
BACHELORARBEIT

Herr
Jonas Wilberg

**Systematisierung und Bewertung
von Altpapier mit
Lebensmittel-Restanhaftungen
hinsichtlich der Lagerung, des Wachstums von
Mikroorganismen und der Auswirkung beim
Wiedereinsatz auf die Prozessstabilität und
Produktqualität**

2023

BACHELORARBEIT

**Systematisierung und Bewertung
von Altpapier mit
Lebensmittel-Restanhaftungen
hinsichtlich der Lagerung, des Wachstums von
Mikroorganismen und der Auswirkung beim
Wiedereinsatz auf die Prozessstabilität und
Produktqualität**

Autor:

Jonas Wilberg

Studiengang:

Bachelor of Science Biotechnologie

Seminargruppe:

Bt18wU-B

Erstprüfer:

Frau Prof. Iris Hermann-Geppert

Zweitprüfer:

Frau M. Sc. Marie Geißler

Weiterer Betreuer:

Herr Dr. Rayko Ehnert

Bibliografische Angaben

Wilberg, Jonas: Systematisierung und Bewertung von Altpapier mit Lebensmittel-Restanhaftungen hinsichtlich der Lagerung, des Wachstums von Mikroorganismen und der Auswirkung beim Wiedereinsatz auf die Prozessstabilität und Produktqualität, 82 Seiten, 31 Abbildungen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Angewandte Computer- und Biowissenschaften

Englischer Titel: *Systematization and evaluation of waste paper with residual food adhesion with regard to storage, growth of microorganisms and impact during reuse on process stability and product quality*

Bachelorarbeit, 2023

Satz: L^AT_EX

Kurzbeschreibung

Die Recyclingfähigkeit von faserbasierten Lebensmittelverpackungen wird durch Restanhaftungen des Lebensmittels vor Probleme gestellt. Dadurch ausgelöste Verkeimungen bei der Altpapierlagerung beeinträchtigen den Recyclingprozess. Die entwickelten Mikroorganismen beeinflussen wiederum die Herstellungskette innerhalb einer Papierfabrik, da es zu hohen organischen Belastungen kommen kann. Die Bachelorarbeit untersucht den mikrobiologischen Einfluss von Lebensmitteln, auf die Altpapierlagerung derer faserbasierter Verpackungen.

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Danksagung	V
1 Einleitung	1
1.1 Papierherstellung / Papierkreislauf	2
1.2 Rechtliche Grundlagen und Normen von faserbasierten Lebensmittelverpackungen ..	4
1.3 Lebensmittel	5
1.4 Papierverpackungen für Lebensmittel	7
1.5 Papierbeschichtungen für Lebensmittelverpackung	9
1.6 Einflüsse von Lebensmittelrückständen auf das Altpapier-Recycling	10
1.7 Bewertungsparameter für Abwässer der Papierindustrie	14
2 Zielstellung	18
3 Material	19
3.1 Papierproben	19
3.2 Lebensmittel	19
3.3 Geräte	22
3.4 Chemikalien / Nährmedien	23
3.5 Allgemeiner Laborbedarf	24
4 Methoden	25
4.1 Angewandte Methoden	25
4.1.1 Methoden zur Restentleerung	25
4.1.2 Mikrobiologische Altpapier-Lagerungs-Simulation	26
4.1.3 Bestimmung der koloniebildenden Einheiten an Papier	26
4.1.4 Analyse der wässrigen Phase	27
4.2 Durchführung	28
4.2.1 Restentleerung von Lebensmittelverpackungen	28

4.2.2 Lagerungs-Simulation / Ansetzen der Anreicherungskultur	29
4.2.3 Bestimmung der koloniebildenden Einheiten	30
4.2.4 Filtrat-Analyse	31
5 Ergebnisse	32
5.1 Restanhaftung am Food Container	32
5.2 Lagerungs-Simulation	34
5.2.1 Mikrobiologische Entwicklung	34
5.2.2 Chemische Lagerungsparameter	37
6 Diskussion.....	45
6.1 Die Rolle der Restentleerbarkeit als grundlegender Störfaktor für den Eintrag von Lebensmitteln in den Altpapierkreislauf.....	45
6.2 Nährstoffbedingte Unterschiede im mikrobiellen Wachstum der Altpapier-Lagerung ..	46
7 Ausblick.....	51
8 Zusammenfassung	53
9 Summary	55
A Methodik	57
B Messwerte.....	63
Originalarbeiten	79
Webseiten	81

II. Abbildungsverzeichnis

1.1	Allgemeines Schema der Faseraufbereitung und Vliesherstellung einer Papiermaschine (Verband Deutscher Papierfabriken e. V., 2015a)	3
1.2	Allgemeines Schema der Trockenpartie und Glättwerks einer Papiermaschine (Verband Deutscher Papierfabriken e. V., 2015a)	4
1.3	Lebensmittel-Inhaltsstoff-Kreis nach (Frede, 2010)	6
1.4	Endstehende Geruchsstoffe einer Papierfabrik aus mikrobiellen Prozessen (Jung und Dietz, 2005)	12
1.5	Vertikale Gradientenbildung innerhalb eines Biofilms (Faber und Nemitz, 2008)	13
1.6	Entstehung von Betonkorrosion (Faber und Nemitz, 2008)	14
4.1	Vorbereitete Papierstapel in transparenten Boxen zur Lagerung	30
4.2	Untersuchungsschema der Lagerungs-Simulation (Erstellt mit: https://app.biorender.com , am 05.05.2023)	31
5.1	Restanhaftungen am doppelseitigen PE-beschichteten Food Container	32
5.2	Dynamische Viskosität in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit der zur Restentleerung genutzten Lebensmittel	33
5.3	Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit während der Lagerungs-Simulation	34
5.4	Entwicklung des bakteriellen Kontaminationsgrads, angegeben in KBE je Gramm lufttrockner Probenmasse. Inkubiert für je 48 h bei 30 °C auf PCA.	35
5.5	Entwicklung des mykotischen Kontaminationsgrads, angegeben in KBE je Gramm lufttrockner Probenmasse. Inkubiert für je 7 Tage bei 30 °C auf SAB.	36
5.6	Testliner: Vergleich der pH-Werte von Faserstoffsuspension und Filtrat während der Lagerung.....	37
5.7	Zeitung: Vergleich der pH-Werte von Faserstoffsuspension und Filtrat während der Lagerung.....	38
5.8	Entwicklung organischer Säuren während der Lagerung	39
5.9	Entwicklung CSB und BSB ₅ während der Lagerung an der Zeitung	40
5.10	Entwicklung CSB und BSB ₅ während der Lagerung am Testliner	41
5.11	Entwicklung Elektrische Leitfähigkeit während der Lagerung am Testliner	41

5.12 Elektrische Leitfähigkeit während der Lagerung an der Zeitung	42
5.13 Entwicklung des Abdampfrückstandes während der Lagerung	43
6.1 Papierstapel der Zeitung mit Eiweiß an Tag 10	49
7.1 Papierstapel des Testliners mit Kohlenhydrat an Tag 10	52
A.1 Berechnung des Abdampfrückstandes nach Methode PTS-RH 025:2022	57
A.2 Berechnung der Gesamtkeimzahl in KBE nach DIN ISO 8784-1	57
B.1 Logarithmierte Fließkurven.....	63
B.2 pH-Wert in Abhängigkeit des Gehalts an organischen Säuren	74
B.3 Abdampfrückstände der Lagerungs-Simulation	76
B.4 Abdampfrückstände des Wassers	76
B.5 KBE-Zählungen der Bakterien auf PCA	77
B.6 KBE-Zählungen der Pilze auf SAB	78

III. Tabellenverzeichnis

3.1	Verwendete Papiermuster zur Lagerungs-Simulation	20
3.2	Angaben der Nährwerttabelle je 100 g Lebensmittel	21
3.3	Verwendete Analysegeräte	22
3.4	Verwendete Chemikalien	23
3.5	Verwendete Nährmedien.....	23
3.6	Allgemeine Bedarfsgegenstände.....	24
B.1	Messwerte der dynamischen Viskosität von Joghurt fettarm	64
B.2	Messwerte der dynamischen Viskosität von Magerquark	65
B.3	Messwerte der dynamischen Viskosität von Kartoffelpüree	66
B.4	Masse m in g an Restanhaftung von Leitungswasser am Food Container	67
B.5	Masse m in g an Restanhaftung von Magerquark am Food Container	68
B.6	Masse m in g an Restanhaftung von Joghurt fettarm am Food Container	69
B.7	Masse m in g an Restanhaftung von Kartoffelpüree am Food Container	70
B.8	Masse m in g an Restanhaftung von Milcheis-Vanille am Food Container.....	71
B.9	Zusammenfassung von statistischen Kennwerten der Restanhaftung-Boxplots	71
B.10	Messwerte von pH und EC der Lagerungs-Simulation	72
B.11	Messwerte der organischen Säuren von der Lagerungs-Simulation	73
B.12	Messwerte von CSB und BSB der Lagerungs-Simulation.....	75

IV. Abkürzungsverzeichnis

.....

AbwV	Abwasserverordnung
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
CEN	Comité Européen de Normalisation
CEPI	Confederation of European Paper Industry
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DIN	Deutsches Institut für Normung
EC	Electrical Conductivity
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
IQR	Interquartilsrange
ISO	International Organization for Standardization
KBE	Koloniebildende Einheit
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
lat.	latein
lutro	lufttrocken
Mio.	Million
m ³	Kubikmeter
NIR	Nahinfrarot-Spektrometrie
NPa	Normenausschuss Papier, Pappe und Faserstoff
Org.	organisch
otro	ofentrocken
PCA	Plate count agar
PE	Polyethylen
pH	lat. <i>potentia hydrogenii</i>
PLA	Polylactide acid
SAB	Sabourad Agar
t	Tonne
TC	Technical Committee
TOC	Total organic carbon
TS	Trockensubstanz
VerpackG	Verpackungsgesetz

V. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank aussprechen, welcher sich an die Betreuung seitens der Hochschule Mittweida und der Papiertechnischen Stiftung richtet. Betonen möchte ich hierbei, das mir entgegengebrachte Vertrauen meiner Projektbetreuerin Frau M. Sc. Marie Geißler, welche mir eine freie Ausgestaltung der Versuche ermöglichte. Außerdem bedanke ich mich für die fachliche Diskussion meiner Fragen und der Einordnung im papiertechnischen Sektor, auch bei Herrn Dipl. - Ing. Mike Schiefer und Frau Dipl. - Ing. Constanze Seidemann.

Die Betreuung seitens der Hochschule übernahm Frau Professor Iris Hermann-Geppert und Herr Dr. Rayko Ehnert, welchen ich beiden zu Dank verpflichtet bin. Besonderer Dank richtet sich an Herrn Dr. Ehnert, welcher mit seiner hingebungsvollen Betreuung, deutliches Interesse an vorliegender Arbeit zeigte und zu einer erfolgreichen Bearbeitung beitrug.

1 Einleitung

Papier ist ein flächiger Faser-Werkstoff, hergestellt aus nachwachsenden und recycelten Rohstoffen pflanzlicher Herkunft. Aus einer Fasersuspension wird durch Entwässerung ein verdichtetes und getrocknetes Faservlies gebildet, welches als Papier bezeichnet wird. Heutzutage gibt es rund 3000 Papiersorten für verschiedenste Anwendungen und mit unterschiedlichsten Materialeigenschaften. Dieses breite Spektrum der Papiernutzung, begann sich seit unserer heutigen Zeitrechnung zu entwickeln. Die Erfindung eines Beschreibstoffes aus pflanzlichen Fasern, wird auf das Jahr 105 datiert und offiziell dem chinesischen Minister Tsai Lun der Han-Dynastie, zugesprochen. Schnell etablierte sich Papier im Alltag der Menschen, in Form von Papiergeld, Briefpapier, Spielkarten oder Toilettenpapier (7. - 14. Jahrhundert in China) und gewann weltweite Aufmerksamkeit (Naujock und Blechschmidt, 2021). Aufgrund der recht simplen Herstellung aus natürlichen Faser-Rohstoffen, und den damit einhergehenden Vorteilen, hat Papier seinen Stellenwert für die Entwicklung der Zivilisation nie verloren. Jahrtausende dient es als Speichermedium für jegliche Art von Informationen in schriftlicher oder gezeichneter Form. Durch Erfindungen, wie den Buchdruck (15. Jahrhundert von Johannes Gutenberg) und ersten Papierdeinking-Recyclingverfahren (1774 von Justus Claproth), stieg die Nutzung und der Bedarf an Papier enorm. Dieser Trend ist auch in der Neuzeit noch immer aktuell, doch entwickelt sich Papier im 21. Jahrhundert zunehmend zu einem vielfältiger nutzbarem Faser-Produkt. Papier als Grundlage von Druckerzeugnissen für Printmedien zu nutzen, ist weiterhin gängige Praxis. Doch verzeichnet dieser Nutzungszweig, durch die Digitalisierung, in bestimmten Bereichen einen leichten Rückgang. Fast jeder Mensch kommt täglich mit Papier in Berührung, sei es in Form von Hygienepapieren, Verpackungspapier und -karton oder verschiedensten Arten von Spezialpapier. Nach der Nutzung, als Abfall und Wertstoff, hat Papier einen hohen Wert. Es trägt zu einem umweltschonendem Konsumverhalten bei, da es sehr gut recyclebar ist und mehrmals wiederverwendet werden kann. Außerdem ist Papier eine gute Alternative für die Substitution von Plastikprodukten. Weltweit ist die Papierindustrie einer Transformation unterworfen, sei es in der Art der hergestellten Produkte oder der Ausgestaltung des Herstellungsverfahrens. Politische Entscheidungen führen zu neuen rechtlichen Regelungen, worauf die Industrie reagieren muss. Das derzeitig aufkommende Umweltbewusstsein zwingt den Markt sich dem anzupassen. Nachhaltig hergestellte und recycelte Produkte tragen zum Umweltschutz bei, auch durch den Trend hin zu Kreislaufwirtschaft und effektivem Recycling. Endverbraucher können aus diesem Grund bereit sein, mehr solche Produkte zu kaufen. Die lange Tradition der Papierherstellung wird in Zukunft nicht an Bedeutung verlieren und die Entwicklung weiterer Innovationen vorantreiben. Auch aus biotechnologischer Sicht besteht ein hohes Potential, da der Papierkreislauf einen einzigartigen Mikrokosmos darstellt.

1.1 Papierherstellung / Papierkreislauf

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland 23 Mio. t Papier, Karton und Pappe produziert (Verband Deutscher Papierfabriken e. V., 2015b). Für die Herstellung von Papier gibt es viele verschiedene Methoden, je nach Art des produzierten Papiers. Die grundsätzlichen Schritte sind dabei immer die gleichen, diese werden in diesem Kapitel näher erläutert. Obwohl Altpapier mengenmäßig der wichtigste Rohstoff der deutschen Papierindustrie ist, steht dennoch der nachwachsende Rohstoff Holz am Anfang der Wertschöpfungskette. Die Faserstofferzeugung ist der erste Schritt zur Gewinnung eines Zellstoffes, dabei wird das Ausgangsmaterial Holz zerkleinert. Es kommt zur Herstellung von Papierprodukten, indem der gewaschene Zellstoff mit Füllstoffen und Leimungsmittel in einem geeigneten Prozess verarbeitet wird. Für ein funktionelles Papierprodukt wird je nach Möglichkeit ein Teil Frischfasern (Primärfasern) und ein Teil recycelter Fasern (Sekundärfasern) zur Herstellung verwendet. Die Aufarbeitung von Altpapier geschieht in zahlreichen Qualitätsstufen und beginnt mit der Trockensortierung. Durch bildverarbeitende Verfahren und Nahinfrarot-Spektrometrie (NIR) werden Störstoffe, wie Kunststoff, Textilien, Holz, Metalle und beschichtete Papiere erkannt. Der nächste Schritt des Altpapier-Recycling ist die Nassaufbereitung, bei der das Altpapier durch die Einwirkung von Wasser und mechanischer Beanspruchung in die Einzelfasern aufgelöst wird. [Abbildung 1.1](#) und [1.2](#) stellen den gesamten Herstellungsprozess dar, welcher in der Stoffzentrale beginnt und mit der Aufrollung nach der Trockenpartie endet. In der Stoffzentrale wird eine Faserstoff-Wasser-Suspension erzeugt, welche zusammen mit weiteren Zusätzen gemischt wird. Die Zusätze beeinflussen den Einsatzzweck des Papiers. So können spezifische Eigenschaften, wie die Färbung, Fettdichtigkeit oder Nassfestigkeit über die Zugabe von Hilfsstoffen angepasst werden. Diese Suspension durchläuft nun einen Sortierer, welcher aus Schlitz- und Lochplatten besteht oder die Wirkung von Zentrifugalkräften nutzt. Die Sortierung sorgt für ein homogenes Fasergemisch, welches über den Stoffauflauf gleichmäßig über einer Siebpartie verteilt wird. Ein großer Teil des Prozesswassers wird bei diesem Schritt vom den Fasern entfernt, somit entsteht ein Faservlies auf dem Sieb. Zur weiteren Wasserentfernung und Komprimierung wird das entstandene Vlies zwischen einem saugfähigen Filztuch und Walzen gepresst, bevor es weiter getrocknet wird. Die finale Trocknung geschieht in der Trockenpartie, bei der das Papier slalomartig mehrere dampfbeheizte Trockenzylinder durchläuft. Während der Trocknung kommt es zur weiteren Verdichtung und Veredelung durch eine Leimpresse. Optional kann das getrocknete Papier durch ein Glättwerk weiter veredelt werden, bevor es im letzten Produktionsschritt auf einen Stahlkern (Tambour) aufgerollt wird.

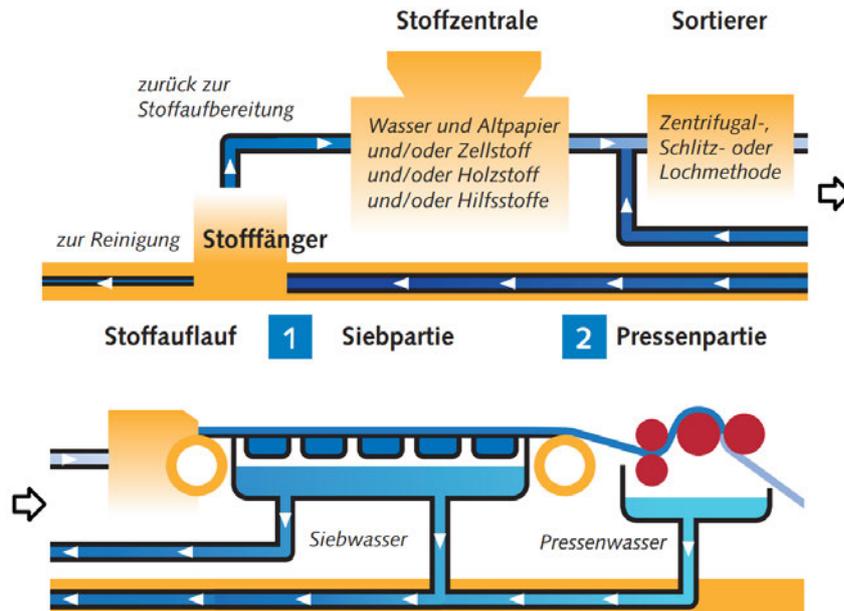


Abbildung 1.1: Allgemeines Schema der Faseraufbereitung und Vliesherstellung einer Papiermaschine (Verband Deutscher Papierfabriken e. V., 2015a)

Zusammenfassen kann man die Herstellung von Papier in fünf grundlegende Schritte (Hossain und Ismail, 2015):

- Holzstofferzeugung
- Faserstofferzeugung
- Bleichen
- Waschen des Faserstoffes
- Herstellung / Produktion des Papierprodukts

Der Wirtschaftszweig der Papier- und Zellstoffindustrie zählt zu den Grundstoffindustri- en. Der weltweite Papierverbrauch lag im Jahr 2018 bei knapp 422 Mio. Tonnen. Das Land mit dem höchsten Papierverbrauch ist China, zeitgleich mit der größten Produktion von Zellstoffprodukten (Statista Research Department, 29.09.2022). In Europa zählen Schweden und Finnland zu den größten Produzenten von Zellstoff. Die deutsche In- dustrie ist auf die Produktion von Papierprodukten fokussiert und hat in diesem Bereich einen hohen Produktionsanteil in Europa (Confederation of European Paper Industries, 2022). Auf den Umsatz bezogen ist die Papier- und Zellstoffindustrie, die zehntgrößte In- dustriebranche in Deutschland, mit einem Jahresumsatz von 14 Milliarden Euro (Stand 2019) (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE, 2021).

Die Papierindustrie gehört zu den rohstoff-, energie- und kapitalintensiven Industrien und ist derzeit einer Transformation unterworfen. Dies hat vielschichtige Gründe, wie der Digitalisierung und Globalisierung. Aber auch politische Anforderungen beeinflus- sen die Branche massiv (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE, 2021). Zum einen

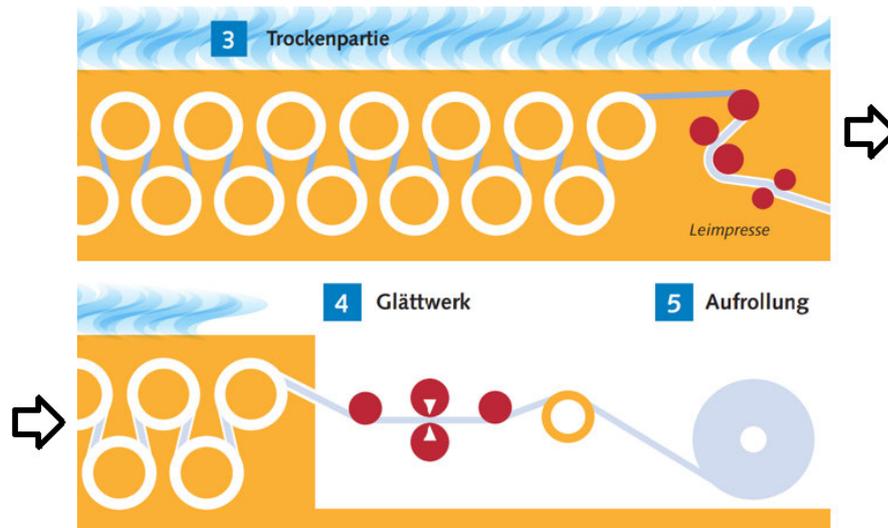


Abbildung 1.2: Allgemeines Schema der Trockenpartie und Glättwerks einer Papiermaschine (Verband Deutscher Papierfabriken e. V., 2015a)

verändert sich der Fokus von produzierten Produkten. Graphische Papiere verlieren mäßig an Bedeutung, wobei die Produktion von Verpackungsprodukten einen steigenden Trend verzeichnet (Confederation of European Paper Industries, 2022; Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE, 2021). Ein wichtiger Faktor in der Papier- und Zellstoffindustrie ist nachhaltiges Wirtschaften. Dies steht heutzutage voll im Sinn des Umweltschutzes, aber auch der Wirtschaftlichkeit von Papierfabriken. Beide Ziele lassen sich teilweise miteinander verbinden, wie man am Beispiel der Altpapiernutzung erkennen kann. Zum einen schont dies den Abbau des nachwachsenden Rohstoffes Holz. Zum anderen ist die Nutzung von Altpapier in der Aufbereitung günstiger, da ein geringer Energie- und Wassereinsatz möglich ist. Doch der Rückgewinnung von Papier sind auch natürliche Grenzen gesetzt, da etwa 20 % der produzierten Papiere nicht für Recycling zur Verfügung stehen (Verband Deutscher Papierfabriken e. V., 2015b). Die speziellen Eigenschaften und damit genutzten Chemikalien verhindern eine mögliche Rückgewinnung. In Deutschland liegt die Rücklaufquote um die 74 %, bei einem Verbrauch von 23 Mio. Tonnen Papier und einer Wiedererfassung von 15 Mio. Tonnen (Verband Deutscher Papierfabriken e. V., 2015b).

1.2 Rechtliche Grundlagen und Normen von faserbasierten Lebensmittelverpackungen

Abfall-Recycling unterliegt einer Reihe von juristischen Vorschriften, welche erstellt wurden, um Umweltschutz, Ressourcenschonung und den allgemeinen Umgang mit Abfällen zu regeln. Die Abfallrahmenrichtlinie stellt europäisches Recht dar. Sie definiert abfallbezogene Begrifflichkeiten, Anforderungen zur Förderung der Vermeidung von Abfällen und weitere das Recycling betreffende Dinge. In Deutschland sind für Papierverpackungs-

Recycling zwei Gesetze von Bedeutung. Zum eine das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und das Verpackungsgesetz (VerpackG). Zweck des KrWG ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen. Das VerpackG ist eng mit dem KrWG verknüpft, denn es legt Anforderungen an die Produktverantwortung nach § 23 des KrWG für Verpackungen fest.

Eine Norm legt spezifische Anforderungen an Produkte, Dienstleistungen oder Verfahren fest. Auf nationaler Ebene liegt die Zuständigkeit beim DIN - Normenausschuss Papier, Pappe und Faserstoff (NPa), auf europäischer Ebene beim Europäischen Komitee für Normung CEN/TC 172 Pulp, paper and board und auf internationaler Ebene bei der International Organization for Standardization ISO/TC 6 Paper, board and pulps. Eine allgemein bekannte Normen stammt aus der Papierbranche und regelt die Größe von Papierformaten, die DIN EN ISO 216.

1.3 Lebensmittel

Laut Verordnung der Europäischen Gemeinschaft (EG) Nr. 178/2002 werden Lebensmittel als Stoffe oder Erzeugnisse bezeichnet, die dazu bestimmt sind, in verarbeitetem, teilweise verarbeitetem oder unverarbeitetem Zustand, von Menschen aufgenommen zu werden. Nahrungsaufnahme ist ein grundlegendes Bedürfnis von Lebewesen. Die semantische Ähnlichkeit, der beiden Begriffe: Lebensmittel und Lebewesen, ist daher nicht verwunderlich. Sie bezieht sich auf das Präfix, Leben, der Inbegriff alles Organischen. Und beschreibt, mit dem jeweiligen Determinatum, den Zusammenhang der beiden Wörter passend. Aus ernährungsphysiologischer Sicht dienen Lebensmittel als Energie- und Stofflieferanten des Metabolismus von Lebewesen. Sie dienen außerdem als Genussmittel und Lifestyleprodukt. Weltweit prägen verschiedene Kulturen eine riesige Vielfalt an Nahrungsprodukten und deren unterschiedlichsten Zubereitungsarten. Daher gibt es viele Möglichkeiten, Lebensmittel zu kategorisieren. Für eine nährstoffbezogene Kategorisierung ist daher die Einteilung nach Inhaltsstoffen eine gute Grundlage. Die Information über den Inhalt eines Lebensmittels sollte dem Verbraucher, besonders aus gesundheitlicher Sicht, zur Verfügung stehen. Um ein hohes Verbraucherschutzniveau zu erreichen und den Erwartungen der Verbraucher und deren Informationsbedürfnisse nachzukommen, ist es unablässig, einheitliche Angaben zur Lebensmittelkennzeichnung zu nutzen. Daher sind die Kennzeichnung und das Aufbringen von Mindestinformationen auf der Lebensmittelverpackung verpflichtend. Und wird europaweit, durch die Lebensmittel-Informationsverordnung (EU) Nr. 1169/2011 geregelt. Neben grundlegenden Deklarationen, wie der Bezeichnung, einer Zutatenliste, der Füllmenge und der Nährwertkennzeichnung, gibt es weitere zu benennende Punkte. Dazu gehören Kennzeichnungen zu enthaltenen oder möglicherweise enthaltenen Allergenen und der Herkunft und des Herstellers. Die Fülle an Inhaltsstoffen ist in Abbildung 1.3 ersichtlich. In diesem Modell wird eine Einteilung in primäre und sekundäre Inhaltsstoffe,

Lebensmittelzusatzstoffe und möglicher Kontaminanten angewandt.

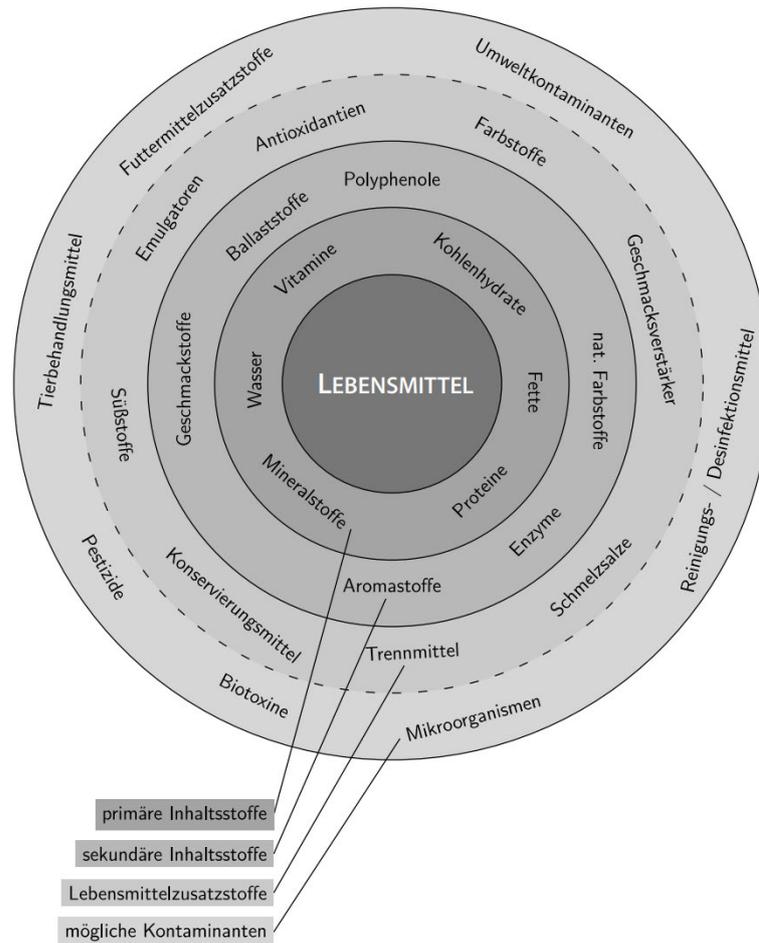


Abbildung 1.3: Lebensmittel-Inhaltsstoff-Kreis nach (Frede, 2010)

Für die Restentleerung von Verpackungen sind die rheologischen Eigenschaften eines Lebensmittels von entscheidender Bedeutung. Das Fließverhalten von Emulsionen und Suspensionen beeinflusst maßgeblich die Restanhaftung von Lebensmitteln am Verpackungsprodukt. Für diese Ausarbeitung wird der Fokus auf die Viskosität gelegt. Die Eigenschaft der Viskosität wird in zwei Parametern beschrieben. Dazu zählt die dynamische Viskosität und die kinematische Viskosität. Als Maß der Zähflüssigkeit eines Fluids dient die dynamische Viskosität (η), welche mit der Einheit Pascalsekunde ($Pa \cdot s$) beschrieben wird. Die dynamische Viskosität gibt den Widerstand eines Fluids gegen eine Verformung an, welche durch eine Scherströmung verursacht wird. Unter Berücksichtigung der Dichte (ρ) wird die kinematische Viskosität (ν) angegeben, welche das Viskositäts-Dichte-Verhältnis beschreibt. Die Angabe der dynamischen Viskosität erfolgt mit der Einheit Quadratmeter pro Sekunde ($\frac{m^2}{s}$). Folgende Formel beschreibt den mathematischen Zusammenhang zwischen dynamischer und kinematischer Viskosität:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Die Restentleerbarkeit von Verpackungen ist die Eigenschaft, welche den Verbleib von Füllgut nach entsprechender Nutzung beschreibt. Dies beinhaltet eine quantitative Bewertung des Rückstandes und eine qualitative Beurteilung des verbliebenen Lebensmittels. Folgende Faktoren beeinflussen den Verbleib von Restmengen in Verpackungen, dazu zählen die Füllguteigenschaften, die Nutzungsbedingungen und das Verbraucherverhalten. Die vollständige Rückstandsminderung ist angesichts der Vielzahl und Komplexität verpackter Lebensmittel nicht umsetzbar. Stattdessen ist eine Minimierung von Rückstandsmengen vorteilhaft, um die weitere Aufbereitung des Papierproduktes zu verbessern. Denn die Restentleerbarkeit und spezifische Restanhaftungen, sind für Lebensmittelverpackung ein grundlegendes Störparameter im Altpapierkreislauf. Es kommt zum Eintrag organischer Substanz, was eine zusätzliche Prozessbelastung darstellt. Bei der Entwicklung von Packmitteln muss die Restentleerbarkeit des Füllgutes berücksichtigt werden, um eine effektive Ressourcennutzung zu gewährleisten und das Anfallen von Störgut im Abfallstrom gering zu halten.

1.4 Papierverpackungen für Lebensmittel

Verpackungen sind nicht nur Mittel zum Aufbewahren, sie müssen eine Vielzahl an Aufgaben und Anforderungen erfüllen. Verpackungsmaterialien dienen dem Schutz, der Verteilung, der Portionierung und dem Vermarkten von Produkten. Besonders im Lebensmittel-Verpackungen müssen spezielle Eigenschaften besitzen. Der Kunde erwartet und hat das Recht auf ein einwandfreies Produkt. Das Verpackungsmaterial sollte dazu dienen, den Verderb eines Lebensmittels zu verzögern oder die Haltbarkeit verlängern. Außerdem dient eine Verpackung der Vermarktung und der Informationsgewinnung über das Produkt (Marsh und Bugusu, 2007). Durch die Unterschiedlichkeit der Lebensmittel, ist die Auswahl des Materials sehr wichtig. Denn nicht jede Substanz eignet sich zur Nutzung jeglichen Lebensmittels. Besonders faser-basierte Verpackungen haben, durch dessen Eigenschaften, einen limitierten Einsatzbereich. Vorteile von solchen Verpackungen sind eine gute mechanische Festigkeit, sie sind biologisch abbaubar und bedruckbar (Deshwal, Panjagari und Alam, 2019). Aber im wichtigen Bereich, der Lebensmittelsicherheit, weisen Papierverpackungen einiges Entwicklungspotential auf. Eher selten werden sie zum Schutz von Lebensmitteln über einen längeren Zeitraum verwendet, da sie eingeschränkte Barrierefunktionen aufweisen können (Raheem, 2013; Marsh und Bugusu, 2007). Diese Nachteile können durch Materialkombinationen und dem Einsatz bestimmter Chemikalien verringert werden, was die Recyclingfähigkeit beeinträchtigt und eine Migration von Verpackungsmaterial in das Lebensmittel verursachen kann (Marsh und Bugusu, 2007). Ob eine faser-basierte Verpackung für ein Lebensmittel geeignet ist, sollte vor der Entwicklung validiert werden. Um Abfall zu vermeiden, sind nachhaltige Verpackungen durch die Verpackungsrichtlinie 1994/62/EG empfohlen. Zellstoffprodukte bieten als Ausgangsmaterial für dieses Ziel gute Voraussetzungen und sollten daher für die Verwendung überprüft werden. Besonders mit Blick auf dem Einsatz von Materialkombinationen, ist daher eine Bewertung der Rezyklier-

barkeit von besonderer Bedeutung.

Lebensmittelverpackungen gehören den allgemeinen Verpackungspapieren zugeordnet. Speziell Lebensmittelverpackungen aus Fasermaterial, lassen sich wie folgt kategorisieren und beschreiben (Raheem, 2013; Marsh und Bugusu, 2007; Deshwal, Panjagari und Alam, 2019):

- Kraftpapier
- Sulfitpapier
- Pergamentpapier
- Pergamin
- Wachspapier
- Papierlamine

Kraftpapier zeichnet sich durch seine enorme Stärke aus und wird oft für Tüten und Verpackungen verwendet. Mehl, Zucker, getrocknetes Obst und Gemüse zählen zu den Lebensmitteln, welche oft in Kraftpapier verpackt sind.

Leichter und schwächer als das Kraftpapier ist das Sulfitpapier. Dieses wird durch Glasierung und dem Einsatz von Materialkombinationen für seine Nassfestigkeit und Ölbeständigkeit geschätzt. Diese Art der Verpackung wird oft in Form kleiner Beutel oder Umhüllungen genutzt. Kekse und Süßwaren werden in Sulfitpapier verpackt.

Durch Hydratation veredelte Papiere, sind feinfaserig und gallertartig. Die Zellulosefasern werden einer starken Aufbrechung unterzogen, wodurch sie eine erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit besitzen. Dies wiederum führt im Trocknungsschritt zu einer oberflächlichen Verkleisterung, welche den Flüssigkeitsdurchgang erschwert. Solche Papiere werden als Pergamentpapier bezeichnet. Die Oberfläche des Papiers ist gegen Öle beständig, weist gegenüber wässrigen Mitteln eine Unbeständigkeit auf. Eine Verwendung ist für ölige Lebensmittel, wie Konfekt, zweckmäßig.

Pergamin zählt zu den Pergamentpapieren und wird durch weitere Hydrationsperioden, zu einem noch dichteren Material. Es ist sehr glatt und hat eine glänzende Oberfläche. Dieses Papier wird hauptsächlich für Süßwaren, Backwaren, Bratfetten und sogenannte Takeaway-Produkte genutzt.

Wachspapier ist mit Wachs veredeltes Papier und bezieht sich nicht auf eine bestimmte Art von Papier. Durch diese Art der Veredelung wird eine Barriere gegenüber Flüssigkeiten und Gasen geschaffen. Das Ausmaß der Barriere, gegenüber flüssigen und gasförmigen Substanzen, ist direkt proportional zur aufgetragenen Wachsmenge. Eingesetzt wird Wachspapier für Backwaren jeglicher Art, sowie für Cornflakes und Müsliprodukte. In Kombination mit Kunststoffpolymeren wird Wachspapier im großem Umfang für

Getränkeverpackungen genutzt. Milch und Fruchtsäfte sind Produkte mit dieser Art von Verpackung.

Papierlamine sind beschichtete oder unbeschichtete Materialkombinationen, auf Basis von Kraft- und Sulfitpapier. Spezielle Eigenschaften werden, durch das Laminieren von Kunststoff oder Metall, verbessert. Der Einsatzbereich von Papier wird dadurch deutlich erhöht. Es verliert dadurch ein nachteiliges Charakteristikum. Es kann heißsiegelbar gemacht werden, die Gas- und Feuchtigkeitsbarrierefunktion wird verbessert. Die Produktionskosten werden durch den erhöhten Aufwand einer Laminierung erhöht. Papierlamine finden Einsatz bei dem Verpacken von getrockneten Produkten, wie Suppen, Kräutern und Gewürzen.

1.5 Papierbeschichtungen für Lebensmittelverpackung

Faserbasierte Lebensmittelverpackungen benötigen eine Beschichtung, um den thermischen und mechanischen Anforderungen deren Nutzung zu entsprechen. Die Beschichtung verleiht dem Verpackungskarton die Eigenschaften der Nassfestigkeit und Heißsiegelfähigkeit. Beschichtungen aus Polyethylen und Polylactide erfüllen die Kriterien, um in Form einer einseitigen Beschichtung auf Innenseite der Verpackung genutzt zu werden (Rhim und Kim, 2009). Extrusionsbeschichtungen aus Polyethylen (PE) werden häufig zur Herstellung von Heißpapierbechern genutzt. Durch die Verwendung von PE wird die Oberflächenhydrophobie der Innenseite des Bechers verbessert und eine Barrierewirkung gegenüber dem Lebensmittel wird erzeugt. Polyethylen zählt zu den Thermoplasten und ist ein erdölbasiertes Produkt. Es ist nicht biologisch abbaubar. Eine Alternative zu PE-Beschichtungen ist das Aufbringen von Polylactide acide (PLA). PE- und PLA-beschichtete Verpackungen haben eine ähnlich optisch glatte Oberfläche. Als Beschichtung für Verpackung, mit wässriger Barrierefunktion ist PLA eine gute Möglichkeit. Gegenüber Polyethylen ist PLA hydrophiler, dies ermöglicht ein stärkeres Eindringen der Beschichtung in die Faserschicht des Kartons (Rhim und Kim, 2009).

Eine zunehmende Menge an beschichteten Verpackungen erzeugt, aus mehreren Gründen, Probleme beim Recyclingvorgang. Wodurch die meisten hot paper cups nicht recycelt werden, sondern auf Deponien entsorgt oder thermisch verwertet werden (Triantafillopoulos und Koukoulas, 2020). Dies liegt an der erschwerten Trennung von Fasermaterial und Beschichtung, was nur in spezialisierten Recycleanlagen durchführbar ist (Jia et al., 2022). Daher sind Bestrebungen für die Weiterentwicklung alternativer Papierbechertechnologien notwendig, um eine einfache Wiederverwendung des Fasermaterials zu ermöglichen. Dafür stehen folgende Entsorgungsszenarien zur Verfügung: Derzeitiges Basisszenario, die Verbrennung, hat die größten negativen Auswirkungen aller Entsorgungswege, abgesehen von einer unrechtmäßigen Entsorgung. Weitere Möglichkeiten sind die Kompostierung, das Recycling innerhalb der Getränkekartonabfalls,

das Recycling innerhalb des Altpapiers oder ein Mehrwegbechersystem (Suskevics und Grönman, 2019).

Die Beschichtung der Papierbecher ist notwendig, um eine Barrierefunktion gegenüber chemischen und physikalischen Einflüssen zu erzeugen. Eigenschaften wie die Nassfestigkeit und Heißsiegelfähigkeit sollten durch die Beschichtung erhalten oder verbessert werden, ohne dabei weitere Umweltbelastungen zu erzeugen. Eine Substitution der üblicherweise verwendeten PE-Beschichtung ist daher sinnvoll, hin zu biologisch abbaubaren Stoffen wie Polylactide acid. Nicht nur aufgrund von Umweltbedenken ist die Umstellung sinnvoll, auch aufgrund gesundheitlicher Bedenken gegenüber Mikroplastik ist die Weiterentwicklung der Verpackungstechnologie von Vorteil. Da die Freisetzung von Mikroplastikpartikeln aus Einwegbechern im täglichen Gebrauch ein beobachtetes Phänomen ist (Chen et al., 2022). Der priorisierte Entsorgungsweg sollte bei der Produktentwicklung bedacht werden, da dieser maßgeblich für die Materialauswahl ist. Kompostierbare Becher sollten aus biologisch abbaubaren Material bestehen. Mit derzeitigem Stand der Technik werden dazu hauptsächlich Becher mit PLA-Beschichtungen verwendet. Weitere Alternativen sind Becher mit Beschichtung aus Polybutylensuccinat (Triantafillopoulos und Koukoulas, 2020). Hot cups für das Recycling sollten eine gut trennbare Beschichtung haben.

Die wohl geeignetste Beschichtung ist diese, welche keine Rückstände im Recyclingprozess erzeugt. Wasserbasierte Dispersionsbeschichtungen sind eine Möglichkeit, um die Trennbarkeit effektiv zu gestalten. Diese Art der Beschichtung löst sich beim Vorgang der Desintegration und liegt dann als Belastung der wässrigen Phase vor. Folgende typische Dispersionsharze werden für wasserbasierte Beschichtungen verwendet: Acrylpolymer, Polyvinylacetate, Styrol-Butadien-Copolymere und Polyolefine (Triantafillopoulos und Koukoulas, 2020). Das Bundesinstitut für Risikobewertung spricht sich gegen die Verwendung einiger Acrylpolymeren, in der 36. Empfehlung Papiere, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt aus. Der amerikanische Markt sieht eine Verwendung solcher Beschichtungen weniger kritisch, wodurch sich neue faserbasierte Verpackungen etablieren. Zusammenfassend ist der hot paper cup ein Faserprodukt mit häufiger und kurzer Nutzung, welcher einer Weiterentwicklung bedarf. Diese bezieht sich hauptsächlich auf die Substitution umweltschädlicher Materialien, ohne eine Funktionseinschränkung zu verursachen. Recycling- und Kompostierfähigkeiten sind Eigenschaften, die der großen Menge an Papiermüll ein nachhaltiges Potential für die Wiederverwertung verleihen.

1.6 Einflüsse von Lebensmittelrückständen auf das Altpapier-Recycling

Die Kombination Altpapier und Lebensmittel stellt eine sehr gute Kohlenstoffquelle dar, die von Mikroorganismen erschlossen wird. Altpapier ist ein lignocellulolytisches Sys-

tem, insbesondere Pilze sind in der Lage Lignin zu verstoffwechseln (Blechsmidt (Hrsg.), 2011). Und Lebensmittel allgemein sind reich an verwertbaren Nährstoffen für Mikroben. Da die Verkeimung von Altpapier, auch ohne Lebensmittlrückstände, ein beobachtetes Phänomen ist, kann man davon ausgehen, dass die Kombination beider Komponenten die Verkeimung begünstigt. Dies hat vielfältige Auswirkungen auf die Papierproduktion und werden nun erläutert. Die genutzten Verpackungen gelangen in den Altpapier-Abfall und werden dann zu einem Altpapier-Entsorger transportiert. Dieser sortiert das Altpapier nach bestimmten Sorten, gemäß DIN EN 643 der Europäischen Liste der Altpapier-Standardsorten. Das sortierte Altpapier wird zu Ballen gepresst und bis zum Weitertransport in eine Papierfabrik, auf dem Altpapierhof gelagert. Die Bedingungen sind dabei sehr unterschiedlich. Die Lagerung kann unter freiem Himmel oder mit Überdachung stattfinden. Daher können Witterungsbedingungen den Feuchtegehalt beeinflussen. Auch die Lagerungsdauer ist variabel. In jedem Schritt der Altpapieraufbereitung kann es zu mikrobiologischen Kontaminationen kommen, welche sich entsprechend den Umweltbedingungen entwickeln. Langzeit-Versuche haben gezeigt, dass die Anzahl koloniebildender Einheiten nach 20 Tagen Lagerung, ihren Höhepunkt erreichen und bestimmte Eigenschaftskennwerte des Papiers verändert werden (Blechsmidt (Hrsg.), 2011). Dafür sind verschiedene Arten an Mikroorganismen verantwortlich, welche sich wiederum in ihrem Dasein beeinflussen und miteinander wechselwirken. Es erfolgt die grobe Einteilung in Bakterien, Schimmelpilze und Sproßpilze, für die Betrachtung der Altpapier-Lagerung.

Doch welche Folgen hat diese Entwicklung? Trotz des gleichen Ursprungs des Problems sind die Folgen für jeden Beteiligten unterschiedlich. Beim Verbraucher des Papierproduktes treten keine schwerwiegenden Probleme auf. Bei unsachgemäßer Lagerung kann es zu Geruchsbildung und einem erhöhten gesundheitlichen Risiko, durch die Entwicklung pathogener Keime, führen (Faber und Nemitz, 2008; Blechsmidt (Hrsg.), 2011). Beim Altpapier-Entsorger können ähnliche Probleme auftreten. Doch dieser hat mit Umsatzeinbußen zu rechnen, wenn die Qualität des Altpapiers sinkt. Wichtige Qualitätsmerkmale laut DIN EN 643 sind der Feuchtegehalt, der Anteil papierfremder Bestandteile und die Menge an unerwünschten Materialien. Bei der Kontamination mit Lebensmitteln, ist damit zu rechnen, dass all diese Parameter negativ beeinflusst werden können. Dies zeigt außerdem die entsprechende Altpapiersorte 5.14.00, welche gebrauchte Papierbecher und anderes gebrauchtes Tischgeschirr bezeichnet. Die für diese Sorte geltenden Anforderungen, sind im Vergleich zu anderen Sorten der DIN EN 643:2014, eher weniger streng. Zum einen wird mit einer Kunststoffbeschichtung gerechnet und somit ein Mindestfaseranteil von 75 % erwartet. Außerdem darf der Anteil papierfremder Bestandteile maximal 1,5 % betragen, sowie ein maximaler Anteil unerwünschter Materialien von 2,5 %.

Das gelagerte Altpapier wird von Papierfirmen aufgekauft und weiterverarbeitet. Bei der dortigen Verarbeitung treten die kostspieligsten und vielfältigsten Probleme mikrobiologischer Belastungen auf. Die Probleme beeinflussen zum einen den Herstellungspro-

zess der Papiermaschine und das produzierte Endprodukt. Die im Altpapier enthaltenen Mikroorganismen treffen in der Papierfabrik auf hervorragende Wachstumsbedingungen, wie einem pH-Wert um den Neutralpunkt, einem ausreichenden Nährstoffangebot und mesophilen bis thermophilen Temperaturbereichen (Blechsmidt (Hrsg.), 2011). Das Wachstum der Mikroben führt auch hier zu Geruchsbelästigungen, welche extremes Ausmaß annehmen kann. Eine Umfrage aus dem Jahr 2007 ergab, dass nur 17 % der befragten Firmen, keine Probleme mit Geruchsbildung hätten (Simstich, Öller und Hamm, 2007). Die Substanzen, welche für die Geruchsbildung verantwortlich sind, gehören zu den organischen Säuren, wozu kurzkettige Carbonsäuren zählen. Diese reichern sich im Prozesswasser an und führen zu einer Versäuerung (Jung und Dietz, 2005) In Abbildung 1.4 sind Geruchsstoffe und deren mikrobieller Entstehungsprozess visualisiert. Die Dicke der aufsteigenden Pfeile symbolisiert die Intensität des Geruchs.

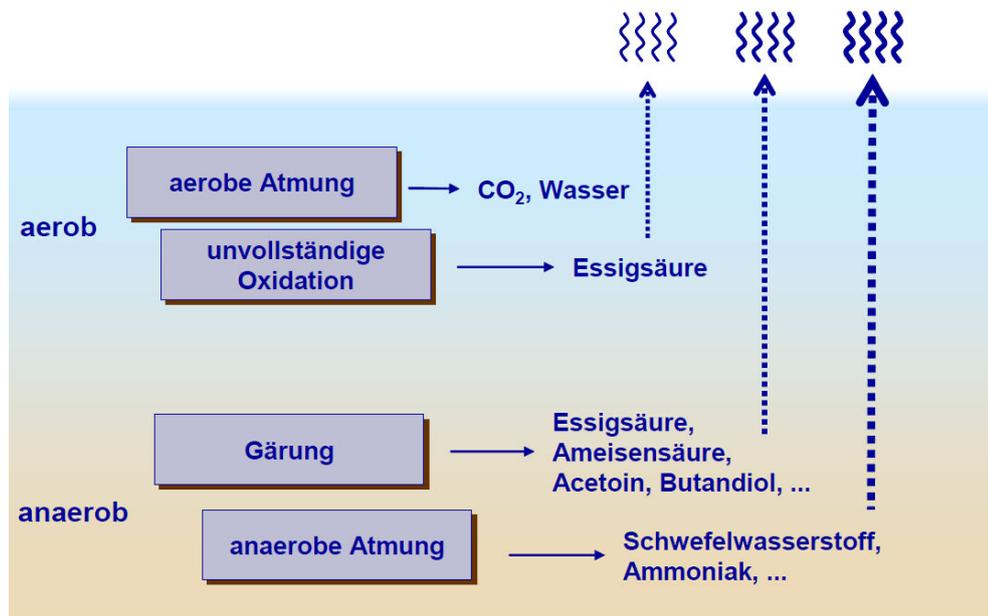


Abbildung 1.4: Endstehende Geruchsstoffe einer Papierfabrik aus mikrobiellen Prozessen (Jung und Dietz, 2005)

Weitere auftretende Probleme sind das Biofouling in Wasserrohren der Papierfabrik und die Betonkorrosion von Abwasserkanälen (Faber und Nemitz, 2008). In einem Biofilm finden verschiedene mikrobielle Prozesse statt, ersichtlich in Abbildung 1.5. In Abhängigkeit des gelösten Sauerstoffs, entsteht im Biofilm ein Gradient, welcher von unterschiedlichen Mikroorganismen besiedelt wird. Im oberen Bereich finden aerobe Prozesse statt, bei denen die organischen Verbindungen zu CO₂ und H₂O oxidiert werden. Die Sauerstoffkonzentration liegt im Bereich von 9 bis 12 mg O₂ pro Liter. Die darunter liegende Phase beinhaltet zwischen 2 und 9 mg O₂ pro Liter und begünstigt somit anoxische Prozesse, wie die Denitrifikation. Dabei nutzen heterotrophe Mikroorganismen den zusätzlich im Nitrat gebundenen Sauerstoff und bilden somit CO₂, H₂O und freien

Stickstoff. In der untersten Phase kommt es zu anaeroben Prozessen, wie der Sulfat-reduktion und der Methanogenese. Diese finden bei einer Sauerstoffkonzentration von 0 bis 2 mg O₂ pro Liter statt. Hierbei metabolisieren anaerobe Mikroben anorganische Sulfate und restliche organische Bestandteile zur Schwefelwasserstoff, anderen Schwefelverbindungen, organische Säuren, Amine und Methan. In diesem Bereich entstehen die geruchsintensiven und gefährlichen Verbindungen.

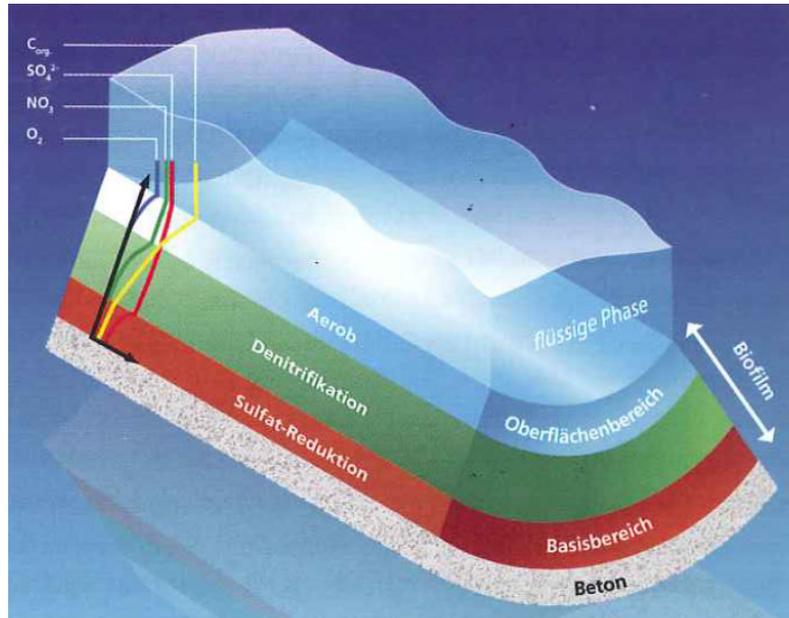


Abbildung 1.5: Vertikale Gradientenbildung innerhalb eines Biofilms (Faber und Nemitz, 2008)

Schwefelwasserstoff führt zum weiteren Problem, der Betonkorrosion von Abwasserkanälen, visualisiert in Abbildung 1.6. In der wässrigen Phase findet eine Umwandlung des Sulfats zu Schwefelwasserstoff, durch Bakterien der Gattungen *Desulfovibrio* und *Desulfobacter*, statt. Gasförmiges H₂S steigt auf und wird durch weitere Bakterien der Gattung *Thiobacillus* zu Schwefelsäure oxidiert. Diese Säure führt nun zu Betonkorrosion in Abwasserkanälen. Ohne ausgeführte Gegenmaßnahmen kann das mikrobielle Wachstum Überhand nehmen und zu Produktionsstops führen. Dies ist mit finanziellen Verlusten verbunden, wobei allein die Gegenmaßnahmen erhebliche Kosten verursachen. Des Weiteren kann das produzierte Papier mit Keimen belastet sein, was für bestimmte Anwendungszwecke ein Verlust der Nutzbarkeit bedeutet. Zwar wirken einige Herstellungsschritte desinfizierend, wie das Deinking, die Zugabe chemischer Additive und der Trocknungsprozess in der Trockenpartie. Doch sind einige Mikroorganismen Sporenbildner, welche auch diese Bedingungen überleben und im Endprodukt nachweisbar sind (Blechsmidt (Hrsg.), 2011). All diese Probleme treten auch ohne enthaltene Lebensmittelrückstände auf, doch ist aufgrund der organischen Beschaffenheit von Lebensmitteln, eine weitere Progression der Probleme sehr wahrscheinlich.

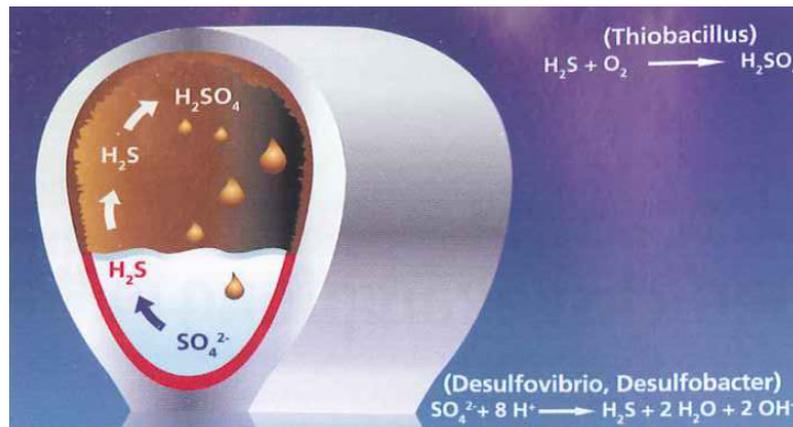


Abbildung 1.6: Entstehung von Betonkorrosion (Faber und Nemitz, 2008)

1.7 Bewertungsparameter für Abwässer der Papierindustrie

Die Papier- und Zellstoffherstellung erfordert große Mengen an Wasser. Allein in Deutschland wurden im Jahre 2019 rund 254 Mio. m³ Frischwasser in Form von Brauchwasser durch die Papierindustrie genutzt (Verband Deutscher Papierfabriken e. V., 2015a). Durch moderne Standards ist es möglich, das meiste Abwasser zu recyceln und dem Wasserkreislauf der Papierfabrik wieder zurückzuführen. Gründe für dieses Bestreben sind zum einen die Steigerung der Materialeffizienz, durch die Rückgewinnung von Fasern und die Bereitstellung von gereinigtem Klarwasser zum Ersatz von Frischwasser. Des Weiteren führt dies zu einer Produktivitätssteigerung, durch die Eliminierung von Störstoffen aus dem Kreislaufwasser. Daher ist ein intensives Monitoring des Abwassers nötig, um Qualitätsanforderungen zu erfüllen und einen reibungslosen Produktionsablauf zu gewährleisten.

Die häufigsten Wasserschadstoffe, welche bei der Papierherstellung anfallen, sind Holzpolymere, Füllstoffe, Prozess- und Hilfschemikalien und deren Reaktionsprodukte (Maximova und Dahl, 2007). Rund 1000 verschiedene Chemikalien können im Abwasser von Papierproduzenten zu finden sein (Karrasch et al., 2006). Oft reagieren Stoffe miteinander oder konkurrieren um zugesetzte analytische Reagenzien, was die Abwasseranalyse vor Schwierigkeiten stellt. Zusammenfassend sind Abwässer der Papier- und Zellstoffindustrie sehr heterogen. Das Abwasser beinhaltet teils hunderte verschiedene Verbindungen in Form von Schwebstoffen, kolloidalen und gelösten Stoffen, mit unterschiedlichsten Eigenschaften: organisch, anorganisch, neutral, sauer, basisch, oxidierbar, nicht oxidierbar, stabil und instabil, sowie mit toxischen Wirkungsweisen (Maximova und Dahl, 2007). Da es aufgrund dieser Mengen an verschiedenen Stoffen, sehr zeit- und kostenintensiv ist, jede einzelne davon zu identifizieren, werden Summenparameter für die Analyse organischer Substanzen bestimmt. Dazu zählt der TOC, CSB und BSB₅. Diese zeigen die Belastung aller organischer Substanzen in Summe an. Außer-

dem werden grundlegende chemische Parameter bestimmt, wie der Färbung, der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit. Bevor Abwasser behandelt werden kann, muss es zunächst charakterisiert werden. Für die Bewertung der Rezyklierbarkeit von Papier, ist die Abwasseranalyse somit ein wichtiger Bestandteil, da die rezyklierten Fasern einen erheblichen Einfluss auf das Wasser nehmen.

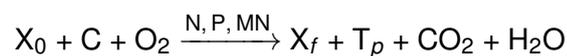
Die Färbung von Prozess- oder Abwasser der Papierindustrie ergibt sich hauptsächlich aus pigmentierten Tinten oder Farbstoffen. Die am häufigsten verwendeten Farbstoffe zum Tönen von Papier sind Direktfarbstoffe, welche gut wasserlöslich und von anionischer Natur sind. Allgemein gehören die Direktfarbstoffe zu den Polyazoverbindungen (Huber und Carre, 2012). Neben diesen Farbstoffen ist auch das in den Holzfasern enthaltene Lignin für Färbungen verantwortlich (Kaur und Sharma, 2018). Ein weiterer Faktor, welcher die Farb- und Trübungseigenschaften des Abwassers beeinflusst ist der pH-Wert. Durch Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei einer stark alkalischen Einstellung des pH-Wertes, die Intensität der Farbe zunimmt (Hossain und Ismail, 2015). Die Notwendigkeit der Entfärbung zeigt sich in der Nutzung im Wasserkreislauf einer Papieranlage. Durch die Verwendung von gefärbtem Wasser können Qualitätsansprüche in der weiteren Produktion nicht erfüllt werden. Sei es in der Beeinflussung der Färbung oder dem Eintrag von Chemikalien in Papierprodukte. Physikalische, chemische und biologische Entfärbungsmethoden werden in der Papierindustrie, einzeln oder in Kombination, genutzt (Huber und Carre, 2012; Kaur und Sharma, 2018).

Als chemisches Parameter ist der pH-Wert ein wichtiger Umweltfaktor, welcher die Aktivität von Mikroorganismen maßgeblich beeinflusst. Die Anwesenheit von Mikroorganismen im Prozesswasser, ist zum einen gewollt und wird in bestimmten Prozessschritten zur biologischen Abwasserbehandlung genutzt. Zum anderen kann eine mikrobiologische Prozesswasserbelastung zu erheblichen Problemen in der Produktion führen (Naujock und Blechschmidt, 2021). Bei Zellstoff- und Papierabwässern schwankt der pH-Wert, je nach verwendetem Rohmaterial und Herstellungsverfahren. Die pH-Regelung, bei einem komplexen Prozess wie der Papierherstellung, wird aus folgenden Gründen vor Schwierigkeiten gestellt. Einerseits ist der pH-Wert enormen Schwankungen ausgesetzt, je nach Herstellungsschritt. Die enthaltenen sauren und basischen Inhaltsstoffe sind vielfältig, wodurch die pH-Kurve der Probe schwer zu bestimmen ist und einer Nichtlinearität unterliegt. Dies verursacht außerdem eine Verzögerung beim Mischen und Messen einer Onlinemessung des Prozesswassers (Kang, Wang und Xiao, 2009).

Der Anteil an gelösten Salzen in Zellstoff- und Papierabwässern wird durch die elektrische Leitfähigkeit bestimmt (Maximova und Dahl, 2007). Auch der Salzgehalt ist ein wichtiges Parameter für die Einschätzung von Abwasserbehandlungsmethoden. Abwasser wird als hoch salzhaltig definiert, wenn der Gehalt an anorganischen Salzen zwischen 1 - 3,5 % m/m liegt. Hauptsächlich wird salzhaltiges Abwasser bei Druck- und Färbeprozessen und der Veredelung eingeleitet (Zhao et al., 2020).

Definitionsgemäß ist der chemische Sauerstoffbedarf ein Maß für das Sauerstoffäquivalent des Gehalts an organischer Substanz einer Probe, die zur Oxidation notwendig ist. Durch ein starkes Oxidationsmittel in saurem Milieu und Hitze wird der enthaltene organische Kohlenstoff zu CO_2 und Wasser oxidiert (Boyles, 1997). Die Menge des verbrauchten Oxidationsmittels wird über titrimetrische oder photometrische Verfahren bestimmt. Die wohl am meisten zur Oxidation verwendete Chemikalie ist Kaliumdichromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), jedoch sind auch andere Oxidantien zur Verwendung geeignet. Im Vergleich zum biologischen Sauerstoffbedarf bedarf es beim CSB einen geringeren Zeitaufwand zur Messung. Die Testdaten sind nach mehreren Stunden verfügbar. In Bezug auf Papier- und Zellstoffabwässern ist der CSB weniger schwankend und fällt in den meisten Fällen sehr hoch aus. Dem zugrunde liegt die Anwendung der vielen Chemikalien (Hossain und Ismail, 2015; Kang, Wang und Xiao, 2009; Kaur und Sharma, 2018). Bei der Rezyklierbarkeitsbewertung ist zu beachten, dass die organische Belastung meist nicht aus Prozesschemikalien stammt, sondern von Stoffen zur Papierveredelung. Dazu zählen besonders Kleb- und Farbstoffe.

Der BSB_5 ist das Pendant zum chemischen Sauerstoffbedarf, er dient zur Abschätzung für die Menge an biologisch leicht abbaubaren organischen Stoffen. Der BSB_5 gibt an wie viel gelöster Sauerstoff, durch die Aktivität aerober Bakterien innerhalb von fünf Tagen bei einer Temperatur von 20°C , verbraucht wird (Nagel, Dellweg und Gierasch, 1992; Abdalla und Hammam, 2014). Bei diesem Prozess findet eine mikrobielle Umwandlung des organischen Material in Biomasse, Umwandlungsprodukten, Kohlenstoffdioxid und Wasser statt. Dies ist in folgender Gleichung zusammengefasst (Jouanneau et al., 2014):



- X_0 : Biomasse zu Beginn
- C: Organische Kohlenstoffquellen
- O_2 : Sauerstoff
- N: Stickstoff
- P: Phosphor
- MN: Mineralien
- X_f : Biomasse nach Umwandlung
- T_p : Transformationsprodukte des biologischen Abbaus
- CO_2 : Kohlenstoffdioxid
- H_2O : Wasser

Im Vergleich zum CSB kann der BSB_5 , von Abwasser der Zellstoffindustrie, enorm unterschiedlich ausfallen. Je nach Art der verwendeten Prozesschemikalien, können diese verschieden schnell biologisch abgebaut werden, was die Schwankungen in Papierabwässern ausmacht. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der beprobten Mikroorganismen,

ist der biologische Sauerstoffbedarf sehr variabel (Jouanneau et al., 2014). Dies ist ein Nachteil für die Vergleichbarkeit von BSB₅-Werten unterschiedlicher Herkunft. Ein weiterer Nachteil der BSB₅-Messung ist die Zeitintensität, welcher eine Messung benötigt. Ein Zeitraum von 5 Tagen bis zum Erhalt des Ergebnisses, ist für ein Echtzeit-Monitoring von Abwasser nicht geeignet. Als Parameter zur Beurteilung der Rezyklierbarkeit von Papierprodukten eignet sich der BSB₅ besser, da hierbei der Zeitfaktor von fünf Tagen keine erhebliche Rolle spielt.

2 Zielstellung

Restanhaftungen von Lebensmitteln und deren Verpackung, sind für die Aufbereitung von Altpapier ein Störgut. Daher soll mit der Arbeit die Veränderung bestimmter Parameter ermittelt werden, um die Störfähigkeit von Lebensmittel einschätzen zu können. Die Arbeit soll aufzeigen, welche mikrobiologischen Ansätze, parallel zu einer Rezyklierbarkeitsuntersuchung, verfolgt werden können, um lebensmittelbedingte Keimbelastungen einzelner Prozessschritte des Altpapieres zu beurteilen. Der Fokus richtet sich primär auf den Eintrag von Lebensmittelrestanhaftungen innerhalb des Altpapierkreislaufes und dessen Unterscheidung von Lebensmittel-Makronährstoffen als mikrobiologisches Substrat. Da die gesamte Papierherstellung, -nutzung und -recycling, einen hochkomplexen Lebensraum für Bakterien, Hefen und Schimmelpilze darstellt, ist der experimentelle Teil auf eine Lagerungs-Simulation im Labormaßstab ausgerichtet. Der somit dargestellte Lebensraum und dessen Sukzession soll über chemische und papiertechnische Analysen überwacht werden. Durch KBE-Bestimmungen wird die mikrobielle Entwicklung von Bakterien, sowie Hefen und Schimmel unter den verschiedenen Substraten dargestellt. Zusammenfassend ist das Ziel der simulierten Lagerung, die Darstellung eines mikrobiologischen Lebensraumes aus Altpapier mit Lebensmittelmrückständen.

3 Material

3.1 Papierproben

Zur beispielhaften Überprüfung der Restentleerung, wurde ein Food Container, der Art Service-Verpackungen, verwendet. Zur Anwendung für kalte Speisen ist der einwandige Food Container mit einer doppelseitigen-PE-Beschichtung funktionalisiert. Da es bei gekühlten Produkten zur Kondensation von Wasser aus der Luft, an deren Oberfläche kommt, ist auch die Außenseite des Food Containers beschichtet. Die Restentleerung wurde mit 5 fließfähigen zu löffelnden oder zu trinkenden Lebensmitteln durchgeführt, wobei das Füllvolumen von 200 ml komplett ausgenutzt wurde. Gelangt der Food Container in den Altpapierstrom, gehört er den Sondersorten an, bezeichnet als gebrauchte (5.14.00) oder ungebrauchte (5.14.01) Papierbecher und anderes Tischgeschirr.

Für die Altpapier-Lagerungs-Simulation fiel die Auswahl auf zwei recycelte Papiere. Zur Simulation der Altpapierlagerung wurden Testliner und Zeitungspapier der Sächsischen Zeitung verwendet. Der Testliner stellt ein Grundmaterial für die Wellpappenherstellung dar und wird vielfältig eingesetzt, daher dient er für die Lagerungsversuche als Vertreter für verschiedene Wellpappen der unteren Altpapier-Standardsorten. Die Herstellung des Testliners wurde in einem eingeeengten Wasserkreislauf realisiert. Zusätzlich zur Stabilitätssteigerung wurde Stärke beigemischt. Als Muster der mittleren Sorten wurde Zeitungspapier der Sächsischen Zeitung verwendet. Beide Papiere sind unbeschichtet und bestehen aus 100 % recycelten Fasern. Zwar wird unter realen Bedingungen, das Zeitungspapier wohl kaum mit Lebensmittelresten in Kontakt kommen, der Testliner wohl eher, dennoch besteht die Gefahr der Kontamination durch andere Lebensmittelverpackungen im Altpapier. Ein weiterer Sinn dieser Auswahl lag darin begründet, dass beide Materialien ein papierspezifisches Inokulum besitzen, beim Testliner zum einen durch die Herstellung im Kreislaufsystem und zum anderen bestehen die Papiere aus Altpapierfasern. Die Sicherstellung vom Eintrag faseradaptierter Mikroorganismen für die Lagerungs-Simulation wurde somit gewährleistet.

3.2 Lebensmittel

Zwei Ziele wurden mit der Lebensmittelauswahl verfolgt. Das erste Ziel war die Auswahl nährwert-typischer Lebensmittel für die Lagerung. Hierbei lag der Fokus auf Lebensmitteln, welche einen Makronährstoff-Simulant darstellen. Dieser sollte einen der drei Makronährstoffe (Kohlenhydrat, Eiweiß, Fett) repräsentieren und einen möglichst hohen Anteil besitzen, die anderen beiden Nährstoffe sollten so gering wie möglich sein. Als Nährstoff-Simulant wurde Kartoffelpüree für Kohlenhydrate, Magerquark für Eiweiße und festes Palm-Raps-Fett verwendet. Diese fanden Verwendung in der Lagerungs-

Papier	Testliner	Zeitung
Material	100 % Sekundärfaser	100 % Sekundärfaser
Produktionsmerkmale	eingengter Wasserkreislauf Stärkebeimischung zur Stabilität ungebleicht und unbedruckt	gebleicht bedruckt (off-set) ungeleimt
Format	Rollenformat Breite = 32 cm	Rheinisches Format (350 x 510 mm)
Trockengehalt	93,53 %	93,36 %
Flächengewicht	127,51 g/m ²	42,16 g/m ²
Altpapier-Standardsorte	1.04.00 - 1.05.01	2.01.00

Tabelle 3.1: Verwendete Papiermuster zur Lagerungs-Simulation

Simulation. Das zweite Ziel war die Auswahl typischer fließfähiger gelöffelter Lebensmittel, welche zur Restentleerung des Food Containers dienen. Dabei lag der Fokus auf häufig konsumierten und typischen Produkten. Andererseits sollten die Lebensmittel eine gute Vergleichbarkeit ihrer generellen Eigenschaften besitzen. Daher wurden verschiedene Milchprodukte zur Analyse herangezogen, außer dem Kartoffelpüree. Zu den Milchprodukten zählen fettarmer Joghurt, Magerquark und Vanille-Milcheis. Die Grundzutat dieser Lebensmittel ist Milch, der Unterschied liegt in der Herstellung und Textur. Die Besonderheit hierbei ist die sukzessive Nährwerterhöhung der Makronährstoffe von fettarmen Joghurt über Magerquark hin zu Milcheis. Dies geht mit einer Vergrößerung der Energiedichte einher. Milcheis generell stellt, nicht nur wegen seiner Nährwertzusammensetzung, ein sehr interessantes Beispiel für die Restentleerung dar. Es ist nicht nur ein typisches Produkt, welches in Containern (umgangssprachlich auch als Becher bezeichnet) für den to-go-Verkauf genutzt wird. Sondern es verändert im Laufe des Verzehr allmählich seine Textur und Konsistenz, durch den Prozess des Auftauens. Als Fertigprodukt besteht Kartoffelpüree aus getrockneten Kartoffelpulver.

Alle Lebensmittel stellen eine homogene Masse dar und enthalten keine festen Bestandteile. Der Fokus lag auf fließfähigen Nahrungsmitteln, mit möglichen worst-case Auswirkungen auf den Altpapierkreislauf. In Tabelle 3.2 sind die Nährwertangaben je 100 g Lebensmittel aufgelistet. Die Angaben sind aus der Nährwerttabelle von dem jeweiligen Lebensmittel entnommen. Dabei ist zu beachten, dass drei Kategorien hinzugefügt wurden, welche aus diesen berechnet sind. Diese sind ungesättigte Fettsäuren, komplexe Kohlenhydrate und der Gesamtanteil an Nährstoffen.

Nährwertangaben je 100 g LM	Kartoffelpüree	Joghurt fettarm	Magerquark	Milcheis Vanille	Palm-Raps-Fett
Brennwert [kJ]	1481	216	281	860	3700
Energiegehalt [kcal]	349	51	66	206	900
Fett gesamt	0,6	0,1	0,2	10,7	100
Gesättigte Fettsäuren	0,4	0	0,1	9,2	45
<i>Ungesättigte Fettsäuren</i>	0,2	0,1	0,1	1,5	55
Kohlenhydrate gesamt	74	6,6	4,1	25,2	0
Zucker	1,5	6,6	4,1	20,1	0
<i>Komplexe Kohlenhydrate</i>	72,5	0	0	5,1	0
Ballaststoffe	0	0	0	0	0
Eiweiß (Protein)	8,3	5,3	12	2	0
Salz	0,15	0,18	0,1	0,09	0
Nährwerte gesamt	83,05	12,18	16,4	37,99	100

Tabelle 3.2: Angaben der Nährwerttabelle je 100 g Lebensmittel

3.3 Geräte

Geräte welche zur Analyse herangezogen wurden, sind in Tabelle 3.6 aufgelistet. Darin enthalten sind weitere technische Daten, wie dem Messbereich bzw. dem einstellbaren Parameterbereich, sowie die Messgenauigkeit der entsprechenden Geräte.

Parameter	Gerät	Technische Daten
Dynamische Viskosität	Rotationsviskosimeter ROTAVISC me-vi	Messbereich: 0 - 40000 Pas Genauigkeit: $\pm 1 \%$
Masse	Präzessionswaage Sartorius LC620S	Messbereich: 0,000 - 620 g Genauigkeit: $\pm 0,001$ g
Masse	Präzessionswaage Sartorius LE6202S	Messbereich: 0,00 - 6200 g Genauigkeit: $\pm 0,01$ g
Desintegration	Warius Commercial Blender mit Glasaufsatz	Volumen: 1000 ml
Inkubation	Inkubator Memmert	Temperaturbereich: 25 - 60 °C Genauigkeit: $\pm 0,3 \%$
Filtration	Membranvakuumpumpe Vacuumbrand Type MZ2C	Durchfluss: 1,7 m ³ /h Serien-Nr.: 19384812
Abdampf- rückstand	Trockenschrank Memmert UM200	Temperaturbereich: 30 - 200 °C
pH-Wert	pH-Meter Xylem Analytics pH 3310, SenTix41	Messbereich: -2 - 20 Genauigkeit: $\pm 0,01$
EC	Konduktometer Xylem Analytics Cond 3310, TetraCond325	Messbereich: 0,000 - 1000 Genauigkeit: 0,5 %
CSB / BSB ₅ , Org. Säuren	UV-Vis Spektralphotometer Hach Lange GmbH DR5000	Spektralbereich: 190 - 1100 nm
CSB, Org. Säuren	Thermostat Hach Lange GmbH LT200	Temperaturbereich: 40 - 200 °C
BSB ₅	Thermostat Hach Lange GmbH LT20	Temperaturbereich: 20 °C
BSB ₅	Verdünnungswasser-System Hach Lange GmbH	Volumen: 500 ml Artikel-Nr.: LZC 901
Temperatur / Luftfeuchtigkeit	Temperatur-Logger testo 646	Temperaturbereich: -50 - 150 °C Genauigkeit: $\pm 0,1$ °C
Fotografische Dokumentation	Kamera Canon Power Shot Sc 540 Hs	Auflösung: 20 MP

Tabelle 3.3: Verwendete Analysegeräte

Parameter	Chemikalie	Technische Daten
CSB	CSB-Küvetten-Test HT-Version (high temperature) Hach Lange GmbH	Messbereich: 100 - 2000 mg O ₂ / l Artikel-Nr.: LCK 514 LOT / Ch.-B.: 22238, 22280
BSB ₅	BSB-Küvetten-Test Hach Lange GmbH	Messbereich: 4 - 1650 mg O ₂ / l Artikel-Nr.: LCK 555 LOT / Ch.-B.: 22291
BSB ₅	Glucose- Glutaminsäurestandard Hach Lange GmbH	Sollwert: 205 ± 45 mg O ₂ / l Artikel-Nr.: LCA 555 addista LOT / Ch.-B.: 22292
BSB ₅	Verdünnungswasser Bio Kit Hach Lange GmbH	Artikel-Nr.: LZC 555 LOT / Ch.-B.: 22287
Organische Säuren	Summenparameter Küvetten-Test Hach Lange GmbH	Messbereich: 50 - 3600 mg / l Artikel-Nr.: LCK 365 LOT / Ch.-B.: 22278

Tabelle 3.4: Verwendete Chemikalien

Eigenschaft	Plate-Count-Agar (PCA)	Sabouraud-Agar (SAB)
Anwendung	aerobe Mikroorganismen	Hefen und filamentöse Pilze
Eigenschaften	hemmstofffrei unselektiv	bakteriell-hemmend Pilz-selektiv
Zusammensetzung	Casein-Pepton 5 g/l Glucose 1 g/l Hefeextrakt 2,5 g/l Agar 15 g/l pH 7,0 ± 0,2	Fleisch- u. Casein-Pepton 10 g/l Glucose 40 g/l Chloramphenicol 0,5 g/l Agar 15 g/l pH 5,6 ± 0,2
Hersteller	Carl Roth GmbH + Co. KG	
LOT-Nr.	31311260101CR	31231090201CR

Tabelle 3.5: Verwendete Nährmedien

3.4 Chemikalien / Nährmedien

Der Einsatz von Chemikalien ist für die Bestimmung des CSB und BSB₅, sowie dem Summenparameter der organischen Säuren notwendig. Alle Küvetten-Tests sind in Fertig-Küvetten, der Firma Hach und Lange, enthalten. Weitere Daten sind aus Tabelle 3.4 zu entnehmen. Für die Zählung der Kolonie-bildenden-Einheiten (KBE) wurden verschiedene Anzuchtmedien, in Tabelle 3.5, verwendet. Weitere Informationen sind im Anhang A: Methodik zu entnehmen.

3.5 Allgemeiner Laborbedarf

Für die experimentellen Arbeiten sind eine Reihe von allgemeinen Laborgegenständen, wie Gläser und Pipetten notwendig. In diesem Kapitel sollen kurz, die wichtigsten Bedarfsgegenstände der Analyse gelistet sein.

Parameter	Gegenstand	Technische Daten
Lagerungs-Simulation	transparente PE-Boxen	145 x 90 x 60 mm Volumen: 1,2 l
Filtration	Schwarzbandfilter 388	Durchmesser: 125 mm Flächengewicht: 84 g/m ²
Filtration	Büchnertrichter mit Saugflasche	Durchmesser: 125 mm
Abdampfrückstand	Aluminiumschalen	Durchmesser: 96 mm Volumen: 125 ml

Tabelle 3.6: Allgemeine Bedarfsgegenstände

4 Methoden

4.1 Angewandte Methoden

4.1.1 Methoden zur Restentleerung

Mit Methoden der Restentleerung können Ergebnisse zur Restanhaftung eines Stoffes an einem Verpackungsprodukt überprüft werden. Für die Restentleerung von Lebensmitteln an faser-basierten Verpackungen gibt es keine allgemeingültige Methode. Wohl aber für die Restentleerung von Spundfässern. Nun stellt dies einen erheblichen Unterschied zur Fragestellung dar, dennoch war es möglich, Anhaltspunkte für eine Methode der Lebensmittel zu generieren. Im Anhang B der DIN EN ISO 15750-2 ist das Prüfverfahren für das Entleeren von Spundfässern beschrieben. Beim Verfahren B wird folgendes erklärt: Nach Öffnung des Fasses, soll dies in eine waagerechte Stellung gebracht werden, bis keine Flüssigkeit mehr austritt. Nun ist das Fass langsam aufzurichten, um eine weitere Entleerung zu ermöglichen. Der Winkel der Aufrichtung sollte zwischen 0° und 20° betragen. In Anlehnung an dieses Prozedere wurde die Restentleerung der faser-basierten Verpackungen durchgeführt. Des Weiteren gilt zu betonen, dass die Entleerung von Lebensmitteln in der Realität anders geschieht. Für Getränke ist diese Methode einigermaßen nutzbar, da diese in einem ähnlichen Prozess vom Becher in den Mundbereich des Konsumenten gelangen. Für den Lebensmittel-Verzehr, welche das Nutzen von Besteck nach sich zieht, geschieht die Entleerung nicht kontinuierlich. Daher wurden zur Restentleerung der Papierverpackungen verschiedene Varianten durchgeführt.

Um ein lebensmittel-spezifisches Merkmal des Vorganges aufzunehmen, welches die Restentleerung beeinflusst, wurden zudem die dynamische Viskosität gemessen. Nach dem Ostwald - de Waele - Fließmodell lässt sich die dynamische Viskosität durch eine Potenzfunktion der Formel $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$ beschreiben. Die zwei Konstanten charakterisieren zum einen die Konsistenz (k), der Exponent (n) stellt den Fließindex dar. Dieser gibt die Abweichung vom linearen newtonschen Fließverhalten ($n = 1$) wider. Wenn $n > 1$ spricht man von dilatanten Stoffen, welche bei höheren Schergeschwindigkeiten ($\dot{\gamma}$) eine steigende Viskosität aufweisen. Wenn $n < 1$ handelt es sich vermutlich um strukturviskose Stoffe, diese zeigen eine abnehmende Viskosität bei steigender Schergeschwindigkeit. Ein Rotationsviskosimeter misst die entstehende Schubspannung (τ) und berechnet daraus die dynamische Viskosität (η).

4.1.2 Mikrobiologische Altpapier-Lagerungs-Simulation

Die experimentelle Lagerungs-Simulation von Altpapier dient der mikrobiologischen Untersuchung, um das Wachstum unter den drei Makronährstoffen abzubilden. Als organisches Material wird Papier von verschiedenen Mikroorganismen als Substrat bewachsen. Begünstigt durch verschiedene Faktoren und Umwelteinflüsse, entsteht dadurch ein komplexer Lebensraum für Bakterien, Hefen und Schimmelpilze. Der Eintrag von Lebensmitteln stellt eine weitere Nährstoffquelle dar und begründet die Annahme, eine Wachstumsförderung der Mikroorganismen auszulösen. Um einen ersten sensorischen Einblick zur Keimbildung, unter Bezugnahme der genannten Faktoren zu gewinnen, wurde die Lagerung von Papierproben simuliert. Dies geschah im Labormaßstab und ist den mikrobiologischen Methoden zuzuordnen. Der Sinn dieser Methode war es, das Potential der Keimbildung verschiedener Papierproben in Kombination mit Lebensmitteln, mikrobiologisch, chemisch und papiertechnisch zu überwachen. Mit dem Verfahren soll eine Anreicherungskultur von papierspezifischen Mikroorganismen erzeugt werden, welche im Altpapier durch Lebensmittelanhaftungen begünstigt keimen. Im Falle dieser Analyse wurden die Parameter Temperatur und Feuchtigkeit unter sommerlichen Niveau durchgeführt. Die Lagerung fand an einem licht freien Ort statt, um die Bedingungen im Inneren eines Altpapierballens zu simulieren.

4.1.3 Bestimmung der koloniebildenden Einheiten an Papier

Für eine quantitative Analyse von Mikroorganismen der Altpapier-Lagerungs-Simulation wird die KBE-Bestimmung herangezogen. Je nach Untersuchungsfokus werden dazu Nährmedium und Verfahren angepasst. Zur Unterscheidung zwischen Bakterien und Pilzen wurde die KBE-Bestimmung mit zwei spezifischen Nährmedien durchgeführt. Auch das Verfahren des Probenauftrages wurde, je nach Verdünnungsstufe, variiert. Zur mikrobiologischen Untersuchung von Faserstoff, wurden Zählung von Bakterien nach Desintegration durchgeführt. Das Gussplattenverfahren nach DIN ISO 8784-1 beinhaltet die Bestimmung von der bakteriellen Gesamtkeimzahl auf Plate count Agar (PCA). Die Anzahl koloniebildender Einheiten (KBE) bezieht sich auf die luftrockene oder ofentrockene Masse, bezeichnet als KBE pro Gramm Faserstoff (KBE / g). In dieser Arbeit beziehen sich die KBE´s auf das luftrockene Probengewicht, welches sich aus Papier und Lebensmittel zusammensetzt. Zur KBE-Bestimmung höherer Verdünnungsstufen wurde nach dem Spatelplattenverfahren gearbeitet. Die Zahl an koloniebildenden Einheiten liegt unter der reellen Lebendkeimzahl in der Probe, da nur die tatsächlich teilungsfähigen Mikroorganismen zählbar sind. Mit der KBE-Bestimmung an mehreren Lagerungstagen können Entwicklung und Grad an Kontamination beurteilt werden.

4.1.4 Analyse der wässrigen Phase

Bei der Papierherstellung entsteht durch Entwässerung das Papierprodukt, als wässrige Phase verbleiben die übrigen Prozesswässer. Im Labormaßstab wird durch Filtration der Faserstoffsuspension, die wässrige Phase gewonnen. Die Fasern eines Papierproduktes, besonders mit Lebensmittelanhaftung, beeinflussen verschiedene chemische Parameter des Filtrats. Durch Stoffwechselprozess der Mikroben wird Substrat umgesetzt zu neuen Verbindungen. Durch die Filtrat-Analyse lassen sich im Wasser gelöste Stoffe nachweisen und somit eine mikrobiell-verursachte Veränderung aufzeichnen. Folgende Parameter des Filtrats werden herangezogen, um eine entsprechende Beurteilung zu treffen. Als allgemeine chemische Werte dienen der pH-Wert, zur Säure / Base - Charakteristik und die elektrische Leitfähigkeit, sowie der Abdampfrückstand als Maß der gelösten Salze. Um die Gesamtbelastung an oxidierbaren Stoffen zu ermitteln, wird der chemische Sauerstoffbedarf bestimmt. Der biologische Sauerstoffbedarf gibt den Anteil biologisch-abbaubaren Material an und wird dazu ermittelt. Als Summenparameter wird die Menge an organischen Säuren bestimmt, dies dient als indirekter Nachweis von metabolischen Prozessen der Mikroorganismen. Auch die Filtrat-Analyse dient zur Beurteilung der Altpapier-Lagerungs-Simulation. Die genannten Parameter sollen chemische Auswirkungen und Veränderungen im Milieu aufzeigen. Besonders die Bildung organischer Säuren und Schwankungen im pH-Wert können aus mikrobieller Aktivität hervorgehen.

4.2 Durchführung

Das Ablaufschema der Untersuchungen ist am Ende dieses Kapitels in Abbildung 4.2 zusammengefasst. Es beinhaltet die Lagerungs-Simulation als Hauptfokus der Analyse, welche in die drei Abschnitte [Lagerungs-Simulation / Ansetzen der Anreicherungskultur](#), [Bestimmung der koloniebildenden Einheiten](#) und [Filtrat-Analyse](#) untergliedert ist. Vorab wird die Durchführung der Restentleerung als worst-case-Szenario eines faserbasierten Verpackungsprodukts beschrieben.

4.2.1 Restentleerung von Lebensmittelverpackungen

Als Ausgangspunkt wurden alle Food Container vor der Befüllung und Entleerung ausgewogen. Ein Messbecher wurde mit ca. 500 ml Leitungswasser befüllt. Anschließend wurde ein Container befüllt und erneut ausgewogen, die damit erhaltene Masse wird als pre-consumer Masse bezeichnet. Danach wurde die Restentleerung vollzogen, in dem der Becherinhalt zurück in den Messbecher gekippt wurde. Dies geschah in Anlehnung an die DIN EN ISO 15750-2 Anhang B. Der Papierbecher wurde annähernd waagrecht an den Messbecher gebracht, um das Getränk zu entleeren. Nachdem der meiste Teil des Lebensmittels zurück in den Messbecher geflossen war, wurde ein Winkel von ca. 20° eingestellt, um den restlichen Inhalt aus dem Becher fließen zu lassen. Die Position wurde für 5 Sekunden gehalten und der restentleerte Becher wurde nun erneut ausgewogen. Das damit ermittelte Gewicht wird als post-consumer Masse bezeichnet. Mit den ermittelten Massen konnte die Restanhaftung mathematisch bestimmt werden, indem man von der post-consumer-Masse, die Masse des Bechers subtrahiert.

Eine realitätsnahe Restentleerung der Lebensmittel stellt die standardmäßige Nutzung von Verpackungsprodukten dar. Daher wurden die hochviskosen Lebensmittel Milcheis, Magerquark, Joghurt und Kartoffelpüree aus dem Food Container mit einem Esslöffel ausgelöffelt. Die gravimetrischen Bestimmungen erfolgten analog dem zuvor beschriebenen Prozedere.

Zur Bestimmung der dynamischen Viskosität der Lebensmittel wurde ein Rotations-Viskosimeter, des Typs ROTAVISC me-vi, verwendet. Die Milchprodukte, Joghurt fettarm und Magerquark, verblieben zur Messung in ihrer ursprünglichen Verpackung. Kartoffelpüree wurde zur Messung in ein 500 ml - Becherglas gegeben. Anschließend startete die Analyse, indem eine geeignete Spule in der Probe rotierte. Die Auswahl der Spule richtete sich nach der Auslastung des jeweiligen Drehmoments, diese sollte mindestens 10 % der Nennleistung der einzelnen Spule betragen. Um Daten für eine Fließkurve zu gewinnen, wurde zwischen 10 - 200 rpm im Abstand von 10 rpm gemessen. Der Rotationsvorgang wurde 1 Minute lang durchgeführt, anschließend kam es zum Stop und die dynamische Viskosität wurde im Zusammenhang mit der Drehmoment-Auslastung abgelesen.

4.2.2 Lagerungs-Simulation / Ansetzen der Anreicherungskultur

An dieser Stelle wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dementsprechende hygienische Maßnahmen und Vorkehrungen zu treffen, um die Aussagekräftigkeit und den Gesundheitsschutz der Untersuchung zu gewährleisten. Daher sind alle Arbeitsschritte mit der Benutzung von Handschuhen und Desinfektions-Schritten durchgeführt worden. Für die Probenentnahme wurde eine Atemschutzmaske verwendet. Das Zeitungspapier und der Testliner wurden jeweils mit den Nährstoff-Simulanten Eiweiß, Fett und Kohlenhydrate kombiniert, zusätzlich wurde ein Blank-Ansatz ohne Lebensmittel gelagert. Somit wurden für jede Papierart 4 Boxen vorbereitet, insgesamt ergibt dies 8 Ansätze. In jeder Box wurden 3 Papierstapel platziert, für Probenentnahmen an Tag 3, 5 und 10.

Die Probenvorbereitung beinhaltete das Schneiden der Papierstreifen, diese wurden in einer Länge von 9 cm und einer Breite von 4,5 cm zurechtgeschnitten. Danach wurden diese Streifen mit Lebensmittel, nach folgendem Schema bestrichen und in eine desinfizierte, transparente Box gelegt. Bestreichen vom ersten Streifen auf der Oberseite, Bestreichen des zweiten Streifens auf der Oberseite, welcher mit der unbestrichenen Seite auf den ersten Streifen gelegt wurde. Dieser Ablauf wurde fortgeführt bis ein Papier-Stapel mit 50 g erhalten wurde, anteilig mit 70 % Papier und 30 % Lebensmittel, für den Blank-Ansatz mit 100 % Papier. Davon wurden 3 Stapel in jeder Box platziert. Um allgemeine mikrobielle Lebensprozesse zu fördern, wurden die Boxen abschließend mit Wasser besprüht. Mit einer handelsüblichen Sprühflasche wurden dem Inhalt 10 g Wasser beigemischt.

In [Abbildung 4.1](#) sind die so vorbereiteten Lagerungsansätze zu erkennen. Im oberen Teil sind die Zeitungspalten erkennbar, im unteren Teil die Proben des Testliners. Die Makronährstoffe sind von rechts beginnend folgend angeordnet: Blank (ohne Lebensmittel), Eiweiß (Magerquark), Fett (festes Palm-Raps-Fett), Kohlenhydrat (Kartoffelpüree). Die Boxen wurden verschlossen und einzeln in einen verschließbaren Clip-Beutel aus Plastik platziert. Anschließend startete die Lagerung unter Lichtausschluss. Die Temperatur wurde dabei mit dem Temperatur-Logger über den gesamten Zeitraum, im stündlichen Abstand erfasst.

Die Probenentnahme geschah an Tag 3, 5 und 10, wobei jeweils ein Papierstapel pro Box entnommen wurde. Der kontaminierte Faserstoff wurde in Anlehnung an DIN ISO 8784-1 für 1 Minute desintegriert, um eine 1 %-ige Faserstoffsuspension zu erhalten. Eine niedrige Temperatur sorgt allgemein zur Reduzierung von Stoffwechselvorgängen. Daher wurde mit einem Labormixer der Papierstapel chargenweise mit kaltem Wasser verarbeitet. 10 g je 1-Liter-Charge, ergibt 5 Chargen für jeden 50 g schweren Papierstapel. Nach der Desintegration wurden die Suspensionen in 5-Liter-Fässern aufbewahrt. Zu Bestimmung des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit wurden die Messsonden in das Medium platziert.



Abbildung 4.1: Vorbereitete Papierstapel in transparenten Boxen zur Lagerung

4.2.3 Bestimmung der koloniebildenden Einheiten

Zur KBE-Bestimmung der Faserstoffsuspension wurde nach dem Plattengussverfahren für Papier in Anlehnung an DIN ISO 8784-1 gearbeitet. Unmittelbar nach der Desintegration wurden mit einer sterilen Pipette 2 ml der 1 %igen Faserstoffsuspension in das verflüssigte Nährmedium der 90mm-Petrischalen gegeben. Um die Fasern im Medium gleichmäßig zu verteilen, wird die Petrischale rotierend bewegt und anschließend abgekühlt. Zur KBE-Bestimmung von Bakterien wurde Plate-Count-Agar (PCA) verwendet, für Hefen und Schimmelpilze erfolgte die Bestimmung simultan auf Sabouraud-Agar mit Chloramphenicol. Die Petrischalen wurden bei 30°C zur bakteriellen Zählung für 48 h inkubiert, zur mykotischen Zählung erfolgte die Inkubation für 7 Tage. Für höhere Verdünnungen wurde auf das Spatelverfahren gesetzt. Hierbei wurde die Probe mit einem Drigalski-Spatel auf das feste Nährmedium verteilt. Die Berechnung der Gesamtkeimzahl in KBE erfolgte nach DIN ISO 8784-1, aufgeführt im Anhang [A.2: Methodik](#).

4.2.4 Filtrat-Analyse

Die wässrige Phase wurde durch Vakuum-Filtration, unter Nutzung eines Schwarzbandfilters und Büchnertrichters des Durchmessers 125 mm, gewonnen. Eine Masse von annähernd 150 g wurden auf das Filterblatt gegeben und filtriert. Anschließend sind die Filtrate in Glasflaschen aufbewahrt worden. Die weitere Untersuchung beinhaltete mehrere Parameter, zur pH- und EC-Messung wurden auch hier die Sonden im Filtrat platziert und die Werte wurden aufgezeichnet. Weitere Analysen des Filtrats wurden in Anlehnung an Methode PTS-RH 025:2022 durchgeführt. Dies beinhaltet den Abdampfrückstand und den CSB, zusätzlich wurden BSB₅ und organische Säuren analysiert. Die Doppelbestimmung des Abdampfrückstandes geschah durch gravimetrische Bestimmungen in Aluschalen, welche ausgewogen und befüllt für 24 h im Trockenschrank bei 105 °C beheizt wurden. Die anschließende Auswaage der Schalen ermöglicht eine Berechnung des Abdampfrückstandes, welche im Anhang A.1: **Methodik** beschrieben wird. Die Analyse des CSB, BSB₅ und der organischen Säuren erfolgte gemäß der Hersteller-Richtlinien, welche im Anhang A: **Methodik** zu finden sind. Die Umrechnung dieser Messwerte bezogen auf den Faserstoff in g/kg, geschieht durch Division mit der Faserstoffkonzentration in g/l. Somit wird der Messwert, welcher in mg/l angegeben wird, auf 1 kg Faserstoff bezogen.

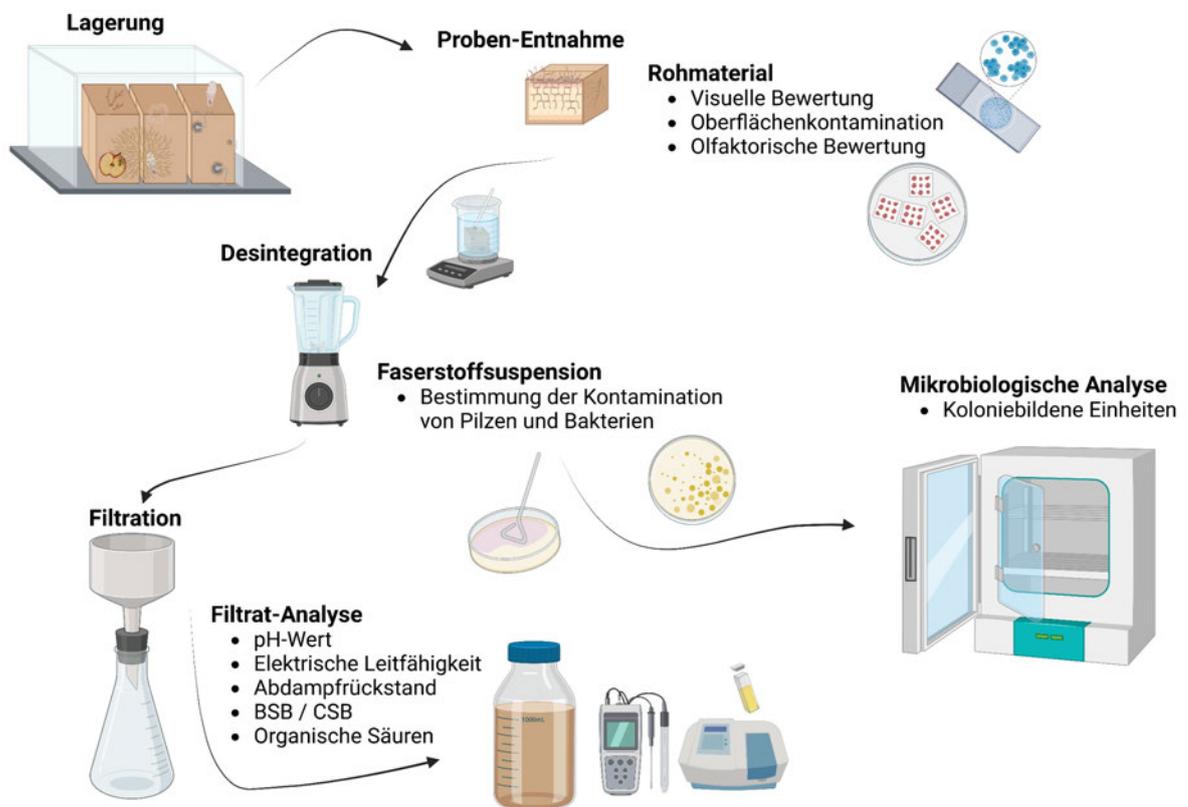


Abbildung 4.2: Untersuchungsschema der Lagerungs-Simulation

(Erstellt mit: <https://app.biorender.com>, am 05.05.2023)

5 Ergebnisse

5.1 Restanhaftung am Food Container

Die Restanhaftungen der Lebensmittel am Food Container sind durch Boxplots visualisiert. Das arithmetische Mittel ist darin mit einem Kreuz gekennzeichnet, Ausreißer mit einem Kreis. Als Ausreißer werden alle Werte bezeichnet, welche weiter als das 1,5-fache des Interquartilsabstand (IQR) dieses Intervalles entfernt liegen. Die Stichprobengröße betrug für jedes Lebensmittel 20 Becher. In Abbildung 5.1 ist die

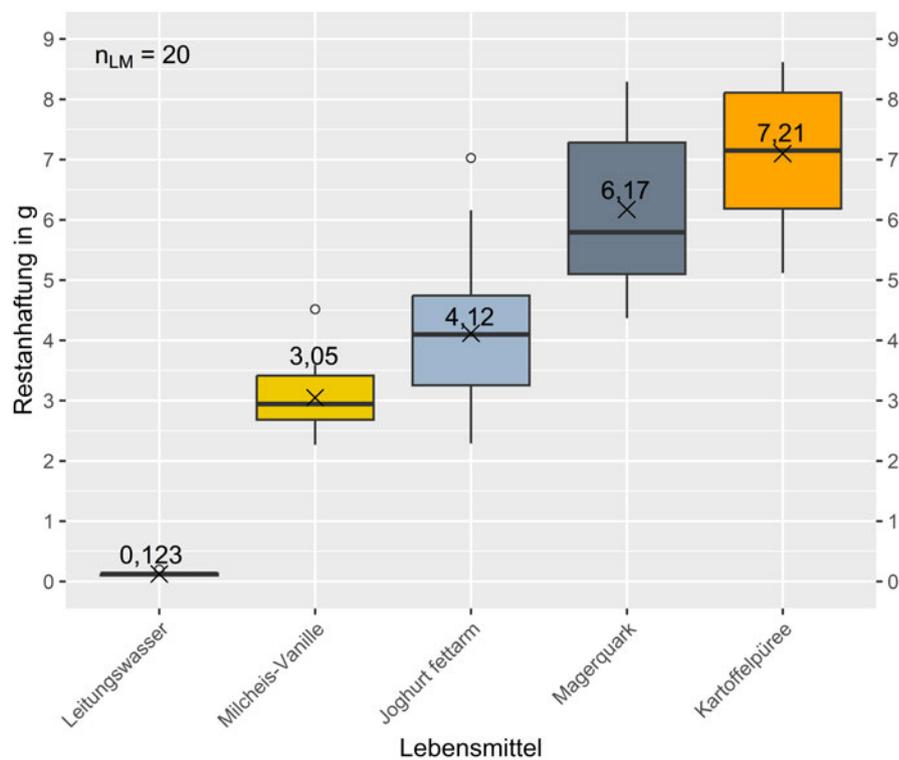


Abbildung 5.1: Restanhaftungen am doppelseitigen PE-beschichteten Food Container

Restanhaftung des einwandigen Food Container mit beidseitiger PE-Beschichtung dargestellt. Die geringste Masse an Restanhaftung generierte Leitungswasser mit durchschnittlich 0,123 g, was einen Anteil von 1,9 % bezogen auf die lufttrockene Verpackung ausmacht. Die geöffneten Lebensmittel erzeugten mehr Anhaftungen, Milcheis-Vanille mit 3,048 g und einem Anteil von 47 %, fettarmer Joghurt mit 4,117 g und 63,9 %, gefolgt von Magerquark mit 6,171 g und einem Anteil von 95,6 %. Das Lebensmittel mit der höchsten Masse ist Kartoffelpüree mit 7,205 g. Durch die Restentleerung entsteht in diesem Fall ein Abfallprodukt, welches einen höheren Lebensmitteleintrag als Papiermasse generieren würde. Der Anteil an Kartoffelpüree-Restanhaftung bezogen auf die Verpackung_{lutro} beträgt 111,7 %. Weitere statistische Kennwerte der Restenhaftungs-Boxplots sind im Anhang B.9 zu finden.

Die in Abbildung 5.2 visualisierten Fließkurven, stellen die dynamische Viskosität in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit des Viskosimeters dar. Die Kurven ähneln sich im Verlauf, dennoch sind Unterschiede in den Formeln des Fließgesetzes nach Ostwald de Waele erkennbar. Die Proportionalitätskonstante steht für die Konsistenz des Lebensmittels. Diese gibt an, wie stark die Scherspannung von der Schergeschwindigkeit beeinflusst wird. Für fettarmen Joghurt liegt dieser Wert bei 105981, für Kartoffelpüree bei 175137 und für Magerquark bei 512000. Die zweite Konstante des Fließgesetzes nach Ostwald de Waele ist der Fließexponent, welcher die Abweichung vom newtonschen Verhalten charakterisiert. Für alle Lebensmittel liegt dieser im negativen Bereich. Die drei hochviskosen Lebensmittel Joghurt fettarm, Kartoffelpüree und Magerquark besitzt demnach Fließexponenten von -0,979, -0,654 und -1,039. Die Wertetabellen der Kurven liegen dem Anhang B.1, B.2, B.3 bei. In Abbildung B.1 sind die logarithmierten Werte dargestellt, mit diesen wurde die Konstanten der Potenzfunktion berechnet.

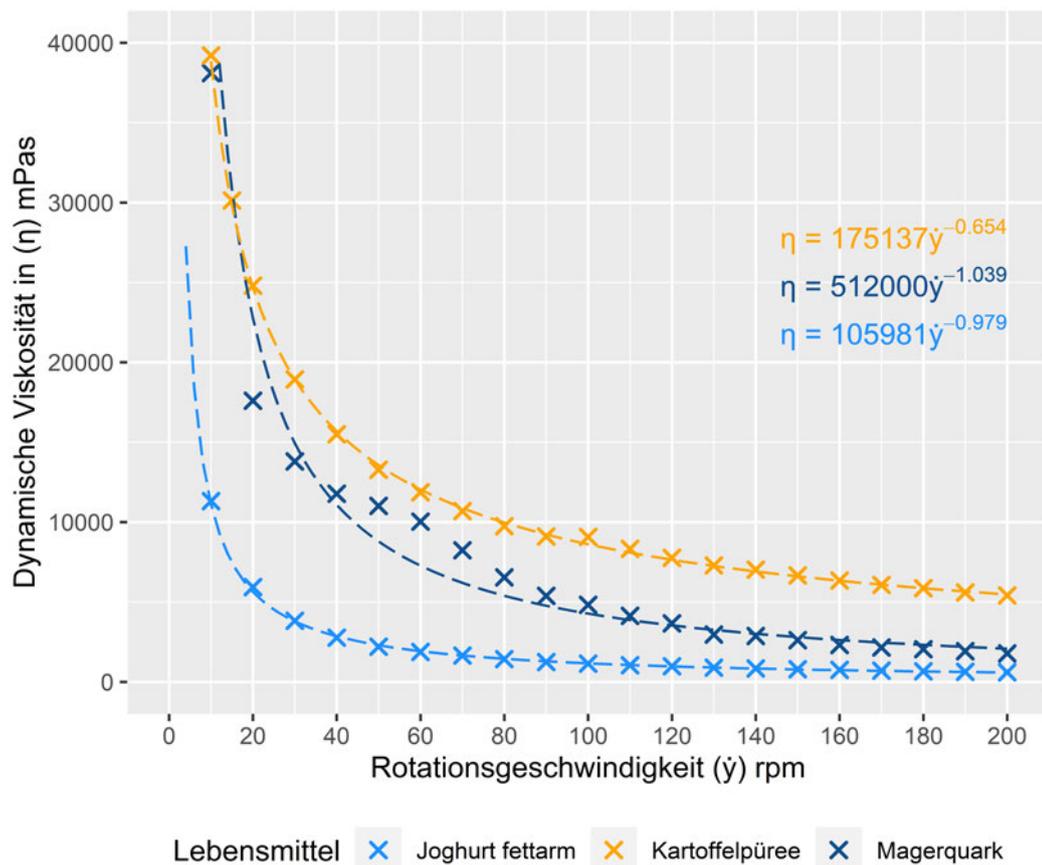


Abbildung 5.2: Dynamische Viskosität in Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit der zur Restentleerung genutzten Lebensmittel

5.2 Lagerungs-Simulation

Die durchschnittliche Lagerungstemperatur lag bei 19,1 °C. Der Temperaturverlauf ist in Abbildung 5.3 in Rot aufgezeichnet. Der blaue Kurvenverlauf repräsentiert die relative Luftfeuchtigkeit, welche im Mittel 64,5 % betrug. Ein sommerliches Wetterniveau ist durch den leichten Temperaturanstieg über die Dauer von 10 Tagen und den Tageshöchstwerten charakterisiert. Im Lagerungscontainer wurde an Tag 8 der Maximalwert von 35,6 °C aufgezeichnet.

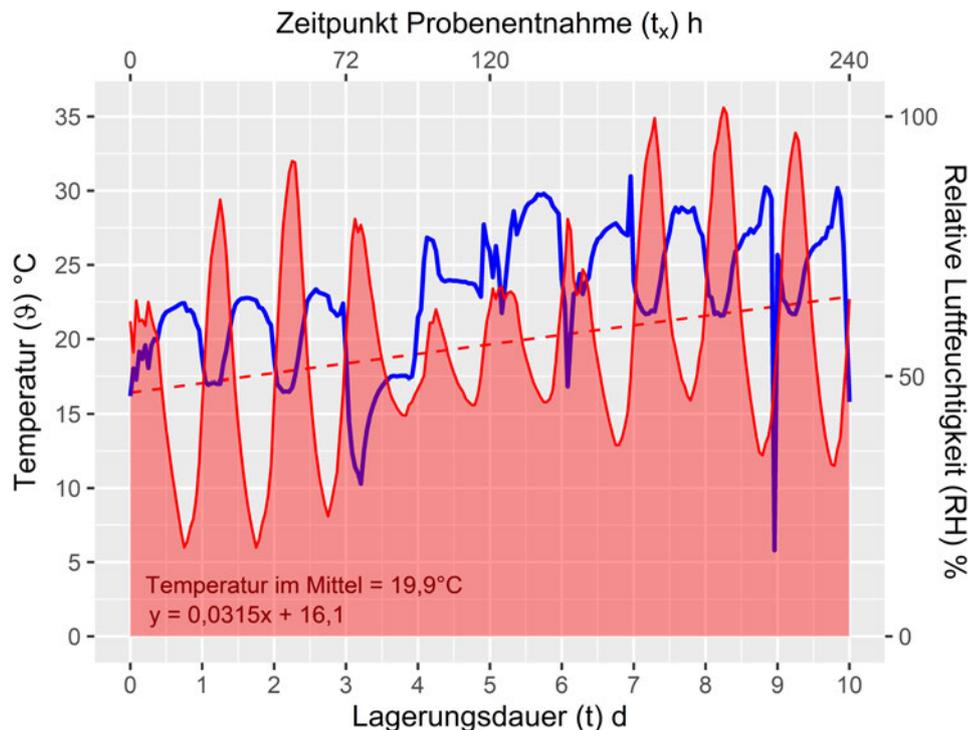


Abbildung 5.3: Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit während der Lagerungs-Simulation

5.2.1 Mikrobiologische Entwicklung

Die bakterielle Keimentwicklung ist in Abbildung 5.4 erkennbar. Quantifiziert in KBE je g Probe_{lutro}, mit einer qualitativen Beprobung auf Plate-Count-Agar, für 48 h bei 30 °C. Das Probengewicht setzt sich aus 70 % Papier und 30 % Lebensmittel zusammen. Am Tag 3 der Lagerung und somit der ersten Probenentnahme lagen alle Werte der KBE-Bestimmungen unterhalb 1×10^6 KBE/g Probe_{lutro}. Beim Testliner zeigte die Kohlenhydrat-Kombination den höchsten Wert, mit $3,9 \times 10^5$ KBE/g. Bei der Zeitung konnte dafür kein Wert bestimmt werden, da die Platte nicht auszählbar war, aufgrund der Koloniedichte. Wiederum steht dies für die höchste Belastung, da die anderen Platten in selber Verdünnung auszählbar waren. Bei der Zeitung mit Eiweiß entwickelten sich nach Tag 3 insgesamt $4,8 \times 10^5$ KBE/g Probe_{lutro}. Für die Blankprobe und Fett la-

gen die koloniebildenden Einheiten im ähnlichen Bereich mit 7×10^4 und $4,5 \times 10^4$ KBE/g Probe_{lutro}. Beim Testliner lagen die restlichen Keimbelastungen stark beieinander, für Fett bei $1,2 \times 10^5$, für Eiweiß bei $9,8 \times 10^4$ und für den Blank bei $8,6 \times 10^4$ KBE/g. Größere Unterschiede zwischen den Makronährstoffen waren nach Lagerungstag 5 zu beobachten. Die teils niedrigeren Werte von Tag 3 der Zeitung im Vergleich zum Testliner, lagen am fünften Tag durchschnittlich über denen vom Testliner. Die meisten KBE zeigten sich bei der Probe Zeitung / Eiweiß mit 8×10^7 KBE/g. Die Kombination Testliner / Eiweiß generierte für die bakterielle Belastung von 1×10^7 KBE/g Probe_{lutro}. Die Werte von Tag 5 für die Kohlenhydratmischungen lagen beim Testliner und der Zeitung unter dem vom Eiweiß, aber oberhalb vom Blank und Fett, mit $3,9 \times 10^6$ und $1,2 \times 10^7$ KBE/g. Für den Testliner lag der Blankwert mit $1,4 \times 10^6$ knapp unter der Belastung von Fett mit $1,5 \times 10^6$ KBE/g Probe_{lutro}. Die Zeitungspalten zeigten ein ähnliches Bild, mit einem Blankwert an Tag 5 mit $4,1 \times 10^6$ und für Fett bei $5,7 \times 10^6$ KBE/g. Die KBE-Bestimmungen für die Probenentnahme an Tag 10 lagen alle im Bereich von 1×10^8 bis 1×10^{10} KBE/g Probe_{lutro}. An beiden Papierarten lagen die Eiweiß- und Kohlenhydratproben zum einen und die Blank- und Fettproben zum anderen, nahe beieinander. Der Testliner zeigte für Eiweiß $7,1 \times 10^9$ und Kohlenhydrat $4,9 \times 10^9$, sowie für Fett 3×10^8 und der Blankprobe mit $2,3 \times 10^8$ KBE/g Probe_{lutro}. Bei der Zeitung lag die bakterielle Keimbelastung am letzten Lagerungstag für Eiweiß und Kohlenhydrat bei $4,5 \times 10^9$ und $4,2 \times 10^9$ KBE/g. Für Fett und die Blankprobe bei $4,9 \times 10^8$ und $1,5 \times 10^8$ KBE/g Probe_{lutro}. Die Ergebnisse der bakteriellen KBE-Zählung sind im Anhang B: Messwerte in Abbildung B.5 enthalten.

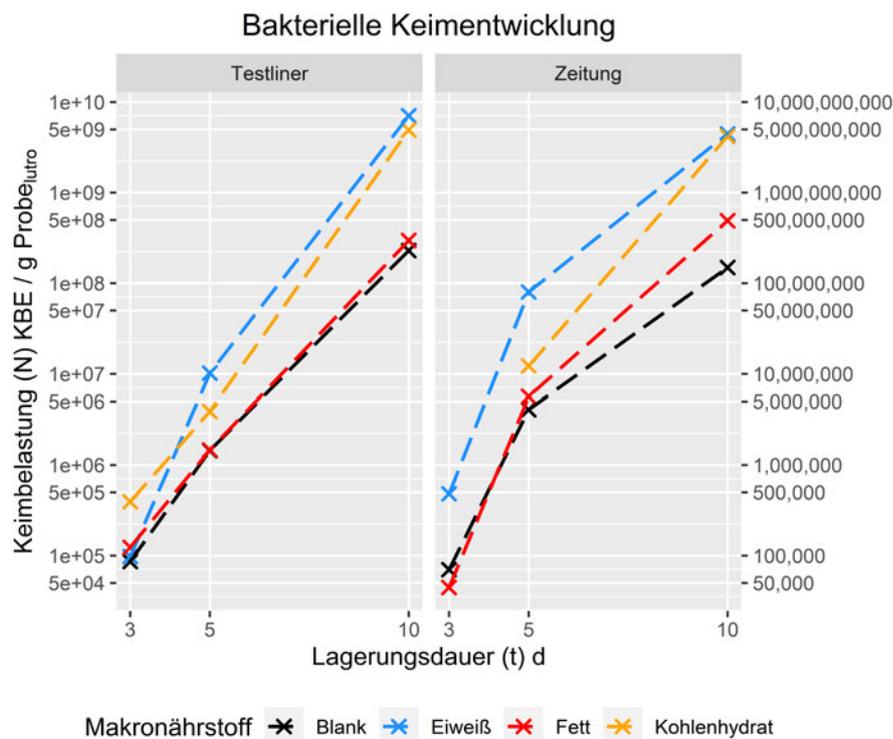


Abbildung 5.4: Entwicklung des bakteriellen Kontaminationsgrads, angegeben in KBE je Gramm lufttrockner Probenmasse. Inkubiert für je 48 h bei 30 °C auf PCA.

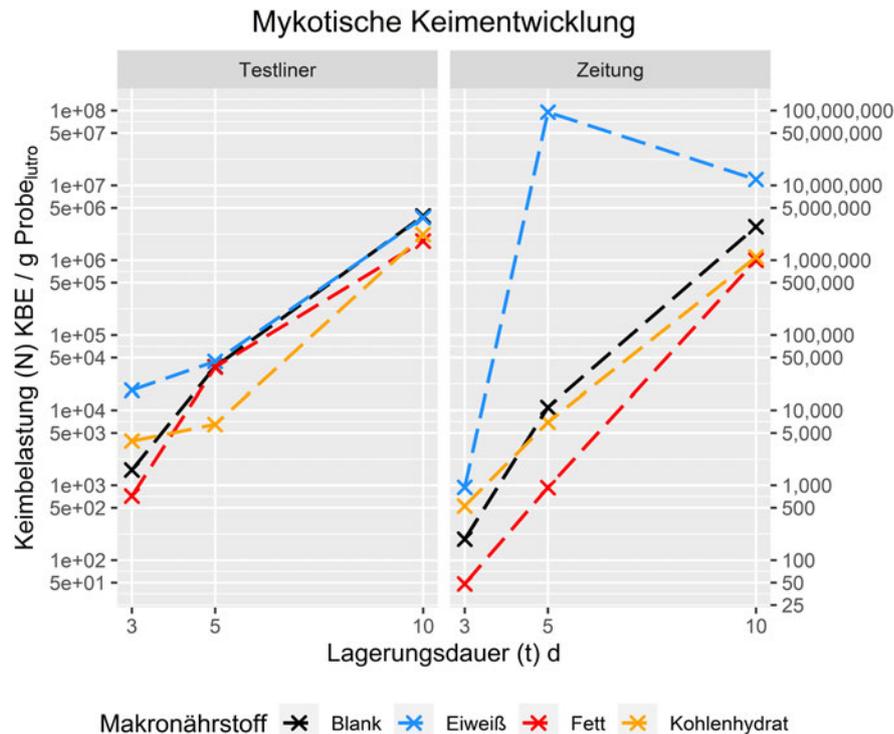


Abbildung 5.5: Entwicklung des mykotischen Kontaminationsgrads, angegeben in KBE je Gramm lufttrockner Probenmasse. Inkubiert für je 7 Tage bei 30 °C auf SAB.

In [Abbildung 5.5](#) ist die mykotische Keimentwicklung dargestellt, welche qualitativ auf Saboarud-Agar, für 7 Tage bei 30°C beprobt wurde. Diese zeigte sich im Verlauf der Simulation mäßiger, als die bakterielle Keimentwicklung. Die Zählungen des Testliners lagen an Tag 3 noch über den Werten der Zeitung, was sich bereits am Lagerungstag 5 ausglich. An beiden Papieren gab es nährstoffspezifische Auffälligkeiten. Bei der Testliner / Kohlenhydrat - Mischung zeigte sich von Tag 3 auf Tag 5 ein vergleichsweise geringere Entwicklung von $3,9 \times 10^3$ auf $6,5 \times 10^3$ KBE/g Probe_{lutro}. Innerhalb der Zeitungspalten sticht die Eiweißkombination, mit einem starken Pilzwachstum hervor. Diese entwickelte sich von $9,4 \times 10^2$ auf $9,5 \times 10^7$ zum zweiten Messwert. Danach kommt es zu einer Verringerung auf $1,2 \times 10^7$ KBE/g Probe_{lutro}. Die Blank und Fettproben des Testliners erzielten ähnliche Ergebnisse, wobei die Blankproben etwas höhere Werte ergaben. Zum Lagerungstag 5 lagen diese bei knapp unter 4×10^4 und entwickelten sich bis zum Lagerungsende auf $3,9 \times 10^6$ beim Blank und auf $1,8 \times 10^6$ KBE/g Probe_{lutro} beim Fett. Insgesamt lagen alle Werte des Testliners an Tag 10 im Bereich von $1,8 \times 10^6$ bis $3,9 \times 10^6$ KBE/g Probe_{lutro}. Bei der Zeitung zeigte die Fettprobe die geringste Belastung mit $4,8 \times 10^1$ über $9,3 \times 10^2$ auf 1×10^6 KBE/g Probe_{lutro}. Bei der Zeitung liegen die Werte von Blank und Kohlenhydrat nahe beieinander, welche am Lagerungstag 5, bei $1,18 \times 10^4$ und $6,9 \times 10^3$ KBE/g Probe_{lutro} lagen. Am Lagerungstag 10 lag die Kohlenhydrat probe näher am Fett, als am Blank mit $1,1 \times 10^6$ KBE/g. Der Blank lag hier bei $2,6 \times 10^6$ KBE/g Probe_{lutro}. Die Ergebnisse der mykotischen KBE-Zählung sind im Anhang B: [Messwerte](#) in [Abbildung B.6](#) enthalten.

5.2.2 Chemische Lagerungsparameter

Die pH-Werte sind für die Probe Testliner in Abbildung 5.6 und Zeitung in 5.7 zu erkennen. Angegeben sind die Werte von der Faserstoffsuspension, in durchzogener Linie. Sowie dem wässrigen Teil in Form des Filtrats, gekennzeichnet durch die gestrichelte Linie. Unter dem Nährstoff Eiweiß wurden die geringsten Werte gemessen, der Minimalwert wurde beim Faserstoff vom Testliner zum Ende der Lagerung mit pH 7,3 gemessen. Beim Testliner mit Eiweiß fielen die pH-Werte des Filtrates leicht höher aus als die der Suspension, bei der Zeitung sind diesbezüglich keine Unterschiede erkennbar. Die pH-Werte welche bei den Kombinationen mit Kohlenhydrat bestimmt wurden, lagen über denen von Eiweiß und unter denen vom Blank und Fett. Über die Lagerung stieg der pH vom Testliner mit Kohlenhydrat minimal auf 7,77 an, bei der Zeitung war kein Trend erkennbar. Die Werte des Blanks und des Fettes liegen auf demselben Niveau, zwischen 7,6 bis 8,04. Bei beiden Blankproben ist auffällig, dass die Faserstoffsuspension höhere Werte generiert als das Filtrat. Beim Fett ist dieses Phänomen nur leicht an der Zeitung erkennbar. Zusammenfassend lassen sich die pH-Werte wie folgt beschreiben: Am geringsten sind die Werte der Eiweißproben unterhalb 7,5, gefolgt vom Kohlenhydrat um pH 7,65. Die Blank- und Fettproben liegen knapp unter 8 im ähnlichen Bereich. Außerdem zeigte sich kein einheitlicher Trend zwischen den pH-Werten von Faserstoff und Filtrat, außer bei den Blankproben. Die einzig auffällige Verringerung des pH-Wertes ist beim Testliner mit Eiweiß erkennbar. Alle gemessenen pH-Werte sind vollständig im Anhang B.10 aufgezeichnet.

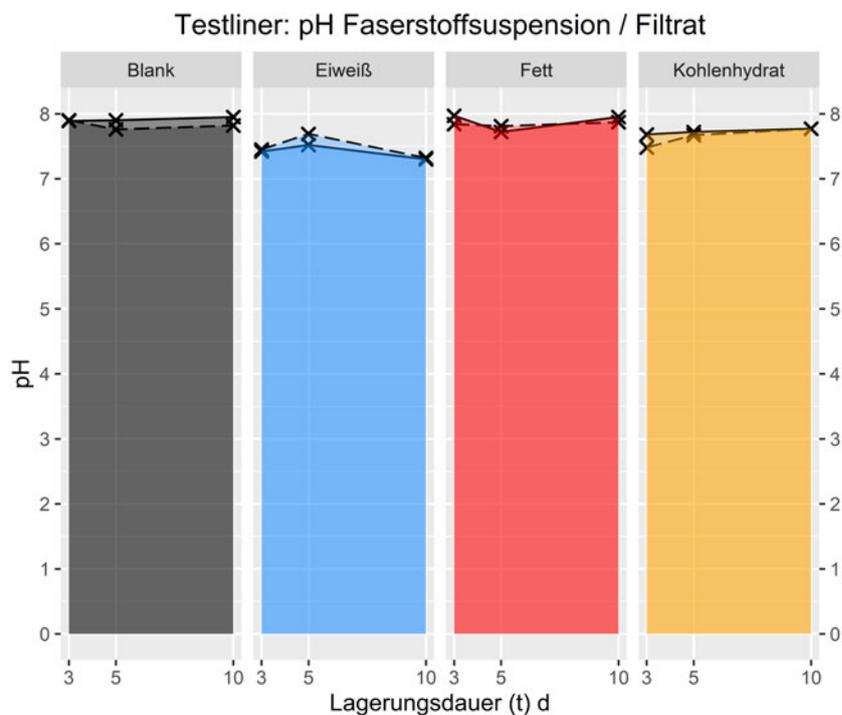


Abbildung 5.6: Testliner: Vergleich der pH-Werte von Faserstoffsuspension und Filtrat während der Lagerung.

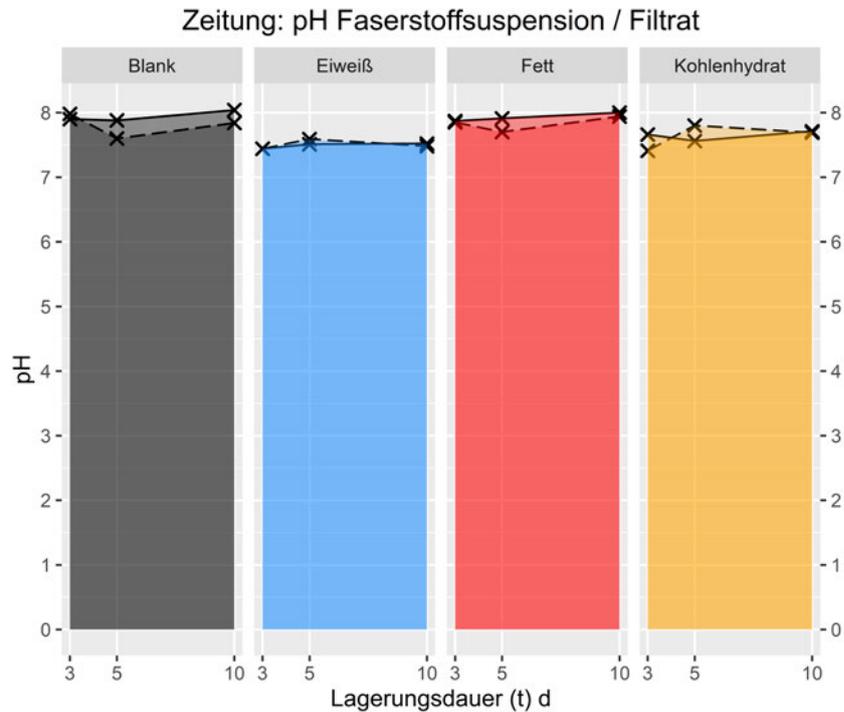


Abbildung 5.7: Zeitung: Vergleich der pH-Werte von Faserstoffsuspension und Filtrat während der Lagerung.

Der Ausgangswert an organischen Säuren, angegeben in Essigsäure-Äquivalente, am Tag 0 wurde vom Rohmaterial ohne Restanhaftung bestimmt und dient daher als Ausgangsbelastung der Papiere. Für Testliner wurde eine Beladung von 7,1 g/kg und Zeitung von g/kg Faserstoff bestimmt. Die über die Lagerung entstandene Dynamik ist in Abbildung 5.8 visualisiert und zeigt für alle untersuchten Kombinationen einen Anstieg an organischen Säuren auf. Die Messwerte des Testliners liegen allgemein über denen der Zeitung. Über die Lagerungsdauer wurde bei beiden Papieren die höchsten Werte mit dem Makronährstoff Eiweiß gemessen. Dieser betrug für Testliner g/kg und für Zeitung lag dieser etwas geringer, bei g/kg Faserstoff. Hohe Belastung an organischen Säuren sind ebenfalls beim Makronährstoff Kohlenhydrat zu erkennen, welche am Lagerungsende für Testliner mit g/kg und Zeitung mit g/kg Faserstoff, knapp unter denen vom Eiweiß lagen. Dennoch zeigte sich die Bildung von organischen Säuren beim Testliner mit Kohlenhydrat am ausgeprägtesten, da hier die Entwicklung schneller verlief als beim Eiweiß. Bei der Zeitung ist dieses Phänomen nicht zu erkennen, dort war die Entwicklung unter Kohlenhydrat mäßig, in der ersten Hälfte der Lagerung lagen die Werte hierfür unter denen vom Fett. Die Dynamik an organischen Säuren beim Fett zeigte an beiden Papieren wiederum einen relativ starken Anstieg, wobei es in der zweiten Lagerungshälfte bei der Zeitung zu einer Stagnation und dem Testliner zu einem leichten Abfall überhalb des Wertes von Tag 3 kam. Die Beladung an organischen Säuren von den Blankproben zeigten zwar einen geringfügigen Anstieg. Dennoch ist zu betonen, dass sich hierbei die Werte alle in einem ähnlichen Niveau befanden. Unter dem Testliner gab es zum dritten Lagerungstag eine Verringerung auf g/kg Faserstoff.

Die vollständige Wertetabelle der Organischen Säuren ist unter Anhang B.11 gelistet.

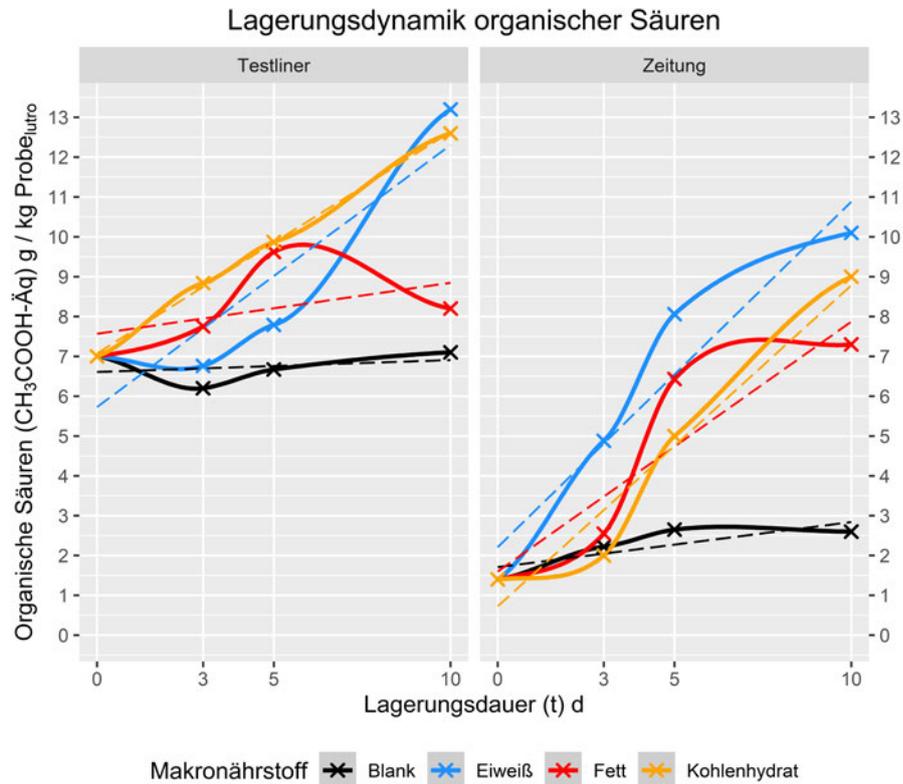


Abbildung 5.8: Entwicklung organischer Säuren während der Lagerung

Zwei weitere zur Lagerung untersuchte Parameter sind für den Testliner in Abbildung 5.10 und die Zeitung in 5.9 dargestellt, es handelt sich hierbei um den chemischen und biologischen Sauerstoffbedarf, angegeben in Sauerstoff-Äquivalente g je kg Faserstoff. Der blaue Teil stellt den CSB als Gesamtbelastung an chemischen Material dar, welcher in die wässrige Phase übergegangen ist. Der grüne Bereich steht für den BSB₅, welcher den biologisch-abbaubaren Teil angibt. Zur Vergleichbarkeit verschiedener Proben, wurde der Biodegradability Index gebildet, welcher das Verhältnis aus BSB₅ / CSB darstellt. Der BI steht in Schwarz oberhalb der Balken. Die vollständigen Messwerte von CSB und BSB befinden sich tabellarisch im Anhang B.12. Im Vergleich zeigt die Blankprobe des Testliners eine höhere Belastung als die Zeitung. Der BI stieg im Laufe der Lagerung von 0,31 über 0,37 auf 0,45 an, wobei der CSB leicht von 66 auf 69 ansteigt, bevor er auf 53 g/kg Faserstoff abfällt. Unter der Zeitung lag die Gesamtbelastung zwischen 6 und 9 g/kg Faserstoff, wobei der BI von 0,2 über 0,53 auf 0,26 fiel. Die Belastung der Eiweißproben fielen allgemein höher als die der Blankproben aus. Für den Testliner entwickelte sich die Dynamik von 74 über 64 auf 77 g / kg Faserstoff, ein Anstieg des BI ist auch hier erkennbar. Dieser stieg von 0,33 über 0,4 auf 0,51. Auch die CSB-Werte der Zeitung / Eiweiß - Kombination schwanken über die Lagerung, von 47 über 64 auf 52 g/kg Faserstoff. Dennoch ist am BI auch hier ein Anstieg von 0,3 über 0,48 auf 0,74 erkennbar. Für den Makronährstoff Fett lag die Gesamtbelastung des Filtrats allgemein

leicht über den Blankwerten. Am Testliner ist ein deutlicher Anstieg des CSB von 68 über 79 auf 129 g/kg Faserstoff zu erkennen, auch der BI zeigt einen positiven Trend von 0,3 über 0,4 auf 0,49. Der CSB der Zeitung und Fett fielen deutlich niedriger als vom Testliner aus, dennoch liegt eine analoge Entwicklung des CSB vor. Dieser stieg von 9 über 10 auf 13 g/kg Faserstoff, wobei der BI von 0,27 über 0,26 auf 0,32 sich in einem ähnlichen Niveau hielt. Die CSB-Werte von Testliner und Zeitung mit Kohlenhydrat zeigen die größten Unterschiede. Auffällig sind die Werte unterhalb des Blanks beim Testliner, welche von 45 über 47 auf 62 g/kg Faserstoff expandierten. Der BI entwickelte sich auch hier von 0,3 über 0,36 auf 0,53 zu. Die Schwankungen der CSB-Werte an der Zeitung / Kohlenhydrat - Kombination haben denselben Trend wie die Eiweißmischung. Erst ein Anstieg von 18 auf 72 g/kg Faserstoff, am Lagerungstag 10 mit einer Endbelastung von 45 g/kg Faserstoff. Die Entwicklung des BI ist schwankend und zeigt dennoch einen ansteigenden Trend, von 0,29 über 0,65 auf 0,55.

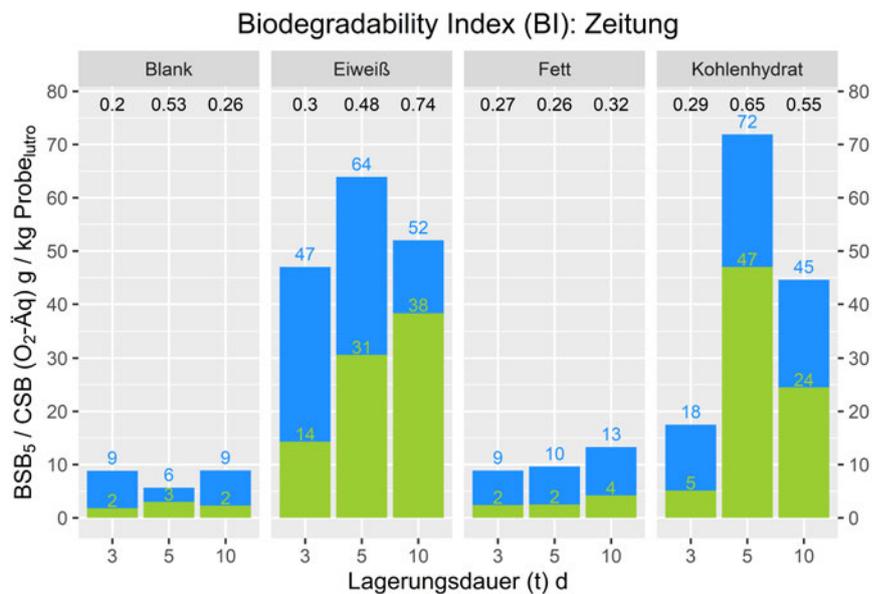


Abbildung 5.9: Entwicklung CSB und BSB₅ während der Lagerung an der Zeitung

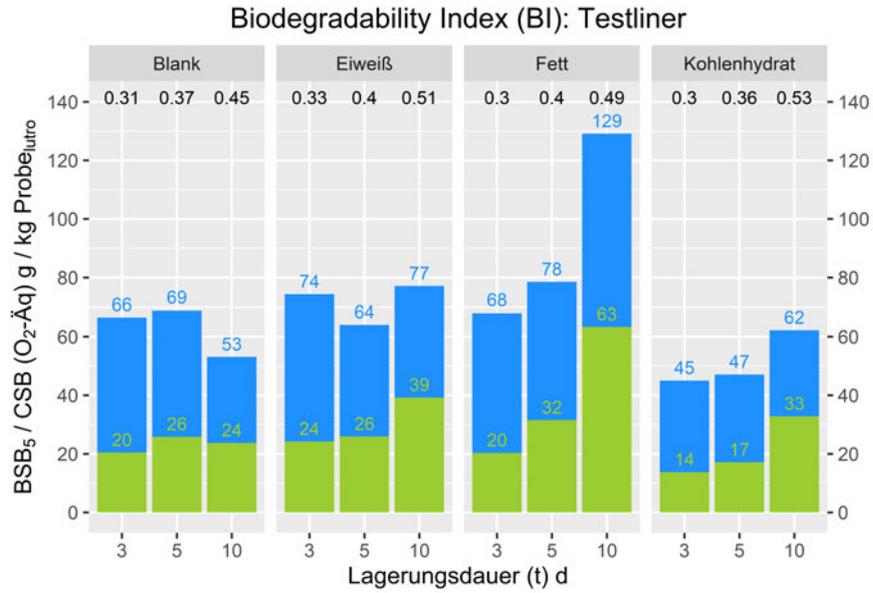


Abbildung 5.10: Entwicklung CSB und BSB₅ während der Lagerung am Testliner

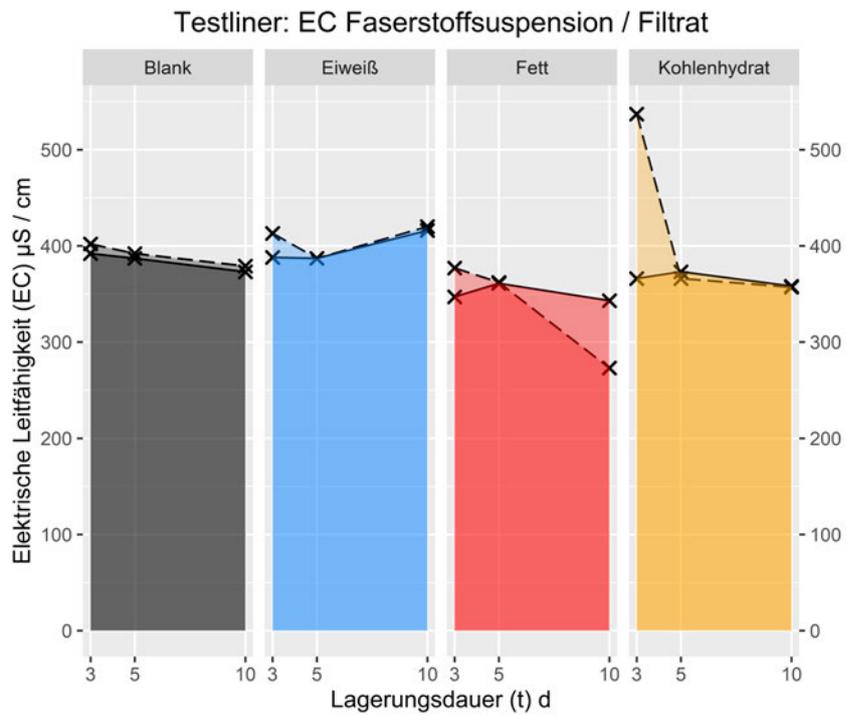


Abbildung 5.11: Entwicklung Elektrische Leitfähigkeit während der Lagerung am Testliner

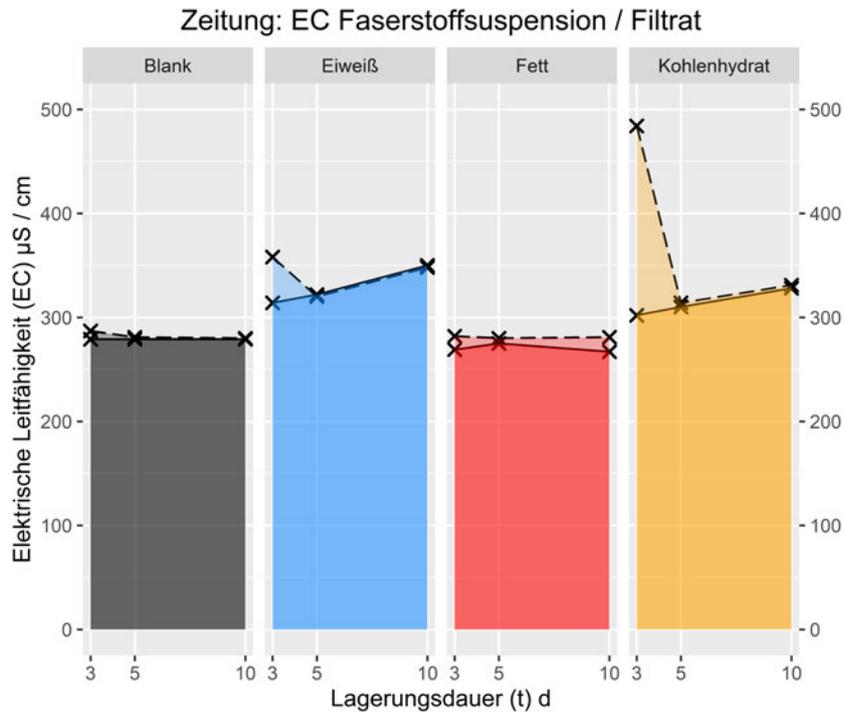


Abbildung 5.12: Elektrische Leitfähigkeit während der Lagerung an der Zeitung

Der EC-Wert des Filtrats war tendenziell höher als der Faser, sowohl für Testliner als auch für Zeitung. Im Allgemeinen wies der Testliner höhere EC-Werte sowohl für die Faser als auch für das Filtrat auf als die Zeitung. Ein sehr hoher Wert ist der EC-Wert von $537 \mu\text{S}/\text{cm}$ für das Filtrat am Tag 3, an Testliner mit Kohlenhydrat. Dieser Wert sticht deutlich hervor, da er im Vergleich zu den anderen Filtratwerten über $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ liegt. Ein weiterer auffälliger Wert tritt am Tag 10 auf, bei der Testliner / Fett - Mischung. Das Filtrat zeigt einen ungewöhnlich niedrigen EC-Wert von $273 \mu\text{S}/\text{cm}$, während der Faserstoff einen EC-Wert von $343 \mu\text{S}/\text{cm}$ aufweist. Dieser deutliche Unterschied zwischen Filtrat und Faser lag am Lagerungstag 3 noch auf Seiten des Filtrats. In Bezug auf den Nährstoff Eiweiß sind am Tag 10 ebenfalls leichte Unterschiede zu beobachten. Das Filtrat weist einen EC-Wert von $416 \mu\text{S}/\text{cm}$ auf, während die Faser einen EC-Wert von $420 \mu\text{S}/\text{cm}$ aufweist. Obwohl der Unterschied nicht so ausgeprägt ist wie beim Fett, deutet er dennoch auf geringfügige Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit zwischen Filtrat und Faser für die Eiweißprobe des Testliners hin. Die vorliegenden Daten deuten darauf hin, dass der Nährstoff Kohlenhydrat tendenziell die höchsten EC-Werte aufweist, während der Nährstoff Fett in der Regel die niedrigsten EC-Werte zeigt, unabhängig von der Unterscheidung zwischen Faser und Filtrat. Die Eiweiß und Blankproben liegen im ähnlichen Bereich, zwischen den Werten von Kohlenhydrat und Fett. Die Trends welche sich am Testliner zeigten, passen mit der Zeitung überein. Die EC-Werte der Zeitungspalten zeigen ähnliche Muster und Abstufungen, basierend auf den verschiedenen Nährstoffen. Beim Nährstoff Kohlenhydrat wurden tendenziell die höchsten EC-Werte beobachtet, während beim Nährstoff Fett die niedrigsten EC-Werte auftraten. Der Nährstoff Eiweiß zeigte moderate EC-Werte, wie der Blank. Auch hier sticht

der Wert von der Kohlenhydratprobe an Tag 3 deutlich hervor.

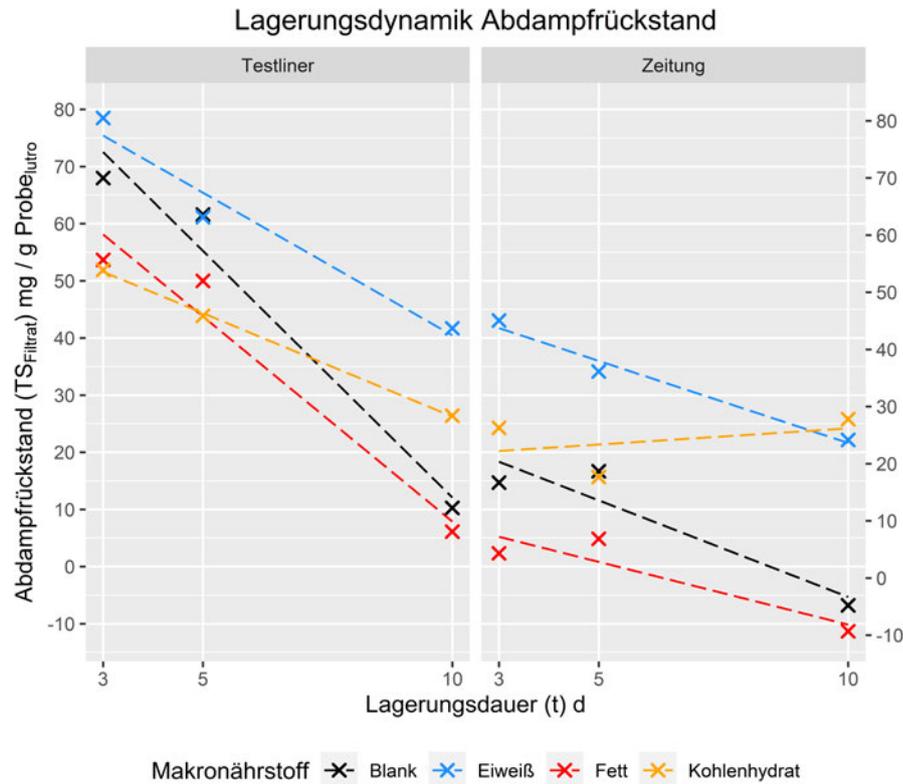


Abbildung 5.13: Entwicklung des Abdampfrückstandes während der Lagerung

Der Abdampfrückstand des Filtrats ist ein weiteres erfasstes Parameter, welches in Abbildung 5.13 dargestellt ist. Der Abdampfrückstand ist angegeben in mg Rückstand je g Faserstoff. Für fast alle Mischungen ist ein absteigender Trend des Abdampfrückstandes erkennbar, außer für die Zeitung / Kohlenhydrat - Probe. Diese zeigt einen leicht ansteigenden Tendenz. Allgemein liegen die Abdampfrückstände des Testliners über denen der Zeitung. Die Eiweiß- und Kohlenhydratproben sanken im Verlauf der Lagerung weniger stark, als die Blank- und Fettproben, charakterisiert besonders am Testliner. Die Eiweißproben entwickelten sich beim Testliner von 78,49 über 61,13 zu 41,7 mg/g Faserstoff und bei der Zeitung von 43,06 zu 34,13 auf 22,16 mg/g Faserstoff. Beim Testliner zeigte der Blank folgenden Verlauf: 67,99 zu 61,6 auf einen Endwert von 10,28 mg/g Faserstoff. Der durchschnittlich zweithöchste Abdampfrückstand bei der Zeitung war nicht der Blank, sondern die Kohlenhydratmischung mit der einzigen ansteigenden Tendenz. Dies startete bei 24,29 sank zur Mitte auf 15,68 ab, um zum Lagerungsende auf 25,81 mg/g Faserstoff anzusteigen. Der Verlauf vom Kohlenhydrat beim Testliner ging von 51,91 über 43,88 auf 26,4 mg/g Faserstoff. Die Dynamik vom Blankwert der Zeitung verlief von 14,7 über 16,69 auf -6,77 mg/g Faserstoff. Die Verringerung des Messwertes von Tag 10 in den negativen Bereich, erklärt sich durch die Berechnung. Da der Abdampfrückstand des Verdünnungswassers, vom Rückstand des untersuchten Mediums abgezogen wird, können negative Ergebnisse entstehen, wenn der Abdampfrückstand

des Verdünnungswassers höher ist als der des untersuchten Mediums. Gleiches Phänomen zeigt sich bei der Fettprobe der Zeitung, welche von 2,33 auf 4,87 zu -11,31 mg/g Faserstoff absankte. Die Fettmischung des Testliners begann bei 53,66, sank geringfügig auf 49,99, um an Tag 10 einen Wert von 6,11 mg/g Faserstoff zu erreichen. Die vollständigen Messwerttabellen sind im Anhang [B: Messwerte](#) in [Abbildung B.3](#) und [B.4](#) enthalten.

6 Diskussion

6.1 Die Rolle der Restentleerbarkeit als grundlegender Störfaktor für den Eintrag von Lebensmitteln in den Altpapierkreislauf

Die Kennwerte der Restanhaftung von Lebensmitteln am Food-Container geben an, wie viel des Lebensmittels nach der Restentleerung noch in der Verpackung verbleibt. Je höher die Restanhaftung, desto ineffizienter ist die Verpackung und desto mehr Lebensmittel gehen in den Altpapierkreislauf über. Aus den generierten Daten lässt sich ablesen, dass Kartoffelpüree die höchste Restanhaftung von allen Lebensmitteln aufweist, während Wasser die geringste Restanhaftung erzeugte.

Der Median zeigt den mittleren Wert, der von der Hälfte der Stichprobe überschritten und von der anderen Hälfte unterschritten wird. Das arithmetrische Mittel und der Median der meisten Lebensmittel weisen keine großen Unterschiede auf. Beim Magerquark liegt der Median mit 0,377 g unter dem arithmetrischen Mittel, was bedeutet, dass es höher ausfallende Ausreißer gibt, welche die Streuung um den Mittelwert beeinflussen. Dieses Phänomen wird auch durch die Standardabweichung bekräftigt, welche für Magerquark mit 1,276 g am höchsten ausfällt. Und auch der Interquartilsabstand (IQR) von 2,183 g spricht für eine größere Streuung des Magerquarks. Dies ist erklärbar durch die Homogenität von Magerquark, welche durch die teilweise Trennung von Wasser und festen Quarkbestandteilen beeinflusst wird. Im Laufe der Zeit bilden sich durch diesen natürlichen Prozess dick- und dünnflüssige Bereiche innerhalb des Quarks. Die Messung der dynamischen Viskosität bekräftigt dies, da auch hier die Werte am meisten zur Trendlinie abweichen. Zur Bestimmung der Konstanten der Fließgleichungen wurden die logarithmierten Werte in ein Koordinatensystem linear aufgetragen, erkennbar im Anhang B.1. Das Bestimmtheitsmaß von Quark ist auch hier am geringsten.

Der Anteil der Restanhaftung bezogen auf das lufttrockene Gewicht der Verpackung ist für Kartoffelpüree am höchsten, gefolgt vom Magerquark, Joghurt, Milcheis und Wasser. Dies bedeutet, dass Kartoffelpüree am ineffizientesten in Bezug auf die Restentleerung des Food Containers ist und mehr Lebensmittel in den Altpapierkreislauf eingetragen wird, als die eigentliche Verpackungsmasse. Der berechnete Anteil ermöglicht den Vergleich von unterschiedlichen restentleerten Verpackungen. Insgesamt zeigen die Kennwerte, dass es erhebliche Unterschiede bei der Restanhaftung von Lebensmitteln am Food-Container gibt. Welche maßgeblich von rheologischen Eigenschaften, wie der dynamischen Viskosität, abhängig sind. Je höher diese ist, desto mehr Restanhaftung entsteht durch die Restentleerung.

Das methodische Restentleerungsverfahren, angelehnt an DIN EN ISO 15750-2 Anhang B, eignet sich zur Durchführung für faser-basierte Verpackungsprodukte mit entsprechenden Anpassungen. Diese beziehen sich auf die Entleerung von Speisen, welche vorzugsweise mit Besteck verzehrt werden. Für Getränke ist das Verfahren gut nutzbar, der Haltevorgang beim Entleeren bedarf einer kleinen Anpassung. Ein Zeitfenster von 5 bis 10 Sekunden, sollte die optimale Dauer des Haltevorganges darstellen, für Getränke in paper cups.

6.2 Nährstoffbedingte Unterschiede im mikrobiellen Wachstum der Altpapier-Lagerung

Unter den durchgeführten Temperaturbedingungen repräsentiert die Simulation, eine Altpapier-Lagerung unter sommerlichen Bedingungen. Die Ergebnisse der Lagerungs-Simulation zeigen ein klares Bild bezüglich der Makronährstoffe. Die Eiweißproben zeigten die größten bakteriellen und mykotischen Belastungen. Die Analyse der organischen Säuren bestätigt indirekt eine hohe mikrobielle Aktivität bei Eiweiß, da hier die Werte am höchsten ausfielen. Mit der Annahme, dass organische Säuren durch metabolische Prozesse gebildet werden, lässt sich schlussfolgern, dass erhöhte mikrobielle Aktivität, mit einem Anstieg an organischen Säuren einhergeht. Beim Eiweiß ist dies an beiden Papieren erkennbar, die Kohlenhydratbelastungen liegen knapp darunter. Sowohl im Grad der Kontamination, als auch in der Entwicklung organischer Säuren. Dort zeigte sich beim Testliner zwar eine anfänglich starke Entwicklung, im Vergleich zum Eiweiß. Dennoch erzielte die Eiweißprobe am letzten Tag, höhere Belastungen als am Kohlenhydrat. Da Mikroorganismen ihren Stoffwechsel an effektiv-verwertbares Substrat anpassen, kann es beim Kohlenhydrat zu der rapiden Entwicklung zu Beginn der Lagerung gekommen sein. Da die enthaltene Stärke ein solches Substrat darstellen kann. Generell ist das Phänomen der Diauxie, besonders bei solch einer Lagerungs-Simulation unter unterschiedlichen Substraten, nicht zu vernachlässigen. So lassen sich auch die Kurven der organischen Säuren vom Fett erklären, welche eine Stagnation verzeichneten. Die Mikroben bewachsen als Erstes die Faserbereiche, da dort eine gute Wasserverfügbarkeit herrscht. In der Zeit produzieren sie organische Säuren. Nach einer gewissen Zeit sind diese Bereiche bewachsen und die Mikroorganismen sind gezwungen den Teil des Fettes zu bewachsen und zu verwerten. Dafür werden enzymatische Anpassungen vorgenommen, bei welchen sich das Wachstum verlangsamt. Da der Metabolismus umgestellt wird, kommt es zu einer Verzögerung in der Bildung von organischen Säuren. Das Absinken beim Blank des Testliners zu Lagerungsbeginn ist auch so erklärbar, da es hier vermutlich zu einem Abbau der organischen Säuren kam, welche aus der Ausgangsbelastung stammen. Generell bekräftigt die Lagerungsdynamik der organischen Säuren die Entwicklung mikrobieller Kontamination. Proben mit hohen Ergebnissen in der KBE-Bestimmung, erzielten auch größere Belastungen an organischen Säuren. Dennoch ist hier zu betonen, dass die Bildung organischer Säuren

dynamisch verläuft. Eine weitere Verwertung dieser ist nicht auszuschließen. Die Probenmischungen des Blank und des Fettes, zeigten sowohl in ihrer mikrobiologischen Belastung, als auch in der Bildung organischer Säuren geringere Belastungen als am Eiweiß und Kohlenhydrat. Im Vergleich der Papiere zeigte der Testliner leicht höhere Anzahlen an KBE, dennoch liegen die Werte in einem ähnlichen Bereich, weshalb nicht von einem signifikanten Unterschied ausgegangen werden kann. Die Zeitung zeigte eine rapide Entwicklung von Tag 3 zu Tag 5, wohingegen der Testliner ein ausgeglichenes Wachstum im Lagerungsverlauf zeigte. Der Grund dafür stützt folgende Vermutung: Der Testliner ist ein dickeres und raueres Papier als die Zeitung, folglich können die Lebensmittel besser in den Testliner eindringen, als dies bei der Zeitung der Fall ist. Daher kann ein Teil der Nährstoffe im Testliner gebunden werden, wodurch es zum ausgeglichenen Wachstum kommt. Die Nährstoffe können in die Zeitung schwerer einziehen und liegen daher weniger gebunden vor. Für die Mikroben ist der Teil des Lebensmittels besser zugänglich, wodurch die starke Entwicklung zu Beginn der Lagerung erklärt werden kann.

Die mykotische Keimentwicklung zeigt ebenfalls für Eiweiß die höchsten Belastungen. Der Extremwert bei der Zeitung an Tag 5 und das anschließende Einbrechen des Wachstums ist auffällig. Aus methodischer Sicht lässt sich dies gut an der Verdünnungsproblematik erklären. Für jede Probe wurde eine Doppelbestimmung mit zwei verschiedenen Verdünnungen durchgeführt. Aufgrund der Entwicklung, war es schwierig die geeigneten Verdünnungsstufen zur KBE-Bestimmung auszuwählen. Der hohe Wert kommt dadurch zustande, dass eine sehr hohe Verdünnung gewählt wurde, wobei die Anzahl an KBE's sehr gering ausfiel. Aufgrund dieser Tatsache, sollten die Ergebnisse der KBE-Bestimmungen, unter Betrachtung ihrer statistischen Ungenauigkeit, interpretiert werden. Die Daten unterliegen den methodischen Grenzen und zeigen einen Trend zwischen den Makronährstoffen auf. Da die mykotischen KBE-Werte vom Testliner an Tag 10 stark beisammen liegen, gilt auch hier die Schlussfolgerung einer zu hoch gewählten Verdünnung. Insgesamt zeigten die Kohlenhydratmischungen weniger starke Belastung an Pilzen. Unter diesem Milieu entwickelten sich bevorzugt Bakterien.

Auch am pH-Wert sind Unterschiede festzustellen, welche die Einstufung nach Makronährstoffen leicht unterstützen. Dies ist zum einen der geringe pH-Wert der Eiweißproben, sowie leicht geringere pH-Werte des Kohlenhydrats im Vergleich zum Blank und Fett. Dennoch beeinflusst der Eintrag vom Lebensmittel mehr den pH-Wert, als die mikrobielle Aktivität. Da anhand der Diagramme 5.6 und 5.7 keine deutliche Veränderung im Verlauf der Lagerung erkennbar sind. Dennoch konnte indirekt nachgewiesen werden, dass es zu einer Absenkung des pH-Wertes kam. Denn die Bildung organischer Säuren, geht mit einer Versauerung einher, was im Diagramm B.2 deutlich wird, befindlich im Anhang B: Messwerte. Unterschiede in Faserstoffsuspension und Filtrat wurden nur beim Testliner deutlich, wo die Werte des Filtrats allgemein unter denen des Faserstoffes lagen. Anscheinend werden einige gelöste Substanzen von der Faser zurückgehalten und gehen nicht ins Filtrat über.

Um eine abwasserspezifische Bewertung vorzunehmen, wurde der Biodegradabilitiy Index (BI) aus BSB_5 und CSB berechnet. Dieser ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit der verschiedenen Proben. Außerdem kann mit dem chemischen Sauerstoffbedarf beurteilt werden, welche Nährstoffe eine hohe Beladung der wässrigen Phase verursachen. An der Zeitung zeigen sich die Nährstoffe Kohlenhydrat und Eiweiß am problematischsten. Beim Testliner lagen die Gesamtbelastungen alle in einem ähnlichen Niveau, über dem der Zeitung. Besonders auffällig ist hier die Entwicklung beim Fett. Zum einen steigt hier der CSB während der Lagerung stark an und auch der BI verläuft steigend. Gleiches ist auch bei der Zeitung mit Fett erkennbar, nur in geringerem Ausmaß als beim Testliner. Da das hydrophobe Fett nicht wasserlöslich ist, verwundert es nicht, dass die anfänglichen Belastungen nur geringfügig über dem der Blankwerte lagen. Der starke Anstieg kann auch auf eine mikrobielle Aktivität hindeuten, wenn das Fett verstoffwechselt wird und dabei wasserlösliche oder emulgierte Bestandteile freigesetzt werden. Der Anstieg des BI wäre mit dieser Erklärung obligatorisch, da die freigesetzten Verbindungen mikrobiologischer Herkunft, auch durch die Methode des BSB besser erfasst werden. Generell zeigte sich an den meisten Mischungen ein steigender Trend des BI, was klar für eine mikrobielle Aktivität steht. Am Testliner zeigte sich der Anstieg für alle Proben ähnlich, bis zu einem BI um die 0,5. Bei der Zeitung hingegen unterscheiden sich die Nährstoffe im BI deutlicher. Hier zeigte das Eiweiß einen Anstieg des BI von 0,3 bis auf 0,74, was für eine starke mikrobiologische Aktivität steht. Der BI am Kohlenhydrat zeigt sich schwankend, dennoch mit einem deutlichen Anstieg. Die Entwicklungen des BI beim Blank und Fett zeigten sich weniger ausgeprägt. Der Anstieg begründet eine mikrobielle Verstoffwechselung, dennoch ist am Ausmaß erkennbar, dass die Blank- und Fettproben davon weniger stark betroffen waren, als die Eiweiß- und Kohlenhydratproben.

Bei Betrachtung der Dynamik des Abdampfdruckstandes ist klar ein abnehmender Trend erkennbar. Auch dieser Parameter zeigt, dass der Testliner größere Belastung aufweist, als die Zeitung. Außerdem ist auch hier eine deutliche Unterscheidung der Nährstoffe möglich, welche sich dem allgemeinen Bild anschließen. Die Eiweißproben mit den höchsten Werten, gefolgt vom Kohlenhydrat. Am Testliner zeigte sich die Kohlenhydratmischung geringer als beim Blank, genauso wie dies beim chemischen Sauerstoffbedarf auffällig ist. Generell zeigen die Fett- und Blankproben auch hier geringere Belastungen. Ein limitierender Faktor für biologische Systeme ist die Verfügbarkeit von Wasser. Als Lösungsmittel dient es auch der Zuführung von essentiellen chemischen Verbindungen, sowie dem Abtransport von Kataboliten. Somit unterliegt der Abdampfdruckstand auch einer Dynamik, hervorgerufen durch die mikrobielle Aktivität. Im Falle der untersuchten Lagerungs-Simulation, zeigte sich eine fallende Kurve, außer bei der Zeitung mit Kohlenhydrat. Somit kann die Abnahme damit begründet werden, dass im Wasser gelöste Stoffe von den Mikroben aufgenommen werden. Und der leichte Anstieg bei der Zeitungs-Kohlenhydrat-Mischung, mit einer vermehrten Freisetzung von Kataboliten in Verbindung gebracht werden kann. Die elektrische Leitfähigkeit kann indirekt mit dem Abdampfdruckstand in Zusammenhang gebracht werden. Auch diese Messung

zeigten an einigen Mischung den abnehmenden Trend. Bei den Blankproben und der Fettprobe sind Absenkungen des EC erkennbar, auch am Kohlenhydrat beim Testliner. Die Zeitung-Kohlenhydratmischung sticht auch hier mit einem Anstieg des EC hervor und stimmt mit dem Ergebnis des steigenden Abdampfdruckstandes überein. Bei den Eiweißproben zeigte sich eine steigende elektrische Leitfähigkeit, in Verbindung mit einem sinkenden Abdampfdruckstand. Erklärbar ist dies auch durch die Dynamik der mikrobiellen Prozesse. Auch bei den Eiweißproben, werden die gelösten Stoffe der Ausgangsbelastung genutzt, daher kommt es zur Senkung des Abdampfdruckstandes. Zeitgleich werden stark leitfähige Metaboliten in die wässrige Phase abgegeben, was zwar den EC-Wert erhöht, aber keine Steigung im Abdampfdruckstand verursacht. Allgemein lag die Leitfähigkeit des Filtrates höher, als die der Faserstoffsuspension. Der Stromfluss kann durch enthaltene Fasern geschwächt werden. Die systematisch höher liegenden EC-Werte des Filtrats an Tag 3 bei Eiweiß und Kohlenhydrat können dafür stehen, dass Substanzen mit der Faser verbunden vorliegen, welche im Laufe der Zeit abgebaut werden.



Abbildung 6.1: Papierstapel der Zeitung mit Eiweiß an Tag 10

Das abschließende Untersuchungsbild der Lagerung von Altpapier mit den Makronährstoffen Eiweiß, Kohlenhydrat und Fett, lässt folgende Schlüsse zu. Eiweiß geht aus der Simulation, als kritischster Makronährstoff hervor. Mehrere Parameter zeigen darauf hin, wie die Keimbelastung an Bakterien und Pilzen, dem Gehalt an organischen Säuren und der damit verbundenen leichten Versauerung des Milieus, sowie dem Abdampfdruckstand. Beispielhaft ist der Papierstapel, der Zeitung mit Eiweiß an Tag 10, in Abbildung 6.1 dargestellt. Gründe dafür können zum einen ein hoher Wassergehalt

sein, genauso wie beim Kohlenhydrat. Das Fett beinhaltet annähernd kein Wasser, was ein Grund für die eingeschränkte mikrobielle Aktivität sein kann. Die hohe mykotische Belastung am Eiweiß, kann durch einen pH-Wert im sauren Bereich gefördert werden. Da Milchprodukte, wie der Magerquark, allgemein saure Lebensmittel darstellen, kann dies damit erklärt werden. Auch der pH-Wert der Eiweißproben spricht für diesen Einfluss. Die Ansätze mit Lebensmittel liegen allgemein über den der Blankwerte, dafür ist hohe organische Beladung der Lebensmittel verantwortlich. Dennoch sollten die Ergebnisse immer mit Blick auf das Mischungsverhältnis an Papier und Lebensmittel, von 70:30, beachtet werden. Aus den Ergebnissen lassen sich besonders ausschlaggebende Umweltfaktoren herleiten. Dazu zählt primär der Wassergehalt des Lebensmittels. Welcher im Laufe der Altpapierlagerung unter freiem Himmel, Änderungen unterworfen ist. Die Ergebnisse des Biodegradability Index geben einen leicht steigenden Trend über die Lagerung vor, dennoch können die Daten aufgrund der Messunsicherheit des BSB₅ natürlichen Schwankungen unterliegen. Um diesen Trend zu bestätigen, sind weitere Untersuchungen notwendig. Auch die Ergebnisse der KBE-Zählungen unterliegen einer statistischen Ungenauigkeit, aufgrund der zwei Verdünnungsstufen je Probe. Um genauere Unterscheidungen zwischen den Makronährstoffen zu treffen, sollten die Zählung von größeren Verdünnungsreihen angestrebt werden, um die Genauigkeit der KBE-Bestimmung zu erhöhen. Daher zeigen auch hier die Ergebnisse nur einen allgemeinen Trend unter den gewählten Bedingungen.

7 Ausblick

Die Papierindustrie ist derzeit einer großen Transformation unterworfen. Umweltschutz und Nachhaltigkeit spielen im aktuellen Zeitgeschehen eine große politische, gesellschaftliche und auch persönliche Rolle. Um Umweltschutz und nachhaltiges Wirtschaften zu gewährleisten, ist es notwendig, verschiedene neue Ansätze zu entwickeln und zu validieren. Die Papierindustrie ist für diese Bestreben ein gutes Beispiel, mit einem großen Potential an Entwicklung. Zum einen ist sie eine der rohstoff-, energie- und kapitalintensiven Industrien, welche die Umwelt belasten kann. Andererseits ist Papier ein sehr nachhaltiges Produkt, wenn es dementsprechend entwickelt und genutzt wird. Daher verändert sich die Papiernutzung, von Artikeln wie Printmedien und Speichermedium für Informationen, hin zu einem vielfältigeren Einsatzgebiet. Dazu zählt besonders die Verwendung als Verpackungsmaterial (Confederation of European Paper Industries, 2022; Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE, 2021).

Bezogen auf die Restentleerbarkeit sollte dennoch angestrebt werden, eine lebensmittel-spezifische Methode zu entwickeln, besonders mit Hinblick auf verschiedene Lebensmittelprodukte und deren Nutzung. Denn es müssen auch dazugehörige Konsumerscheineungen beachtet werden, dazu gehören Zubereitungshinweise, wie beispielsweise in der Mikrowelle. Generell der Unterschied heißer und kalter Speisen stellt eine weitere Unterscheidung dar. Es sollte eine differenziertere Betrachtung von Restanhaftung und deren Einfluss geschehen, somit können auch spezifische Entsorgungswege beschrieben werden. Mit Entwicklung einer solchen Methode, ist es möglich ein weiteres Kriterium zur Recyclingbewertung zu integrieren. Somit können umfassendere und spezifische Bewertung vorgenommen werden, was zu einem noch effektiveren Recycling beitragen soll. Auch Produktentwicklung können von solchen Erkenntnissen profitieren.

Bezüglich der Mikrobiologie im Altpapier, sollten folgende Forschungen weiter vertieft werden, um ein umfassenderes Bild des Mikrokosmos zu erhalten. Die gewählte Unterscheidung in Bakterien und Pilzen gilt es, mit weiteren Anzuchtmethoden und unterschiedlichen Nährmedien, weiter zu ergründen. Ein weiterer Untersuchungsansatz sollte sich auf die mikrobielle Analyse von faser-basierten Verpackungen mit Beschichtungen richten und welchen Einfluss die Beschichtung dabei nimm. Der in der Arbeit dargestellte Teil stellt nur einen Auszug der unter realen Bedingungen vorzufindenden Mikroorganismen dar. Abbildung 7.1 und 6.1 stehen dafür beispielhaft. Am Testliner mit Kohlenhydrat sind rote und bräunlich bis grünliche Verfärbung erkennbar. Der Schimmelpilzbefall an der Zeitung mit Eiweiß zeigt ein weiteres Bild von möglichen Kontaminationen. Diese Vielfältigkeit an mikrobiellen Lebensformen abzudecken, bedarf der tieferen Bearbeitung. Das Anlegen einer papier-spezifischen Stammsammlung an Mikroben kann für bestimmte Zwecke erörtert werden. Aus wissenschaftlicher Hinsicht

macht dies mehr Sinn, als für Papierhersteller. In Papierfabriken macht die Anwendung von Online-Systemen den Unterschied, beim Reagieren auf Prozessprobleme. Daher sollte auch hier die Entwicklung weiter vorangetrieben werden, um bestimmte Messsysteme zu verbessern oder zu etablieren. Dazu zählen Adenosintriphosphat-Messungen, die Durchflusssyztometrie und die in-situ-Hybridisierung.



Abbildung 7.1: Papierstapel des Testliners mit Kohlenhydrat an Tag 10

Der politische und gesellschaftliche Wille ist vorhanden. Neue Technologien ermöglichen auch eine wirtschaftliche Machbarkeit. Die Entwicklung sollte dahin gehend vorangetrieben werden, die Papierbeschichtungen aus Stoffen herzustellen, welche keine Belastung für den Recyclingkreislauf darstellen. Wie beispielsweise die PE-Beschichtungen von Heißpapierbechern, welche ein Recycling in großen Maße erschweren (Chen et al., 2022). Auch die mikrobiologische Betrachtung von faser-basierten Verpackungen ist hierbei ein Thema von Bedeutung. Es gilt heraus zu finden, in welchem Maße Beschichtungen, die mikrobielle Aktivität beeinflussen. Dies ist für alle Beteiligten von Vorteil, auch im Bereich der Lebensmittelsicherheit. Außerdem kommt es zur Schonung der Umwelt, wovon die ganze Menschheitsfamilie etwas hat. Papierhersteller könnten ihre Umsätze weiter steigern, durch den vermehrten Kauf von nachhaltigen Produkten und die Bereitschaft des Endkunden, dafür mehr zu bezahlen. Die Politik kann dieses Thema nutzen, um Wählerstimmen für sich zu gewinnen. Der in die Zukunft gerichtete Blick, ist vielversprechend, aber auch mit kostenintensiver Forschung und Entwicklung verbunden. Daher ist es unerlässlich, die Thematik der Papierherstellung weiter voranzutreiben, obwohl sie die Menschheit schon seit Beginn unserer Zeitrechnung begleitet.

8 Zusammenfassung

Die Papierherstellung findet seit dem Jahr 105 offiziell statt (Naujock und Blechschmidt, 2021). Bis heute hat sich die Art des Herstellungsprozesses nicht verändert. Die Dimensionen haben sich zwar vergrößert, dennoch sind die Prinzipien die Gleichen. Diese beginnen mit dem Holzaufschluss und der Faserstoffherzeugung, welche aus dem Rohstoff Holz geschieht. Dies steht am Anfang der Wertschöpfungskette von Papier. Aber nicht Holz ist mengenmäßig der wichtigste Rohstoff der deutschen Papierindustrie, sondern Altpapier. Dieses wird von Altpapierentsorgern gesammelt, aufbereitet, sortiert, gelagert und an Papierfabriken weiterverkauft. Aus diesen beiden Rohstoffen entsteht eine Faserstoff-Suspension, welche dementsprechend aus Primär- und Sekundärfasern besteht. Aufgrund der Tatsache, dass Papier ein ubiquitär genutztes Produkt ist, haben politische und wirtschaftliche Bestrebungen zu verschiedenen rechtlichen Grundlagen und Normen geführt. In Deutschland sind besonders zwei Gesetze hervorzuheben, zum einen das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und das Verpackungsgesetz (VerpackG). Das KrWG soll zur Schonung natürlicher Ressourcen führen und die Kreislaufwirtschaft fördern. Das VerpackG regelt verschiedene Anforderungen an Verpackungen. Diese Anforderungen sollen alle Verpackungen erfüllen, besonders Lebensmittelverpackungen müssen spezifische Sicherheitskriterien erfüllen. Dazu werden verschiedene Arten an Papier genutzt, welche für den Lebensmittelkontakt besonders gut geeignet sind. Dazu zählen Kraftpapier, Sulfitpapier, Pergamentpapier, Pergamin, Wachspapier und Papierlamine (Raheem, 2013; Marsh und Bugusu, 2007; Deshwal, Panjagari und Alam, 2019). Bei der Altpapierentsorgung treffen Mikroorganismen auf organische Nährstoffe, welche ein mikrobielles Wachstum bedingen. Dies führt zum Qualitätsverlust des Altpapiers, es werden einige Eigenschaftskennwerte der Fasern verändert (Blechschmidt (Hrsg.), 2011). Gelangt dieses verkeimte Altpapier nun zu einer Papierfabrik, können die Probleme weiter expandieren. Es entwickelt sich bestimmte flüchtige Verbindungen, welche zu starken Geruchsbelästigungen führen (Jung und Dietz, 2005; Simstich, Öller und Hamm, 2007). Biofouling und Betonkorrosion sind weitere entstehende Probleme, welche nur mit immensem Kostenaufwand beseitigt werden können (Faber und Nemitz, 2008). Um diese Probleme möglichst gering zu halten, ist es notwendig, am Beginn der Verpackungsherstellung anzusetzen.

Mit vorliegender Arbeit wurde ein Teil der Problematik von Lebensmittelanhaftungen im Altpapierkreislauf näher untersucht. Der Fokus lag auf der Unterscheidung von Makronährstoffen. Sekundär wurde die Restentleerung von einer faser-basierten Verpackung, für ein worst-case-Szenario untersucht. Wasser, Milcheis-Vanille, fettarmer Joghurt, Magerquark und Kartoffelpüree wurden dabei zur Entleerung verwendet. Für die Lagerung sollten die Lebensmittel Magerquark, Kartoffelpüree und festes Palm-Raps-Fett die entsprechenden Makronährstoffe simulieren. Die Restentleerung, durchgeführt in Anlehnung an DIN EN ISO 15750-2, ergab für das Kartoffelpüree die höchste Masse an Restanhaftung, gefolgt von Magerquark, Joghurt fettarm, Milcheis-Vanille und Leitungswasser. Durch die Ermittlung der dynamischen Viskosität, wird aufgezeigt, umso höher die dynamische Viskosität fließfähige Lebensmittel ist, desto größer fällt die Masse an Restanhaftung aus.

Die mikrobiologische Lagerungs-Simulation von Altpapier unter den Makronährstoffen, wurde durch KBE-Bestimmungen, angelehnt an DIN ISO 8784-1, analysiert. Außerdem wurden die wässrige Phase in Form einer Filtrat-Analyse untersucht. Ein herausstechendes Bild zeigen die Kontaminationen am Eiweiß. Welche die höchsten Keimbelastungen im bakteriellen und mykotischen Bereich aufweisen. Diese Belastungen konnten in der wässrigen Phase weiter nachgewiesen werden. Die Eiweißproben zeigten die höchsten Abdampfrückstände. Auch der Anteil an gebildeten organischen Säuren zeigte sich beim Eiweiß am ausgeprägtesten, verbunden damit zeigte sich die pH-Werte im sauersten Bereich. Ein weiterer kritischer Nährstoff stellt Kohlenhydrat dar, bei diesem zeigten sich die zweitstärkste Belastungen an mikrobieller Aktivität. Die Fettproben schwanken um die Werte des Blanks. Somit zeigt sich das Fett weniger belastet. Mit Blick auf die Nährwertangaben der Lebensmittel, kann man anhand des Wassergehaltes, folgendes rückschließen. Dass der niedrige Wassergehalt im Fett, für eine eingeschränkte Entwicklung gesorgt hat. Die Lebensmittel Magerquark und Kartoffelpüree beinhalten mehr Wasser, es sind Nährstoffe darin verfügbar und das Wachstum wurde gefördert.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Restentleerbarkeit von faser-basierten Verpackungen, als Kriterium zur Recyclingbewertung herangezogen werden kann, unter Beachtung lebensmittel-spezifischer Eigenschaften. In Kombination mit einer weiteren Lebensmittelanalyse können die Werte zum Clustering spezifischer Störmerkmale genutzt werden. Zusammenfassend lassen sich die Makronährstoffe wie folgt beurteilen: Das größte Potential an mikrobiologischer Entwicklungsfähigkeit zeigte sich am Eiweiß, gefolgt von Kohlenhydrat und Fett.

9 Summary

Paper manufacturing has officially taken place since the year 105 (Naujock und Blechschmidt, 2021). To this day, the nature of the manufacturing process has not changed. The dimensions have increased, but still the principles are the same. These start with wood pulping and fiber production, which is done from the raw material wood. This is at the beginning of the paper value chain. However, wood is not the most important raw material for the German paper industry in terms of volume, but recovered paper. This is collected, processed, sorted, stored and sold on to paper mills by waste paper disposal companies. These two raw materials produce a pulp suspension, which accordingly consists of primary and secondary fibers. Due to the fact that paper is a commonly used product, political and economic efforts have led to various legal foundations and standards. In Germany, two laws are particularly worthy of mention: the Recycling Management Act (KrWG) and the Packaging Act (VerpackG). The KrWG is intended to lead to the conservation of natural resources and promote the circular economy. The VerpackG regulates various requirements for packaging. These requirements are to be met by all packaging, and food packaging in particular must meet specific safety criteria. For this purpose, various types of paper are used which are particularly suitable for food contact. These include kraft paper, sulfite paper, parchment paper, glassine, wax paper and paper laminates (Raheem, 2013; Marsh und Bugusu, 2007; Deshwal, Panjagari und Alam, 2019). During waste paper disposal, microorganisms encounter organic nutrients which cause microbial growth. This leads to the loss of quality of the waste paper, some property characteristics of the fibers are changed (Blechs Schmidt (Hrsg.), 2011). If this contaminated waste paper now reaches a paper mill, the problems can expand further. It develops certain volatile compounds, which lead to strong odors (Jung und Dietz, 2005; Simstich, Öller und Hamm, 2007). Biofouling and concrete corrosion are further emerging problems, which can only be eliminated at immense cost (Faber und Nemitz, 2008). To minimize these problems, it is necessary to start at the beginning of the packaging production.

The present work investigated in more detail one part of the problem of foodstuff adhesion in the recycling paper cycle. The focus was on the differentiation of macronutrients. Secondly, the residual discharge from a fiber-based package, for a worst-case scenario, was investigated. Water, milk ice cream vanilla, low-fat yogurt, low-fat cottage cheese and mashed potatoes were used for draining. For storage, the foods lean curd, mashed potatoes and solid palm canola fat were to simulate the corresponding macronutrients. Residue depletion, carried out in accordance with DIN EN ISO 15750-2, showed the highest mass of residue adhesion for the mashed potato, followed by low-fat cottage cheese, low-fat yogurt, milk ice cream vanilla and tap water. By determining the dynamic viscosity, it is shown that the higher the dynamic viscosity of flowable foods, the greater the mass of residual adhesion.

The microbiological storage simulation of recycling paper under the macronutrients, was analyzed by CFU determinations, based on DIN ISO 8784-1. In addition, the aqueous phase was examined in the form of a filtrate analysis. A striking picture is shown by the contaminations at the protein. These show the highest bacterial and mycotic contamination levels. These contaminations could be further detected in the aqueous phase. The protein samples showed the highest evaporation residues. The proportion of organic acids formed was also most pronounced in the case of protein, associated with pH values in the most acidic range. Another critical nutrient is carbohydrate, which showed the second highest levels of microbial activity. The fat samples fluctuate around the values of the blank. Thus, fat shows to be less contaminated. With regard to the nutritional value of the food, the following conclusions can be drawn on the basis of the water content. That the low water content in the fat, for a limited development provided. The foods lean curd and mashed potatoes contain more water, nutrients are available in it and the growth was promoted.

From the investigations it emerges that the residual dischargeability of fiber-based packaging, can be used as a criterion for recycling evaluation, taking into account food-specific properties. In combination with further food analysis, the values can be used for clustering specific interfering characteristics. In summary, the macronutrients can be assessed as follows: Protein showed the greatest potential for microbiological evolvability, followed by carbohydrate and fat.

Anhang A: Methodik

Der Abdampfrückstand (AR) wird wie folgt berechnet:

$$\text{AR Filtrat} \left(\frac{\text{g Rückstand}}{\text{g Filtrat}} \right) = \frac{m_3 (\text{g}) - m_1 (\text{g})}{m_2 (\text{g})}$$

$$\text{AR Probe} \left(\frac{\text{g Rückstand}}{\text{g Filtrat}} \right) =$$

$$\text{AR Filtrat} \left(\frac{\text{g}}{\text{g}} \right) - \text{AR Leitungswasser} \left(\frac{\text{g}}{\text{g}} \right)$$

m_1 = Leermasse der Aluschale

m_2 = Masse Filtrat

m_3 = Masse Schale inkl. Rückstand

Daher wird der Abdampfrückstand in g Rückstand/kg Analysematerial wie folgt berechnet:

$$\frac{\text{AR Probe} \left(\frac{\text{g}}{\text{g}} \right)}{\text{Material Konsistenz} \left(\frac{\text{g}}{\text{g}} \right)} = \text{AR Probe} \left(\frac{\text{l}}{\text{g}} \right)$$

$$\text{AR Probe} \left(\frac{\text{l}}{\text{g}} \right) = \text{AR Probe} \left(\frac{\text{kg}}{\text{g}} \right)$$

$$\text{AR Probe} \left(\frac{\text{kg}}{\text{g}} \right) \times 1.000.000 =$$

$$\text{AR Probe} \left(\frac{\text{g Rückstand}}{\text{kg Analysematerial}} \right)$$

Schließlich wird der Abdampfrückstand in Prozent wie folgt berechnet:

$$\text{AR Probe} \left(\frac{\text{g Rückstand}}{\text{kg Analysematerial}} \right) \div 1.000 =$$

Abbildung A.1: Berechnung des Abdampfrückstandes nach Methode PTS-RH 025:2022

Die Gesamtkeimzahl bzw. die Sporenzahl wird nach Gleichung (1) als N_{rec} je Gramm Probe (im Anlieferungszustand) berechnet:

$$N_{\text{rec}} = n \cdot V \cdot f / (v \cdot m) \quad (1)$$

Dabei ist

- N_{rec} die Gesamtkeimzahl bzw. Sporenzahl, in KBE je Gramm Probe (im Anlieferungszustand);
- n die Gesamtanzahl von Kolonien auf den 5 entsprechenden Petrischalen, in KBE;
- f der Verdünnungsfaktor (wenn keine Verdünnung erfolgt, ist der Faktor 1);
- V das Volumen des desintegrierten Untersuchungsmaterials (8.4), in Milliliter;
- v das Volumen der ausplattierten Fasersuspension (hier 10 ml oder 50 ml), in Milliliter;
- m die Masse des Untersuchungsmaterials (8.3), das zu Herstellung der Fasersuspension verwendet wurde, in Gramm.

Abbildung A.2: Berechnung der Gesamtkeimzahl in KBE nach DIN ISO 8784-1

LCK 514

Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)

DOC312.72.94026

100–2000 mg/L O₂

LCK 514

Umfang und Anwendung: Für Abwasser und Prozessanalytik.

Testvorbereitung

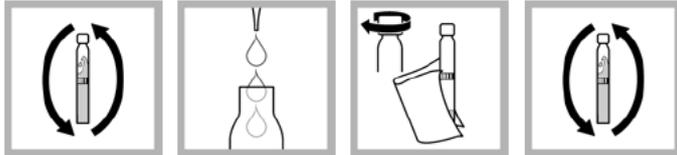
Testlagerung

Lagerungstemperatur: 15–25 °C (59–77 °F)
 Hinweis: Für eine optimale Stabilität der Reagenzien bis zum Ablauf der Haltbarkeit wird empfohlen den Küvetten-Test im Kühlschrank zu lagern.
 Lichtgeschützt aufbewahren.

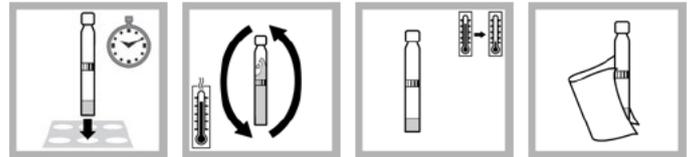
Vor dem Start

Im Vergleich zum klassischen CSB Küvetten-Test (CSB classic) zeichnet sich der HT-CSB durch eine höhere Aufschluss-temperatur und kürzere Aufschlusszeit aus.
 Für die Praxis wird der Vergleich mit dem CSB classic empfohlen, um sicherzustellen, dass der HT-CSB für die eigenen Proben vergleichbare Ergebnisse zur Norm liefert.
 Beachten Sie die Sicherheitshinweise und das Verfallsdatum auf der Verpackung.
 Lesen Sie die Sicherheitsdatenblätter (SDB) für die verwendeten chemischen Stoffe. Verwenden Sie die empfohlene persönliche Schutzausrüstung.
 Entsorgen Sie ausreagierte Lösungen gemäß lokaler, landes- und bundesrechtlicher Vorschriften. Entsorgungsinformationen für nicht verwendete Reagenzien finden Sie in den Sicherheitsdatenblättern. Weitere Informationen zur Entsorgung erhalten Sie von den für Umwelt, Gesundheit und Sicherheit zuständigen Mitarbeitern Ihrer Einrichtung und/oder den lokalen Regierungsbehörden.

Verfahren



1. Bodensatz durch Schwenken in Schwebelagen bringen.
2. 2,0 mL Probe vorsichtig pipettieren.
3. Küvette verschließen, außen gut säubern.
4. Schwenken.



5. Im Thermostaten erhitzen.
CSB classic: für 2 Stunden bei 148 °C (298,4 °F).
HT200S: 15 Minuten im Standardprogramm HT.
6. Heiße Küvette entnehmen.
CSB classic: zweimal vorsichtig schwenken.
HT200S: Nach Freigabe der Verriegelung zweimal vorsichtig schwenken.
7. Auf Raumtemperatur abkühlen lassen.
CSB classic: im Küvettenständer.
HT200S: im Thermostaten.
8. Küvette außen gut säubern und auswerten.
Hinweis: Das Sediment muss vollständig abgesetzt sein bevor die Auswertung durchgeführt wird.



9. Küvette in Küvettenständer einsetzen.
DR 1900 LCK/TNTplus Verfahren anwählen. Test anwählen, MESSEN drücken.

Störungen

Die Methode ist bis zu einem Chloridgehalt von 1500 mg/L in der Probe (oder verdünnten Probe) anwendbar.
 Messergebnisse sind durch eine Plausibilitätskontrolle zu überprüfen (Verdünnung und/oder Aufstockung).

Zusammenfassung der Methode

Oxidierbare Stoffe reagieren mit schwefelsaurer Kaliumdichromatlösung in Gegenwart von Silberulfat als Katalysator. Chlorid wird mit Quecksilbersulfat maskiert. Ausgewertet wird die Grünfärbung des Cr⁷⁺.



HACH LANGE GMBH
 Wollsteinstraße 11
 D 40549 Düsseldorf

Tel +49 (0) 21 11 52 88 0
 Fax +49 (0) 21 11 52 88 143

Info de@hach.com
 www.hach.com

© Hach Company, 2019. Alle Rechte vorbehalten.

10/2019, Edition 1

LCK555 BSB₅/BSB_[n]

DOC312.72.94393

4–1650 mg/L BSB₅/BSB_[n] (biochemischer Sauerstoffbedarf in 5/[n] Tagen)

LCK555

Umfang und Anwendung: Für kommunale und industrielle Abwässer.

Testvorbereitung

Testlagerung

Lagerungstemperatur: 2–8 °C (35–46 °F)

pH/Temperatur

Der pH-Wert der Wasserprobe muss 4–10 sein.
 Die Temperatur der Wasserprobe und Reagenzien muss 18–24 °C (64–75 °F) sein.

Vor dem Start

Verdünnungswasser für LCK555
 Das Verdünnungswasser (LZC901) enthält die vorgegebenen Kenndaten zur Herstellung und Handhabung des Verdünnungswassers. Bitte beachten Sie diese Daten.
Analytische Qualitätssicherung
 addista® ist das System zur Analytischen Qualitätssicherung AQS, mit dem Sie Präzision und Richtigkeit Ihrer Analyseergebnisse jederzeit überprüfen können. Eine regelmäßige Kontrolle gewährleistet den ordnungsgemäßen Zustand Ihres Messsystems, die fehlerfreie Handhabung und die Erkennung von probenspezifischen Störungen.
 Bei der Durchführung der Analysen darf aus Qualitäts- und Sicherheitsgründen nur mit Original-Zubehör des Herstellers gearbeitet werden.
 Beachten Sie die Sicherheitshinweise und das Verfallsdatum auf der Verpackung.
 Lesen Sie die Sicherheitsdatenblätter (SDB) für die verwendeten chemischen Stoffe. Verwenden Sie die empfohlene persönliche Schutzausrüstung.
 Entsorgen Sie ausreagierte Lösungen gemäß lokaler, landes- und bundesrechtlicher Vorschriften. Entsorgungsinformationen für nicht verwendete Reagenzien finden Sie in den Sicherheitsdatenblättern. Weitere Informationen zur Entsorgung erhalten Sie von den für Umwelt, Gesundheit und Sicherheit zuständigen Mitarbeitern Ihrer Einrichtung und/oder den lokalen Regierungsbehörden.

1. Auswahl der Verdünnungsstufen

Abwassermatrix	empfohlener Messbereich (in mg/L)	Voraussichtliche obere Messbereichsgrenze
Kläranlagen Auslauf Biologisch gereinigtes Abwasser Leicht verschmutztes Industrieabwasser	A 4–58	> A1 > 4–19 mg/L * > A2 > 7–38 mg/L * > A3 > 11–58 mg/L *
Vorgeklärtes kommunales Abwasser Verschmutztes Industrieabwasser Kommunales Rohabwasser	B 25–413	> B1 > 25–138 mg/L * > B2 > 50–275 mg/L * > B3 > 75–413 mg/L *
Kommunales Rohabwasser Stark verschmutztes Industrieabwasser Deponiesickerwasser	C 100–1650	> C1 > 100–550 mg/L * > C2 > 200–1100 mg/L * > C3 > 300–1650 mg/L *

* voraussichtliche obere Messbereichsgrenze siehe **Besonders beachten** auf Seite 4 Punkt 2.

Bei der Auswahl der Verdünnungsstufe sollte der geschätzte BSB₅-Gehalt in der Mitte des Messbereiches liegen.

Zum Beispiel:

geschätzter BSB₅-Gehalt ≈ 200 mg/L
 Auswahl Messbereich B3 = 75–413 mg/L

Bei Proben mit unbekanntem BSB₅-Gehalt wird vorab mit Hilfe einer Schätzgröße R die günstigste Verdünnungsstufe ermittelt.

Art des Abwassers	Schätzgröße R
Unbehandeltes industrielles und kommunales Abwasser	35 65 % des CSB-Gehaltes mg/L BSB ₅ geschätzt
Biologisch behandeltes Abwasser	25 % des CSB-Gehaltes der Probe mg/L BSB ₅ geschätzt

2. Probenvorbereitung

a) Homogenisierung der Probe

Probe (20 °C (88 °F)) 5 Minuten bei 700–900 U/min (Magnetrührer) homogenisieren oder je nach Flockengröße vorher 30 Sekunden bei 20000 Umdrehungen/Minute mit einem Flockenaufschlaggerät.

Hinweis: Sind nach der Homogenisierung noch größere Partikel/ Flocken vorhanden, empfiehlt es sich den BSB₅-Wert über eine Mehrfachbestimmung zu ermitteln.

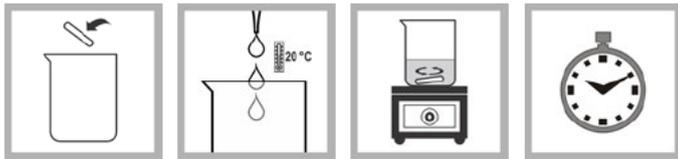
b) Vorverdünnung im Reaktionsglas für die Verdünnungsstufen

In das Reaktionsglas (entsprechend der Tabelle) Probe und Verdünnungswasser pipettieren Reaktionsglas verschließen und 1 Minute kräftig schütteln um die Probe mit Sauerstoff anzureichern.

Messbereich (in mg/L)	Vorverdünnung im Reaktionsglas Probe	Vorverdünnung im Reaktionsglas Verdünnungswasser	vorbereitete Probe in den Küvetten Test pipettieren	Verdünnungsfaktor
A > 4 58	> A1 > 4–19 mg/L *	4 mL	—	1.8 mL 3.5
	> A2 > 7–38 mg/L *	4 mL	—	0.9 mL 7.0
	> A3 > 11–58 mg/L *	4 mL	—	0.6 mL 10.5
B > 25 413	> B1 > 25–138 mg/L *	1 mL	1 mL	0.5 mL 25
	> B2 > 50–275 mg/L *	1 mL	3 mL	0.5 mL 50
	> B3 > 75–413 mg/L *	1 mL	5 mL	0.5 mL 75
C > 100 1650	> C1 > 100–550 mg/L *	0.4 mL	2.8 mL	0.5 mL 100
	> C2 > 200–1100 mg/L *	0.4 mL	6.0 mL	0.5 mL 200
	> C3 > 300–1650 mg/L *	0.4 mL	9.2 mL	0.5 mL 300

* voraussichtliche obere Messbereichsgrenze siehe **Besonders beachten** auf Seite 4 Punkt 2.

Verfahren—Probenvorbereitung

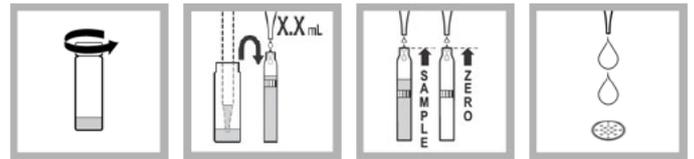


1. Homogenisierung der Probe: Magnetrührstab in ein Becherglas geben.
2. Probe (20 °C) in das Becherglas dosieren.
3. Das Becherglas auf den Magnetrührer stellen.
4. 5 Minuten bei 700–900 U/min rühren lassen.



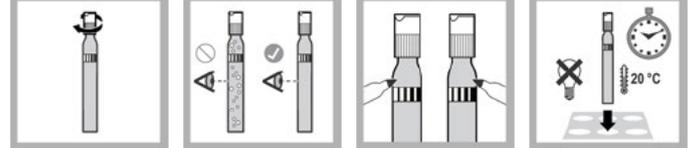
5. Pipetieren Sie Probe und Verdünnungswasser, hergestellt wie in 2. Probenvorbereitung auf Seite 2 beschrieben, in das Reaktionsglas.
6. Reaktionsglas verschließen.
7. 1 Minute kräftig schütteln um die Probe mit Sauerstoff anzureichern.

Verfahren—Füllen der Küvetten mit Probe und Verdünnungswasser



1. Reaktionsglas öffnen
2. Pipetieren Sie das erforderliche Probenvolumen (XX mL), wie in 2. Probenvorbereitung auf Seite 2 beschrieben hergestellt, in die Probenküvette.
3. Mittels Transferpipette die Probenküvette und Nullküvette mit Verdünnungswasser luftblasenfrei randvoll auffüllen. Beim Befüllen der Küvetten auf gleichmäßiges Pipetieren achten.
4. Überschüssiges Verdünnungswasser in der Transferpipette nach dem Befüllen der Küvette verwerfen.

Pro Analysentag muss eine Verdünnungswasserküvette (Küvette nur mit Verdünnungswasser) als Leerwert für alle Messwerte angesetzt werden. Bei Analysenserien ist nur eine Verdünnungswasserküvette erforderlich.



5. Küvetten wieder mit DosiCap®Zip verschließen.
6. Zur Prüfung, dass keine Luftblasen eingeschlossen sind, Küvetten auf den Kopf drehen.
7. Die Küvetten entsprechend der Verdünnungsstufe und Probenart auf dem Küvettenetikett kennzeichnen, um eine Verwechslung der Küvetten nach 5[n] Tagen auszuschließen.
8. 5[n] Tage lichtgeschützt im Trockenthermostat bei 20 °C (68° F).

Besonders beachten

1. Kontrolle des Verdünnungswasserwertes nach 5[n] Tagen

Anzeige: I : o

Verdünnungswasser ist mit Sauerstoff übersättigt.

Maßnahme: Verdünnungswasser erst 1 Stunde nach Beendigung der Belüftung nutzen.

Anzeige: I : u

Sauerstoffverarmtes Verdünnungswasser.

Maßnahme: Animpfung kontrollieren. Belüftung kontrollieren. Temperatur des Verdünnungswassers und dessen Standort überprüfen.

2. Variable Messbereichsgrenzen

Mit der Auswahl des Messbereiches wird lediglich die untere Messbereichsgrenze festgelegt. Die obere Messbereichsgrenze dient zur Orientierung, da diese sich aus dem vorab vermessenen Verdünnungswasserwert errechnet.

Sollte das Ergebnis außerhalb des Messbereiches liegen, wird dieses im Display und auf dem Drucker dargestellt.

Umrechnungstabelle

Sollte eine BSB₂-Bestimmung aus zeitlichen Gründen innerhalb von 5 Tagen nicht möglich sein (z. B. am Wochenende), kann der BSB₂ auch in Näherung über einen Faktor bestimmt werden.

Vorzzeitige Messung des BSB nach 4 Tagen

Ergebnis BSB₂ x 1.14 ≈ BSB₂ in Näherung

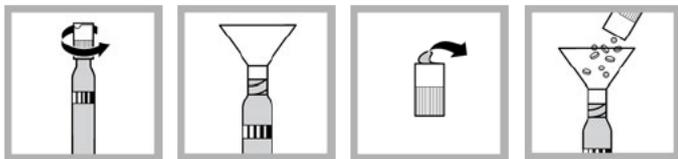
Spätere Messung des BSB nach 6 Tagen

Ergebnis BSB₂ x 0.91 ≈ BSB₂ in Näherung

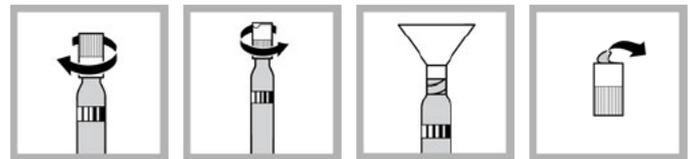
Die Ergebnisse sind Näherungswerte für kommunale Abwässer.

Bei industriellen Abwässern kann der Faktor abweichen. Wir empfehlen diesen Faktor anhand mehrerer Proben abwasserspezifisch zu ermitteln.

4. Verfahren BSB Auswertung nach 5[n] Tagen

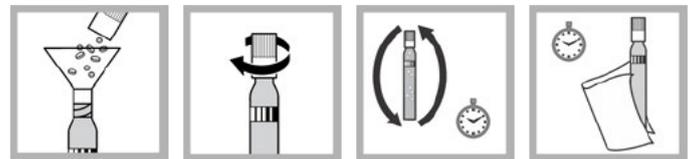


1. DosiCapZip von der Verdünnungswasserküvette abschrauben.
2. Trichter auf die Verdünnungswasserküvette aufsetzen.
3. Vorsichtig die Folie des DosiCap®Zip abziehen.
4. Den Inhalt (Tabletten und Glasperlen) über den Trichter langsam in die Verdünnungswasserküvette dosieren.



5. Trichter entfernen und die Verdünnungswasserküvette mit DosiCap®Zip sofort luftblasenfrei verschließen.
6. DosiCapZip von der Probenküvette abschrauben.
7. Trichter auf die Probenküvette aufsetzen.
8. Vorsichtig die Folie des DosiCap®Zip abziehen.

Hinweis: Sollte sich der Flüssigkeitsmeniskus nach dem Entfernen des Trichters unterhalb der Küvettenöffnung befinden, muss das fehlende Volumen durch Zugabe von 2–4 Glasperlen korrigiert werden.



9. Den Inhalt (Tabletten und Glasperlen) über den Trichter langsam in die Probenküvette dosieren.
10. Trichter entfernen und die Probenküvette mit DosiCap®Zip sofort luftblasenfrei verschließen. **Hinweis:** Sollte sich der Flüssigkeitsmeniskus nach dem Entfernen des Trichters unterhalb der Küvettenöffnung befinden, muss das fehlende Volumen durch Zugabe von 2–4 Glasperlen korrigiert werden.
11. Die Küvetten für 3 Minuten mehrfach schwenken bis sich die Reagenztabletten vollständig gelöst haben.
12. Nach weiteren 3 Minuten Küvette von außen gut säubern und auswerten.



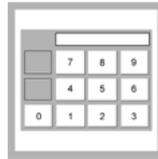
13. Verdünnungswasser küvette in den Küvetten-schacht einsetzen. DR1900 LCK/TNTplus Verfahren anwählen. Test anwählen, NULL drücken.



14. Verdünnungswasser-küvette entfernen.



15. Probenküvette in den Küvetten-schacht einsetzen. DR1900 MESSEN drücken.



16. Verdünnungsfaktor eingeben (siehe 2. Probenvorbereitung auf Seite 2). Es ist dringend erforderlich, den exakten Verdünnungsfaktor einzugeben (siehe: Umrechnungstabelle auf Seite 5).

Störungen

Die in der Tabelle aufgeführten Ionen wurden bis zu den angegebenen Konzentrationen einzeln überprüft und stören nicht. Die summarische Wirkung sowie der Einfluss weiterer Ionen wurden nicht ermittelt.

Es stören nicht:

Störungsniveau	Störende Substanz
10000 mg/L	Cl ⁻
2000 mg/L	SO ²⁻
500 mg/L	PO ³⁻ , CO ²⁻ , NO ³⁻
200 mg/L	NH ⁺ , Ca ²⁺
100 mg/L	Mg ²⁺
50 mg/L	SCN ⁻
20 mg/L	S ²⁻ , HCHO, Fe ³⁺
10 mg/L	SiO ₂ , EDTA, Pb ²⁺ , CN ⁻ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ⁶⁺ , Mn ²⁺ , Ni ²⁺ , Sn ²⁺ , Ag ⁺ , F ⁻
5 mg/L	Al ³⁺
2 mg/L	Cr ³⁺ , NO ²⁻
1 mg/L	Fe ²⁺

Peroxidverbindungen und andere starke Oxidationsmittel werden ebenfalls erfasst und bewirken Minderbefunde. Höhere Chlorkonzentrationen können Mehr- oder Minderbefunde verursachen. Starke Reduktionsmittel führen zu Mehrbefunden. Messergebnisse sind durch eine Plausibilitätskontrolle zu überprüfen (Verdünnung und/oder Aufstockung).

Dies ist bei dem LCK555 BSB₅/BSB₁₀ durch Mehrfachbestimmungen und weitere Verdünnungen der Wasserprobe möglich.

LCK555 BSB₅/BSB₁₀

7

Zusammenfassung der Methode

Bestimmung des biochemischen Sauerstoffbedarfs in 5/[n] Tagen unter zusätzlicher Hemmung der Nitrifikation mit 5 mg/L Allylthioharnstoff. Die Bestimmung des gelösten Sauerstoffs erfolgt in alkalischer Lösung mit einem Brenzkatechinderivat in Gegenwart von Fe²⁺, wobei ein roter Farbstoff entsteht.



HACH LANGE GMBH
W Isattenstraße 11
D 40549 Düsseldorf

Tel +49 (0)2 11 52 88 0
Fax +49 (0)2 11 52 88 143

info.de@hach.com
www.hach.com

© Hach Company, 2020. Alle Rechte vorbehalten.

08/2020, Edition 2

LZC555 Bio Kit für BSB₅

DOC312.72.94610

LZC555

Umfang und Anwendung: Für Kommunale und industrielle Abwässer.

! Testvorbereitung

Testlagerung

Lagerungstemperatur: 4–10 °C (39–50 °F)

Packungsinhalt

- Reaktionsgläser
- Dosierlöffel
- Phosphatpuffer 0.01 M (pH 7.2)
- Gefäß mit Animpfmateriale

Vor dem Start

Besonders beachten

Das Verdünnungswasser immer frisch ansetzten. Nach Gebrauch entsorgen. Die Gefäße nach Gebrauch mit reichlich Leitungswasser reinigen.

Zur Verwendung des Ansatzes im Verdünnungswasserset LZC901, siehe Verfahren in LZC901 (DOC312.53.94488).

Zur Verwendung des Verdünnungswassers im BSB₅ Küvetten-Test LCK555 siehe Verfahren in LCK555 (DOC312.53.94383).

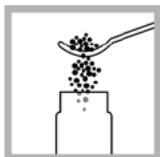
Beachten Sie die Sicherheitshinweise und das Verfallsdatum auf der Verpackung.

Lesen Sie die Sicherheitsdatenblätter (SDB) für die verwendeten chemischen Stoffe. Verwenden Sie die empfohlene persönliche Schutzausrüstung.

Entsorgen Sie ausreagierte Lösungen gemäß lokaler, landes- und bundesrechtlicher Vorschriften.

Entsorgungsinformationen für nicht verwendete Reagenzien finden Sie in den Sicherheitsdatenblättern. Weitere Informationen zur Entsorgung erhalten Sie von den für Umwelt, Gesundheit und Sicherheit zuständigen Mitarbeitern Ihrer Einrichtung und/oder den lokalen Regierungsbehörden.

Verfahren—Ansatzvorbereitung



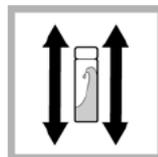
1. In das Reaktionsglas 1 gestrichelten Dosierlöffel (blau) des Animpfmateriale geben.



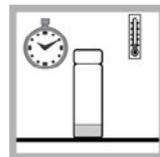
2. Dem Reagenzglas 10 ml. Pufferlösung hinzufügen.



3. Reaktionsglas verschließen.



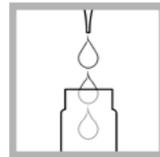
4. Reaktionsglas verschließen und 1 Minute kräftig schütteln um die Mikroorganismen zu resuspendieren.



5. Den Ansatz 1 Stunde bei Raumtemperatur (18–24 °C / 64–75 °F) stehen lassen.

Verfahren—Verwendung des Ansatzes im Verdünnungswasserset LZC901

In 500 mL Leitungswasser 0.3 mL Spurenelementlösung D geben. Bei gechlortem Leitungswasser vorher 5 Minuten kräftig belüften.



1. Aus dem Überstand des abgesetzten Ansatzes 0.5 mL der Animpflösung dem Reaktionsglas zufügen. Die zugefügte Animpflösung darf keine Partikel enthalten.

Sollten Partikel an der Außenseite der Pipettenspitze haften bleiben, empfiehlt es sich, die Partikel mit einem Einwegtuch abzuwischen.



2. Nach erfolgter Animpfung das Verdünnungswasser 1 Stunde belüften.

Zusammenfassung der Methode

BSB₅-Impfmateriale eignet sich zur schnellen Herstellung eines Verdünnungswassers mit angepassten Mikroorganismen. Das Material ist für ein großes Spektrum an Abwasserinhaltsstoffen aus dem kommunalen und industriellen Sektor (Lebensmittel, Papier etc.) geeignet.

Literatur

Wasserqualität - Bestimmung des Biochemischen Sauerstoffbedarfs nach n Tagen (BSB_n)

Teil 1: Verdünnungs- und Animpfverfahren mit Zugabe von Allylthioharnstoff (ISO 5815:1989, geändert); Deutsche Version EN 1899-1:1998



HACH LANGE GMBH
W Isattenstraße 11
D 40549 Düsseldorf

Tel +49 (0)2 11 52 88 0
Fax +49 (0)2 11 52 88 143

info.de@hach.com
www.hach.com

© Hach Company, 2021. Alle Rechte vorbehalten.

02/2021, Edition 1

LCA 555 addista

DOC312.72.94084

BSB₅ Glucose–Glutaminsäurestandard

LCA 555 addista

Umfang und Anwendung: Zur Qualitätssicherung

Testvorbereitung

Testlagerung

Lagerungstemperatur: 2–8 °C (35–48 °F)

Vor dem Start

Besonders beachten

Standard immer frisch ansetzen und nach Gebrauch verwerfen. Die Analyse möglichst als Doppelbestimmung durchführen.

Kenndaten

Wiederfindungsrate bei optimaler Animpfung 205 ± 45 mg/L BSB₅

Der Sollwert von 205 ± 45 mg/L entspricht der allgemein anerkannten Streubreite des biologischen Messverfahrens BSB₅.

Beachten Sie die Sicherheitshinweise und das Verfallsdatum auf der Verpackung.

Lesen Sie die Sicherheitsdatenblätter (SDB) für die verwendeten chemischen Stoffe. Verwenden Sie die empfohlene persönliche Schutzausrüstung.

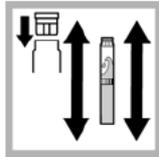
Entsorgen Sie ausreagierte Lösungen gemäß lokaler, landes- und bundesrechtlicher Vorschriften.

Entsorgungsinformationen für nicht verwendete Reagenzien finden Sie in den Sicherheitsdatenblättern. Weitere Informationen zur Entsorgung erhalten Sie von den für Umwelt, Gesundheit und Sicherheit zuständigen Mitarbeitern Ihrer Einrichtung und/oder den lokalen Regierungsbehörden.

Verfahren



1. In Küvette mit Lyophilisat vorsichtig pipettieren
5,0 mL destilliertes Wasser.



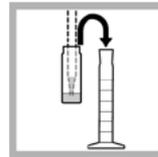
2. Küvette verschließen und kräftig schütteln.



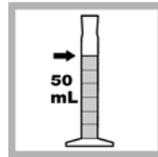
3. Die Stoppuhr auf 3 Minuten Reaktionszeit einstellen.



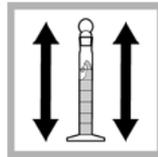
4. Küvette öffnen.



5. 2,2 mL dieser Lösung in einen 50 mL Messkolben pipettieren.



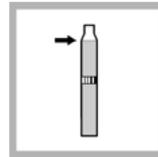
6. Mit destilliertem Wasser auffüllen.



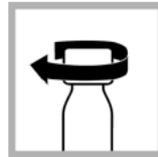
7. Messkolben verschließen und kräftig schütteln.



8. Messkolben öffnen. 0,5 mL Standardlösung (50 mL Messkolben) direkt in die Probenküvette pipettieren.



9. Probenküvette mit Verdünnungswasser auffüllen.



10. Küvette verschließen



11. Nach 5 Tagen im Messbereich B2 (50 275 mg/L) gegen die parallel angesetzte Verdünnungswasserküvette auswerten.

Zusammenfassung der Methode

Der LCA 555 addista® ist ein Kontrollstandardsystem für den Küvetten-Test LCK 555 BSB₅. Der Standard enthält Glucose und L-Glutaminsäure.



HACH LANGE GMBH
WaldstraÙe 11
D 40549 Düsseldorf

Tel +49 (0)2 11 52 88 0
Fax +49 (0)2 11 52 88 143

info.de@hach.com
www.hach.com

© Hach Company, 2019. Alle Rechte vorbehalten.

07/2019, Edition 1

LCK365 Organische Säuren (Fettsäuren) / Buttersäure

DOC312.72.94057

50–2500 mg/L CH₃COOH oder 75–3600 mg/L C₃H₇COOH

LCK365

Umfang und Anwendung: Für Faulschlamm, Belebtschlamm, Prozesswässer und Lebensmittel.

Testvorbereitung

Testlagerung

Lagerungstemperatur: 15–25 °C (59–77 °F)

pH/Temperatur

Der pH-Wert der Wasserprobe muss 3–9 sein.

Die Temperatur der Wasserprobe und Reagenzien muss 15–25 °C (59–77 °F) sein.

Vor dem Start

Die zu untersuchenden Proben müssen partikelfrei sein und ggf. filtriert werden (Prozesswässer, Belebtschlamm).

Faulschlämme müssen in jedem Fall filtriert oder zentrifugiert (10 min, 6000 U/min) werden. Der Zeitraum für die Gewinnung des Faulwassers ist so kurz wie möglich zu halten (<15 Minuten), da es sonst zu einem Abbau der organischen Säuren und somit zu Minderbefunden kommt.

Bei jeder Untersuchung sollte der Zeitbedarf und der Ablauf der Probenvorbereitung bis zur Durchführung des Testes identisch sein, um eine bestmögliche Bewertbarkeit der Ergebnisse zu erreichen.

Beachten Sie die Sicherheitshinweise und das Verfallsdatum auf der Verpackung.

Lesen Sie die Sicherheitsdatenblätter (SDB) für die verwendeten chemischen Stoffe. Verwenden Sie die empfohlene persönliche Schutzausrüstung.

Entsorgen Sie ausreagierte Lösungen gemäß lokaler, landes- und bundesrechtlicher Vorschriften.

Entsorgungsinformationen für nicht verwendete Reagenzien finden Sie in den Sicherheitsdatenblättern. Weitere Informationen zur Entsorgung erhalten Sie von den für Umwelt, Gesundheit und Sicherheit zuständigen Mitarbeitern Ihrer Einrichtung und/oder den lokalen Regierungsbehörden.

Verfahren



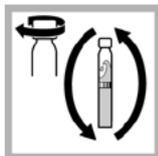
1. Thermostaten auf 100 °C (212 °F) vorheizen.



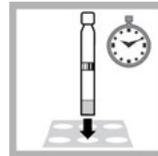
2. 0,4 mL Lösung A vorsichtig pipettieren.



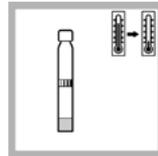
3. 0,4 mL Probe vorsichtig pipettieren.



4. Küvette verschließen und mehrmals schwenken.



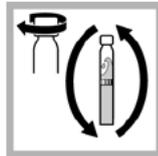
5. Im Thermostaten erhitzen für 10 Minuten bei 100 °C (212 °F).



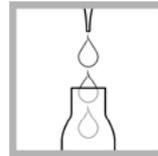
6. Auf Raumtemperatur abkühlen lassen.



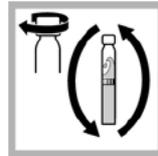
7. 0,4 mL Lösung B vorsichtig pipettieren.



8. Küvette verschließen und mehrmals schwenken.



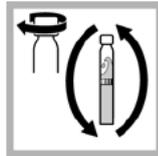
9. 0,4 mL Lösung C vorsichtig pipettieren.



10. Küvette verschließen und mehrmals schwenken.



11. 2,0 mL Lösung D vorsichtig pipettieren.



12. Küvette verschließen und mehrmals schwenken.



13. Nach 3 Minuten Küvette außen gut säubern und auswerten.



14. Küvette in Küvetten-schacht einsetzen. DR1900 LCK/TNTplus Verfahren anwählen. Test anwählen, MESSEN drücken.

Störungen

Die in der Tabelle aufgeführten Ionen wurden bis zu den angegebenen Konzentrationen einzeln überprüft und stören nicht.

Die summarische Wirkung sowie der Einfluss weiterer Ionen wurden nicht ermittelt.

Messergebnisse sind durch eine Plausibilitätskontrolle zu überprüfen (Verdünnung und/oder Aufstockung).

Störungsniveau	Störende Substanz
2000 mg/L	Cl ⁻ , SO ²⁻
1000 mg/L	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺
250 mg/L	NH ₄ ⁺
50 mg/L	Al ³⁺ , Cd ²⁺ , Co ²⁺ , Cr ³⁺ , CO ₃ ²⁻ , Cu ²⁺ , I ⁻ , Mn ²⁺ , Mo ²⁺ , NO ₂ ⁻ , Pb ²⁺ , S ²⁻ , Sn ²⁺ , SiO ₂ , SO ₃ ²⁻ , Acetaldehyd, Formaldehyd, Aceton
25 mg/L	Zn ²⁺
10 mg/L	Ni ²⁺
5 mg/L	Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Cr ⁶⁺

Zusammenfassung der Methode

Fettsäuren reagieren mit Diolen in einem sauren Milieu unter Bildung von Fettsäureestern. Diese bilden nach Reduktion mit Eisen-III-Salzen rot gefärbte Komplexe, die photometrisch ausgewertet werden.



HACH LANGE GMBH
Wilshäuserstraße 11
D 40549 Düsseldorf

Tel +49 (0)2 11 52 88 0
Fax +49 (0)2 11 52 88 143

info.de@hach.com
www.hach.com

Anhang B: Messwerte

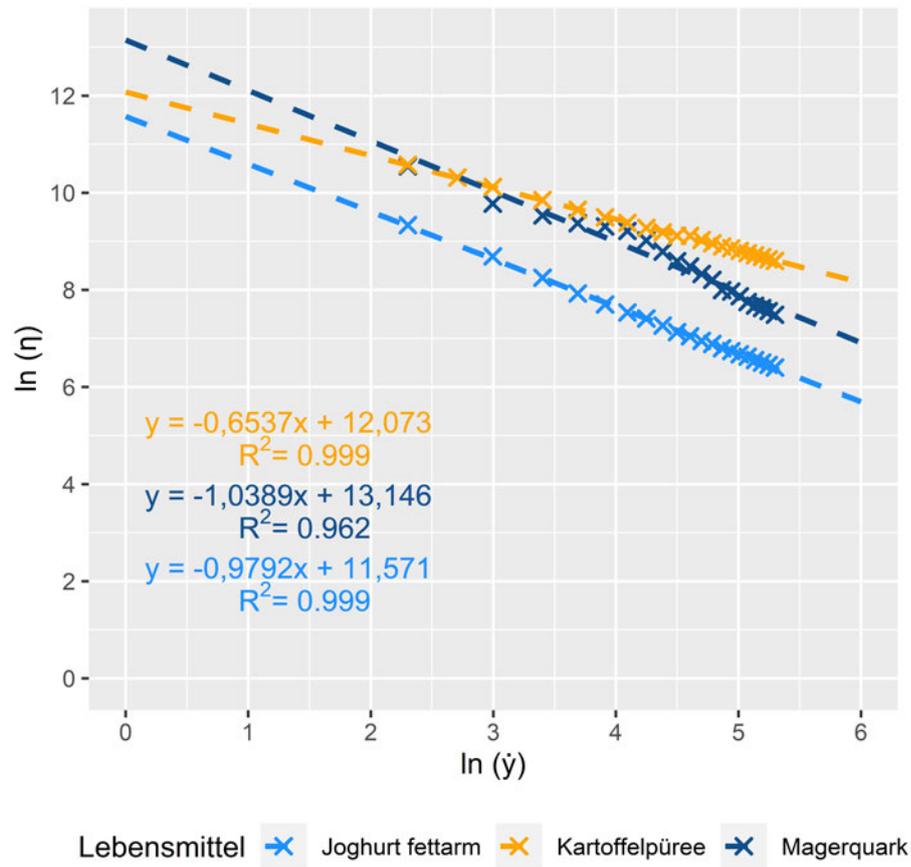


Abbildung B.1: Logarithmierte Fließkurven

Tabelle B.1: Messwerte der dynamischen Viskosität von Joghurt fettarm
Temperatur: 13,2°C, Spindel-Nummer: 10

Geschwindigkeit ($\dot{\gamma}$) rpm	Umlaufauslastung (τ) %	Dynamische Viskosität (η) mPas
10	28,3	11320
20	28,5	5940
30	28,7	3827
40	27,7	2770
50	27,6	2208
60	28,1	1873
70	28,9	1651
80	28,6	1430
90	28,1	1249
100	28,7	1148
110	28,7	1044
120	29,4	980,0
130	29,1	895,4
140	29,6	845,7
150	29,7	792,0
160	30,1	752,5
170	29,9	703,5
180	30,0	666,7
190	30,2	635,8
200	30,1	602,0

Tabelle B.2: Messwerte der dynamischen Viskosität von Magerquark
 Temperatur: 10,7°C, Spindel-Nummer: 11

Geschwindigkeit ($\dot{\gamma}$) rpm	Umlaufauslastung (τ) %	Dynamische Viskosität (η) mPas
10	38,1	38100
20	35,2	17600
30	41,4	13800
40	47,1	11775
50	55,1	11020
60	60,2	10033
70	57,7	8243
80	52,4	6550
90	48,5	5389
100	48,3	4830
110	45,5	4136
120	44,0	3667
130	38,6	2969
140	40,3	2879
150	39,2	2613
160	37,1	2319
170	36,3	2153
180	36,9	2050
190	36,6	1926
200	33,7	1785

Tabelle B.3: Messwerte der dynamischen Viskosität von Kartoffelpüree
Temperatur: 40,1 °C, Spindel-Nummer: 12

Geschwindigkeit ($\dot{\gamma}$) rpm	Umlaufauslastung (τ) %	Dynamische Viskosität (η) mPas
10	9,8	39200
15	11,3	30133
20	12,4	24800
30	14,2	18933
40	15,5	15500
50	16,6	13280
60	17,8	11867
70	18,7	10686
80	19,5	9750
90	20,9	9111
100	22,7	9080
110	22,9	8327
120	23,3	7767
130	23,7	7292
140	24,6	7029
150	25,0	6667
160	25,4	6350
170	25,8	6071
180	26,4	5867
190	26,6	5600
200	27,0	5420

Tabelle B.4: Masse m in g an Restanhaftung von Leitungswasser am Food Container

mVerpackung	m_{pre-consumer}	m_{post-consumer}	mRestanhaftung
6,466	168,109	6,597	0,131
6,466	161,866	6,553	0,087
6,430	161,644	6,559	0,129
6,438	165,493	6,527	0,089
6,460	184,609	6,568	0,108
6,466	168,816	6,564	0,098
6,452	151,370	6,546	0,094
6,447	187,523	6,547	0,100
6,449	183,829	6,614	0,165
6,455	181,834	6,590	0,135
6,463	168,865	6,576	0,113
6,452	171,942	6,591	0,139
6,450	164,697	6,610	0,160
6,428	165,779	6,543	0,115
6,454	167,725	6,650	0,196
6,434	165,333	6,562	0,128
6,461	181,213	6,589	0,128
6,433	187,266	6,559	0,126
6,440	174,759	6,564	0,124
6,451	179,736	6,549	0,098

Tabelle B.5: Masse m in g an Restanhaftung von Magerquark am Food Container

mVerpackung	m_{pre-consumer}	m_{post-consumer}	mRestanhaftung
6,457	188,654	13,875	7,418
6,479	186,366	11,132	4,653
6,464	189,381	12,532	6,068
6,474	188,921	12,019	5,545
6,472	180,213	14,170	7,698
6,442	193,763	10,948	4,506
6,444	190,623	14,736	8,292
6,430	189,848	11,432	5,002
6,459	199,159	13,696	7,237
6,485	192,461	11,379	4,894
6,448	201,402	12,102	5,654
6,427	200,490	13,345	6,918
6,472	198,756	10,840	4,368
6,451	186,804	14,286	7,835
6,464	202,183	14,583	8,119
6,481	208,050	12,050	5,569
6,464	200,242	12,304	5,840
6,442	189,224	11,573	5,131
6,433	193,792	12,180	5,747
6,453	189,567	13,388	6,935

Tabelle B.6: Masse m in g an Restanhaftung von Joghurt fettarm am Food Container

mVerpackung	m_{pre-consumer}	m_{post-consumer}	mRestanhaftung
6,448	213,156	13,474	7,026
6,447	213,826	11,262	4,815
6,438	209,484	11,278	4,840
6,432	207,386	11,487	5,055
6,483	207,479	11,202	4,719
6,461	213,207	10,614	4,153
6,440	212,627	9,258	2,818
6,449	214,945	10,994	4,545
6,416	212,597	12,574	6,158
6,403	209,392	9,341	2,938
6,421	209,231	10,711	4,290
6,462	209,086	9,292	2,830
6,452	210,185	10,598	4,146
6,458	209,556	10,146	3,688
6,428	207,961	10,213	3,785
6,440	208,048	9,766	3,326
6,455	210,808	8,743	2,288
6,473	212,179	10,303	3,830
6,458	210,582	10,507	4,049
6,424	208,401	9,467	3,043

Tabelle B.7: Masse m in g an Restanhaftung von Kartoffelpüree am Food Container

m Verpackung	m pre-consumer	m post-consumer	m Restanhaftung
6,452	202,091	13,602	7,150
6,434	208,572	13,555	7,121
6,455	213,400	11,692	5,237
6,447	213,276	14,330	7,883
6,449	214,724	13,660	7,211
6,446	210,541	13,553	7,107
6,486	210,658	15,101	8,615
6,492	217,586	11,971	5,479
6,483	216,541	12,403	5,920
6,457	217,144	11,572	5,115
6,475	215,355	13,163	6,688
6,452	212,514	14,351	7,899
6,448	213,396	14,442	7,994
6,456	213,252	12,906	6,450
6,456	207,634	14,681	8,225
6,452	214,695	14,702	8,250
6,442	211,001	14,971	8,529
6,412	207,041	14,843	8,431
6,454	205,538	12,028	5,574
6,445	208,695	15,672	9,227

Tabelle B.8: Masse m in g an Restanhaftung von Milcheis-Vanille am Food Container

m Verpackung	m pre-consumer	m post-consumer	m Restanhaftung
6,454	131,731	9,052	2,598
6,475	126,798	9,318	2,843
6,483	128,287	9,887	3,404
6,476	129,857	10,063	3,587
6,496	133,055	9,016	2,520
6,512	138,270	9,268	2,756
6,499	137,811	9,788	3,289
6,499	135,389	9,645	3,146
6,494	134,323	11,012	4,518
6,469	129,110	9,238	2,769
6,465	126,274	9,996	3,531
6,443	123,271	8,718	2,275
6,485	121,106	9,522	3,037
6,439	117,872	8,705	2,266
6,474	122,834	9,778	3,304
6,455	119,186	10,046	3,591
6,477	114,465	9,929	3,452
6,477	111,139	8,987	2,510
6,490	108,687	9,201	2,711
6,491	116,077	9,344	2,853

Tabelle B.9: Zusammenfassung von statistischen Kennwerten der Restanhaftung-Boxplots

Lebensmittel	Wasser	Milcheis	Joghurt	Magerquark	Kartoffelpüree
Mittel	0,123	3,048	4,117	6,171	7,205
Standardabweichung	0,028	0,550	1,155	1,276	1,244
Minimum	0,087	2,266	2,288	4,368	5,115
1. Quartil	0,100	2,683	3,255	5,099	6,318
Median	0,125	2,945	4,098	5,794	7,181
3. Quartil	0,132	3,416	4,743	7,282	8,231
Maximum	0,196	4,518	7,206	8,292	9,227
Spannweite	0,109	2,252	4,738	3,924	4,112
IQR	0,032	0,733	1,488	2,183	1,914
m/m% - Anteil bezogen auf Verpackung_{intro}	1,9 %	47,0 %	63,9 %	95,6 %	111,7 %

Tabelle B.10: Messwerte von pH und EC der Lagerungs-Simulation

Papier- Art	Makro- Nährstoff	Tag (d)	pH		EC in $\mu\text{S/cm}$	
			Faser	Filtrat	Faser	Filtrat
Testliner	Blank	3	392	402	7,89	7,90
		5	387	392	7,90	7,76
		10	373	379	7,95	7,82
	Eiweiß	3	388	413	7,42	7,45
		5	387	387	7,52	7,69
		10	416	420	7,3	7,32
	Kohlenhydrat	3	366	537	7,68	7,48
		5	373	366	7,72	7,67
		10	358	357	7,77	7,77
	Fett	3	347	377	7,97	7,84
		5	361	362	7,72	7,81
		10	343	273	7,95	7,87
Zeitung	Blank	3	279	287	7,9	7,98
		5	279	281	7,88	7,6
		10	279	280	8,04	7,84
	Eiweiß	3	314	358	7,44	7,44
		5	322	320	7,51	7,59
		10	350	348	7,52	7,48
	Kohlenhydrat	3	302	484	7,66	7,41
		5	310	314	7,56	7,8
		10	328	331	7,71	7,69
	Fett	3	267	282	7,87	7,85
		5	275	280	7,91	7,7
		10	267	277	8	7,94

Tabelle B.11: Messwerte der organischen Säuren von der Lagerungs-Simulation

Papier- Art	Makro- Nährstoff	Tag (d)	Organische Säuren	
			mg/l	g/kg Faser
Testliner	Blank	3	62	6,2
		5	66,7	6,7
		10	71	7,1
	Eiweiß	3	67,6	6,8
		5	77,9	7,8
		10	132,2	13,2
	Kohlenhydrat	3	77,5	7,8
		5	96,2	9,6
		10	82	8,2
	Fett	3	88,4	8,8
		5	98,7	9,9
		10	125,8	12,6
Zeitung	Blank	3	22,2	2,2
		5	26,5	2,7
		10	26	2,6
	Eiweiß	3	48,8	4,9
		5	80,6	8,1
		10	101	10,1
	Kohlenhydrat	3	25,5	2,6
		5	64,3	6,4
		10	73,1	7,3
	Fett	3	20	2,0
		5	50	5,0
		10	90,3	9,0

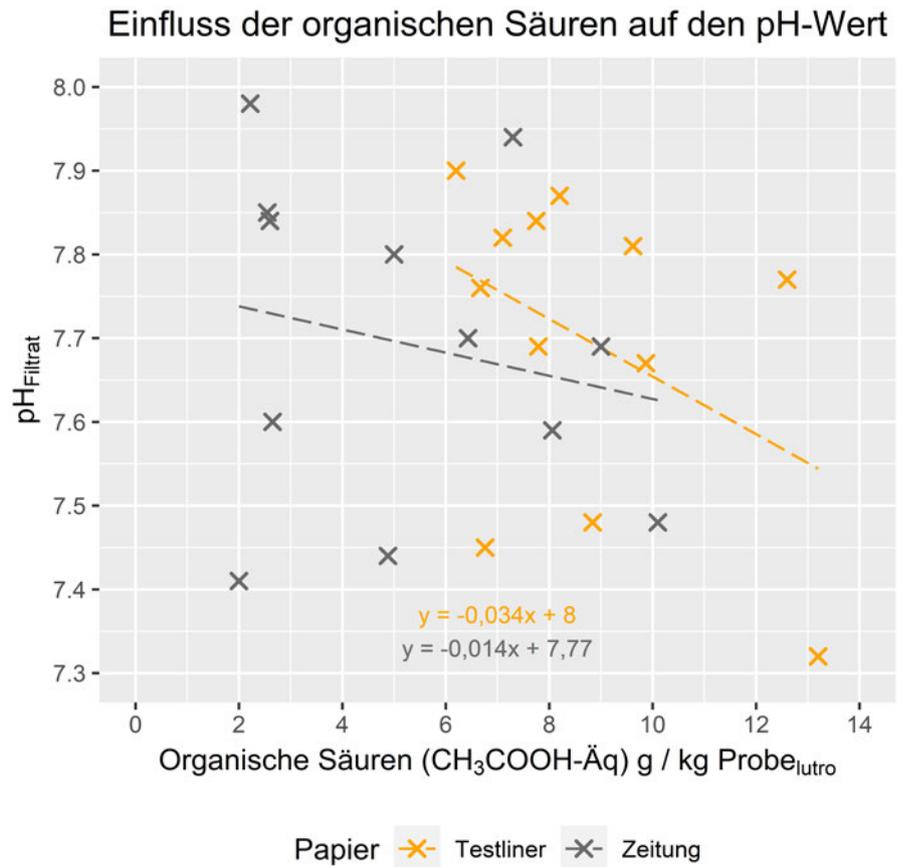


Abbildung B.2: pH-Wert in Abhängigkeit des Gehalts an organischen Säuren

Tabelle B.12: Messwerte von CSB und BSB der Lagerungs-Simulation

Papier- Art	Makro- Nährstoff	Tag (d)	CSB		BSB		BI
			mg/l	g/kg Faser	mg/l	g/kg Faser	
Testliner	Blank	3	665	66,5	204	20,4	0,31
		5	689	68,9	258	25,8	0,37
		10	531	53,1	237	23,7	0,45
	Eiweiß	3	743	74,3	242	24,2	0,33
		5	640	64,0	259	25,9	0,40
		10	771	77,1	392	39,2	0,51
	Kohlenhydrat	3	450	45,0	137	13,7	0,30
		5	471	47,1	171	17,1	0,36
		10	622	62,2	328	32,8	0,53
	Fett	3	680	68,0	203	20,3	0,31
		5	785	78,5	315	31,5	0,40
		10	1291	129,1	633	63,3	0,49
Zeitung	Blank	3	88	8,8	18	1,8	0,20
		5	57	5,7	30	3,0	0,53
		10	89	8,9	23	2,3	0,26
	Eiweiß	3	470	47,0	143	14,3	0,30
		5	639	63,9	306	30,6	0,48
		10	520	52,0	384	38,4	0,74
	Kohlenhydrat	3	175	17,5	51	5,1	0,29
		5	719	71,9	470	47,0	0,65
		10	446	39,5	245	24,5	0,62
	Fett	3	89	8,9	24	2,4	0,27
		5	96	9,6	25	2,5	0,26
		10	133	13,3	42	4,2	0,32

Faserstoff-Konzentration		10 g/l		Abdampfrückstand								
Verpackung	Lebensmittel	Nährstoff	Tag	Nr. / Einheit	1 %	g	g	g	g	g / g	g	mg/g
					g	g	g	g	g / g	g	mg/g	
Testliner	Blank	Blank	3	1	3,049	87,793	3,122	0,073	0,0008315	0,000835	67,99	
				2	3,05	63,180	3,103	0,053	0,0008389			
			5	1	3,043	72,561	3,102	0,059	0,0008131	0,000829	61,60	
				2	3,065	70,964	3,125	0,06	0,0008455			
			10	1	3,043	72,561	3,08	0,037	0,0005099	0,000269	10,28	
				2	3,065	70,964	3,067	0,002	0,0000282			
	Magerquark	Eiweiß	3	1	3,047	83,815	3,131	0,084	0,0010022	0,000940	78,49	
				2	3,058	92,245	3,139	0,081	0,0008781			
			5	1	3,054	74,229	3,114	0,06	0,0008083	0,000825	61,13	
				2	3,035	68,975	3,093	0,058	0,0008409			
			10	1	3,054	74,229	3,09	0,036	0,0004850	0,000583	41,70	
				2	3,035	68,975	3,082	0,047	0,0006814			
	Palm-Raps-Fett	Fett	3	1	3,053	92,916	3,118	0,065	0,0006996	0,000692	53,66	
				2	3,033	95,017	3,098	0,065	0,0006841			
			5	1	3,053	95,937	3,117	0,064	0,0006671	0,000713	49,99	
				2	3,044	93,505	3,115	0,071	0,0007593			
			10	1	3,053	95,937	3,072	0,019	0,0001980	0,000227	6,11	
				2	3,044	93,505	3,068	0,024	0,0002567			
	Kartoffel-Püree	Kohlenhydrat	3	1	3,047	89,629	3,107	0,06	0,0006694	0,000674	51,91	
				2	3,047	94,204	3,111	0,064	0,0006794			
			5	1	3,044	80,166	3,094	0,05	0,0006237	0,000652	43,88	
				2	3,05	72,002	3,099	0,049	0,0006805			
			10	1	3,044	80,166	3,074	0,03	0,0003742	0,000430	26,40	
				2	3,05	72,002	3,085	0,035	0,0004861			
Zeitung	Blank	Blank	3	1	3,05	84,31	3,078	0,028	0,0003321	0,000302	14,70	
				2	3,048	99,119	3,075	0,027	0,0002724			
			5	1	3,044	70,743	3,071	0,027	0,0003817	0,000380	16,69	
				2	3,049	71,289	3,076	0,027	0,0003787			
			10	1	3,039	70,743	3,044	0,005	0,0000707	0,000098	-6,77	
				2	3,04	71,289	3,049	0,009	0,0001262			
	Magerquark	Eiweiß	3	1	3,043	91,871	3,096	0,053	0,0005769	0,000586	43,06	
				2	3,039	94,130	3,095	0,056	0,0005949			
			5	1	3,038	79,802	3,079	0,041	0,0005138	0,000555	34,13	
				2	3,043	75,574	3,088	0,045	0,0005954			
			10	1	3,038	79,802	3,064	0,026	0,0003258	0,000388	22,16	
				2	3,043	75,574	3,077	0,034	0,0004499			
	Palm-Raps-Fett	Fett	3	1	3,026	101,744	3,047	0,021	0,0002064	0,000179	2,33	
				2	3,044	92,845	3,058	0,014	0,0001508			
			5	1	3,04	85,428	3,064	0,024	0,0002809	0,000262	4,87	
				2	3,043	90,520	3,065	0,022	0,0002430			
			10	1	3,053	95,937	3,056	0,003	0,0000313	0,000053	-11,31	
				2	3,044	93,505	3,051	0,007	0,0000749			
	Kartoffel-Püree	Kohlenhydrat	3	1	3,055	89,799	3,091	0,036	0,0004009	0,000398	24,29	
				2	3,038	88,492	3,073	0,035	0,0003955			
			5	1	3,042	70,98	3,069	0,027	0,0003804	0,000370	15,68	
				2	3,043	77,829	3,071	0,028	0,0003598			
			10	1	3,042	70,98	3,084	0,042	0,0005917	0,000424	25,81	
				2	3,043	77,829	3,063	0,02	0,0002570			

Abbildung B.3: Abdampfrückstände der Lagerungs-Simulation

Wasser		Abdampfrückstand						
Tag	Nr.	Schale	Einwaage	Auswaage	Rückstand	Rückstand	Mittel	je g Faser
		g	g	g	g	g / g	g	mg/g
3	1	3,039	89,778	3,048	0,009	0,0001002	0,000155	15,53
	2	3,066	76,091	3,082	0,016	0,0002103		
5	1	3,038	83,773	3,056	0,018	0,0002149	0,000213	21,33
	2	3,04	66,110	3,054	0,014	0,0002118		
10	1	3,024	79,059	3,037	0,013	0,0001644	0,000166	16,62
	2	3,04	77,387	3,053	0,013	0,000168		

Abbildung B.4: Abdampfrückstände des Wassers

Faserstoff-Konzentration	10 g/l		Verdünnung	ausplattiertes Volumen	Bakterien			
	1 %				Gussplattenverfahren		Mittel KBE je g otro	
Verpackung	Lebensm	Nährstoff	Tag	ml	KBE gezählt	KBE je g Probe otro		
Testliner	Blank	Blank	3	1	2	nicht zählbar KBE > 1000		86122
				10	2	175	8,6E+04	
			5	10	1	346	3,3E+05	1444914
				100	1	266	2,6E+06	
			10	10000	0,5	27	5,2E+07	229606665
				100000	0,5	21	4,1E+08	
	Magerquark	Eiweiß	3	1	2	nicht zählbar KBE > 1000		97843
				10	2	205	9,8E+04	
			5	10	0,1	210	2,1E+06	10188867
				100	0,1	184	1,8E+07	
			10	100000	0,5	234	4,3E+09	7075384330
				1000000	0,5	53	9,8E+09	
	Palm-Raps-Fett	Fett	3	1	2	nicht zählbar KBE > 1000		123445
				10	2	258	1,2E+05	
			5	10	1	607	6,3E+05	1467223
				100	1	224	2,3E+06	
			10	10000	0,5	111	2,0E+08	296860987
				100000	0,5	22	3,9E+08	
	Kartoffel-Püree	Kohlenhydrat	3	1	2	nicht zählbar KBE > 1000		394048
				10	2	813	3,9E+05	
			5	10	1	nicht zählbar KBE > 1000		3891487
				100	1	416	3,9E+06	
			10	10000	1	219	2,0E+08	4918025195
				1000000	0,5	52	9,6E+09	
Zeitung	Blank	Blank	3	1	2	nicht zählbar KBE > 1000		70120
				10	2	147	7,0E+04	
			5	10	1	1118	1,1E+06	4081258
				100	1	734	7,1E+06	
			10	10000	0,5	33	6,0E+07	149076276
				100000	0,5	13	2,4E+08	
	Magerquark	Eiweiß	3	1	2	nicht zählbar KBE > 1000		481850
				10	2	977	4,8E+05	
			5	10	0,1	nicht zählbar KBE > 1000		80075543
				100	0,1	848	8,0E+07	
			10	100000	0,5	102	1,8E+09	4458137006
				1000000	0,5	39	7,1E+09	
	Palm-Raps-Fett	Fett	3	1	2	525	2,5E+04	44592
				10	2	134	6,4E+04	
			5	10	1	nicht zählbar KBE > 1000		5667530
				100	1	613	5,7E+06	
			10	10000	0,5	98	1,8E+08	490432844
				100000	0,5	43	8,0E+08	
	Kartoffel-Püree	Kohlenhydrat	3	1	2	nicht zählbar KBE > 1000		
				10	2			
			5	10	1	nicht zählbar KBE > 1000		1,2E+07
				100	1	1436	1,2E+07	
			10	100000	0,5	167	2,9E+09	4,2E+09
				1000000	1	63	5,5E+09	

Abbildung B.5: KBE-Zählungen der Bakterien auf PCA

Faserstoff-Konzentration			10 1	Verdünnung	ausplattiertes Volumen ml	Pilze		
						Gussplattenverfahren		
Verpackung	Lebensmittel	Nährstoff			KBE gezählt	KBE je g Probe otro	Mittel KBE je g otro	
Testliner	Blank	Blank	1	2	15	7,4E+02	1,6E+03	
			10	2	5	2,5E+03		
			10	1	8	7,8E+03	3,8E+04	
			100	1	7	6,8E+04		
			1000	0,5	2	3,9E+06	3,9E+06	
			10000	0,5	0			
	Magerquark	Eiweiß	1	2	202	9,6E+03	1,8E+04	
			10	2	57	2,7E+04		
			10	1	16	1,5E+04	4,4E+04	
			100	1	8	7,4E+04		
			1000	0,5	0		3,7E+06	
			10000	0,5	2	3,7E+06		
	Palm-Raps-Fett	Fett	1	2	10	4,8E+02	7,2E+02	
			10	2	2	9,6E+02		
			10	1	23	2,1E+04	3,7E+04	
			100	1	6	5,4E+04		
			1000	0,5	0		1,8E+06	
			10000	0,5	1	1,8E+06		
	Kartoffel-Püree	Kohlenhydrat	1	2	21	1,0E+03	3,9E+03	
			10	2	14	6,8E+03		
10			1	4	3,7E+03	6,5E+03		
100			1	1	9,3E+03			
1000			0,5	12	2,2E+06	2,2E+06		
10000			0,5	0				
Zeitung	Blank	Blank	1	2	4	1,9E+02	1,9E+02	
			10	2	0			
			10	1	4	3,7E+03	1,1E+04	
			100	1	2	1,8E+04		
			1000	0,5	1	1,8E+05	2,8E+06	
			10000	0,5	3	5,5E+06		
	Magerquark	Eiweiß	1	2	18	8,9E+02	9,4E+02	
			10	2	2	9,9E+02		
			10	1	19	5,2E+07	9,5E+07	
			100	1	5	1,4E+08		
			1000	0,5	50	9,1E+06	1,2E+07	
			10000	0,5	8	1,4E+07		
	Palm-Raps-Fett	Fett	1	2	1	4,8E+01	4,8E+01	
			10	2	0			
			10	1	1	9,3E+02	9,3E+02	
			100	1	0			
			1000	0,5	1	1,9E+05	1,0E+06	
			10000	0,5	1	1,9E+06		
	Kartoffel-Püree	Kohlenhydrat	1	2	12	5,8E+02	5,3E+02	
			10	2	1	4,8E+02		
			10	1	6	5,2E+03	6,9E+03	
			100	1	1	8,7E+03		
			1000	0,5	3	5,2E+05	1,1E+06	
			10000	0,5	1	1,7E+06		

Abbildung B.6: KBE-Zählungen der Pilze auf SAB

Originalarbeiten

- Abdalla, KZ und G Hammam (2014) Correlation between Biochemical Oxygen Demand and Chemical Oxygen Demand for Various Wastewater Treatment Plants in Egypt to Obtain the Biodegradability Indices. *International Journal of Sciences : Basic and Applied Research* 13(1).
- Blechs Schmidt (Hrsg.), J (2011) Altpapier: Regularien - Erfassung - Aufbereitung - Maschinen und Anlagen - Umweltschutz. Carl Hanser Verlag.
- Boyles, W (1997) The science of chemical oxygen demand. *Technical Information Series* (9).
- Chen, H, L Xu, K Yu, F Wei und M Zhang (2022) Release of microplastics from disposable cups in daily use. *The Science of the total environment* 854(158606).
- Confederation of European Paper Industries (2022) CEPI Key statistics 2021 European pulp & paper industrie.
- Deshwal, GK, NR Panjagari und T Alam (2019) An overview of paper and paper based food packaging materials: health safety and environmental concerns. *Journal of food science and technology* 56(10):S. 4391–4403.
- Faber, W und T Nemitz (2008) Geruchsbekämpfung in Wasser führenden Systemen. *Wochenblatt für Papierfabrikation* 136(23-24):S. 1371–1372.
- Florescu, D, AM Iordache, D Costinel, E Horj, RE Ionete und M Culea (2013) Validation procedure for assessing the total organic carbon in water samples. *Romanian Journal of Physics* 58:S. 211–219.
- Frede, W (2010) Handbuch für Lebensmittelchemiker. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-01684-4.
- Hossain, K und N Ismail (2015) Bioremediation and Detoxification of Pulp and Paper Mill Effluent: A Review. *Research Journal of Environmental Toxicology* 9(3):S. 113–134.
- Huber, P und B Carre (2012) Decolorization of process waters in deinking mills and similar applications: A review. *BioResources* 7(1):S. 1366–1382.
- Jia, P, X Ji, B Zheng, C Wang, W Hao, W Han, J Zhang, G Xia, X Ji und J Zhang (2022) Eco-Friendly and Complete Recycling of Waste Bamboo-Based Disposable Paper Cups for Value-Added Transparent Cellulose-Based Films and Paper Plastic Composites. *Polymers* 14(1589).
- Jouanneau, S, L Recoules, MJ Durand, A Boukabache, V Picot, Y Primault, A Lakel, M Sengelin, B Barillon und G Thouand (2014) Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): a review. *Water research* 49:S. 62–82.
- Jung, H und W Dietz (2005) Geruchsfrei produzieren - verfahrenstechnische Ansätze und Lösungen. *PTS Symposium Water and Environmental Technology*.
- Kang, J, M Wang und Z Xiao (2009) Modeling and Control of pH in Pulp and Paper Wastewater Treatment Process. *Journal of Water Resource and Protection* 1(2):S. 122–127.

- Karrasch, B, O Parra, H Cid, M Mehrens, P Pacheco, R Urrutia, C Valdovinos und C Zaror (2006) Effects of pulp and paper mill effluents on the microplankton and microbial self-purification capabilities of the Biobío River, Chile. *Science of the total environment* 359(1-3):S. 194–208.
- Kaur, A und S Sharma (2018) Study of Biological Treatment of Paper-Pulp Effluent. *Asian Journal of Chemistry* 30(9):S. 1925–1932.
- Marsh, K und B Bugusu (2007) Food packaging—roles, materials, and environmental issues. *Journal of food science* 72(3):R39–55.
- Maximova, N und O Dahl (2007) A set up of a modern analytical laboratory for wastewaters from pulp and paper industry. *Chemical Society reviews* 36(8):S. 1323–1349.
- Nagel, B, H Dellweg und LM Gierasch (1992) Glossary for chemists of terms used in biotechnology. *Pure and Applied Chemistry* 64(1):S. 143–168.
- Naujock, HJ und J Blechschmidt (2021) Taschenbuch der Papiertechnik. Carl Hanser Verlag.
- Raheem, D (2013) Application of plastics and paper as food packaging materials - An overview. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 25(3):S.177.
- Rhim, JW und JH Kim (2009) Properties of Poly(lactide)-Coated Paperboard for the Use of 1-Way Paper Cup. *Journal of food science* 74(2):S. 105–111.
- Simstich, B, HJ Öller und U Hamm (2007) Aktuelle Umfrage zu Geruchsproblemen in der Papierindustrie. *Wochenblatt für Papierfabrikation* 135(20):S. 1116–1119.
- Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (2021) Branchenausblick 2030+ Die Papier- und Zellstoffindustrie.
- Suskevics, V und K Grönman (2019) Single-Use Paper Cups Circularity Improvement and Environmental Impact Mitigation Measures for Lappeenranta University of Technology Campus. *Proceedings* 16(58).
- Triantafillopoulos, N und A Koukoulas (2020) The future of single-use paper coffee cups: Current progress and outlook. *BioResources* 15(3):S. 7260–7287.
- Verband Deutscher Papierfabriken e. V. (2015) Papier machen.
- Verband Deutscher Papierfabriken e. V. (2015) Papier recyceln.
- Zhao, Y, X Zhuang, S Ahmad, S Sung und SQ Ni (2020) Biotreatment of high-salinity wastewater: current methods and future directions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 36(3):S.37.

Webseiten

Statista Research Department. (29.09.2022) *Statistiken zur Papier- und Zellstoffindustrie*. URL: <https://de.statista.com/themen/2995/statistiken-zur-papier-und-zellstoffindustrie/>.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

