 10^4$	$4,90 \pm 0,29$	$0,75 \pm 0,22$
80	$3,14 \cdot 10^3$	$3,48 \pm 0,17^{**}$	$2,17 \pm 0,02^{**}$
100	< 100 *	2,00	> 3,65
120	< 100 *	2,00	> 3,65

* Gesamtkeimzahl unterhalb der Nachweisgrenze von 100 KbE/ml

** Standardabweichung aus zwei Werten berechnet

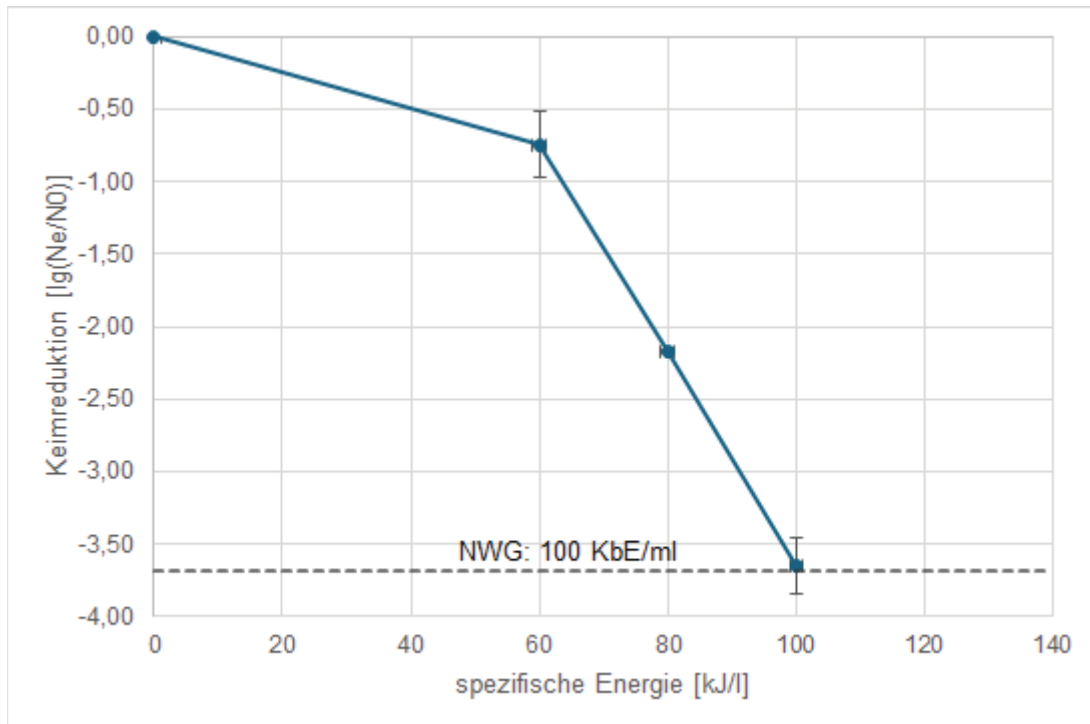


Abb. 20: Keimreduktion [lg(N_e/N₀)] in Abhängigkeit zur spezifischen Energie [kJ/l] – Lupinendrink mit *Escherichia coli* (NWG = Nachweisgrenze)

Die Untersuchung der Inaktivierung des Lupinendrinks (Tab. 37), welcher mit *Escherichia coli* beimpft wurde, ergab eine kontinuierliche Abnahme der Keimbelastung mit steigendem Energieeintrag, was durch den Kurvenverlauf in Abb. 20 verdeutlicht wird. Ausgehend von einem Anfangskeimgehalt bei 0 kV/cm und 0 kJ/l von $4,73 \cdot 10^5$ KbE/ml konnte ab der ersten Behandlungsstufe (60 kJ/l) eine Reduktion um $0,75 \pm 0,22$ log-Stufen verzeichnet werden. Diese erhöhte sich bei der zweiten Behandlungsstufe (80 kJ/l) auf $2,17 \pm 0,02$ log-Stufen. Bei einem Energieeintrag von 100 kJ/l und 120 kJ/l und einer Feldstärke von 24 kV/cm sank die Gesamtkeimzahl auf einen Wert unter der Nachweisgrenze. Es fand demnach in diesen Stufen eine vollständige Inaktivierung statt, welches in Abb. 20 mit dem Erreichen des Kurvenlaufes an die gestrichelte Linie visualisiert ist. Die errechnete Reduktion um 3,65 log-Stufen stellt dabei einen Mindestwert dar, dessen genaueren Ermittlung aufgrund der Nachweisgrenze nicht möglich ist.

Tab. 38: Ergebnisse Gesamtkeimzahl [KbE/ml], $\lg(N)$ [KbE/ml] und Keimreduktion [$\lg(N_0/N_e)$] – Lupinendrink mit *Saccharomyces cerevisiae* bei 24 kV/cm

spez. Energie [kJ/l]	Gesamtkeimzahl [KbE/ml] Ø	$\lg(N) \pm \sigma$ [KbE/ml]	Keimreduktion $\pm \sigma$ [$\lg(N_0/N_e)$]
0	$1,55 \cdot 10^7$	$7,19 \pm 0,06$	0,00
60	$1,65 \cdot 10^6$	$6,16 \pm 0,29$	$1,03 \pm 0,34$
80	$1,76 \cdot 10^5$	$5,24 \pm 0,06^{**}$	$1,94 \pm 0,04^{**}$
100	$2,50 \cdot 10^3$	$3,09 \pm 0,07^{**}$	$4,09 \pm 0,01^{**}$
120	< 100 *	2,00	> 5,19

* Gesamtkeimzahl unterhalb der Nachweisgrenze von 100 KbE/ml

** Standardabweichung aus zwei Werten berechnet

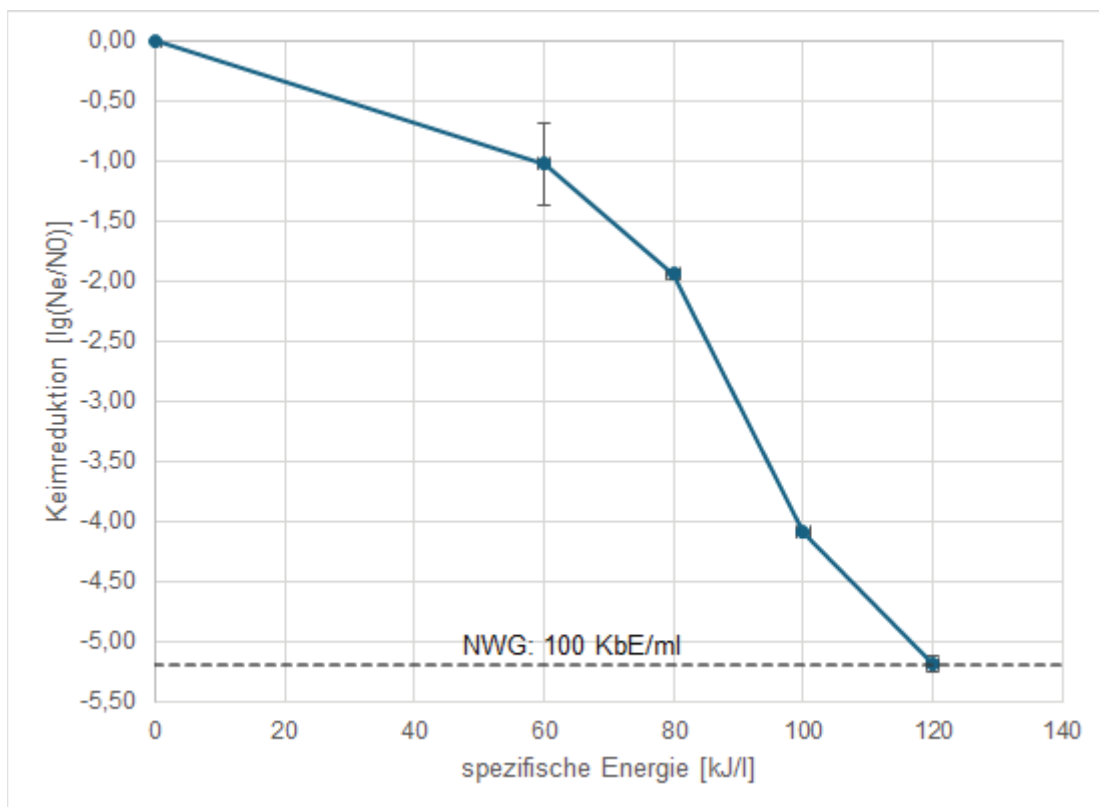


Abb. 21: Keimreduktion [$\lg(N_e/N_0)$] in Abhängigkeit zur spezifischen Energie [kJ/l] – Lupinendrink mit *Saccharomyces cerevisiae* (NWG = Nachweisgrenze)

Die kontinuierliche Abnahme der Keimbelastung mit steigendem Energieeintrag zeigt sich auch beim Lupinendrink mit *Saccharomyces cerevisiae* (siehe Tab. 38 und Abb. 21). Ausgehend von einem Anfangskeimgehalt von $1,55 \cdot 10^7$ KbE/ml sank die Keimzahl bis zur letzten Behandlungsstufe mit 120 kJ/l stetig ab. Im Gegensatz zum anderen Lupinendrink sank bei diesem Versuch die Keimzahl der Hefen mit 60 kJ/L um $1,03 \pm 0,34$ log-

Stufen. Bei einem spezifischen Energieeintrag von 80 kJ/l betrug die Reduktion $1,94 \pm 0,04$ log-Stufen, bei 100 kJ/l $4,09 \pm 0,01$ und bei 120 kJ/l $> 5,19$ log-Stufen, wobei mit 120 kJ/l abermals eine Gesamtkeimzahl unter der Nachweisgrenze vorlag.

Tab. 39: Ergebnisse Gesamtkeimzahl [KbE/ml], lg(N) [KbE/ml] und Keimreduktion $[\lg(N_0/N_e)]$ – Bierwürze mit *Escherichia coli* bei 24 kV/cm

spez. Energie [kJ/l]	Gesamtkeimzahl [KbE/ml] Ø	lg(N) ± σ [KbE/ml]	Keimreduktion ± σ $[\lg(N_0/N_e)]$
0	$4,73 \cdot 10^5$ *	$5,65 \pm 0,20$ *	0
60	$9,33 \cdot 10^4$ *	$4,90 \pm 0,29$ *	$0,75 \pm 0,22$ *
80	$1,50 \cdot 10^4$ **	$4,17 \pm 0,02$ **	$1,47 \pm 0,16$ **
100	$2,00 \cdot 10^3$ **	$3,30 \pm 0,06$ **	$2,35 \pm 0,25$
120	< 100 ***	2,00	$> 3,65$

* Werte aufgrund von Fremdverkeimung aus der Versuchsreihe Lupinendrink + *Escherichia coli* übernommen

** Gesamtkeimzahl unterhalb der Nachweisgrenze von 100 KbE/ml

*** Standardabweichung aus zwei Werten berechnet

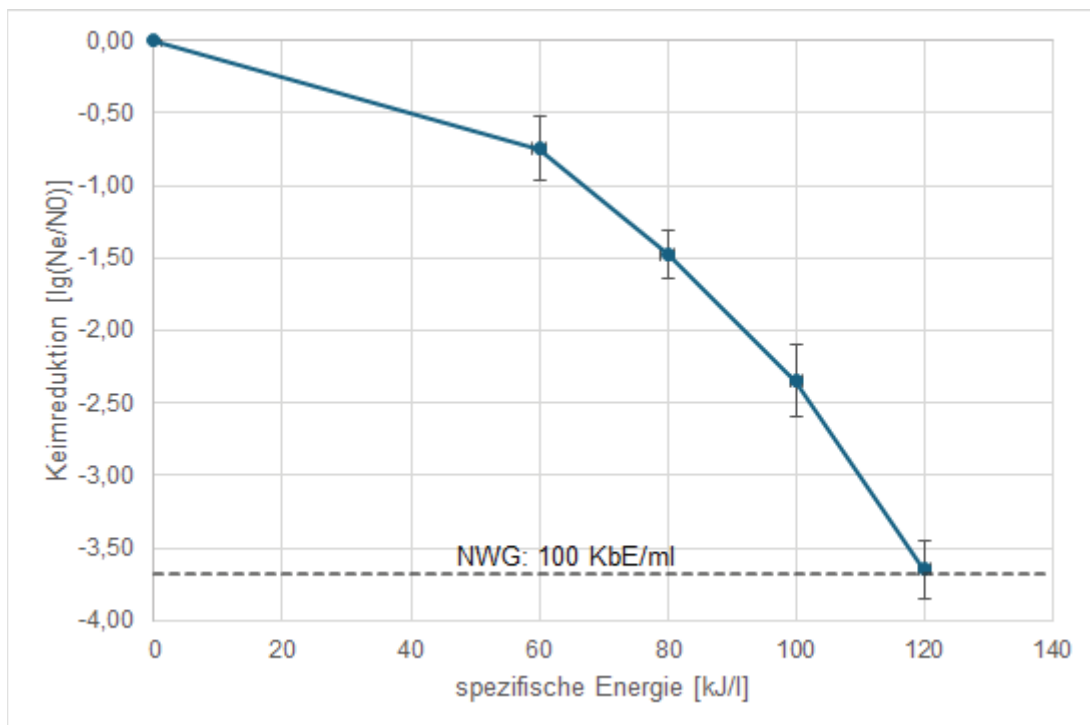


Abb. 22: Keimreduktion $[\lg(N_e/N_0)]$ in Abhängigkeit zur spezifischen Energie [kJ/l] – Bierwürze mit *Escherichia coli* (NWG = Nachweisgrenze)

Gleiches gilt für den Versuch mit der Bierwürze (siehe Tab. 39 und Abb. 22). Wie bereits erwähnt, wurde für den Anfangskeimgehalt und den Keimgehalt der Behandlungsstufe die Werte aus dem Versuch des ersten Lupinendrink-Versuches für eine theoretische

Basis übernommen. Trotz dessen ist ein kontinuierlicher Kurvenfall bzgl. der Keimreduktion zu erkennen. Bei der Behandlungsstufe mit 80 kJ/l kam es, anstatt von $2,17 \pm 0,22$ log-Stufen wie beim ersten Lupinendrink-Versuch, zu einer Reduktion von $1,47 \pm 0,16$ log-Stufen. Die Reduktion der dritten Behandlungsstufe (100 kJ/l) verlief sich auf $2,35 \pm 0,25$ log-Stufen, welche dann mit 120 kJ/l wieder zu einer Gesamtkeimzahl unter der Nachweisgrenze führte ($> 3,65$ log-Stufen).

Des Weiteren ist bei allen Versuchsreihen eine kontinuierliche Temperaturerhöhung des Mediums mit steigender spezifischen Energie zu verzeichnen. Beim Lupinendrink (*E. coli*) lag die Starttemperatur (Nullprobe) bei 42,4 °C. Bei einer Energieeintragung von 60 kJ/l erhöhte sich diese auf 57,2 °C bis zu einer Temperatur von 74,2 °C bei 120 kJ/l. Die Starttemperatur des Lupinendrinks, welche mit *S. cerevisiae* beimpft wurde, lag hingegen bei 40,6 °C und erhöhte sich durch die erste Behandlungsstufe auf 54,4 °C. Nach der Behandlung mit 120 kJ/l betrug die Endtemperatur des Mediums 72,7 °C. Bei der Bierwürze hingegen lag die Starttemperatur bei 40,6 °C, welches sich kontinuierlich bis zur letzten Behandlungsstufe auf 72,4 °C erhöhte. Abbildung 23 fasst den Kurvenverlauf der Temperatur von allen Versuchen im Bezug zur spezifischen Energie zusammen.

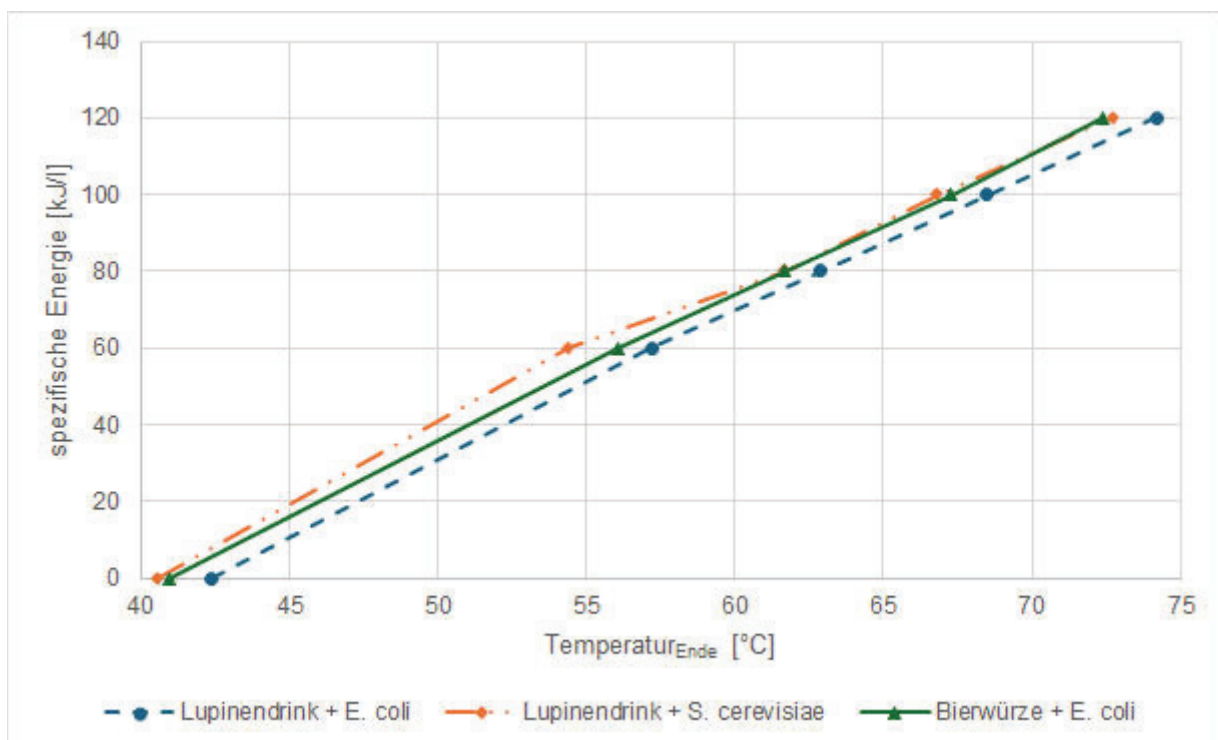


Abb. 23: Zusammenfassende Darstellung der Temperaturverläufe aller Versuche in Bezug zur spezifischen Energie [kJ/l]

Eine Erhöhung der Pulsanzahl sowie der effektiven Behandlungszeit [µs] ergab sich auch mit einer Erhöhung der spezifischen Energie [kJ/l], wie in den Tabellen 66 bis 68 (Anhang

9) zu erkennen ist. Im ersten Lupinendrink-Versuch mit *E. coli* betrug die Pulsanzahl bei 60 kJ/l 42,56 Pulse und die Behandlungszeit 170,22 μ s. Dies erhöhte sich kontinuierlich bis zu 120 kJ/l auf 77,39 Pulse und 309,56 μ s. Ähnliche bzw. gleiche Werte sind im zweiten Lupinendrink-Versuch zu verzeichnen mit 42,66 Pulsen und 170,63 μ s bei 60 kJ/l und 77,39 Pulsen und 309,56 μ s bei 120 kJ/l. Beim Bierwürze-Versuch stieg die Pulsanzahl und die Behandlungszeit zwar auch mit der Erhöhung der spezifischen Energie, dort stiegen die Werte aber von 56,07 Pulse und 224,27 μ s (60 kJ/l) auf 98,57 Pulsen und 394,28 μ s (120 kJ/l).

Zur besseren Übersicht und Einordnung sind die physikochemischen Werte (pH und Leitfähigkeit) der einzelnen Medien in Tabelle 40 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 40: Zusammenfassung physikochemischer Eigenschaften der Medien

Medium	pH-Wert	Leitfähigkeit [mS/cm]
Lupinendrink mit <i>Escherichia coli</i>	6,69 $\pm$ 0,02	2,40 $\pm$ 0,01
Lupinendrink mit <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	6,88 $\pm$ 0,05	2,45 $\pm$ 0,01
Bierwürze mit <i>Escherichia coli</i>	5,59 $\pm$ 0,02	1,93 $\pm$ 0,02

4.4.2 Allgemeiner Einfluss der spezifischen Energie bzgl. Keimreduktion

Der Trend, dass in allen Versuchen eine Erhöhung der spezifischen Energie zu einer höheren Keimreduktion führte, wurde mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse ($\alpha = 0,05$) geprüft. Das Ziel dessen war, die Abhängigkeit der Keimreduktion vom spezifischen Energieeintrag statistisch zu belegen, wobei nur Behandlungsstufen einbezogen wurden, welche oberhalb der Nachweisgrenze lagen.

Für die statistische Auswertung des Versuches „Lupinendrink mit *E. coli*“ wurden die Behandlungsstufen 60 kJ/l ($n_1 = 3$) und 80 kJ/l ($n_2 = 2$) genutzt. Aufgrund einer Fremdverkeimung im dritten Replikat der 80 kJ/l-Stufe musste der Stichprobenumfang auf zwei Werte reduziert werden. Trotzdem konnte mit $p = 0,004$ ein signifikanter Einfluss der Energieerhöhung auf die log-Reduktion nachgewiesen werden ($p < \alpha$). Somit kann die

Nullhypothese, dass die Erhöhung der Keimreduktion nicht von der spezifischen Energie abhängig ist, verworfen werden (siehe Tab. 71, Anhang 10).

Für den Versuch „Lupinendrink mit *S. cerevisiae*“ wurde die ANOVA über die Stufen 60 kJ/l ($n_1 = 3$), 80 kJ/l ($n_2 = 2$) und 100 kJ/l ($n_3 = 2$) durchgeführt. Auch hier standen für die höheren Behandlungsstufen (80 und 100 kJ/l) nur zwei auswertbare log-Reduktionswerte zur Verfügung. Wie beim ersten Versuch ergab die schrittweise Steigerung der spezifischen Energie mit $p = 0,0003$ auch einen signifikanten Einfluss der spezifischen Energie auf die Keimreduktion (siehe Tab. 72, Anhang 10).

Beim Versuch „Bierwürze mit *E. coli*“ erfolgte die ANOVA über den Bereich von 60 kJ/l ($n_1 = 3$) bis 100 kJ/l ($n_2, n_3 = 2$). Trotz der gewählten theoretischen Basis, also der Übernahme der Gesamtkeimzahlen aus dem ersten Lupinendrink-Versuch, konnte mit $p = 0,003$ ein signifikanter Zusammenhang zwischen Energieeintrag und Keimreduktion nachgewiesen werden (siehe Tab. 73, Anhang 10).

Bei allen Versuchen markierte die Behandlungsstufe mit 120 kJ/l das Erreichen der NWG, im Versuch Lupinendrink mit *E. coli* auch die Stufe 100 kJ/l. Zusammenfassen ergibt die statistische Auswertung mit der einfaktoriellen Varianzanalyse, dass in allen Versuchen eine Erhöhung der spezifischen Energie innerhalb der gewählten Werte zu einer statistisch gesicherten Steigerung der Inaktivierungsrate führte.

4.4.3 Vergleich Lupinendrink – Bierwürze

Wie die Daten aus Kapitel 4.4.1 (Tab. 39) aufzeigen, ist im Vergleich zum Lupinendrink-Versuch ($\text{pH } 6,69 \pm 0,02$ & Leitfähigkeit $2,40 \pm 0,01$ mS/cm) im Bierwürze-Versuch ($\text{pH } 5,59 \pm 0,02$ & Leitfähigkeit $1,93 \pm 0,02$ mS/cm) eine niedrigere Keimreduktion bei gleichem Energieeintrag zu verzeichnen, wobei anzumerken ist, dass für die Auswertung die log-Reduktionswerte des Lupinendrink-Versuches als theoretische Basis für den Bierwürze-Versuch herangezogen worden sind.

Um den Einfluss der Lebensmittelmatrix auf die Inaktivierung von *E. coli* statistisch zu prüfen, wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse ($\alpha = 0,05$; $n = 2$) über drei Behandlungsstufen (60, 80 und 100 kJ/l) durchgeführt (siehe Tab. 74, Anhang 10). Für die Behandlungsstufe mit 100 kJ/l im Lupinendrink-Versuch wurde die log-Reduktion auf Basis der Nachweisgrenze von 100 KbE/ml mit in die Berechnung einbezogen, da im

Bierwürze-Versuch in selbiger Behandlungsstufe die Gesamtkeimzahl oberhalb der Nachweisgrenze ($> 100 \text{ KbE/ml}$) lag.

Infolgedessen wurde ein signifikanter Unterschied in der Keimreduktion zwischen dem Lupinendrink und der Bierwürze mit $p = 0,00165$ ($p < \alpha$) nachgewiesen. Demzufolge erfährt in diesen Versuchen *E. coli* in Bierwürze eine statistisch signifikant geringere Keimreduktion als in Lupinendrink bei gleicher Feldstärke und gleichen spezifischen Energien, welches in Abb. 24 visualisiert ist.

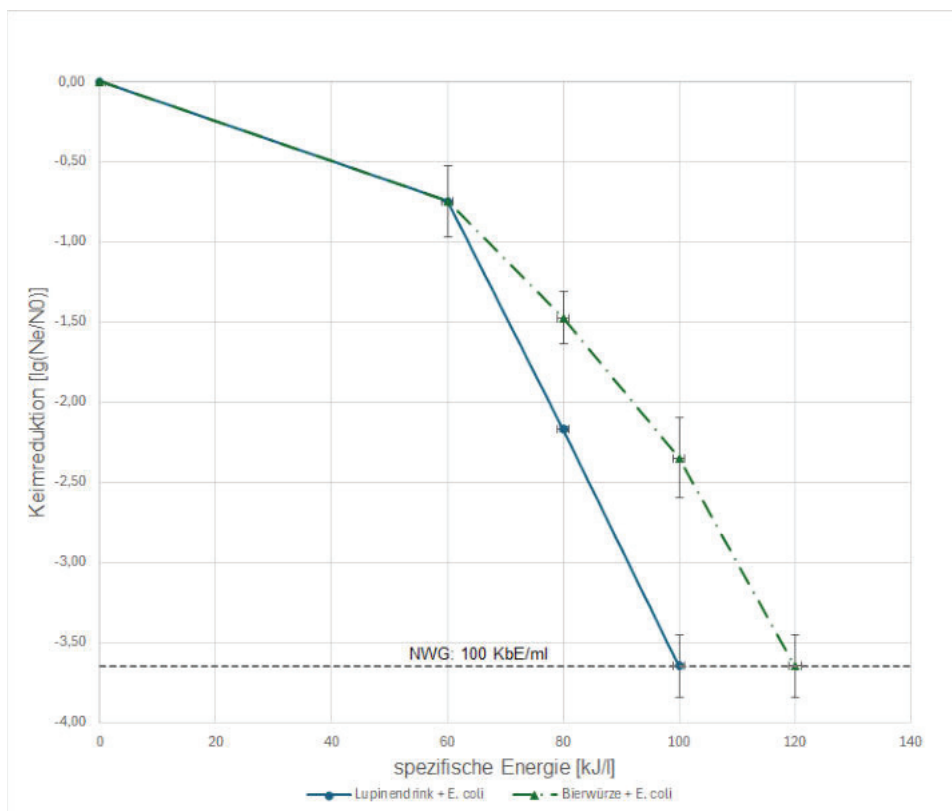


Abb. 24: Zusammenfassung physikochemischer Eigenschaften der Medien

4.4.4 Vergleich *Escherichia coli* – *Saccharomyces cerevisiae*

Aus den Daten in Kapitel 4.4.1 ist auch zu entnehmen, dass zwischen den beiden Mikroorganismen kein Unterschied bzgl. Keimreduktion bei jeweils gleichem Energieeintrag besteht. Im Vergleich des mit *E. coli*-beimpften Lupinendrinks (pH $6,69 \pm 0,02$ & Leitfähigkeit $2,40 \pm 0,01 \text{ mS/cm}$) mit dem *S. cerevisiae*-beimpften Lupinendrinks (pH $6,88 \pm 0,05$ & Leitfähigkeit $2,45 \pm 0,006 \text{ mS/cm}$) ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Wie in Abb. 25 zu erkennen ist, liegen die log-Reduktionswerte alle nah beisammen. Für die statistische Überprüfung wurde wie beim Medienvergleich dazu eine zweifaktorielle

Varianzanalyse ($\alpha = 0,05$; $n = 2$) durchgeführt, wobei wieder die Behandlungsstufen 60-100 kJ/l miteinbezogen worden sind (siehe Tab. 75, Anhang 10).

Die Varianzanalyse ergab, dass mit $p = 0,167$ kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Keimreduktion *E. coli* und *S. cerevisiae* vorliegt, die Nullhypothese wurde somit nicht verworfen. Zwar zeigte sich eine signifikante Wechselwirkung zwischen Mikroorganismus und Energieeintrag mit $p = 0,024$, was auf leicht unterschiedliche Inaktivierungsverläufe hindeutet, doch im Durchschnitt der spezifischen Energien erwiesen sich beide Organismen als vergleichbar, welches in Abb. 25 zusätzlich zu sehen ist.

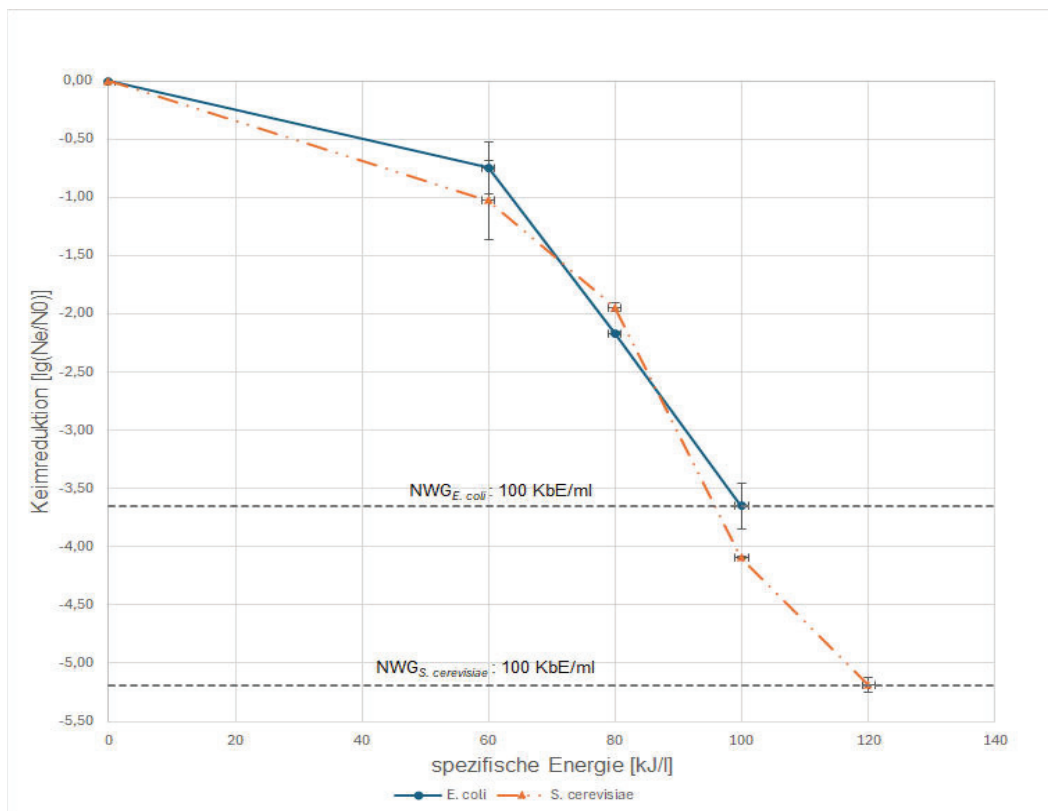


Abb. 25: Vergleich der Keimreduktion von *E. coli* und *S. cerevisiae* in Lupinendrink

5 Diskussion

5.1 Herstellung Bierwürze

Obwohl die Herstellung der Bierwürze nicht im primären Fokus dieser Arbeit stand, war eine möglichst präzise Einstellung der physikochemischen Parameter für die späteren PEF-Versuche unerlässlich. Aus diesem Grund umfassen die Tabellen nur die Prozessparameter nach Abschluss der Herstellung und nicht z.B. den Stammwürzegehalt der Vorderwürze.

Der gemessene pH-Wert der Versuchsreihen lag mit $5,6 \pm 0,1$ geringfügig über dem brautypischen Optimum von 5,0 bis 5,4 (Frischknecht, 2021). Da das Ziel jedoch nicht die Produktion eines verkaufsfähigem Bieres, sondern die Bereitstellung einer definierten mikrobiologischen Matrix war, ist diese Abweichung als vernachlässigbar einzustufen, gerade, weil es immer noch im leicht sauren Bereich lag. Die Messwerte zur Leitfähigkeit liegen mit 1,72 bis 1,93 mS/cm auch im Bereich typischer Werte von 1,2 und 2,3 mS/cm (Hyfoma, 2017). Für die PEF-Behandlungen waren diese Werte ideal, da dadurch ein stabiler Betrieb der Anlage ohne Frequenzüberschreitungen, wie im ersten Versuch mit entmineralisiertem Wasser, möglich war. Die Stammwürzegehalte der Bierwürzeversuche entsprechen gleichermaßen denen typischer Gehalte von 10 bis 13 °Plato (Redders, 2025). Vergleicht man die Messwerte bzgl. Stammwürzegehalt und elektrischer Leitfähigkeit, ist eine leichte Korrelation zu beobachten. Besonders deutlich wird dies im Vergleich von Bierwürze 4 (11,1 °Plato; 1,70 mS/cm) mit der Bierwürze 5, die mit 12,2 °Plato den höchsten Extraktgehalt und mit 1,93 mS/cm die höchste Leitfähigkeit vorzuweisen hat. Diese Annahme ist in dem Sinne plausibel, da mit steigendem Stammwürzegehalt nicht nur der Zuckergehalt, sondern auch die Konzentration von gelösten Stoffen und damit auch Ionen zunimmt (Flensburger Brauerei, 2022).

Mit den Ergebnissen der physikochemischen Analysen lässt sich festhalten, dass die hergestellten Bierwürzen trotz ihrer Funktion als rein experimentelles Medium eine Charakteristik aufweisen, die sowohl brautypischen Standards als auch den elektrophysikalischen Anforderungen der PEF-Behandlung entspricht.

5.2 Herstellung des Lupinendrinks

5.2.1 Rezepturentwicklung im Labormaßstab – Phase 1

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 1 (Gellan) verdeutlichten einen signifikanten Einflusses des Gellans auf die Viskosität, wobei der p-Wert von 0,0000055 und das Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9931 die Annahme stützen, dass das Gellan einen primären Einfluss auf die Viskosität hat. Im Gegensatz hatte das Maltodextrin, egal in welcher Konzentration, keinen direkten, signifikanten Einfluss auf die Viskosität. Zwar ergab die ANOVA auch ein signifikantes Ergebnis ($p = 0,013$), jedoch ohne erklärbaren Grund für die Dosis-Wirkungs-Beziehung, da kein Trend wie beim Gellanversuch zu erkennen ist. Interpretiert man die Problematik beim Filtrieren mit dem Geschirrtuch richtig, könnte dies die hohen Viskositätswerte ab 65,5 mPa·s in der Nullprobe erklären, da noch viele Feststoffe in der Flüssigkeit vorhanden sind. Der festgelegte Gellangehalt der Versuchsreihe 2 könnte dann gleichermaßen den hohen Anfangswert in der Probe 1.2 erklären, sowie die relativ gleichen Werte der anderen Proben. Gleiches gilt für die hohen Viskositätswerte des Gellanversuches. Durch die relativ hohen Feststoffgehalte in der Ausgangslösung sind auch dort die Anfangswerte dementsprechend hoch. Der Unterschied beider Nullproben wäre durch das manuelle Pressen begründet, da vor der Fest-Flüssig-Trennung die Menge für die beiden Versuchsreihen aufgeteilt wurde und daher beide Chargen nicht gleich gefiltert wurden.

Der deutliche Abstand der Viskosität zu den Referenzmedien Kuhmilch (2,14 mPa·s) und Sojadrink (1,86 mPa·s) verdeutlicht, dass die Rezeptur der ersten Phase für die PEF-Behandlung ungeeignet war. Zum einen entspricht dies nicht den rheologischen Fließeigenschaften von Kuhmilch und Milchalternativen und führt andererseits dazu, dass die Pumpbarkeit des Mediums beeinträchtigt ist. Infolgedessen wurde beschlossen, eine weitere Versuchsreihe zu machen, um einen geeigneten Gellangehalt für die Rezeptur zu finden. Da durch das manuelle Filtrieren mit dem Geschirrtuch anscheinend der Feststoffgehalt der Medien erhöht war und für eine hohe Basisviskosität sorgte, wird für die zweite Phase eine Laborzentrifuge eingesetzt, um die Fest-Flüssig-Trennung zu automatisieren und Fehler durch manuelles Trennen zu vermeiden.

5.2.2 Rezepturentwicklung im Labormaßstab – Phase 2

Durch die Fest-Flüssig-Trennung mithilfe der Laborzentrifuge war es möglich, die Suspension visuell fast nahezu vollständig aufzutrennen, sodass, im Gegensatz zur ersten Phase der Rezepturentwicklung, eine klare, leicht gelblich-grüne Flüssigkeit übrig blieb. Der Vergleich der Nullprobe (1,53 mPa·s) mit den Werten aus Phase 1 (44,5 mPa·s und 65,5 mPa·s) zeigt, dass die Verwendung der Laborzentrifuge zu einer wesentlich effizienteren Abtrennung der Feststoffe von der Suspension führte als die manuelle Filtration mit dem Geschirrtuch. Dies bestätigt auch die Annahme im Kapitel 5.1.1, dass die verbliebenen Feststoffe durch die manuelle Filtration die Viskosität grundlegend erhöht hatten. Die Effektivität der Laborzentrifuge zur Fest-Flüssig-Trennung ist auch visuell im Vergleich der jeweiligen Nullproben zu erkennen (Bsp. siehe Abb. 30, Anhang 5). Die Auswirkung dessen ist auch deutlich bei der Betrachtung der Viskosität der einzelnen Proben zu erkennen. Während in Phase 1 der Rezepturentwicklung Werte ab 63,5 mPa·s gemessen wurden, waren es in Phase 2 unter Einsatz der Laborzentrifuge nur noch Werte ab 2,44 bis 6,72 mPa·s.

Die Probe 1 (0,01 % Gellan) mit einer resultierenden dyn. Viskosität von 2,44 mPa·s stellt die bestmögliche Annäherung an das Fließverhalten von Kuhmilch (2,14 mPa·s) und Sojadrink (1,86 mPa·s) dar. Wie in nachfolgender Abbildung 26 ersichtlich ist, liegt lediglich die Rezeptur mit 0,01 % Gellan in unmittelbarer Nähe zu den Referenzmedien. Ab Probe 2 (0,015% Gellan) mit 2,93 mPa·s werden die Viskositäten immer höher und entfernen sich weiter von den Referenzmedien. Das bedeutet, dass für die Wahl der Menge an Gellan für die finale Rezeptur ein Gehalt von 0,01 % genommen wird, um möglichst ähnliche rheologische Eigenschaften wie Kuhmilch oder Sojadrink zu erreichen. Zwar könnte man mit einem weiteren Versuch den Gellangehalt sicherlich weiter reduzieren, da aber für den Zweck dieser Arbeit keine 100 %ige Übereinstimmung als Ziel gesetzt wurde, bleibt es für den Technikumsversuch und der späteren PEF-Behandlung bei 0,01 %.

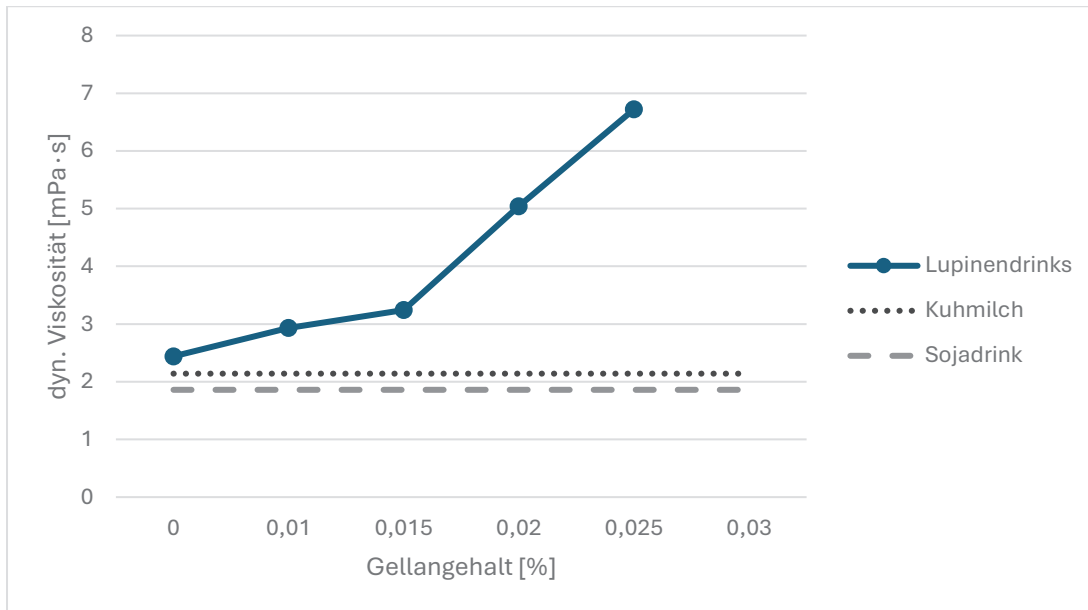


Abb. 26: Vergleich der Viskositäten der Lupinendrinks mit Referenzmedien Kuhmilch und Sojadrink

5.2.3 Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab – Phase 1

Obwohl es während der Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab in der ersten Durchführung zu Problemen kam, konnte trotz der Phasentrennung ein milchähnlicher und für die PEF-Behandlung geeigneter Drink hergestellt werden. Die Farbe des Lupinendrinks entsprach auch der der Lupinendrinks aus dem Labormaßstab. Da die Fließeigenschaften des Drinks visuell denen von Kuhmilch und Sojadrink ähnelten, wurde der Lupinendrink am Folgetag zur PEF-Behandlung genutzt, da aus zeitlich-organisatorischen Gründen weitere Versuchsdurchläufe nicht möglich waren. Eine unzureichende PEF-Behandlung durch die Phasentrennung wurde ausgeschlossen, da bereits nach kurzem Schütteln der Drink wieder (visuell) homogen wurde und durch den Einsatz der Pumpe eine stetige und kontinuierliche Durchmischung garantiert ist.

Die Fließeigenschaften bestätigen sich durch die Viskositätsmessung mit einem Wert von 2,58 mPa·s. Zwar liegt er leicht über dem im Labormaßstab ermittelten Wert mit 0,01 % Gellan und 2,44 mPa·s für die Rezeptur, da es aber zu Komplikationen während der Herstellung kam und davon ausgegangen wurde, dass mit dem Gebrauch mehrerer geeigneter Kochtöpfe und dem Dispergiergerät niedrigere Werte vorliegen würden, wurde der Lupinendrink für die PEF-Behandlung zugelassen. Der leicht erhöhte Werte könnte durch die unzureichende Durchmischung und Erhitzung vom Kochkessel und der daraus

resultierenden ungleichmäßigen Verteilung des Gellans im gesamten Drink entstanden sein. Laut einem Hersteller für Gellan, sind für eine ausreichende Netzwerkbildung und Stabilisation hohe Scherkräfte nötig, die durch den Kochkessel nicht möglich waren (CPKelco, 2017). Die Homogenisierung durch das Dispergiergerät am Ende hat nicht ausgereicht, um den Fehler zu korrigieren. Da die Differenz zwischen Labor- und Technikumsmaßstab deutlich außerhalb der im Labor ermittelten Standardabweichung der Messwerte liegt, wäre ein Messfehler auszuschließen. Ein statistischer Vergleich war aufgrund fehlender Daten (Mehrfachbestimmung Dichte und Fallzeit) nicht möglich.

Die für die PEF-Behandlung benötigte Menge von ca. 24 l konnte mit der Versuchsdurchführung hergestellten Menge von 23,72 kg ungefähr erreicht werden. Daher wird für die zweite Versuchsdurchführung mit den selben Mengen wie im ersten Durchlauf des Technikumsmaßstab gearbeitet. Die Nutzung der Packpresse in Kombination mit dem Separator zur Fest-Flüssig-Trennung haben sich auch für den Scale-up bewährt, da mit Blick auf die Viskosität ähnlich niedrige Viskositätswerte erreicht wurden wie in der letzten Phase des Labormaßstabes.

5.2.4 Herstellung des Lupinendrinks im Technikumsmaßstab – Phase 2

Durch den Einsatz des Dispergiergerätes unter Verwendung mehrerer Kochtöpfe anstelle des Kochkessels mit Rührwerk konnte der Versuchsaufbau für den Technikumsmaßstab deutlich verbessert werden. Zwar trennte sich auch hier der Lupinendrink in zwei Phasen, im Gegensatz zum ersten Versuch war im Vergleich beider Proben die letztere deutlicher besser homogenisiert bzw. trennte sich deutlich weniger klare Flüssigkeit ab. Ein Grund dafür könnte die Herstellung des Lupinendrinks in mehreren Chargen sein, da die Lupinenflüssigkeit auf mehrere Töpfe aufgeteilt werden musste und somit das Dispergieren nicht gleich ablief, sodass sich das Gellan in beiden Kochtöpfen unterschiedlich verteilte. Andererseits könnte das Dispergiergerät für diesen Einsatz ungeeigneter sein als das Messerwerk des Thermomixes, da bei diesem Versuch selbst am Folgetag keine Phasentrennung auftrat (siehe Abb. 31, Anhang 5). Für die Behandlung mit der PEF-Anlage gilt dasselbe wie beim ersten Durchlauf des Technikumsmaßstabs. Da durch den Einsatz der Pumpe eine ständige Durchmischung garantiert ist, wird die Phasentrennung keinen direkten Einfluss haben.

Die Viskositätsmessung zeigte, dass mit diesem Aufbau und den Herstellungsprozessen ein trotzdem ein geeigneter Technikumsmaßstab realisierbar ist. Die Viskosität des Lupinendrinks mit 2,11 mPa·s liegt im Bereich von der Viskosität der Kuhmilch (2,14 mPa·s) und des Sojadrinks (1,86 mPa·s). Im Vergleich zum ersten Technikumsversuch (2,58 mPa·s) besteht eine Reduktion der Viskosität um ca. 18 %. Dieser Unterschied könnte damit begründet werden, dass die entnommene Probe des ersten Versuches aus einem Bereich des Behälters stammen könnte, welcher eine erhöhte Gellankonzentration bzw. ein Volumen mit einer stärkeren Netzwerkbildung des Gellans besaß als z.B. am Boden des Behälters vorhanden war. Im zweiten Versuch konnte hingegen durch das Dispergiergerät, welches gleich am Anfang und auch für einen längeren Zeitpunkt eingesetzt worden ist, für eine homogenere Verteilung und einer gleichmäßigeren Netzwerkbildung sorgen.

5.3 Technischer Aufbau sowie PEF-Behandlung Phase 1

Die Skepsis gegenüber den mikrobiologischen Ergebnissen der ersten Versuchsreihen begründete sich primär durch den Vergleich mit den gängigen Literaturwerten. Diese besagen, dass durch eine PEF-Behandlung eine Reduktion um ca. 3-5 log-Stufen erreicht werden kann, wobei die Effektivität je nach Medium und spezifischen Prozessparametern variiert (Tab. 41 , Anhang 1). Besonders widersprüchlich waren die Ergebnisse der Bierwürze-Versuche mit *Saccharomyces cerevisiae*. Während die Versuche mit *Escherichia coli* relativ höhere Inaktivierungsraten aufwiesen, vermehrten sich die Hefen sogar, so dass die Platten überwuchert waren. Wie im Kapitel 2.1.1 beschrieben, sollten Hefen aufgrund ihrer Zellgröße eine geringere Resistenz gegenüber PEF-Behandlungen besitzen als gramnegative MO. Da die Inaktivierungsraten in den weiteren Versuchen des Weiteren auch konsequent bei einer log-Stufe oder darunter lagen, trotz mehrfach wiederholter und gewissenhafter Durchführung, wurde ein technischer Defekt der Anlage vermutet. Mögliche Fehler durch mich während den Vor- und Nachbereitungen der mikrobiologischen Untersuchungen konnte vom Fachpersonal der Hochschule Neubrandenburg ausgeschlossen werden. Die Annahme des technischen Defekts bestätigte sich im späteren Verlauf der Arbeit durch einen Servicetechniker der Firma Elea Technology GmbH. Die Ergebnisse des Testversuches zur Überprüfung der Reparatur stimmten im Vergleich auch mit den Literaturwerten überein. Die Funktionalität der Behandlung lässt sich auch mit der Nullprobe bestätigen, da im Gegensatz zu dem Versuch mit der *Staphylococcus*

carneus-beimpften Bierwürze die Null- bzw. Kontrollprobe eine den Annahmen entsprechenden Anfangskeimzahl von $x \cdot 10^5$ besaß.

Zwar hatte die Verwendung der Kreislampe und die Lage des Membranventils geringfügiger Auswirkungen auf eine inkonsistente Durchflussrate, was zu kleineren Schwankungen der internen Prozessparametersteuerung führte, die eigentliche Hauptursache lag jedoch an fehlerhaften Elektroden, die eine Ausbildung eines homogenen und ausreichend starken elektrischen Feldes verhinderten. Infolgedessen war der effektive Energieeintrag und die Feldstärke auf die Zellen im jeweiligen Medium nicht nur inkonstant, sondern unterschritten auch die für eine irreversible Elektroporation notwendige Größe. Eine effiziente Abtötung der Mikroorganismen konnte somit unter den gegebenen Bedingungen nicht realisiert werden. Eine Auswertung und Interpretation der nachweislich fehlerbehafteten Werte hätte daher keine für diese wissenschaftliche Arbeit nötige Relevanz. Um die Methodik und die Versuchsplanung trotzdem transparent darzustellen, wurden die Ergebnisse im Anhang beigelegt.

Die Entscheidung, die Versuchsplanung bzgl. den Prozessparametern nach den Versuchen mit Wasser umzustellen, begründet sich mit der Wirksamkeit des PEF-Verfahrens. Die Literatur (siehe Kapitel 2.1.1 und 2.1.3) verdeutlicht, dass die Feldstärke lediglich einen gewissen Schwellenwert überschreiten muss, um eine irreversible Elektroporation in Mikroorganismen auszulösen. Dieser wird bei einer Feldstärke von min. 10 bis 15 kV/cm erreicht. Sobald dieser Schwellenwert überschritten ist, fungiert die spezifische Energie als Dosisparameter, der mitunter das Ausmaß der Inaktivierung bestimmt (Töpl, 2006). Die Versuchsplanung mit Feldstärken unter 12 kV/cm waren daher nicht optimal ausgewählt, weswegen zunächst eine Änderung für die einhergehenden Versuche mit der Bierwürze vorgenommen wurde. Für die Versuchsplanung nach der Reparatur und dem Umbau wurden die Werte für die spezifische Energie dann noch weiter korrigiert.

Die Entscheidung, nur noch Versuche mit *E. coli* und *S. cerevisiae* durchzuführen, begründet sich, neben der zeitlich-organisatorischen Einschränkung, in dem von mir angestrebten Vergleich und der statistischen Auswertung für diese Arbeit. Ein zentrales Ziel war es, trotz des reduzierten Umfangs wenigstens einen Medienvergleich und einen Mikroorganismenvergleich durchführen zu können. Die Behandlung eines Mediums, welches mit *Staph. carneus* beimpft worden wäre, wäre daher nicht zielführend. Für den Medienvergleich wurde sich daher für *Escherichia coli*- beimpfter Bierwürze und -

beimpften Lupinendrink entschieden. Für den Vergleich zweier Mikroorganismen im selben Medium *S. cerevisiae*.

Der endgültige Aufbau des gesamten PEF-Systems zum Scale-Up im kontinuierlichen Betrieb gelang schlussendlich durch die implementierten Bestandteile Vorlaufbehälter, Pumpe, einem vorgeschaltetem Membranventil, der PEF-Anlage sowie einem Temperiergerät. Die Wasserversuche sowie der Testversuch mit dem Service-Techniker dienten als kritische Validierung der Anlagensteuerung, bevor es zur Behandlung mit den eigentlichen Medien weiterging.

5.4 PEF-Behandlung Phase 2

5.4.1 Prozessstabilität, Prozessparameter und mikrobiologische Ergebnisse

Bevor in den nächsten Abschnitten auf die Ergebnisse der Keimreduktion und den Vergleich zwischen Medien und Mikroorganismen eingegangen wird, wird in diesem auf die aufgetreten Probleme/Störungen zur statistischen Einordnung der Ergebnisse eingegangen.

Da aufgrund von Fremdverkeimung eine Auswertung der Gesamtkeimzahl der Nullprobe und der ersten Behandlungsstufe (60 kJ/l) des Bierversuches mit *E. coli* nicht ohne weiteres gemacht werden konnte, wurden für eine theoretische Basis die Werte des Lupinendrink-Versuches mit *E. coli* übernommen. Dieser Entschluss begründet sich mit der Annahme, dass bei beiden Versuchen die Inokula ähnliche Gesamtkeimzahlen haben könnten, da diese unter denselben Bedingungen hergestellt worden sind. Da aber nicht abschließend gesagt werden kann, wie hoch die Anfangskeimzahl des Bierversuches war, sind alle weiteren statistischen Auswertungen und Aussagen mit dem Vermerk der theoretischen Basis zu interpretieren.

Da die mikrobiologische Auswertung des Versuches „Lupinendrink mit *S. cerevisiae*“ ergab, dass in der Nullprobe eine Gesamtkeimzahl von $1,55 \cdot 10^7$ vorhanden war, ist davon auszugehen, dass es nach der Hitzebehandlung des Lupinendrinks und vor der PEF-Behandlung zu einer Fremdverkeimung durch eventuelle Hefen aus der Umgebungsluft oder den verwendeten Materialien kam, obwohl alle Geräte vorschriftsmäßig gereinigt und desinfiziert worden waren. Trotz einer kalkulierten und geplanten Inokulationsmenge von $1:10^4$ ($V_{\text{Inokulum}}:V_{\text{Medium}}$) des Medienvolumens lag die gemessene Anfangskeimzahl

um ca. 2-3 log-Stufen über dem geplanten Zielwert von 10^4 bis 10^5 KbE/ml. Diese Differenz zwischen den Versuchen beeinflusst unmittelbar beim Erreichen der Nachweisgrenze von 100 KbE/ml die errechneten log-Reduktionswerte. Da bei den hohen Behandlungsstufen (100 und 120 kJ/l) häufig eine Gesamtkeimzahl unter der Nachweisgrenze vorhanden war, resultierte daraus ein gedeckelter Reduktionswert, welcher, aufgrund der Nachweisgrenze nicht genauer ermittelt werden konnte. Deswegen kann der rechnerisch höhere Wert beim Versuch mit *S. cerevisiae* nicht als Beleg für eine geringere Keimreduktion beim Versuch mit *E. Coli* (Lupinendrink sowie Bierwürze) interpretiert werden. Es muss infolgedessen davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Reduktionsleistung der Behandlungsstufen deutlich höher hätte ausfallen können, als die Ermittlung auf Basis der Nachweisgrenze es zulässt. Aufgrund der Nachweisgrenze wurden zur statistischen Auswertung auch nur die Behandlungsstufen hinzugezogen, die eine Gesamtkeimzahl oberhalb der Nachweisgrenze vorzuweisen hatten. Hinzuzufügen ist, dass die Nachweisgrenzen von 100 KbE/ml nicht erreicht worden wäre, wenn die geplante Keimbelastung bei allen Versuchen einheitlich auf ein höheres Niveau oberhalb von 10^5 KbE/ml eingestellt worden wäre, sodass bei theoretisch gleicher log-Reduktion höhere Gesamtkeimzahlen bei der letzten Behandlungsstufe vorzuweisen wären. Die Problematik daran wäre aber, dass bei gleichem Versuchsaufbau mit ca. 24 l Medium eine Erhöhung der Anfangskeimzahl auf mehr als 10^5 KbE/ml bedeutet, dass man z. B. für 10^8 KbE/ml ca. 2,4 Liter Inokulum benötigt, was wiederum die physikochemischen Eigenschaften des Mediums beeinflussen könnte.

5.4.2 Einfluss der spezifischen Energie auf die Keimreduktion im Allgemeinen

Die statistisch belegte Abhängigkeit der Inaktivierungsrate vom spezifischen Energieeintrag der einzelnen Versuche (Lupinendrink + *E. coli*: $p = 0,004$; Lupinendrink + *S. cerevisiae*: $p = 0,0003$; Bierwürze + *E. coli*: $p = 0,003$) steht im Einklang mit der grundlegenden elektrophysikalischen Wirkweise der PEF-Technologie, welche im Kapitel 2.1.3 beschrieben ist, wonach die Keimreduktion mit steigender spezifischer Energie zunimmt (Töpfl, 2006; Witt et al., 2021).

Dennoch muss für diese Arbeit die beobachtete Erhöhung der Keimreduktion durch eine Erhöhung der spezifischen Energie bei allen Versuchen kritisch betrachtet werden. Wie im Kapitel 4.4.1 dargelegt ist, resultierte die Erhöhung der spezifischen Energien in allen

Versuchen auch zu einer Erhöhung der Temperatur der Medien bis auf über 70 °C in der letzten Behandlungsstufe. Da einige dieser Maximaltemperaturen im Bereich der letalen Schwellenwerte für *E. coli* (Guyot et al., 2013) und von *S. cerevisiae* (Owusu-Ansah et al., 2024) liegen, ist davon auszugehen, dass die ermittelte Keimreduktion nicht nur durch die spezifische Energie ausgelöst wurde, sondern entweder gänzlich durch die Temperatur bei den höheren Behandlungsstufen (100 und 120 kJ/l) oder in Teilen mit einem synergetischen Effekt. Die Erhöhung der Temperatur bei steigender spezifischen Energie lässt sich mit folgender Gleichung erklären:

$$\Delta T = \frac{W_s}{c_p}$$

Wobei gilt:

ΔT Temperaturerhöhung [K]

W_s spezifische Energie [kJ/kg]

C_p spezifische Wärmekapazität [kJ·kg⁻¹·K⁻¹]

Wie im Kapitel 2.1.3 beschrieben, ist die Temperaturerhöhung direkt proportional zur spezifischen Energieeintragung und abhängig von der spezifischen Wärmekapazität des zu behandelnden Produktes (Jäger, 2012). Daher steigt die Temperatur in allen Versuchen auch mit der Erhöhung der spezifischen Energie. Die Ergebnisse der Versuchsreihen spiegeln demnach einen synergetischen Effekt wieder, welcher als eine zusätzliche Hürde im Sinne eines Hürdenkonzeptes fungiert (Raso et al., 2022). Das Merkmal einer non-thermalen Behandlung ist dann aber nicht mehr gegeben, auch wenn die Keimreduktion per se funktioniert hat.

5.4.3 Einfluss der Lebensmittelmatrix auf die Keimreduktion von *E. coli*

Die im Ergebnisteil (Kapitel 4.4.3) beschriebene statistische Signifikanz ($p = 0,00165$) der Keimreduktion zwischen dem Lupinendrink und der Bierwürze stellt fest, dass die Lebensmittelmatrix eine maßgebliche Rolle bei der Keimreduktion von *E. coli* spielen kann. Obwohl die Bierwürze mit einem pH-Wert von $5,59 \pm 0,02$ ein saureres Milieu aufweist als der Lupinendrink mit einem pH-Wert von $6,69 \pm 0,02$, wurde im Lupinendrink eine

höhere Keimreduktion von *E. coli* erzielt. Begründen lässt sich dies damit, dass Gram-negative Bakterien wie *E. coli* eine höhere Resistenz bei niedrigeren pH-Werten und eine gesteigerte Sensitivität im neutralen Bereich aufweisen können (Raso et al., 2022; Lytras et al., 2024). Die physiologische Begründung dessen wird, laut Studien, auf die Fähigkeit zurückgeführt, dass diese Mikroorganismen Membranschäden im leicht sauren Milieu besser reparieren können bzw. durch eine gewissen Säureadaption eine stabilere Membranstruktur ausbilden können (Raso et al., 2022).

Im Widerspruch dazu steht aber, dass nach einigen Studien eine erhöhte Leitfähigkeit zu einer geringeren Keimreduktion führen müsste, da aufgrund einer geringeren Leitfähigkeit der Unterschied in der Ionenkonzentration zwischen dem Cytoplasma und dem Medium vergrößert wird. Dies führt wiederum zu einem verstärktem Ionenfluss über die Membran, was diese sensibler gegenüber PEF-Behandlungen macht (Lytras et al., 2024). Beim Lupinendrinks lag die Leitfähigkeit bei $2,40 \pm 0,01$ mS/cm und bei der Bierwürze bei $1,93 \pm 0,02$ mS/cm, was eigentlich eine höhere Keimreduktion bei der Bierwürze bedeuten würde, insofern der Unterschied signifikant ist. Eine Erklärung, warum die Keimreduktion beim Lupinendrink höher war, könnte sein, dass durch die höhere Leitfähigkeit eine höhere Stromintensität in der Behandlungskammer zustande kam, was eine schnellere und höhere Erwärmung zufolge hatte (Raso et al., 2022) und abermals einen höheren synergetischen Effekt auslöste.

5.4.4 Vergleich der keimspezifischen Resistenz gegenüber spezifischer Energie

Die statistische Auswertung des Mikroorganismenvergleichs im Lupinendrink untermauerte die Aussage, dass für diese Versuche kein signifikanter Unterschied in der Keimreduktion von *E. coli* und *S. cerevisiae* vorlag ($p = 0,167$). Anhand der im Kapitel 2.1.1 beschriebenen Theorie, sollten Hefen aufgrund ihrer Zellvolumens und dem Durchmesser anfälliger gegenüber PEF-Behandlungen sein als *E. coli*, da das induzierte Transmembranpotential direkt proportional zum Zellradius ansteigt. So ist zeigen bereits Feldstärken von 2-3 kV/Cm bei Hefen einen signifikanten Effekt gegenüber *E. coli* (>10 kV/cm). In Versuchen unter gleichen Bedingungen (10 kV/cm und 200 kJ/l) kam es so bei *E. coli* zu einer Reduktion um 3,6 log-Stufen. Bei *S. cerevisiae* hingegen zu einer Reduktion um 6,01 (Töpfl et al., 2005; Lytras et al., 2024). In den Versuchen dieser Arbeit kam aber grundlegend heraus, dass beide Mikroorganismen bei gleicher spezifischer Energie

eine ähnliche Keimreduktionen vorzuweisen hatten. Mit Blick auf die gewählte Feldstärke in dieser Arbeit, kann diese aber so hoch gewählt worden sein, dass der signifikante Unterschied beider Mikroorganismen ausblieb, da mit 24 kV/cm die irreversible Elektroporation gleich stark ausgeprägt war. Die hohe Temperaturerhöhung und der mögliche synergetische Effekt dessen mit der spezifischen Energie könnte des Weiteren für den nicht signifikanten Unterschied verantwortlich sein.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Etablierung einer kontinuierlichen Verfahrensweise für gepulste elektrische Felder (PEF) zur Anwendung an verschiedenen Lebensmittelmatrixen. Das Hauptziel war es, ein Scale-Up vom Labormaßstab zum Technikumsmaßstab mit einer relevanten Durchflussrate zu realisieren, um für weiterführende Forschungsarbeiten aber auch für industrielle Zwecke im kleineren Maßstab eine Grundlage zur Keimreduktionen in Lebensmitteln zu schaffen. Dabei wurden auch die Einflüsse der Prozessparameter, der Lebensmittelmatrix (Lupinendrink und Bierwürze) sowie der keimspezifischen Resistenzen für eine klare Abgrenzung und Einordnung untersucht. Ein weiterer Teil dieser Arbeit befasste sich mit einer Rezepturentwicklung des Lupinen drinks, da (Stand 2025) kein kommerziell verfügbarer Drink zu erwerben war. Ein Nebenziel dieser Arbeit war es daher auch rauszufinden, inwiefern die Rezeptur konzipiert werden muss, um ähnliche rheologische Eigenschaften wie kommerzielle Milchalternativen vorweisen zu können ohne dabei gleichzeitig die Prozessstabilität der Anlage zu beeinflussen.

Die Rezepturentwicklung ergab, dass durch den Einsatz von 0,01 % Gellan, 4 % Maltodextrin, 3 % Kokosfett sowie einem Lupinenextrakt im Verhältnis 1:11 zu Wasser ein milchähnliche Alternative mit einer Viskosität von 2,11 mPa·s hergestellt werden kann. Die Herstellung beruht dabei auf das Extrahieren der Inhaltsstoffe durch eine Trockenvermahlung und anschließendem Einmaischen mit Wasser sowie einer Fest-Flüssig-Trennung durch eine Kombination aus einer Packpresse und einer Tellerzentrifuge. Für weiterführende Arbeiten zu diesem Thema könnte versucht werden, ein Lupinenprotein-Extrakt zu verwenden.

Der technische Aufbau des PEF-Systems wurde durch eine stufenweise Skalierung realisiert. Trotz eines im Prozessverlauf während der Bearbeitung der Arbeit erkannten und durch die Firma „Elea Technology GmbH“ behobenen Defekts an den Elektroden, konnte ein stabiles System aus Vorlaufbehälter, Pumpe, Membranventil, PEF-Anlage (PEF-Pilot Dual; Elea Technology GmbH) und einem Temperiergerät für die Anlage etabliert werden, um eine kontinuierliche Durchflussrate von 50 l/h aufrecht zu erhalten. Verschiedene Wasserversuche ergaben, dass mit der verwendeten Anlage und den eingestellten Parametern ein höherer Durchfluss aber soweit nicht möglich ist, da sonst die Frequenz auf einen Wert gegen die Sicherheitswerte der Anlage steigt.

Die Untersuchungen der PEF-Behandlungen ergaben, dass in allen Versuchen (Lupinendrink + *Escherichia coli*; Lupinendrink + *Saccharomyces cerevisiae*; Bierwürze + *Escherichia coli*) bei einer Feldstärke von 24 kV/cm ein hochsignifikanter Einfluss zwischen Erhöhung der spezifischen Energie (60, 80, 100 und 120 kJ/l) und der Keimreduktion besteht ($p_{1,2,3} < 0,005$). Bei 120 kJ/l in allen Versuchen und auch bei 100 kJ/l im Lupinendrink-*E. coli*-Versuch besteht unter den gegebenen Parametern eine vollständige Reduktion von $> 3,65$ bis $> 5,19$ log-Stufen. Es konnte jedoch belegt werden, dass mit Erhöhung der spezifischen Energie die Temperatur proportional ansteigt, sodass die Keimreduktion nicht alleine durch die spezifische Energie hervorgerufen wird. Es besteht in diesem Sinne ein synergetischer Effekt. Demnach konnte mit dieser Arbeit durch die Erhöhung der spezifischen Energie nur ein Hürdenkonzept mit einer erhöhten Temperaturen etabliert werden. Für weiterführende Arbeiten ist daher geraten, die Prozessparameter so auszuwählen, dass eine Keimreduktion ohne Erhöhung der Temperatur vorliegt, um dem Merkmal einer non-thermalen Behandlung gerecht zu werden.

Im Medienvergleich zeigte sich, dass eine signifikant höhere Keimreduktion im Lupinendrink (pH $6,69 \pm 0,02$) gegenüber der Bierwürze (pH $5,59 \pm 0,02$) vorliegt ($p = 0,00165$). Im Mikroorganismenvergleich ergaben die Untersuchungen dieser Arbeit kann entgegen der theoretischen Annahme (Resistenz gegenüber PEF: *E. coli* > *S. cerevisiae*) kein signifikanter Unterschied zwischen *E. coli* und *S. cerevisiae* festgestellt werden ($p = 0,167$). Bei beiden Versuchen lagen die Keimreduktionen bei jeder Behandlungsstufe nah beisammen.

Es ist dabei anzumerken, dass die statistische Auswertung aufgrund aufgetretener Problematiken bei der Gesamtkeimzahlbestimmung grundlegend mit nur zwei anstatt drei Werten pro Replikat gerechnet wurde. Trotz der klaren signifikanten Unterschiede kann von einem leicht geänderten Ergebnis ausgegangen werden.

Für weiterführende Arbeiten ist außerdem geraten, den Anfangskeimgehalt der Medien so zu planen, dass durch die PEF-Behandlung genügend auswertbare Platten vorhanden sind (Reduktion um ca. 3-5 log-Stufen), da sonst die Problematik bestehen könnte, dass die Gesamtkeimzahl unter der Nachweisgrenze der genutzten Bestimmungsmethode liegt. Die ermittelten Reduktionswerte stellen in dieser Arbeit aufgrund des Erreichens der Nachweisgrenze in einigen Behandlungsstufen eine nicht näher quantifizierbare Reduktion dar. Es ist davon auszugehen, dass *E. coli* im Lupinendrink eine noch höhere Reduktion erfahren würde als 3,65 log-Stufen ab 100 kJ/l und *S. cerevisiae* mehr als 5,19

log-Stufen. Aufgrund der Nachweisgrenze der Bestimmungsmethode dieser Arbeit lässt es sich aber nicht näher ermitteln.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die kontinuierliche Verfahrensweise, trotz aufgetretener Problematiken und Störungen, mit dieser Arbeit erfolgreich etabliert werden konnte. Für eine industrielle Umsetzung empfiehlt es sich aber, eine nachgeschaltete Kühlung einzubauen, um die thermischen Belastungen bei hohen spezifischen Energien und Feldstärken zu begrenzen.

7 Literaturverzeichnis

Alkanan, Z.T.; Altemimi, A.B.; Younis, M.I.Y.; Ali, M.R.; Cacciola, F.; Abedelmaksoud, T.G.: Trends, Recent Advances, and Application of Pulsed Electric Field in Food Processing: A Review. *ChembioEng Reviews* [online]. Wiley Online Library. Juli 2024. Band 11, Teil 4. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/cben.202300078>

Andreou, V.; Dimopoulos, G.; Dermesonlouoglou, E.; Taoukis, P.: Application of pulsed electric fields to improve product yield and waste valorization in industrial tomato processing. *Journal of Food Engineering* [online]. ScienceDirect. April 2020. Band 270. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109778>

Anton Paar GmbH: U-tube technology in digital laboratory density meters [online]. [Zugriff am 03.01.2026]. Verfügbar unter: <https://web.archive.org/web/20231203103531/https://wiki.anton-paar.com/at-de/digitale-labor-dichtemessgeraete-mit-biegeschwinger-technologie/>

Aronsson, K.; Lindgren, M.; Johansson, B.R.; Rönner, U.: Inactivation of microorganisms using pulsed electric fields: the influence of process parameters on *Escherichia coli*, *Listeria innocua*, *Leuconostoc mesenteroides* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* [online]. ScienceDirect. März 2001. Band 2, Teil 1, 41-54. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(01\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(01)00021-2)

Barba, F.J.; Parniakov, O.; Pereira, S.A.; Wiktor, A.; Grimi, N.; Boussetta, N.; Saraiva, J.A.; Raso, J.; Martin-Belloso, O.; Witrowa-Rajchert, D.; Lebovka, N.; Vorobiev, E.: Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry. *Food Research International* [online]. ScienceDirect November 2015. Band 77, Part 4, 773-798. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.015>

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus (StMELF): Fact-Sheet: Alternative Proteinquellen – Eine Bestandsaufnahme [Online]. KErn. [Zugriff 27.11.2025]. Verfügbar unter: <https://www.kern.bayern.de/recherche/312473/index.php>

Beckh, J.: Viskositätstabelle – mPas-Werte für Flüssigkeiten, Öle & Chemikalien [online]. Behaelter-kg.de. [Zugriff am 22.09.2025]. Verfügbar unter: <https://www.behaelter-kg.de/de/wissenswert/alle-inhalte/welche-viskositat-weist-ihr-produkt-auf.html>

Bhat, Z.F.; Morton, J.D.; Mason, S.L.; Bekhit, A.E.A.: Current and future prospects for the use of pulsed electric field in the meat industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* [online]. Taylor & Francis Online. 2019. Band 59, Teil 10. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1425825>

BierV (idF. v. 05.07.2017) §1

Bremer, E.: Verfahren zur Herstellung einer proteinhaltigen Lupinenmilch, danach herstellbares Produkt, Verfahren zu dessen Weiterverarbeitung sowie danach herstellbares tofuähnliches Lebensmittel. EP 0 449 396 A1. Europäisches Patentamt. 1991. Verfügbar unter: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.0/publication-dates/19911002/patents/EP0449396NWA1/document.html>

Brito, I.P.C.; Silva, E.K.: Pulsed electric field technology in vegetable and fruit juice processing: A review. *Food Research International* [online]. ScienceDirect. Mai 2024, Band 184. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114207>

Brücklmeier, J.: Bier Brauen – Grundlagen, Rohstoffe, Brauprozess. Komplette überarbeitet. Stuttgart: Eugen Ulmer KG, 2022.

Chen, C.; Smye, S.W.; Robinson, M.P.; Evans, J.A.: Membrane electroporation theories: a review. *Medical & Biological Engineering & Computing* [online]. Springer Nature Link. Februar 2006, Band 44, 5-14. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11517-005-0020-2>

CP Kelco Germany GmbH: KELCOGEL – Gellan Gum. Produktdatenblatt Dok.-Nr.: 300-X. 2017. Verfügbar als PDF unter: https://www.ozhat.com/show_catalogue_pdf/271385/1

Daryani, D.; Pegua, K.; Aryaa, S. S.: Review of plant-based milk analogue: Ist preperation, nutritional, physicochemical and organoleptic properties. *Food Science and Biotechnology* [online]. Springer Nature Link. Februar 2024, Band 33, 1059-1073. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01482-z>

DLG (Hrsg.): Anwendung von gepulsten elektrischen Feldern (PEF) in der Lebensmittelindustrie. DLG-Expertenwissen. 2018. Verfügbar als PDF unter: https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/Expertenwissen/lebensmitteltechnologie/2018_5_Expertenwissen_PEF.pdf

DLG (Hrsg.): Anwendung von gepulsten elektrischen Feldern (PEF) in der Lebensmittelindustrie. 2. Auflage. 2024. Verfügbar als PDF unter: <https://www.dlg.org/mediacenter/alle-publikationen/dlg-expertenwissen/foodchain/dlg-expertenwissen-02-2024-anwendung-von-gepulsten-elektrischen-feldern-pef-in-der-lebensmittelindustrie>

Dziadek, K.; Kopec, A.; Drozd, T.; Kielbasa, P.; Ostafin, M.; Bulski, K.; Oziembowski, M.: Effect of pulsed electric field treatment on shelf life and nutritional value of apple juice. *Journal of Food Science and Technology* [online]. Springer Nature Link. Februar 2019, Band 56, 1184-1191. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-019-03581-4>

Eisner, P.; Fischl, R.; Mittermaier, S.; Zacherl, C.; Toelstede, S.; Jacobs, D.; Schreiber, K.; Hickisch, A.: Emulsion mit Lupinenprotein, deren Verwendung und Herstellung. EP 3 160 246 B1. Europäisches Patentamt. 2015. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/WO2016000939A1/de>

Europäische Kommission: Ingredient – Maltodextrin. CosIng – Cosmetics Ingredients [online]. [Zugriff am 08.11.2025]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/cos-ing/details/35142>

Flensburger Brauerei: Stammwürze – die DANN des Bieres [online]. 2022. [Zugriff am 28.11.2025]. Verfügbar unter: <https://www.flens.de/verstehen/detail/stammwuerze-beim-bier/>

Food and Agriculture Organization (FAO): Gellan Gum. Compendium of Food Additive Specifications [online]. FAO Food and Nutrition Paper. 52, Band 5. 1997. [Zugriff am 08.11.2025]. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/4/W6355E/w6355e0f.html>

Frischknecht, K.: Brau- und Gärparameter: Temperatur und pH-Wert [online]. MUG Mikrobrauerei. 2021. [Zugriff am 28.11.2025]. Verfügbar unter: <https://www.mug-mikrobrauerei.ch/p>

Guyot, S.; Pottier, L.; Hartmann, A.; Ragon, M.; Tiburski, J. H.; Molin, P.; Ferret, E.; Gervais, P.: Extremely rapid acclimation of *Escherichia coli* to high temperature over a few generations of a fed-batch culture during slow warming [online]. *MicrobiologyOpen* Volume 3, Ausgabe 1. Seite 52-63. 2013. Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mbo3.146>

Hamatschek, J.: Lebensmitteltechnologie. 2. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer KG, 2021.

Hermann, M.: Method for producing a soy milk. US 2009/0317533 A1. United States Patent Application Publication. 2009. Verfügbar als PDF unter: <https://patentimages.storage.googleapis.com/54/bb/81/3e32ad170c0aaa/US20090317533A1.pdf>

Hyfoma: Beer [online]. Safe Food Factory. 2017. [Zugriff am 28.11.2025]. Verfügbar unter: <https://www.safefoodfactory.com/en/knowledge/43-beer/>

Jäger, H.: Process performance analysis of pulsed electric field (PEF) food applications. Dissertation. Berlin, 2012.

Kantala, C.; Supasin, S.; Intra, P.; Rattanadecho, P.: Evaluation of Pulsed Electric Field and Conventional Thermal Processing for Microbial Inactivation in Thai Orange Juice. *Foods* [online]. MDPI. 2022, Band 11, 1102. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/foods11081102>

Kantar, S.E.; Boussetta, N.; Lebovka, N.; Foucart, F.; Rajha, H.N.; Maroun, R.G.; Louka, N.; Vorobiev, E.: Pulsed electric field treatment of citrus fruits: Improvement of juice and polyphenols extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* [online]. ScienceDirect. April 2018. Band 46, 153-161. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.09.024>

Kantar, S.E.; Koubaa, M.: Pulsed electric field treatment for the stimulation of microorganism: Applications in food production. *Research in Agricultural Engineering* [online]. Czech Academy of Agricultural Sciences. 2022. Band 68, 80-92. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.17221/78/2021-RAE>

Kim, S.; Lee, B.; Hong, S.; Yeo, H.; Jeong, S.; Lee, D.: A Pulsed Electric Field Accelerates the Mass Transfer during the Convective Drying of Carrots: Drying and Rehydration Kinetics, Texture, and Carotenoid Content. *Foods* [online]. MDPI. 2023. Band 12, 589. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/foods12030589>

Kintek Solution: Was ist Nassvermahlung und Trockenvermahlung? [online]. 2025 [Zugriff am 06.09.2025]. Verfügbar unter: <https://de.kindle-tech.com/faqs/what-is-wet-grinding-and-dry-grinding>

Kort, P. H.: Verfahren zur Herstellung von Sojamilch. EP 0 334 057 A2. Europäisches Patentamt. 1989. Verfügbar unter: <https://data.epo.org/publication-server/rest/v1.2/publication-dates/19890927/patents/EP0334057NWA2/document.html>

Kotnik, T.; Kramar, P.; Pucihar, G.; Miklavcic, D.: Cell membrane electroporation-Part 1: The phenomenon. *IEEE Electrical Insulation Magazine* [online]. ResearchGate. September 2012. Band 28, 14-23. Verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/236681389_Cell_membrane_electroporation-Part_1_The_phenomenon

Kunze, W.: Technologie Brauer & Mälzer. 11. Auflage. Berlin: VLB Berlin, 2016.

Lammerskitten, A.; Mykhailik, V.; Wiktor, A.; Töpfl, S.; Nowacka, M.; Bialik, M.; Czyzewski, J.; Witrowa-Rajchert, D.; Parniakov, O.: Impact of pulsed electric fields on physical properties of freeze-dried apple tissue. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* [online]. ScienceDirect. Oktober 2019. Band 57. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102211>

Landi, G.; Benedetti, M.; Sforzini, M.; Eslami, E.; Pataro, G.: Comparative Analysis of Cost, Energy Efficiency, and Environmental Impact of Pulsed Electric Fields and Conventional Thermal Treatment with Integrated Heat Recovery for Fruit Juice Pasteurization. *Foods* [online]. MDPI. Juni 2025. Band 14. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/13/2239>

Lasekan, O.; Ng, S.; Azeez, S.; Shittu, R.; Teoh, L.; Gholivand, S.: Effect of Pulsed Electric Field Processing on Flavor and Color of Liquid Foods. *Journal of Food Processing and Preservation* [online]. Wiley Online Library. August 2016, Band 41, Teil 3. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12940>

Li, Y.; Tian, W.; Mo, H.; Zhang, Y.; Zhao, X.: Effects of Pulsed Electric Field Processing on Quality Characteristics and Microbial Inactivation of Soymilk. *Food and Bioprocess Technology*

[online]. Springer Nature Link. 2013, Band 6, 1907-1916. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-012-0868-8>

Lytras, F.; Psakis, G.; Gatt, R.; Cebrian, G.; Raso, J.; Valdramidis, V.: Exploring the efficacy of pulsed electric fields (PEF) in microbial inactivation during food processing: A deep dive into the microbial cellular and molecular mechanisms. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* [online]. ScienceDirect. Juli 2024, Band 95. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103732>

McClements, D. J.; Grossmann, L.; Wagemans, A. M.: Pflanzliche Lebensmittelalternativen – Eigenschaften, Formulierung, Verarbeitungsmethoden und Herstellung. 1. Auflage. Cham: Springer Spektrum, 2024. Verfügbar als PDF unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-52639-8>

Milani, E. A.; Silva, F.V.M.: Pasteurization of Beer by Non-Thermal Technologies. *Food Safety and Quality Control* [online]. Frontiers. März 2022, Band 1. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3389/frfst.2021.798676>

Mohamed, M.E.A.; Eissa, A.H.A.: Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology. *Structure and Function of Food Engineering* [online]. 2012. DOI: 10.5772/48678

Nabilah, U.U.; Sitanggang, A.B.; Dewanti-Hariyadi, R.; Sugiarto, A.T.; Purnomo, E.H.: Meta-analysis: microbial inactivation in milk using pulsed electric field. *International Journal of Food Science and Technology* [online]. Food Science + Technology. September 2022. Band 57, Teil 9, 5750-5763. Verfügbar unter: <https://academic.oup.com/ijfst/article/57/9/5750/7807341>

Narziss, L.: Abriss der Bierbrauerei. 7.Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.

Narziss, L.; Schuster, K.; Weinfurter, F.: Die Bierbrauerei Band 2: Die Technologie der Würzebereitung. 7. Auflage. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1992.

Niu, D.; Zeng, X.; Ren, E.; Xu, F.; Li, J.; Wan, M.; Wang, R.: Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China. *Food Research International* [online]. Elsevier. November 2020, Band 137. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109715>

Nowak, D.; Jakubczyk, E.: Effect of Pulsed Electric Field Pre-Treatment and the Freezing Methods on the Kinetics of the Freeze-Drying Process of Apple and Its Selected Physical Properties. *Foods* [online]. MDPI. 2022. Band 11, 2407. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/foods11162407>

Ostermeier, R.; Parniakov, O.; Töpfl, S.; Jäger, H.: Applicability of Pulsed Electric Field (PEF) Pre-Treatment for a Convective Two-Step Drying Process. *Foods* [online]. MDPI. 2020. Band 9, 512. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/foods9040512>

Owusu-Anah, A. A.; Martinets, L.; Chukwurah, N.: Thermal Death Rate of *Saccharomyces cerevisiae* [online]. Academia. 2024. Verfügbar als PDF unter: https://www.academia.edu/121060008/Thermal_Death_Rate_of_Saccharomyces_Cerevisiae?auto=download&auto_download_source=social-news

Pollmer, U: Zusatzstoffe von A bis Z – Was Etiketten verschweigen. Hamburg: Deutsches Zusatzstoffmuseum, 2014. Verfügbar als PDF unter: https://euleev.de/images/Beitraege/Zusatzstoffe_von_A_bis_Z_2014.pdf

Peng, K.; Koubaa, M.; Bals, O.; Vorobiev, E.: Effect of Pulsed Electric Fields on the Growth and Acidification Kinetics of *Lactobacillus delbrueckii* Subsp. *Bulgaricus*. *Foods* [online]. MDPI. 2020, Band 9, 1146. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/foods9091146>

Raso, J.; Frey, W.; Ferrari, G.; Pataro, G.; Knorr, D.; Teissie, J.; Miklavcic, D.: Recommendations guidelines on the key information to be reported in studies of application of PEF technology in food and biotechnological processes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* [online]. ScienceDirect. October 2016, Band 37 (C), 312-321. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.003>

Raso, J.; Heinz, V.; Alvarez, I.; Töpfl, S. (Editoren): *Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry*. 2. Auflage. Schweiz: Springer, 2022. Verfügbar als PDF unter: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-70586-2>

Redders, T.: Stammwürze: Was ist das eigentlich? [online]. *Das Biermagazin*. 2025. [Zugriff am 28.11.2025]. Verfügbar unter: <https://erick.hopfenhelden.de/stammwuerze-was-ist-das-eigentlich/>

Rimbach, G.; Nagursky, J.; Erbersdobler, H. F.: *Lebensmittel - Warenkunde für Einsteiger*. 3. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2025.

Saulis, G.: Electroporation of Cell Membranes: The Fundamental Effects of Pulsed Electric Fields in Food Processing. *Food Engineering Reviews* [online]. Springer Nature Link. Mai 2010. Band 2, 52-73. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-010-9023-3>

Senatskommission zur gesundheitlichen Bewertung von Lebensmitteln (SKLM): *Stellungnahme zur Hochspannungsimpulsbehandlung von Lebensmitteln*. Endfassung. Kaiserslautern: 2007. Verfügbar als PDF unter: <https://www.dfg.de/resource/blob/168902/sklm-hochspannungsimpulsbehandlung.pdf>

Su, W.; Wang, Q.; Li, J.; Qiu, Z.; Qiu, Y.: Effects of pulsed electric field technology on the nutritional value and biological function of plant food. *Agro-Food Safety* [online]. *Front. Sustain. Food*. Mai 2024. Band 8. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1385533>

Töpfl, S.: *Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food- and Bioprocessing – Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis*. Dissertation. Berlin, 2006.

Töpfl, S.; Heinz, V.; Knorr, D.: *Overview of Pulsed Electric Field Processing for Food*. TU Berlin, 2005.

Töpfl, S.; Heinz, V.; Knorr, D.: High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical Engineering and Processing* [online]. Elsevier. 2006a, Band 46, 537-546.

Töpfl, S.; Mathys, A.; Heinz, V.; Knorr, D.: Review: Potential of High Hydrostatic Pressure and Pulsed Electric Fields for Energy Efficient and Environmentally Friendly Food Processing. *Food Reviews International* [online]. ResearchGate. 2006b, Band 22, 405-423. DOI: 10.1080/87559120600865164

VerbraucherService Bayern im KDFB e.V.: *Pflanzendrinks: Gesunde und nachhaltige Alternative zu Kuhmilch?* [online]. 2025 [Zugriff am: 13.09.2025], Verfügbar unter: <https://www.verbraucherservice-bayern.de/themen/ernaehrung/pflanzendrinks-gesunde-und-nachhaltige-alternative-zu-kuhmilch>

VorlBierG (idF. v. 29.10.2001) §9 Abs. 1

Walkling-Ribeiro, M.; Rodriguez-Gonzales, O.; Jayaram, S.H.; Griffiths, M.W.: Processing temperature, alcohol and carbonation levels and their impact on pulsed electric fields (PEF) mitigation of selected characteristic microorganisms in beer. *Food Research International* [online]. ScienceDirect. October 2011, Band 44, Teil 8, 2524-2533. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.01.046>

Walter, L.; Knight, G.; Ng, S.Y.; Buckow, R.: Kinetic models for pulsed electric field and thermal inactivation of *Escherichia coli* and *Pseudomonas fluorescens* in whole milk. International Dairy Journal [online]. ScienceDirect. Juni 2016, Band 57, 7-14. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2016.01.027>

Warren, E.A.K.; Payne, C.K.: Cellular binding of nanoparticles disrupts the membrane potential. RSC Adv. [online]. PubMed. Januar 2015. Band 5, 13660-13666. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25685328/>

Wingender, J.; Stamm, M.; Zarnkow, M.; Bier, R. RÖMPP [online]. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2015. Verfügbar unter: <https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-02-01263>

Witt, J.; Siemer, C.; Bostelmann, A.; Töpfl, S.: Juice Preservation by Pulsed Electric Fields. Elsevier. 2021.

Xiao, W.; Geng, Y.; Gao, W.; Zeng, X.; Woo, M.; Ma, J.; Han, Z.: A comprehensive review of the applications of pulsed electric field: Primary emphasis on extraction, modification, and inactivation. Innovative Food Science and Emerging Technologies [online]. ScienceDirect [online]. ScienceDirect. Mai 2026, Band 109, 104420. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104420>

Xie, A.; Dong, Y.; Liu, Z.; Li, Z.; Shao, J.; Li, M.; Yue, X.: A Review of Plant-Based Drinks Addressing Nutrients, Flavor and Processing Technologies. Foods [online]. MDPI. Oktober 2023. Band 12. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/foods12213952>

Yao, Y.; He, W.; Cai, X.; Bekhit, A. E. A.; Xu, B.: Sensory, physicochemical and rheological properties of plant-based milk alternatives made from soybean, peanut, adlay, adzuki bean, oat and buckwheat. International Journal of Food Science and Technology [online]. August 2022, Band 57, 4868-4878. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1111/ijfs.15814>

8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1: Hauptphasen der Einwirkung eines elektrischen Feldes auf die Zellmembran (Saulis, 2010)	5
Abb. 2: Simulation einer sich öffnenden Pore in der Zellmembran bei Einwirkung eines elektrischen Feldes. Links: Geschlossene/intakte Zellmembran. Mitte: Phospholipide (grau-orange) weichen zur Seite, Wassermoleküle dringen ein (blau). Rechts: Pore vergrößert sich weiter und Natrium-Ionen (grün) können eindringen. (Kotnik et al., 2012)	5
Abb. 3: Darstellung der Elektroporation an der Zellmembran. A: Doppellipidschicht ohne Poren. B: Doppellipidschicht mit hydrophober Pore. C: Entstehung einer reversiblen, hydrophilen Pore. D: Entstehung einer irreversiblen, hydrophilen Pore. (Kotnik et al., 2012)	6
Abb. 4: Vereinfachtes Fließschema eines kontinuierlichen PEF-Systems zur Keimreduktion von Flüssigkeiten (DLG, 2018)	7
Abb. 5: Konfigurationen von Elektroden-Anordnungen in einer Behandlungskammer (A) Parallel, (B) Koaxial, (C) Kollinear. (Witt et al., 2021)	9
Abb. 6: Darstellung der unipolaren/bipolaren Rechteckpulsform (links oben/unten) und unipolaren/bipolaren exponentiellen Pulsform (rechts oben/unten) (Raso et al., 2016).12	
Abb. 7: Grundlegender Brauprozess vom Einmaischen bis zur Abfüllung (Hamatschek, 2021)	21
Abb. 8: Grundlegender Herstellungsprozess eines Pflanzendrink mittels Pflanzenöl, Emulgatoren und Zusätzen (McClements et al., 2024).....	22
Abb. 9: Allgemeiner Herstellungsprozess eines Pflanzendrinks mit Nassvermahlung oder Trockenvermahlung (Daryani et al., 2024)	24
Abb. 10: Brauereianlage „Brixonia 20 T Serie“ (Rational Beratungsges. mbH / ROSOMA GmbH, Deutschland, Rostock 1996). Auf der Anlage links: Maische-/Würzepfanne, rechts: Läuterbottich sowie firmeneigener Volumenmessstab (eigene Aufnahme)	28
Abb. 11: Einsätze für die Brauereianlage. Links: Whirlpooleinsatz, Rechts: Siebboden mit Aufhackwerk (eigene Aufnahme).....	29
Abb. 12: Fließdiagramm zur Durchführung der Herstellung von Bierwürze	31
Abb. 13: Fließschema zur Herstellung des Lupinendrink-Prototyps – Phase 1	35
Abb. 14: Fließschema zur Herstellung des Lupinendrink-Prototyps – Phase 2	39
Abb. 15: Fließschema zur Herstellung des Lupinendrink im Technikumsmaßstab – Phase 1	45
Abb. 16: Einfluss des Gellangehalts auf die dyn. Viskosität des Lupinendrinks mit 6 % Maltodextrin	62
Abb. 17: Einfluss des Maltodextringehalts auf die dyn. Viskosität des Lupinendrinks mit 0,03 % Gellan	62
Abb. 18: Einfluss des Gellangehalts auf die dyn. Viskosität des Lupinendrinks mit 4 % Maltodextrin – Phase 2	65
Abb. 19: Fließschema zum Aufbau des Anlagensystems - Wasserversuch. 1) Vorlaufbehälter, 2) Absperrventil 3) Kreiselpumpe, 4) PEF-Anlage, 5) Membranventil, 6) Rückfluss in Vorlaufbehälter, 7) Probenahme, 8) Druckluft, 9) Temperiergerät/Kühlung	68
Abb. 20: Keimreduktion [$\lg(N_e/N_0)$] in Abhängigkeit zur spezifischen Energie [kJ/l] – Lupinendrink mit Escherichia coli (NWG = Nachweisgrenze).....	73

Abb. 21: Keimreduktion [$\lg(N_e/N_0)$] in Abhängigkeit zur spezifischen Energie [kJ/l] – Lupinendrink mit <i>Saccharomyces cerevisiae</i> (NWG = Nachweisgrenze)	74
Abb. 22: Keimreduktion [$\lg(N_e/N_0)$] in Abhängigkeit zur spezifischen Energie [kJ/l] – Bierwürze mit <i>Escherichia coli</i> (NWG = Nachweisgrenze)	75
Abb. 23: Zusammenfassende Darstellung der Temperaturverläufe aller Versuche in Bezug zur spezifischen Energie [kJ/l]	76
Abb. 24: Zusammenfassung physikochemischer Eigenschaften der Medien	79
Abb. 25: Vergleich der Keimreduktion von <i>E. coli</i> und <i>S. cerevisiae</i> in Lupinendrink	80
Abb. 26: Vergleich der Viskositäten der Lupinendrinks mit Referenzmedien Kuhmilch und Sojadrink.....	84
Abb. 27: Fertiger Lupinendrink Maltodextrinversuch – Phase 1 Rezepturentwicklung am Folgetag (eigene Aufnahme)	115
Abb. 28: Fertiger Lupinendrink Maltodextrinversuch – Phase 1 Rezepturentwicklung am Folgetag (eigene Aufnahme)	115
Abb. 29: Nullprobe Lupinendrink – Phase 1 Rezepturentwicklung (eigene Aufnahme)	115
Abb. 30: Nullprobe Lupinendrink – Phase 2 Rezepturentwicklung (eigene Aufnahme)	115
Abb. 31: Packpresse mit eingelegten Paketen (eigene Aufnahme).....	116
Abb. 32: Fertiger Lupinendrink Gellanversuch – Phase 2 Rezepturentwicklung am Folgetag (eigene Aufnahme)	116
Abb. 33: Vergleich Lupinensamen vor (links) und nach (rechts) dem Mahlen (eigene Aufnahme).....	116
Abb. 34: Eingesetztes Dispergiergerät mit Kochtopf (eigene Aufnahme)	117
Abb. 35: Separatoranlage mit Pumpe im Einsatz (eigene Aufnahme).....	117
Abb. 36: Eingesetzter Kochkessel mit Rührwerk (eigene Aufnahme).....	117
Abb. 37: Fertiger Lupinendrink – Technikumsmaßstab – Phase 1 nach 15 min (eigene Aufnahme).....	118
Abb. 38: Fertiger Lupinendrink Technikumsmaßstab – Phase 2 nach 60 min (eigene Aufnahme).....	118
Abb. 39: Fertiger Lupinendrink Technikumsmaßstab – Phase 2 nach Schütteln (eigene Aufnahme).....	118
Abb. 40: Fertiger Lupinendrink – Technikumsmaßstab – Phase 1 nach Schütteln (eigene Aufnahme)	118
Abb. 41: Frontansicht PEF-System (eigene Aufnahme)	119
Abb. 42: Seitliche Ansicht PEF-System (eigene Aufnahme)	119
Abb. 43: Ansicht Modulplatte kontinuierlicher Betrieb.....	120
Tab. 1: Zusammenfassung beeinflussender Faktoren/Parameter zur Inaktivierung von MO (Witt et al., 2021)	9
Tab. 2: Verwendete Anlage, Geräte sowie Materialien für die Bierwürze-Herstellung...	29
Tab. 3: Verwendete Rohstoffe sowie Hersteller und Menge zur Herstellung der Bierwürze.....	30
Tab. 4: Verwendete Rohstoffe/Zutaten für Rezeptentwicklung.....	33
Tab. 5: Verwendete Mengen an Stabilisatoren der Versuchsreihe 1 – Phase.....	34
Tab. 6: Verwendete Mengen an Stabilisatoren der Versuchsreihe 2 – Phase 1	34

Tab. 7: Verwendete Geräte und Materialien zur Herstellung eines Lupinendrink-Prototypens – Phase 1	35
Tab. 8: Eingesetzte Zutatenmenge für Versuchsreihe 1 und 2 – Phase 1	36
Tab. 9: Verwendete Geräte und Materialien zur Herstellung eines Lupinendrink-Prototypens – Phase 1	37
Tab. 10: Eingesetzte Zutatenmenge - Phase 2	38
Tab. 11: Verwendete Mengen an Gellan - Phase 2	38
Tab. 12: Finale Rezeptur - Lupinendrink	40
Tab. 13: Verwendete Geräte, Anlagen und Materialien zur Herstellung eines Lupinendrink-Prototypens – Phase 1	41
Tab. 14: Spezifikationen/Parameter für die Packpresse	43
Tab. 15: Spezifikationen/Parameter für die Separatoranlage	43
Tab. 16: Übersicht der verwendeten Geräte/Anlagen und Komponenten	46
Tab. 17: Eingestellte Prozessparameter des ersten Wasserversuches	47
Tab. 18: Prozessparameter der <i>Bierversuche</i>	48
Tab. 19: Eingestellte Prozessparameter des <i>Testversuches mit Wasser</i>	49
Tab. 20: Prozessparameter für die Behandlung der Lupinendricks und der Bierwürze	50
Tab. 21: Verwendete Materialien und Geräte zur Herstellung der Nährböden, Reagenzien und Inokula	50
Tab. 22: Mikroorganismen und die dazu verwendeten Nährmedien	52
Tab. 23: Temperatur zur Inkubation der Inokula	52
Tab. 24: Verwendete Materialien und Geräte für das Beimpfen und Inkubieren	52
Tab. 25: Verwendete Mikroorganismen <i>sowie Inkubationstemperatur und -dauer</i>	53
Tab. 26: Verwendete Materialien und Geräte zum Auszählen der inkubierten Platten	53
Tab. 27: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung des Stammwürzegehalts der Bierwürze	55
Tab. 28: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung der Viskosität des Lupinendricks sowie Sojadrink und Kuhmilch	56
Tab. 29: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung des pH-Wert der Bierwürze und des Lupinendricks	58
Tab. 30: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung der Leitfähigkeit der Bierwürze und des Lupinendricks	58
Tab. 31: Verwendete Geräte und Materialien zur Bestimmung der Restfeuchte des Lupinentresters	59
Tab. 32: Mengen und physikochemische Eigenschaften aller Bierwürzen	60
Tab. 33: dyn. Viskosität der einzelnen Proben aus Versuchsreihe 1 „Gellan“	61
Tab. 34: dyn. Viskosität der einzelnen Proben aus Versuchsreihe 2 „Maltodextrin“	62
Tab. 35: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten/berechneten Daten/Parameter	63
Tab. 36: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten/berechneten Daten/Parameter des Lupinendricks – Rezepturentwicklung Phase 2	64
Tab. 37: Ergebnisse Gesamtkeimzahl [KbE/ml], Ig(N) [KbE/ml] und Keimreduktion [lg(N ₀ /N _e)] – Lupinendrink mit Escherichia coli bei 24 kV/cm	72
Tab. 38: Ergebnisse Gesamtkeimzahl [KbE/ml], Ig(N) [KbE/ml] und Keimreduktion [lg(N ₀ /N _e)] – Lupinendrink mit Saccharomyces cerevisiae bei 24 kV/cm	74
Tab. 39: Ergebnisse Gesamtkeimzahl [KbE/ml], Ig(N) [KbE/ml] und Keimreduktion [lg(N ₀ /N _e)] – Bierwürze mit Escherichia coli bei 24 kV/cm	75
Tab. 40: Zusammenfassung physikochemischer Eigenschaften der Medien	77

Tab. 41: Ausschnitt der Zusammenfassung variierteter Prozessparameter und Dekontaminationseffizienz verschiedener PEF-Behandlungen (Lytras et al., 2024) ..	107
Tab. 42: Ergebnisse der pH-Wert-Messung	109
Tab. 43: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung	109
Tab. 44: Ergebnisse der Messung des Stammwürzegehalts	110
Tab. 45: Ergebnisse der Viskositätsbestimmung – Versuchsreihe 1 & 2	
Rezepturentwicklung Phase 1	111
Tab. 46: Ergebnisse der Gewichtsbestimmung des Senkkörpers in Luft, Kuhmilch und Soja	111
Tab. 47: Ergebnisse der Fallzeitermittlung der Kugel für Kuhmilch und Sojadrink	111
Tab. 48: Ergebnisse der Gewichtsbestimmung des Senkkörpers in <i>Lupinendrink aus Phase 2</i>	111
Tab. 49: Ergebnisse der Fallzeitermittlung der Kugel <i>des Lupinendrinks aus Phase 2</i>	112
Tab. 50: Ergebnisse Restfeuchtebestimmung Trester – Technikumsmaßstab Phase 1	112
Tab. 51: Ergebnisse Restfeuchtebestimmung Trester – Technikumsmaßstab Phase 2	112
Tab. 52: pH-Wert – Lupinendrink Technikumsmaßstab Phase 1	112
Tab. 53: pH-Wert – Lupinendrink Technikumsmaßstab Phase 2	113
Tab. 54: Leitfähigkeit – Lupinendrink Technikumsmaßstab Phase 1	113
Tab. 55: Leitfähigkeit – Lupinendrink Technikumsmaßstab Phase 2	113
Tab. 56: Mengenberechnung Platten, Agar und NaCl-Lösung	114
Tab. 57: Zusammenfassende Übersicht des Wasserversuches mit <i>Escherichia coli</i> ..	121
Tab. 58: Zusammenfassende Übersicht Bierwürze – <i>Escherichia coli</i> 1	122
Tab. 59: Zusammenfassende Übersicht Bierwürze – <i>Escherichia coli</i> 2	123
Tab. 60: Zusammenfassende Übersicht Bierwürze – <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	124
Tab. 61: Zusammenfassende Übersicht Bierwürze – <i>Staphylococcus carnosus</i>	126
Tab. 62: Zusammenfassende Übersicht Testversuch Wasser – <i>Escherichia coli</i>	127
Tab. 63: Rohdaten der Keimzählung – Lupinendrink mit <i>Escherichia coli</i>	129
Tab. 64: Rohdaten der Keimzählung – Lupinendrink mit <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ..	129
Tab. 65: Rohdaten der Keimzählung – Bierwürze mit <i>Escherichia coli</i>	130
Tab. 66: Prozessparameter – Lupinendrink mit <i>Escherichia coli</i>	131
Tab. 67: Prozessparameter – Lupinendrink mit <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	131
Tab. 68: Prozessparameter – Bierwürze mit <i>Escherichia coli</i>	132
Tab. 69: ANOVA - Lupinendrink Rezepturentwicklung – Versuchsreihe 1 „Gellan“	133
Tab. 70: ANOVA - Lupinendrink Rezepturentwicklung – Versuchsreihe 2 „Maltodextrin“	134
Tab. 71: ANOVA - Lupinendrink mit <i>Escherichia coli</i>	134
Tab. 72: ANOVA - Lupinendrink mit <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	135
Tab. 73: ANOVA - Bierwürze mit <i>Escherichia coli</i>	136
Tab. 74: ANOVA zweifaktorielle Varianzanalyse – Vergleich Lupinendrink und Bierwürze	137
Tab. 75: ANOVA zweifaktorielle Varianzanalyse – Vergleich <i>Escherichia coli</i> mit <i>Saccharomyces cerevisiae</i> in Lupinendrink	138

9 Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Zusammenfassung verschiedener Studien bzgl. Keimreduktion	107
Anhang 2: Ergebnisse physikochemischer Analysen der Bierwürze	109
Anhang 3: Ergebnisse der physikochemischen Untersuchungen der Lupinendrinks ..	111
Anhang 4: Daten Vorbereitung Mikrobiologie	114
Anhang 5: Bilder bzgl. Herstellung der Medien sowie Versuchsdurchführungen PEF.	115
Anhang 6: Anlagenaufbau	115
Anhang 7: Zusammenfassende Übersicht der mikrobiologischen Untersuchungen - PEF-Behandlung Phase 1	121
Anhang 8: Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen der PEF-Behandlung Phase 2	129
Anhang 9: Gemessene und berechnete Prozessparameter PEF-Behandlung Phase 2	131
Anhang 10: Ergebnisse statistische Auswertung	133

Anhang 1: Zusammenfassung verschiedener Studien bzgl. Keimreduktion

Tab. 41: Ausschnitt der Zusammenfassung variierter Prozessparameter und Dekontaminationseffizienz verschiedener PEF-Behandlungen (Lytras et al., 2024)

Mikroorganismus	Produkt & Kenndaten	Behandlungsbedingungen	Reduktion [$\log_{10}$]
<u>Gram-negative</u>			
Escherichia coli (ATCC 8739)	Grüner Tee (pH 6,0; 0,1 S/m)	E: 38,4 kV/cm; t: 160 μ s; τ : 2 μ s; f: 667 Hz; Q: 236 $\times$ 103J/L	5,6
Escherichia coli (ATCC 8739)	Sojamilch (pH 7,22; 0,21 S/m)	E: 40 kV/cm; t: 547 μ s; τ : 2 μ s; f: 400 Hz; Q: 1 mL/s	5,2
Escherichia coli (ATCC 26)	Mcllvaine Puffer (pH 3,8; 2 mS/cm)	E: 12 kV/cm; τ : 4 μ s; ω : 40 J/mL; Q: 15 mL/min	2,25
Escherichia coli (ATCC 8739)	Fettarme Milch	E: 10 kV/cm; τ : 30 μ s; ω : 200 kJ/kg; Q: 30 L/h	4,5
Escherichia coli (ATCC 11775)	UHT Vollmilch (4% Fett)	E: 35 kV/cm; t: 124 μ s; τ : 2 μ s; Q: 120 mL/min	4,8
E. coli K12 & 35218	Orangensaft (pH 3,4)	E: 20 kV/cm; t: 70 μ s; τ : 2,6 μ s; f: 740 Hz	5,06
E. coli DH5 α	Traubensaft (15,8 °Brix)	E: 24 kV/cm; t: 180 μ s; τ : 3 μ s; f: 120 Hz	2,02
E. coli 1.107	Melonensaft (pH 5,82)	E: 35 kV/cm; t: 1250 μ s; τ : 4 μ s; ω : 7662 J/cm ³	3,91
E. coli 0157:H7	Apfel-Cider (12,5 °Brix)	E: 30 kV/cm; f: 1500 pps; ω : 408 J/mL; Q: 350 mL/min	6,38
Salmonella Enteritidis	Wassermelonensaft (6,5 °Brix)	E: 35 kV/cm; t: 2000 μ s; τ : 4 μ s; ω : 7541 J/cm ³	4,27

Salmonella Typhimurium	Apfel-Cider (pH 3,83)	E: 30 kV/cm; f: 1500 pps; ω : 408 J/mL; Q: 60 mL/min	6,34
Pseudomonas fluorescens	UHT Vollmilch (4% Fett)	E: 35 kV/cm; t: 124 μ s; τ : 2 μ s; Q: 120 mL/min	2,4
Cronobacter sakazakii	Säuglingsmilchnahrung (pH 6,8)	E: 35 kV/cm; t: 700 μ s; τ : 2,5 μ s; Q: 30 mL/min	1,1
<u>Gram-positive MO.</u>			
Bacillus cereus (131)	Magermilch (pH 6,69)	E: 35 kV/cm; t: 200 μ s; τ : 2,5 μ s; Q: 30 mL/min	3,05
Lactiplantibacillus spp.	Orangensaft (pH 3,4)	E: 20 kV/cm; t: 70 μ s; τ : 2,6 μ s; f: 740 Hz	3,07 – 4,53
Listeria monocytogenes	Melonensaft (pH 5,82)	E: 35 kV/cm; t: 2000 μ s; τ : 4 μ s; Q: 100 mL/min	4,27
Staphylococcus aureus	Magermilch (pH 6,68)	E: 35 kV/cm; τ : 8 μ s; f: 100 Hz; n: 150 Pulse	4,5
<u>Hefen</u>			
Candida stellata	Deionisiertes Wasser	E: 12,5 kV/cm; τ : 0,3 ms; n: 5 Pulse	3,5
Saccharomyces cerevisiae	Traubensaft (15,8 °Brix)	E: 24 kV/cm; t: 180 μ s; τ : 3 μ s; f: 120 Hz	6,01
S. cerevisiae (Ascosporen)	Lager-Bier / Ale	E: 45 kV/cm; t: 70 μ s; τ : 1,5 μ s; n: 46,3 Pulse	0,2 – 2,2
Brettanomyces bruxellensis	Rotwein (13,5% alc.)	E: 50 kV/cm; t: 42 μ s; τ : 1,7 μ s; ω : 119 kJ/kg	0,9 – 3,7

Anhang 2: Ergebnisse physikochemischer Analysen der Bierwürze

Tab. 42: Ergebnisse der pH-Wert-Messung

Versuch \ Parameter	pH-Wert		
	Wert	Mittelwert	SD
Bierwürze 1	5,62	5,61	0,01
	5,61		
	5,61		
Bierwürze 2	5,54	5,54	0,01
	5,54		
	5,53		
Bierwürze 3	5,83	5,78	0,04
	5,76		
	5,76		
Bierwürze 4	5,50	5,52	0,02
	5,53		
	5,52		
Bierwürze 5	5,57	5,59	0,02
	5,59		
	5,61		

Tab. 43: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung

Versuch \ Parameter	Leitfähigkeit [mS/cm]		
	Wert	Mittelwert	SD
Bierwürze 1	1,76	1,75	0,01
	1,74		
	1,75		
Bierwürze 2	1,79	1,79	0,00
	1,79		
	1,79		
Bierwürze 3	1,87	1,88	0,01
	1,87		
	1,89		
Bierwürze 4	1,72	1,70	0,02
	1,69		
	1,70		
Bierwürze 5	1,95	1,93	0,02
	1,92		
	1,92		

Tab. 44: Ergebnisse der Messung des Stammwürzegehalts

Versuch	Parameter	Stammwürze [°Plato]		
		Wert	Mittelwert	SD
Bierwürze 1		11,2	11,2	0,06
		11,2		
		11,3		
Bierwürze 2		11,5	11,5	0,06
		11,6		
		11,5		
Bierwürze 3		12,0	12,1	0,06
		12,1		
		12,1		
Bierwürze 4		11,0	11,1	0,06
		11,1		
		11,1		
Bierwürze 5		12,3	12,2	0,06
		12,2		
		12,2		

Anhang 3: Ergebnisse der physikochemischen Untersuchungen der Lupinendricks

Tab. 45: Ergebnisse der Viskositätsermittlung – Versuchsreihe 1 & 2 Rezepturentwicklung Phase 1

Versuchsreihe 1	dyn. Viskosität [mPa·s] bei 20 °C					
Gellangehalt [%]	Nullprobe	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
1	46	63	71	80	92	99
2	43	64	71	80	93	103
Mittelwert	44,5	63,5	71	80	92,5	101
Versuchsreihe 2						
Maltodextringehalt [%]	Nullprobe	2	3	4	5	6
1	66	84	83	78	81	83
2	65	84	82	80	81	85
Mittelwert	65,5	84	82,5	79	81	84

Tab. 46: Ergebnisse der Gewichtsbestimmung des Senkkörpers in Luft, Kuhmilch und Soja

Probe	Gewicht Senkkörper [g] in:		
	Kuhmilch 3,5 %	Sojadrink	Luft
1	20,1923	20,3700	30,5054
2	20,1925	20,3714	30,5054
Mittelwert	20,1924	20,3707	30,5054

Tab. 47: Ergebnisse der Fallzeitermittlung der Kugel für Kuhmilch und Sojadrink

Probe	Fallzeit [s]	
	Kuhmilch 3,5 %	Sojadrink
1	224	192
2	223	192
Mittelwert	223,5	192,0

Tab. 48: Ergebnisse der Gewichtsbestimmung des Senkkörpers in *Lupinendrink aus Phase 2*

Probe	Gewicht Senkkörper [g]					
	Nullprobe	1	2	3	4	5
1	20,4391	20,2951	20,3012	20,3175	20,3340	20,3428
2	20,4392	20,2950	20,3012	20,3174	20,3341	20,3428
Mittelwert	20,4392	20,2951	20,3012	20,3175	20,3341	20,3428

Tab. 49: Ergebnisse der Fallzeitermittlung der Kugel des Lupinendrinks aus Phase 2

	Fallzeit [s]					
Probe	Nullprobe	1	2	3	4	5
1	12,23	19,71	23,63	26,07	40,51	53,83
2	12,11	19,68	23,64	25,98	40,48	54,01
Mittelwert	12,17	19,70	23,64	26,03	40,50	53,92

Tab. 50: Ergebnisse Restfeuchtebestimmung Trester – Technikumsmaßstab Phase 1

Messwert	Restfeuchte [%]
1	63,73
2	63,38
3	64,27
Mittelwert	63,79
SD	0,448

Tab. 51: Ergebnisse Restfeuchtebestimmung Trester – Technikumsmaßstab Phase 2

Messwert	Restfeuchte [%]
1	70,02
2	69,17
3	69,98
Mittelwert	69,72
SD	0,480

Tab. 52: pH-Wert – Lupinendrink Technikumsmaßstab Phase 1

Messwert	pH
1	6,70
2	6,71
3	6,67
Mittelwert	6,69
SD	0,02

Tab. 53: pH-Wert – Lupinendrink Technikumsmaßstab Phase 2

Messwert	pH
1	6,89
2	6,88
3	6,88
Mittelwert	6,88
SD	0,05

Tab. 54: Leitfähigkeit – Lupinendrink Technikumsmaßstab Phase 1

Messwert	Leitfähigkeit [mS/cm]
1	2,39
2	2,40
3	2,41
Mittelwert	2,40
SD	0,01

Tab. 55: Leitfähigkeit – Lupinendrink Technikumsmaßstab Phase 2

Messwert	Leitfähigkeit [mS/cm]
1	2,45
2	2,46
3	2,45
Mittelwert	2,45
SD	0,01

Anhang 4: Daten Vorbereitung Mikrobiologie

Tab. 56: Mengenberechnung Platten, Agar und NaCl-Lösung

		Faktoren/Parameter zur Berechnung	
Probenanzahl (unbehandelt, Anfangs-keimgehalt)	1	Verdünnungsstufen	4 (10 ⁻¹ ;10 ⁻² ;10 ⁻³ ;10 ⁻⁴)
Probenanzahl (behandelt, Endkeimgehalt)	4	Bestimmung	3 <i>fach</i>
Materialkontrolle	1	Probengröße [ml]	10
Anzahl Platten pro MO	72	Anzahl MO gesamt	3/2
		Agar/Platte [ml]	20
Agar pro MO [ml]	1440	NaCl/Verdünnungsstufe 1-4 [ml]	9
		Aufschlagfaktor Agar [%]	20
NaCl pro MO [ml]	648	Aufschlagfaktor NaCl [%]	10

Anhang 5: Bilder bzgl. Herstellung der Medien sowie Versuchsdurchführungen PEF

Abb. 27: Fertiger Lupinendrink
Maltodextrinversuch – Phase 1
Rezepturentwicklung am Folgetag
(eigene Aufnahme)



Abb. 28: Fertiger Lupinendrink
Maltodextrinversuch – Phase 1
Rezepturentwicklung am Folgetag
(eigene Aufnahme)



Abb. 29: Nullprobe Lupinen-
drink – Phase 1 Rezepturen-
wicklung (eigene Aufnahme)



Abb. 30: Nullprobe Lupinendrink
– Phase 2 Rezepturentwicklung
(eigene Aufnahme)



Abb. 31: Fertiger Lupinendrink
Gellanversuch – Phase 2 Rezepturenentwicklung am Folgetag (eigene Aufnahme)



Abb. 32: Vergleich Lupinensamen vor (links) und nach (rechts) dem Mahlen (eigene Aufnahme)



Abb. 33: Packpresse mit eingelegten Paketen (eigene Aufnahme)



Abb. 34: Separatoranlage mit Pumpe im Einsatz (eigene Aufnahme)



Abb. 35: Eingesetzter Kochkessel mit Rührwerk (eigene Aufnahme)



Abb. 36: Eingesetztes Dispergiergerät mit Kochtopf (eigene Aufnahme)



Abb. 32: Fertiger Lupinendrink – Technikumsmaßstab – Phase 1 nach 15 min (eigene Aufnahme)



Abb. 38: Fertiger Lupinendrink – Technikumsmaßstab – Phase 1 nach Schütteln (eigene Aufnahme)



Abb. 33: Fertiger Lupinendrink – Technikumsmaßstab – Phase 2 nach 60 min (eigene Aufnahme)



Abb. 40: Fertiger Lupinendrink – Technikumsmaßstab – Phase 2 nach Schütteln (eigene Aufnahme)

Anhang 6: Anlagenaufbau

Abb. 41: Seitliche Ansicht PEF-System – Phase 1 (eigene Aufnahme)



Abb. 42: Frontansicht PEF-System – Phase 1 (eigene Aufnahme)



Abb. 34: Ansicht Modulplatte kontinuierlicher Betrieb (eigene Aufnahme)



Abb. 35: Anlagenaufbau – Phase 2 (eigene Aufnahme)

Anhang 7: Zusammenfassende Übersicht der mikrobiologischen Untersuchungen - PEF-Behandlung Phase 1

Tab. 57: Zusammenfassende Übersicht des Wasserversuches mit *Escherichia coli*

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
0	0	0	31	1,6	53	0	0,00	0,00
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	>300	>300	1				
2	>300	>300	86	20				
3	>300	>300	>300	1				
6	4,98	4	32,8	1,6	44	308	316,54	1266,15
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	>300	>300	40				
2	>300	>300	14	n. a.				
3	>300	>300	>300	9				
12	5,10	4	36,4	1,6	35	47	60,72	242,89
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	>300	n. a.	n. a.				
2	>300	n. a.	>300	1				
3	>300	>300	>300	1				
24	5,07	4	36,7	1,6	40	12	13,57	54,26
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	>300	>300	2				
2	>300	72	3	1				
3	>300	>300	>300	0				

n. a. = nicht auswertbar

Tab. 58: Zusammenfassende Übersicht Bierwürze – *Escherichia coli* 1

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [µs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [H]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [µs]
0	0	0	29,8	1,7	51	0	0,00	0,00
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	200	24	1				
2	>300	187	27	3				
3	>300	231	17	3				
23,74	19,25	4	30,5	1,7	43	58,00	60,99	243,96
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	203	26	1				
2	>300	214	26	3				
3	>300	158	12	3				
23,79	40,13	4	34,5	1,7	46	114,00	112,06	448,23
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	128	16	3				
2	>300	n. a.	n. a.	2				
3	>300	191	16	1				
23,83	81,81	4	37,7	1,7	46	196,00	192,66	770,64
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	n. a.	n. a.	n. a.				
2	>300	n. a.	5	3				
3	>300	144	21	1				

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
23,85	120,12	4	43,1	1,7	42	226,00	243,31	973,22
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	60	1	0				
2	>300	89	5	0				
3	>300	72	17	0				

n. a. = nicht auswertbar

Tab. 59: Zusammenfassende Übersicht Bierwürze – *Escherichia coli* 2

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
0	0	0	30,2	1,7	51	0	0,00	0,00
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	>300	25	0				
2	>300	>300	49	1				
3	>300	>300	73	2				
23,81	20,38	4	31,2	1,7	51	57	50,54	202,14
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	>300	13	1				
2	>300	>300	>300	40				
3	>300	262	12	0				
23,77	41,58	4	39,9	1,7	46	88	86,50	346,00
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	>300	n. a.	1				
2	>300	291	23	2				
3	>300	>300	>300	31				

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
23,85	80,63	4	41,2	1,7	51	148	131,22	524,86
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	>300	>300	0				
2	>300	>300	>300	n. a.				
3	>300	>300	>300	5				
23,79	120,77	4	45,2	1,7	52	246	213,91	855,63
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	176	19	10				
2	>300	>300	10	2				
3	>300	92	52	4				

n. a. = nicht auswertbar

Tab. 60: Zusammenfassende Übersicht Bierwürze – *Saccharomyces cerevisiae*

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
0	0	0	29,9	1,8	51	0	0	0,00
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [µs]	TemperaturEnde [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [µs]
23,72	20,43	4	30,3	1,8	51	67	59,40	237,61
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
23,82	39,31	4	36,5	1,8	49	114	105,20	420,79
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
23,84	80,95	4	40,1	1,8	54	204	170,82	683,26
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
23,79	119,55	4	46,2	1,8	44	228	234,30	937,20
Probe\Verdünnung	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
2	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				
3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.				

n. a. = nicht auswertbar

Tab. 61: Zusammenfassende Übersicht Bierwürze – *Staphylococcus carnosus*

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
0	0	0	35,6	1,8	50	0	0	0
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	0	0	0	0				
2	0	0	0	0				
3	0	0	0	0				
23,71	19,82	4	36,8	1,8	51	55	48,76	195,05
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	0	0	0	0				
2	0	0	0	0				
3	0	0	0	0				
23,78	39,72	4	38,4	1,8	49	83	76,59	306,36
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	0	0	0	0				
2	0	0	0	0				
3	0	0	0	0				
23,8	79,76	4	40,2	1,8	49	149	137,49	549,97
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	0	0	0	0				
2	0	0	0	0				
3	0	0	0	0				

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
23,72	121,32	4	46,9	1,8	48	200	188,40	753,60
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	0	0	0	0				
2	0	0	0	0				
3	0	0	0	0				

n. a. = nicht auswertbar

Tab. 62: Zusammenfassende Übersicht Testversuch Wasser – *Escherichia coli*

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
0	0	0	39,7	2,2	50	0	0	0
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	>300	77	4	0				
2	>300	89	5	0				
23,89	60,47	4	56,,3	2,2	88	97,00	49,84	199,36
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	21	0	0	0				
2	15	0	0	0				
23,94	80,27	4	61,6	2,2	83	116,00	63,19	252,77
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	Keimgehalt [KbE/ml]:			
1	0	0	0	0				
2	0	0	1	0				

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur_{Ende} [°C]	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
23,91	99,11	4	67	2,2	78	131,00	75,94	303,76
Probe	0,1	0,01	0,001	0,0001	>10 ¹			
1	0	0	0	0	Keimgehalt [KbE/ml]:			
2	0	0	0	0				

n. a. = nicht auswertbar

Anhang 8: Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen der PEF-Behandlung Phase 2

Tab. 63: Rohdaten der Keimzählung – Lupinendrink mit Escherichia coli

spez. Energie [kJ/l]	Verdün- nungsstufe	Probe 1	Probe 2	Probe 3
0	0,1	>300	>300	>300
	0,01	261	>300	>300
	0,001	36	50	65
	0,0001	0	2	5
60	0,1	>300	>300	>300
	0,01	52	45	n.a.
	0,001	14	10	17
	0,0001	0	0	0
80	0,1	21	33	n.a.
	0,01	4	11	n.a.
	0,001	0	0	0
	0,0001	0	0	0
100	0,1	0	4	0
	0,01	0	0	0
	0,001	0	0	0
	0,0001	0	0	0
120	0,1	0	0	0
	0,01	0	0	0
	0,001	0	0	0
	0,0001	0	0	0

Tab. 64: Rohdaten der Keimzählung – Lupinendrink mit Saccharomyces cerevisiae

spez. Energie [kJ/l]	Verdün- nungsstufe	Probe 1	Probe 2	Probe 3
0	0,1	>300	>300	>300
	0,01	>300	>300	>300
	0,001	>300	>300	>300
	0,0001	173	159	132
60	0,1	n.a.	n.a.	n.a.
	0,01	n.a.	n.a.	n.a.
	0,001	>300	133	164
	0,0001	74	91	81
80	0,1	>300	>300	>300
	0,01	>300	189	156
	0,001	n.a.	25	18
	0,0001	4	0	0
100	0,1	14	7	11
	0,01	0	0	0
	0,001	0	0	0
	0,0001	0	0	0
120	0,1	0	0	0
	0,01	0	0	0
	0,001	0	0	0
	0,0001	0	0	0

Tab. 65: Rohdaten der Keimzählung – Bierwürze mit Escherichia coli

spez. Energie [kJ/l]	Verdün- nungsstufe	Probe 1	Probe 2	Probe 3
0	0,1	c	n. a.	n. a.
	0,01	n. a.	n. a.	n. a.
	0,001	n. a.	n. a.	n. a.
	0,0001	n. a.	n. a.	n. a.
60	0,1	n. a.	n. a.	n. a.
	0,01	n. a.	n. a.	n. a.
	0,001	n. a.	n. a.	n. a.
	0,0001	n. a.	n. a.	n. a.
80	0,1	n. a.	128	156
	0,01	n. a.	30	15
	0,001	0	0	2
	0,0001	0	0	0
100	0,1	22	18	3
	0,01	0	0	0
	0,001	0	0	0
	0,0001	0	0	0
120	0,1	0	0	0
	0,01	0	0	0
	0,001	0	0	0
	0,0001	0	0	0

Anhang 9: Gemessene und berechnete Prozessparameter PEF-Behandlung Phase 2

Tab. 66: *Prozessparameter – Lupinendrink mit Escherichia coli*

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur _{Ende} [°C] *	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Verweilzeit [s]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
23,76	59,89	4	57,2	2,4	51	48	0,887	42,56	170,22
23,84	80,31	4	62,9	2,4	49	57	0,923	52,60	210,39
23,85	100,23	4	68,5	2,4	50	68	0,904	61,49	245,98
23,87	120,67	4	74,2	2,4	52	89	0,870	77,39	309,56

*Starttemperatur = 42,4 °C

Tab. 67: *Prozessparameter – Lupinendrink mit Saccharomyces cerevisiae*

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [μs]	Temperatur _{Ende} [°C] *	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Verweilzeit [s]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [μs]
23,75	60,55	4	54,4	2,4	53	50	0,853	42,66	170,63
23,85	79,51	4	61,7	2,4	51	59	0,887	52,31	209,23
23,86	100,1	4	66,8	2,4	52	71	0,870	61,74	246,95
23,89	120,13	4	72,7	2,4	52	89	0,870	77,39	309,56

*Starttemperatur = 40,6 °C

Tab. 68: *Prozessparameter – Bierwürze mit Escherichia coli*

Feldstärke [kV/cm]	spez. Energie [kJ/l]	Pulsweite [µs]	Temperatur_{Ende} [°C] *	Leitfähigkeit [mS/cm]	Durchfluss [l/h]	Frequenz [Hz]	Verweilzeit [s]	Anzahl Pulse	Behandlungszeit [µs]
23,82	60,28	4	56,1	1,9	50	62	0,904	56,07	224,27
23,90	80,10	4	61,7	1,9	51	81	0,887	71,81	287,25
23,91	100,24	4	67,3	1,9	49	94	0,923	86,74	346,96
23,93	120,35	4	72,4	1,9	50	109	0,904	98,57	394,28

*Starttemperatur = 41,0 °C

Anhang 10: Ergebnisse statistische Auswertung

Tab. 69: ANOVA - Lupinendrink Rezepturentwicklung – Versuchsreihe 1 „Gellan“

<i>Gellangehalt [%]</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Summe</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Varianz</i>			
0,02	2	127	63,5	0,5			
0,03	2	142	71	0			
0,04	2	160	80	0			
0,05	2	185	92,5	0,5			
0,06	2	202	101	8			
ANOVA							
<i>Streuungsursache</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>	<i>Prüfgröße (F)</i>	<i>P-Wert</i>	<i>kritischer F-Wert</i>	
Unterschiede zwischen den Gruppen	1875,4	4	468,85	260,4722222	0,0000055	5,192167773	
Innerhalb der Gruppen	9	5	1,8				
Gesamt	1884,4	9					

Tab. 70: ANOVA - Lupinendrink Rezepturentwicklung – Versuchsreihe 2 „Maltodextrin“

<i>Maltodextringehalt [%]</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Summe</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Varianz</i>			
2	2	168	84	0			
3	2	165	82,5	0,5			
4	2	158	79	2			
5	2	162	81	0			
6	2	168	84	2			
ANOVA							
<i>Streuungsursache</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>	<i>Prüfgröße (F)</i>	<i>P-Wert</i>	<i>kritischer F-Wert</i>	
Unterschiede zwischen den Gruppen	36,4	4	9,1	10,11111111	0,01294925	5,192167773	
Innerhalb der Gruppen	4,5	5	0,9				
Gesamt	40,9	9					

Tab. 71: ANOVA - Lupinendrink mit *Escherichia coli*

ZUSAMMENFASSUNG						
spez. Energie [kJ/l]	Anzahl	Summe	Mittelwert	Varianz		
60	3	-2,235676949	-0,74522565	0,0499338		
80	2	-4,171726454	-2,085863227	0,00024406		
ANOVA						
Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
Unterschiede zwischen den Gruppen	2,156770936	1	2,156770936	64,6309594	0,00401914	10,12796449
Innerhalb der Gruppen	0,100111663	3	0,033370554			
Gesamt	2,256882599	4				

Tab. 72: ANOVA - Lupinendrink mit *Saccharomyces cerevisiae*

ZUSAMMENFASSUNG						
<i>spez. Energie [kJ/l]</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Summe</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Varianz</i>		
60	3	-3,075549392	-1,025183131	0,114767067		
80	2	-3,833793404	-1,916896702	4,08728E-05		
100	2	-8,171099313	-4,085549657	8,11133E-05		
ANOVA						
<i>Streuungsursache</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>	<i>Prüfgröße (F)</i>	<i>P-Wert</i>	<i>kritischer F-Wert</i>
Unterschiede zwischen den Gruppen	11,39688582	2	5,698442911	99,25174931	0,000390171	6,94427191
Innerhalb der Gruppen	0,22965612	4	0,05741403			
Gesamt	11,62654194	6				

Tab. 73: ANOVA - Bierwürze mit *Escherichia coli*

ZUSAMMENFASSUNG						
<i>spez. Energie [kJ/l]</i>	<i>Anzahl</i>	<i>Summe</i>	<i>Mittelwert</i>	<i>Varianz</i>		
60	3	-2,235676949	-0,74522565	0,0499338		
80	2	-3,163015534	-1,581507767	0,003168425		
100	2	-4,532638583	-2,266319291	0,062926057		
ANOVA						
<i>Streuungsursache</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>	<i>Prüfgröße (F)</i>	<i>P-Wert</i>	<i>kritischer F-Wert</i>
Unterschiede zwischen den Gruppen	2,850632739	2	1,425316369	34,35281978	0,0030268	6,94427191
Innerhalb der Gruppen	0,165962082	4	0,04149052			
Gesamt	3,016594821	6				

Tab. 74: ANOVA zweifaktorielle Varianzanalyse – Vergleich Lupinendrink und Bierwürze

ZUSAMMENFASSUNG						
Lupinendrink	60	80	100	Gesamt		
Anzahl	2	2	2	6		
Summe	-1,653212514	-4,171726454	-7,130333768	12,95527274		
Mittelwert	-0,826606257	-2,085863227	-3,565166884	2,159212123		
Varianz	0,06013078	0,000244063	0,03580655	1,522407177		
Bierwürze						
Anzahl	2	2	2	6		
Summe	-1,653212514	-3,163015534	-4,532638583	-9,34886663		
Mittelwert	-0,826606257	-1,581507767	-2,266319291	1,558144438		
Varianz	0,06013078	0,003168425	0,062926057	0,440127284		
Gesamt						
Anzahl	4	4	4			
Summe	-3,306425028	-7,334741988	-11,66297235			
Mittelwert	-0,826606257	-1,833685497	-2,915743088			
Varianz	0,040087187	0,085928972	0,595245892			
ANOVA						
Streuungsursache	Quadratsummen (SS)	Freiheitsgrade (df)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	P-Wert	kritischer F-Wert
Stichprobe	1,083847083	1	1,083847083	29,23960386	0,00165	5,987377607
Spalten	8,732733232	2	4,366366616	117,7941355	0,00002	5,14325285
Wechselwirkung	0,857532416	2	0,428766208	11,56708753	0,00873	5,14325285
Fehler	0,222406655	6	0,037067776			
Gesamt	10,89651939	11				

Tab. 75: ANOVA zweifaktorielle Varianzanalyse – Vergleich *Escherichia coli* mit *Saccharomyces cerevisiae* in Lupinendrink

ZUSAMMENFASSUNG						
<i>E. coli</i>						
	60	80	100	Gesamt		
Anzahl	2	2	2	6		
Summe	-1,653212514	-4,171726454	-7,130333768	12,95527274		
Mittelwert	-0,826606257	-2,085863227	-3,565166884	2,159212123		
Varianz	0,06013078	0,000244063	0,03580655	1,522407177		
<i>S. cerevisiae</i>						
Anzahl	2	2	2	6		
Summe	-1,665342323	-3,833793404	-8,171099313	13,67023504		
Mittelwert	-0,832671162	-1,916896702	-4,085549657	2,278372507		
Varianz	0,007168985	4,08728E-05	8,11133E-05	2,196100749		
<i>Gesamt</i>						
Anzahl	4	4	4			
Summe	-3,318554837	-8,005519858	-15,30143308			
Mittelwert	-0,829638709	-2,001379964	-3,82535827			
Varianz	0,022445516	0,009611541	0,102228631			
ANOVA						
<i>Streuungsursache</i>	<i>Quadratsummen (SS)</i>	<i>Freiheitsgrade (df)</i>	<i>Mittlere Quadratsumme (MS)</i>	<i>Prüfgröße (F)</i>	<i>P-Wert</i>	<i>kritischer F-Wert</i>
Stichprobe	0,042597591	1	0,042597591	2,470085143	0,167089885	5,987377607
Spalten	18,23228016	2	9,11614008	528,6130366	0,0000002	5,14325285
Wechselwirkung	0,256787108	2	0,128393554	7,445092536	0,023693373	5,14325285
Fehler	0,103472364	6	0,017245394			
Gesamt	18,63513722	11				

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Jakob Awe, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel „Etablierung einer kontinuierlichen Verfahrensweise für gepulste elektrische Felder zur Anwendung an verschiedenen Lebensmittelmatrizes“ eigenständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe.

Übernahmen, die wörtlich, dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sowie Übernahmen aus Sprachgenerierungsmodellen und Informationssystemen sind als solche kenntlich gemacht und mit Quellenverweisen versehen. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Des Weiteren bestätige ich, dass die schriftliche und die elektronische Version der Arbeit identisch sind.

Neubrandenburg, 24.03.2026