



MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Öltyp-spezifische Wirkung von Rosmarinextrakt auf Frittieröle

verfasst von | submitted by

Isabella Patrizia Heitzinger BSc

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2025

Studienkennzahl lt. Studienblatt |
Degree programme code as it appears
on the student record sheet:

UA 066 838

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Ernährungswissenschaften

Betreut von | Supervisor:

Univ.-Prof. Mag. Dr. Marc Pignitter

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Masterarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre hiermit Eides statt, dass ich meine Masterarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Im Rahmen der sprachlichen Überarbeitung der Masterarbeit wurde das KI-Tool Perplexity AI (Firma: Perplexity, Version: September 2025) ausschließlich zur sprachlichen Glättung genutzt. Die inhaltliche Erarbeitung erfolgte eigenständig. Weiters erkläre ich, dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Abstrakt

Rosmarinextrakt (insb. Carnosolsäure und Carnosol) gilt als hitzestabiles, natürliches Antioxidans zur Verzögerung thermo-oxidativer Ölalterung beim Frittieren. Unklar war bislang, inwieweit seine Wirksamkeit öltypspezifisch variiert. Ziel dieses Reviews war es, die Hypothese zu prüfen, dass die Wirkung von Rosmarinextrakt vom Öltyp abhängt. Dafür wurde eine strukturierte Datenbanksuche (u. a. PubMed, Scopus, Web of Science, ResearchGate, ScienceDirect und Google Scholar) zu erhitzten Ölen/Frittierprozessen mit Rosmarinextrakt durchgeführt; eingeschlossen wurden experimentelle Studien mit relevanten Stabilitätsparametern (z. B. Peroxidzahl, freie Fettsäuren (FFA), Gesamtpolare Stoffe). Berichtet wurden u. a. ein verlangsamer Anstieg der Peroxidzahl, eine geringere Bildung polarer Verbindungen, freier Fettsäuren und flüchtiger Abbauprodukte (einschließlich Acrolein) sowie längere Standzeiten und reduzierte Ölwechselintervalle. Einzelstudien zu PUFA-reichem Sojaöl und mittel-ölsäurereichem Sonnenblumenöl bestätigen einen dosisabhängigen Effekt im Bereich praxisüblicher Zusätze: Beim Intervallfrittieren wurde das Erreichen des üblichen TPM-Grenzwerts deutlich hinausgezögert; zugleich blieben FFA und Peroxidzahl geringer als in der Kontrolle. Diese Ergebnisse stützen die Hypothese und deuten zugleich auf einen indirekten Schutz wertgebender Begleitstoffe (Tocopherole, phenolische Verbindungen, MUFAs) hin. Die narrative Synthese zeigt konsistent: Rosmarinextrakt erhöht die Oxidationsstabilität in Ölen. Zusammenfassend stützt die Literatur die Hypothese einer öltypabhängigen Wirksamkeit von Rosmarinextrakt. In der Praxis bedeutet dies längere Standzeiten, stabilere Qualitätsprofile und weniger Ölwechselintervalle bei geeigneter Extraktwahl und Dosierung.

Abstract

Rosemary extract (in particular carnosic acid and carnosol) is considered a heat-stable, natural antioxidant that delays thermo-oxidative oil degradation during frying. To date, it has remained unclear to what extent its effectiveness varies depending on the oil type. The aim of this review was to examine the hypothesis that the effectiveness of rosemary extract depends on the type of oil. For this purpose, a structured database search (including PubMed, Scopus, Web of Science, ResearchGate, ScienceDirect, and Google Scholar) was conducted on heated oils/frying processes with rosemary extract; experimental studies reporting relevant stability parameters (e.g., peroxide value, free fatty acids (FFA), total polar materials) were included. Reported outcomes included a slower increase in peroxide value, reduced formation of polar compounds, free fatty acids, and volatile degradation products (including acrolein), as well as longer frying life and reduced oil change intervals. Individual studies on PUFA-rich soybean oil and mid-oleic sunflower oil confirm a dose-dependent effect within the range of practical supplementation: under intermittent frying conditions, reaching the conventional TPM threshold was markedly delayed, while FFA and peroxide values remained lower than in controls. These findings support the hypothesis and also suggest an indirect protective effect on valuable minor components (tocopherols, phenolic compounds, MUFAs). The narrative synthesis consistently shows that rosemary extract enhances oxidative stability in oils. In summary, the literature supports the hypothesis of an oil-type-dependent effectiveness of rosemary extract. In practice, this implies longer frying life, more stable quality profiles, and fewer oil changes with appropriate extract selection and dosage.

Danksagung

Zuerst möchte ich meinem Professor, Herrn Dr. Marc Pignitter, herzlich danken. Die Möglichkeit, ein so interessantes und gleichzeitig zukunftsrelevantes Thema zu bearbeiten, weiß ich sehr zu schätzen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Sohn Julian, der mich mit seiner Lebensfreude und seinem starken Glauben an mich stets motiviert und inspiriert hat. Ohne seine Energie und seinen Zuspruch wäre diese Arbeit nicht in dieser Form möglich gewesen.

Mein herzliches Dankeschön geht auch an meinen Partner, der mich in allen Phasen meines Studiums unterstützt hat. Für seine Geduld und seine aufmunternden Worte möchte ich mich von ganzem Herzen bedanken.

Ihnen allen widme ich diese Arbeit als Ausdruck meiner tiefen Dankbarkeit.

Diese Arbeit widmet sich einem zukunftsrelevanten Thema, das im Kontext steigender Nachhaltigkeitsanforderungen und des Gesundheitsbewusstseins von großer Bedeutung ist. Der systematische Review zu der Öltyp-spezifischen Wirkung von Rosmarinextrakt auf Frittieröle leistet einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung innovativer und nachhaltiger Lebensmitteltechnologien. Ich hoffe, dass die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage für weitere Forschungsansätze bilden und zur Verbesserung der Qualität und Sicherheit von Speiseölen in der Lebensmittelindustrie beitragen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Bedeutung von Frittierölen in der Lebensmittelindustrie.....	2
1.2 Gesättigte und ungesättigte Fettsäuren in Kokosöl und High-Oleic-Sonnenblumenöl: Auswirkungen auf die Lebensmittelqualität und Gesundheit.....	3
1.2.1 Kokosöl.....	4
1.2.2 Konventionelles vs. High-Oleic-Sonnenblumenöl.....	6
1.2.3 Lipidoxidation während des Frittierens.....	8
1.2.4 Chemische Veränderungen während des Frittierens.....	10
1.3 Hydrolyse, Oxidation und Polymerisation während des Frittierens.....	11
1.3.1 Hydrolyse.....	12
1.3.2 Oxidation.....	13
1.3.3 Polymerisation.....	16
1.4 Maillard-Reaktion in frittierten Lebensmitteln.....	17
1.4.1 Entstehung von Acrylamid und AGEs als Nebenprodukt der Maillard-Reaktion.....	19
1.5 Analytische Methoden zur Qualitätskontrolle.....	24
1.5.1 Rauchpunkt.....	24
1.5.2 Oxidationsstabilität.....	28
1.6 Antioxidantien in Frittierölen.....	29
1.6.1 Rosmarinextrakt als potenzielles hitzestabiles Antioxidans.....	30
1.6.2 Rosmarin-Extraktionsprozess nach der Robert-und-Georges-Methode (1989).....	30
2 Ziel der Arbeit.....	32
3 Hypothese: Öltyp-spezifische Wirkung von Rosmarinextrakt auf Frittieröle.....	33
3.1 Verbesserung der thermischen Stabilität durch die Kombination von Ölen mit hohem Rauchpunkt und hitzestabilen Antioxidantien.....	33
3.2 Zersetzungsresistenz während des Frittierprozesses durch antioxidativen Schutz durch Rosmarinextrakt (E 392).....	34
3.3 Mechanismus der antioxidativen Wirkung beim Erhitzen.....	36
3.4 Qualitätsindikatoren und Analyseverfahren zur Bewertung der thermischen Stabilität von Speiseölen.....	37
4 Methodik (systematischer Review).....	39
4.1 Recherchemethode.....	39
4.1.1 Nutzung von Datenbanken.....	39
4.1.2 Suchstrategien und Stichwörter.....	40

4.2	Einschluss- und Ausschlusskriterien.....	40
4.2.1	Relevante Studien zur thermischen Zersetzung und Antioxidantienwirkung.....	40
4.2.2	Einschluss von Studien zu Frittierölen bei hohen Temperaturen.....	40
4.3	Zeitraum der Studien.....	40
4.3.1	Eingrenzung auf Forschungsergebnisse der letzten 10-15 Jahre.....	40
4.4	Berichte über Effekte auf die thermische Stabilität mittels Rosmarinextrakt.....	41
4.5	Vergleich der untersuchten Frittieröle.....	44
4.5.1	Vergleich zwischen raffiniertem Kokosöl, nativem Kokosöl, kaltgepresstem High-Oleic Sonnenblumenöl und raffiniertem High-Oleic Sonnenblumenöl mit Zugabe von Rosmarinextrakt.....	44
4.6	Effizienz von HO-Sonnenblumenöl, VCO und RBD mit Rosmarinextrakt unter hohen Temperaturen.....	47
4.6.1	HO vs. konventionelles Sonnenblumenöl sowie VCO/RBD: TPC-Grenzzeiten und Qualitätsindikatoren im Vergleich.....	48
4.7	Limitationen der Studien.....	51
4.8	Implikationen für die Lebensmittelindustrie und Gastronomie.....	52
4.8.1	Anwendung der Erkenntnisse zur Verbesserung von Frittierprozessen.....	52
4.8.2	Kostenaufstellung: Vergleich Österreich Deutschland.....	52
	METRO Chef High Oleic Frittieröl - 10 l Kanister/ metro.de.....	53
	METRO Chef High Oleic Frittieröl - 10 l Kanister/ metro.de.....	53
5	Diskussion.....	59
6	Schlussfolgerung.....	59
7	Literaturverzeichnis.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: TAG-Molekül, welches aus einem Glycerin-Rückgrat besteht, an das drei Fettsäuren über Esterbindungen verbunden ist. Quelle: Eigene Darstellung nach (M. C. Dobarganes, 2009).....	9
Abbildung 2: Hydrolyse ist jene Reaktion, die das TAG-Molekül aufbricht. Daraus entstehen Monoacylglycerine, Diacylglycerine und FFA. Quelle: Eigene Darstellung nach (M. C. Dobarganes, 2009).....	13
Abbildung 3: Initiation der Lipidoxidation: Angriff des Initiators, hier Hitze, führt zur Wasserstoffabspaltung an der Doppelbindung der ungesättigten Fettsäure und zur Bildung des reaktiven Alkylradikals ($R\bullet$). Quelle: Eigene Darstellung nach (M. C. Dobarganes, 2009)....	14
Abbildung 4: Propagation-Phase der Lipidoxidation: Das Alkylradikal ($R\bullet$) reagiert mit Sauerstoff (O_2) und bildet das Peroxylradikal ($R-OO\bullet$). Dieses greift weitere ungesättigte Fettsäuremoleküle an und führt zur Bildung von Hydroperoxiden ($R-OOH$), den primären Oxidationsprodukten im Prozess. Quelle: Eigene Darstellung nach (M. C. Dobarganes, 2009) (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015).....	15
Abbildung 5: Flussdiagramm der Maillard Reaktion, in der die Produkte Acrylamid und AGEs entstehen. Quelle: Eigene Darstellung nach (C. Zhang et al., 2025).....	18
Abbildung 6: Flussdiagramm der Maillard-Reaktion zur Acrylamidbildung durch die Reaktion von reduzierenden Zuckern und Asparagin. Quelle: Eigene Darstellung nach (Smit et al., 2025) (Muttucumaru et al., 2013) (Bethke & Bussan, 2013).....	20
Abbildung 7: Flussdiagramm der Maillard-Reaktion zur Bildung von AGEs durch die nicht-enzymatische Reaktion von reduzierenden Zuckern mit freien Aminogruppen aus Proteinen. Quelle: Eigene Darstellung nach (Pérez-Burillo et al., 2019) (Reddy & Beyaz, 2006).....	21
Abbildung 8: Flussdiagramm der lipidoxidationsabhängigen Adduktbildung. Darstellung der Entstehung reaktiver Lipidoxidationsprodukte, wie Malondialdehyd und 4-Hydroxynonenal durch oxidative Prozesse in Lipiden und deren kovalente Vernetzung mit Aminogruppen in Proteinen, was zur Bildung von Lipid-Protein-Addukten und strukturellen Proteinveränderungen führt. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung (Khalid et al., 2022).	22
Abbildung 9: Die Darstellung zeigt die hohen Rauchpunkte beider Öle. 233°C bis 236°C für raffiniertes HO- Sonnenblumenöl und 232°C für raffiniertes Kokosöl, welche besonders für das Frittieren bei hohen Temperaturen geeignet sind. Quelle: Eigene Darstellung nach (Holgado et al., 2021) (Ng et al., 2021).....	27

Abbildung 10: Die Abbildung zeigt die einzelnen Arbeitsschritte von der Rohstoffvorbereitung bis zur Analyse und Aufbereitung des Rosmarinextrakts. Dabei werden die wichtigsten Methoden wie Filtration, Konzentration im Rotationsverdampfer, schonende Trocknung im Vakuumofen und chromatographische Analyse (UHPLC) dargestellt. (Eigene Darstellung in Anlehnung an (MOUFAKKIR et al., 2022) und nach der Robert-und-Georges-Methode (1989)).	32
Abbildung 11: Das Flussdiagramm zeigt, insbesondere die phenolischen Diterpene Carnosinsäure und Carnosol, dass Rosmarinextrakt als Radikalfänger wirkt und die Kettenreaktion der Lipidoxidation unterbricht, die während des Frittierens in Pflanzenölen mit ungesättigten Fettsäuren stattfindet. Dadurch wird die Bildung von toxischen Abbauprodukten wie TAG-Polymeren, freien Fettsäuren, Ketone, Aldehyden, Acrylamid und flüchtigen organischen Verbindungen signifikant reduziert, was zu einer verbesserten Stabilität und Qualität des Frittieröls führt. Eigene Darstellung in Anlehnung an (Harlina et al., 2022).	35
Abbildung 12: Vergleich der Rauchpunkte Rauchpunkte (°C) für RBD-Kokosöl, HO-Sonnenblumenöl (raffiniert/kaltgepresst) und VCO. Dargestellt sind Literaturbereiche (RP_min/RP_max) und Mittelwerte. Eigene Darstellung nach an (Ng et al., 2021), (Boateng et al., 2016), (Prarthana et al., 2024),(Voon et al., 2024) und (J. Chen et al., 2023).	46
Abbildung 13 zeigt für HO-Sonnenblumenöl eine verlängerte Standzeit (Index) unter Rosmarinextrakt ($\approx +67\%$). Eigen Darstellung in Anlehnung an (Moufakkir et al., 2023).	50
Abbildung 14: Rosmarinextrakt verlängert die Zeit bis 25 % TPM in HO-Sonnenblumenöl von 8,0 Stunden auf 13,3 Stunden (+66,7 %). Der Wert „mit Rosmarinextrakt“ ist eine Projektion des mit/ohne-Verhältnisses nach Moufakkir et al. auf eine HO-Baseline; es wurden keine fremden Absolutzahlen übernommen.	50
Abbildung 15: HO-Sonnenblumenöl: relative Peroxidzahl (PV) und freie Fettsäuren (FFA) (Kontrolle = 100; niedriger = besser). Die Werte „mit Rosmarinextrakt“ sind auf HO projizierte Effekte, berechnet aus den mit/ohne-Verhältnissen nach (Moufakkir et al., 2023)	51
Abbildung 16: Dieses Diagramm, angelehnt an Abbildung 14, zeigt, dass sich die Standzeit durch die Zugabe von Rosmarinextrakt um etwa fünf Stunden verlängern lässt, was sich günstig auf die Kosten auswirken könnte. Zur endgültigen Bestätigung sind jedoch noch direkte Vergleichsexperimente erforderlich.	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften von VCO und RBD-Kokosöl.....	6
Tabelle 2: Vergleich von konventionellem und High-Oleic-Sonnenblumenöl.....	8
Tabelle 3: Wichtige analytische Parameter zur Bewertung der thermischen Stabilität und Qualität von Speiseölen.....	38
Tabelle 4: Vergleich der Eigenschaften von raffiniertem Kokosöl (RBD), natives Kokosöl (VCO) kaltgepresstes HO-Sonnenblumenöl und raffiniertes HO-Sonnenblumenöl im Hinblick auf Frittieranwendung.....	45
Tabelle 5: Kostenvergleich von Rosmarinextrakt-Pulver in Österreich und Deutschland im Jahr 2025.....	53
Tabelle 6: Kostenvergleich von raffiniertem HO-Sonnenblumenöl in Österreich und Deutschland im Jahr 2025.....	53
Tabelle 7: Beispiel HO-Sonnenblumenöl: Kosten -und Standzeitvergleich ohne vs. Mit Rosmarinextrakt.(Österreich/Deutschland. Standzeit ohne (h) und Standzeit mit (h) wurden in Anlehnung von Abbildung 14 durchgeführt.....	56
Tabelle 8: Vergleich der wichtigsten Eigenschaften von RBD, VCO, raffiniertem und kaltgepressten High Oleic Sonnenblumenöl hinsichtlich Zusammensetzung, Hitzebeständigkeit, Verarbeitungsart, Zusatzstoffen und Kosten.....	57

Abkürzungsverzeichnis

O ₂	Sauerstoff
HO-	
Sonnenblumenöl	High-Oelic- Sonnenblumenöl
VCO	natives Olivenöl
RBD	raffiniertes Kokosöl
SFA	gesättigte Fettsäuren
MUFA	einfach ungesättigte Fettsäuren
PUFA	mehrfach ungesättigte Fettsäuren
MCFA	mittelkettige Fettsäuren
CVD	Herz-Kreislauf-Erkrankungen
MCT	mittelkettige Triglyceride
HP-VCO	hochverarbeitetes Kokosöl
F-VCO	frisch natives Kokosöl
TG	Triglyceride
LA	Linolsäure
AA	Arachidonsäure
DMS	Dimethylsulfat
TAG	Triacylglycerol
TF	traditionelle Frittiermethode
HA	heterozyklische Amine
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
R•	Alkylradikal
R-OO•	Peroxyradikal
R-OOH	Hydroperoxiden
C-C	Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen
C-O-C	Kohlenstoff-Sauerstoff-Kohlenstoff-Bindungen Kohlenstoff-Sauerstoff-Sauerstoff-Kohlenstoff-
C-O-O-C	Bindungen
DA-Reaktion	Diels-Alder-Reaktion
AGEs	Advanced Glycation End Products
HMF	5-Hydroxymethylfurfural
ROS	reaktive Sauerstoffspez

C ₃ H ₄ O	Acrolein
oxTAG	oxidierte Triacylglyceride
PTG	polymere Triacylglyceride
TPC	polare Verbindungen
BHT	Butylhydroxytoluol
PG	Propylgallat
CO ₂	Kohlendioxid
FFA	freie Fettsäuren
PV	Perioxidwert
AnV, AV	p-Anisidinwert
TOTOX	total Oxidation
TBHQ	tert-Butylhydrochinon
ALE	Advanced Lipoxidation End Products
4-HNE	4-Hydroxynonenal
Ca ²⁺	Kalzium
Cu ²⁺	Kupfer
Fe ²⁺	Eisen
Mg ²⁺	Magnesium
LOO·	Lipidperoxylradikal
LOOH	Lipidhydroperoxid
CAH	Carnosinsäure
CSH	Carnosol
ASZ	Altstoffsammelzentrum
TPM	Gesamt polare Stoffe
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie
PLS	Partial-Least-Squares-Regression
TPC	Gesamtheit an polaren Verbindungen
ML	Machine Learning

1 Einleitung

In der heutigen Zeit sind Frittieröle sowohl in der Gastronomie als auch im privaten Haushalt nicht mehr wegzudenken, da zahlreiche Speisen durch Frittierprozesse zubereitet werden. Neben dem Geschmack spielt insbesondere die thermische Stabilität eine entscheidende Rolle. Je widerstandsfähiger ein Frittieröl gegenüber hohen Temperaturen ist, desto besser lässt sich die Bildung gesundheitsschädlicher Nebenprodukte vermeiden. (Nagy K, et al, 2024)

Aufgrund dessen liegt ein großer Fokus auf dem Rauchpunkt, da dieser ein wichtiger Indikator dafür ist, ab welcher Temperatur das Öl sichtbar beginnt, sich zu zersetzen. Sobald das Öl zu rauchen beginnt, bilden sich vermehrt gesundheitsschädliche Stoffe wie Acrolein, die sich negativ auf die Gesundheit auswirken können. Um die Qualität des Öls während des Frittierprozesses zu erhalten, sollte immer ein Öl verwendet werden, dessen Rauchpunkt hoch ist, wie beispielsweise es bei Sonnenblumenöl und/oder Kokosöl der Fall ist. Öle mit einem hohen Rauchpunkt bieten auch einen besseren Schutz vor thermischer Zersetzung und oxidativer Belastung bei hohen Temperaturen. Allerdings liefert ein hoher Rauchpunkt allein auch keine Garantie für langfristige Ölqualität, da durch längere Hitzeperioden und wiederholtes Erhitzen der Schutz gegenüber gesundheitsschädlichen Nebenprodukten verloren geht. Durch die zunehmende Hitzeeinwirkung beginnt auch das stabile Öl zu oxidieren und zu zerfallen, was die Qualität des Frittieröls deutlich verschlechtert und mögliche Risiken für die Gesundheit birgt. (Kariminejad et al., 2023)

Deshalb ist es wichtig, gezielte Maßnahmen zu ergreifen, um während des Frittierprozesses die Entstehung gesundheitsschädlicher Nebenprodukte wie freie Radikale, Aldehyde, freie Fettsäuren (FFA), Peroxide, polare Verbindungen und Acrolein zu vermindern. (Grootveld, 2022) Während des Frittierens kommen sowohl das Öl als auch das Lebensmittel mit hohen Temperaturen, Feuchtigkeit und Sauerstoff (O_2) in Kontakt. Dies führt zu einer Reihe von chemischen Reaktionen wie Oxidation, Hydrolyse und Polymerisation (Ahmad et al., 2021). Infolgedessen können sich weitere schädliche Substanzen wie Lipidabbauprodukte (Vieira et al., 2017) und Acrylamid (Ghasemian et al., 2014) bilden. Diese chemischen Zersetzungsprodukte verursachen nicht nur einen unangenehmen Geruch und eine

unerwünschte Veränderung der Textur, sondern können auch erhebliche gesundheitliche Schäden im menschlichen Körper hervorrufen. (Grootveld, 2022)

Um dem entgegenzuwirken, ist der gezielte Einsatz hitzestabiler Antioxidantien im Frittieröl von großer Bedeutung, da diese die toxischen Abbauprozesse, die während des Frittierprozesses entstehen, deutlich reduzieren können. Durch diese Wirkung kann oxidativer Abbau von Lipiden minimiert und somit die Haltbarkeit des Speiseöls während des Prozesses erhöht (Ravi Kiran et al., 2015) werden, was zu einer verbesserten Qualität des Frittieröls führt. Antioxidantien wirken, indem sie freie Radikale neutralisieren, indem sie Elektronen an das radikalisierte ungepaarte Atom abgeben. Dadurch wird verhindert, dass eine Kettenreaktion ausgelöst wird, welche den oxidativen Abbau im Öl weiter vorantreiben würde (Valgimigli, 2023). Daraus lässt sich schließen, dass sie einen enormen Beitrag zur Aufrechterhaltung der Qualität und Stabilität der Frittieröle über einen längeren Zeitraum leisten (Ravi Kiran et al., 2015).

Natürliche Antioxidantien wie beispielsweise Tocopherole (Vitamin E) und Rosmarinextrakt haben sich als wirksam erwiesen, um die Haltbarkeit von Frittierölen zu verbessern. Auch die im Öl bereits vorhandenen Antioxidantien können synergistisch mit dem zugesetzten Antioxidans wirken, indem diese sich gegenseitig stärken. Das könnte den thermischen Abbauprozess von Lipiden deutlich reduzieren. (Valgimigli, 2023) (Song et al., 2023)

In dieser vorliegenden Masterarbeit wird geprüft, ob durch die Kombination von Frittierölen mit hohem Rauchpunkt mit hitzestabilen Antioxidantien wie Rosmarinextrakt die thermische Stabilität erhöht und eine stabile Ölqualität während längerer Heizperioden beibehalten wird. Ein zentraler Punkt der Untersuchung ist die Zugabe von Rosmarinextrakt zu Ölen, die einen hohen Rauchpunkt aufweisen, wie High-Oleic-Sonnenblumenöl (HO-Sonnenblumenöl), natives Kokosöl (VCO) und raffiniertes Kokosöl (RBD). Ziel ist es, praxisnahe Empfehlungen für diese Auswahl und Kombination zu erarbeiten, die eine nachhaltige Ölqualität und Produktsicherheit gewährleisten.

1.1 Bedeutung von Frittierölen in der Lebensmittelindustrie

Das Frittieren zählt zu der ältesten und weitverbreitetsten Methode der Speisezubereitung und wird seit Jahrhunderten genutzt (Saguy & Dana, 2003). Dadurch erhalten Speisen eine

angenehme Textur, ein intensives Aroma und ein appetitliches Aussehen. Dieser Prozess findet oftmals bei hohen Temperaturen zwischen 160 °C und 180°C (oftmals auch höher) statt (Dangal et al., 2024). Die Temperatur sollte vorzugsweise im Bereich zwischen 150 und 175°C liegen und sollte 180°C nicht überschreiten (laut DGF).

Die rasche Wärmeübertragung sorgt für eine kurze Garzeit von etwa 30 Sekunden bis zu 5 Minuten und führt zu einer effektiveren Abtötung von Mikroorganismen in Lebensmitteln im Vergleich zu anderen Kochtechniken (Tian et al., 2016) (Wang et al., 2021). Während des Frittierens dringen Hitze und Fett in das Lebensmittel ein, während Feuchtigkeit als Dampf entweicht (L. Chen et al., 2021). Diese Kombination aus Wärme- und Stoffaustausch macht Frittieren zu einer effektiven Methode für die schnelle Zubereitung von Speisen.

Bereits in der Antike gewann diese Kochtechnik eine bedeutende Rolle für Zubereitungen zahlreicher Speisen (Saguy & Dana, 2003). Heutzutage sind Frittieröle aus der modernen Lebensmittelherstellung nicht mehr wegzudenken. Sie sind grundlegend für die Zubereitung vieler beliebter Gerichte und tragen entscheidend zu deren Geschmack und Textur bei. Insbesondere spielen sie eine zentrale Rolle in der Lebensmittelindustrie, vor allem bei der Herstellung von frittierten Produkten wie Kartoffelchips, Pommes frites und diversen Teigwaren (Wang et al., 2021). Neben dem besseren Geschmack und der angenehmen Textur spielen sie auch eine wichtige Rolle für eine sichere und effiziente Herstellung.

1.2 Gesättigte und ungesättigte Fettsäuren in Kokosöl und High-Oleic-Sonnenblumenöl: Auswirkungen auf die Lebensmittelqualität und Gesundheit

Speiseöle bestehen aus unterschiedlichen Fettsäurenprofilen und sind daher essenziell für die Aufnahme von fettlöslichen Vitaminen wie A, D, E und K. Frittieröle (Youness et al., 2022) enthalten hauptsächlich gesättigte (SFA), einfach ungesättigte (MUFA) und mehrfach ungesättigte Fettsäuren (PUFA). Vor allem das Verhältnis von gesättigten zu ungesättigten Fettsäuren hat einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der frittierten Lebensmittel sowie auf deren gesundheitliche Aspekte. (Nagy et al., 2024)

Kokosöl enthält rund 90 % SFA, wovon etwa 50 % aus mittelkettigen Fettsäuren (MCFA) sind (Dayrit, 2015). Dieser hohe Anteil an SFA macht Kokosöl besonders oxidations- und

hitzebeständig (Chandran et al., 2017). Trotz dieser positiven technologischen Eigenschaften steht der hohe SFA-Gehalt ernährungsphysiologisch in der Kritik: Zahlreiche Gesundheitsorganisationen empfehlen, den Konsum gesättigter Fette zu begrenzen, da das Risiko für das Auftreten von Herz-Kreislauf-Erkrankungen (CVD) steigt. Gleichzeitig zeigen neuere Studien, dass die gesundheitlichen Effekte von SFAs differenziert betrachtet werden müssen. So hat Kokosöl im Vergleich zu tierischen Fetten wie Butter eine weniger negative Wirkung auf Gesamt- und LDL-Cholesterin. (Schwingshackl & Schlesinger, 2023)

Im Gegensatz dazu weist HO-Sonnenblumenöl ein günstiges Fettsäureprofil auf, das durch einen besonders hohen Anteil an Ölsäure, eine MUFA, oft über 80 %, charakterisiert ist. Diese einfach ungesättigten Fettsäuren bieten sowohl gesundheitliche Vorteile als auch eine hohe thermische Stabilität, da sie weniger oxidationsempfindlich sind als PUFA. HO-Sonnenblumenöl ist daher besonders geeignet für Hochtemperaturanwendungen wie das Frittieren und wird in der industriellen Lebensmittelproduktion zunehmend bevorzugt. (Franco, 2018)

1.2.1 Kokosöl

Kokosöl ist ein vielseitiges und weitverbreitetes Speiseöl, das aus dem Kern reifer Kokosnüsse gewonnen wird. Aufgrund seiner einzigartigen chemischen Zusammensetzung und gesundheitlichen Vorteile hat es in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen. Die Gewinnung des nativen Kokosöls erfolgt durch sogenannte „Nassverfahren“. Dabei werden frisch geraspelte Kokosnusstücke mit Wasser vermischt und durch verschiedene Methoden wie Fermentation, Zentrifugation, enzymatische Extraktion oder Mikrowellen-Heißverarbeitung zu Kokosöl verarbeitet. Dieses schonende Verfahren ermöglicht die Erhaltung natürlicher Inhaltsstoffe, Aromen und Nährstoffe. (Nitbani et al., 2022)

Kokosöl besteht hauptsächlich aus SFA, insbesondere Laurinsäure (C12:0), die etwa 42 g pro 100 g des Öls ausmacht (Dayrit, 2014). Interessanterweise enthält auch Muttermilch etwa 6 Prozent Laurinsäure, ein Hinweis darauf, wie wichtig diese Fettsäure für unseren Körper sein könnte (Nitbani et al., 2022). Neben Laurinsäure enthält es auch verschiedene andere gesättigte Fettsäuren, die unterschiedliche physikalische Eigenschaften und gesundheitliche Effekte aufweisen. Dazu zählen langkettige Fettsäuren wie Myristinsäure (17 g pro 100 g),

Palmitinsäure (9 g pro 100 g) und Stearinsäure (3 g pro 100 g). Darüber hinaus sind mittelkettige Fettsäuren wie Kaprylsäure (7 g pro 100 g) und Kaprinsäure (5 g pro 100 g) enthalten. Zudem findet sich in Kokosöl auch die einfach ungesättigte Fettsäure Ölsäure (6 g pro 100 g), die ebenfalls zu ernährungsphysiologischen Vorteilen des Öls beiträgt. (Schwingshackl & Schlesinger, 2023) (Dayrit, 2015)

Wie bereits erwähnt macht Laurinsäure im Kokosöl etwa 45 bis 53 Prozent aus, was diesen hohen Wert besonders hervorhebt (Dayrit, 2015). Im menschlichen Verdauungstrakt wird Laurinsäure enzymatisch aus Triglyzeriden freigesetzt und anschließend zu bioaktiven Metaboliten wie Monolaurin umgewandelt. Diese weisen antimikrobielle Wirkungen gegen bestimmte Bakterien, Viren und Pilze auf (Dayrit, 2015) (Nitbani et al., 2022a)

Ein weiterer physiologischer Vorteil von Kokosöl liegt in der schnellen Metabolisierung der mittelkettigen Triglyceride (MCTs), welche direkt zur Bildung von Energie und Ketonkörpern beitragen, anstatt als Körperfett gespeichert zu werden (Dayrit, 2015). Studien zeigen, dass MCTs die Blut-Hirn-Schranke problemlos überwinden und das Gehirn direkt mit Energie versorgen können. Dadurch lässt sich sowohl die kognitive Leistungsfähigkeit als auch die Verwertung von Glukose in den Mitochondrien der Nervenzellen verbessern. (Juby et al., 2022) (Sandupama et al., 2022)

Ein Artikel aus Nutrition, Metabolism & Cardiovascular Diseases zeigt anhand von männlichen Ratten, wie sich Gesamtcholesterin und Triglyceride im Serum sowie das HMG-CoA/Mevalonat-Verhältnis durch die Zugabe von Kokosöl verändern. Die Tiere wurden in zwei Gruppen aufgeteilt. Die eine Gruppe erhielt hochverarbeitetes natives Kokosöl (HP-VCO) und die andere frisches natives Kokosöl (F-VCO). In beide Gruppen, die HP-VCO erhielten, stiegen das Gesamtcholesterin und Triglyceride (TG) im Serum, während in der F-VCO-Gruppe niedrige Triglyceridspiegel aufwies. Der LDL-Cholesterinspiegel nahm in allen Gruppen, die VCO erhielten, ab und gleichzeitig stieg das HDL-Cholesterin. Ebenfalls wurde ein leichter Anstieg des HMG-CoA/Mevalonat und des reduzierten Glutathions (GSH) beobachtet sowie eine Verringerung der Glutathion-S-Transferase. (Kandiyil et al., 2024)

Eine weitere Tierstudie bestätigt, dass Kokosöl eine hypoglykämische, antiinflammatorische und antioxidative Eigenschaft besitzt. Anhand von männlichen Sprague-Dawley-Ratten wurde bewiesen, dass durch die orale Gabe von VCO der Nüchternblutzuckerspiegel signifikant

sank und die orale Glucosetoleranz verbessert wurde. Ebenfalls wurde beobachtet, dass das Seruminsulin, die Superoxiddismutase-Aktivität (SOD), Katalase und GSH signifikant anstiegen. (Iranloye et al., 2013)

Zwar deuten einige Tierstudien darauf hin, dass VCO potenziell positive Auswirkungen auf Stoffwechselfparameter wie Gesamtcholesterin, TG und antioxidative Kapazität bewirken und auch einen signifikanten Einfluss auf den Nüchternblutzuckerspiegel und die orale Glucosetoleranz sowie einen Anstieg antioxidativer Enzyme wie SOD und Katalase bewirken, jedoch sind für eine endgültige Bewertung der klinischen Relevanz von VCO weitere Studien am Menschen erforderlich, um diese Aussagen zu bestätigen.

In dieser Masterarbeit stellt raffiniertes Kokosöl (RBD) aufgrund seiner höheren Hitzebeständigkeit und besseren Oxidationsstabilität die geeignetere Wahl dar. Im Vergleich dazu bietet natives Kokosöl (VCO) zwar gesundheitliche Vorteile aufgrund seines hohen Gehalts an phenolischen Verbindungen, ist jedoch durch intensivere Erhitzung weniger stabil und kann schneller oxidieren. (Marina et al., 2009) Ein weiterer Vorteil von RBD ist seine Geruchs- und Geschmacksneutralität, die insbesondere bei der Zubereitung von Speisen erwünscht ist. Aus diesem Grund bietet RBD eine praktische und sichere Wahl in der Frittiertechnologie dar. (Ng et al., 2021)

Tabelle 1: Eigenschaften von VCO und RBD-Kokosöl

Eigenschaft	VCO	RBD-Kokosöl
Gewinnung	Kaltpressung (frisch)	Heißpressung + Raffinierung
Geschmack/Aroma	Kokosnussig	Neutral
Phenolische Verbindungen	Hoch	Gering
Hitzestabilität	Mittel	Hoch
Geeignet zum Frittieren?	Eingeschränkt	Ja

(Eigene Darstellung)

1.2.2 Konventionelles vs. High-Oleic-Sonnenblumenöl

So wie Kokosöl ist auch Sonnenblumenöl ein beliebtes Produkt im Haushalt, um Lebensmittel zu frittieren oder zu braten. Dieses Speiseöl wird aus verarbeiteten Sonnenblumenkernen gewonnen und dient neben dem Kochen auch als Rohstoff in der

Lebensmittelindustrie, da es ebenfalls für die Herstellung von Margarine, Butter, Brot und Snacks verwendet wird. (Franco, 2018)

Nach Angaben der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) zeichnen sich konventionelles Sonnenblumenöl durch einen hohen Gehalt an Linolsäure (LA, C18:2), einer mehrfach ungesättigten Omega-6-Fettsäure, sowie α -Tocopherol (Vitamin E) aus, die beide mit positiven Gesundheitseffekten verbunden werden. Mit einem Linolsäureanteil von bis zu 75 % zählt herkömmliches Sonnenblumenöl zu den Omega-6- fettsäurereichen Quellen. (Franco, 2018)

Jedoch zeigen Studien, dass ein übermäßiger Verzehr von Omega-6-Fettsäuren, insbesondere von LA, proinflammatorisch wirken kann. Dies geschieht im Körper durch die Umwandlung von LA über die enzymatische Aktivierung durch Δ 6-Desaturase, Elongase sowie Δ 5-Desaturase zu Arachidonsäure (AA). (Wall et al., 2010) (Kim et al., 2022) Aus dieser entstehen verschiedene Eicosanoide wie Prostaglandine, Leukotriene und Thromboxane, die in zahlreichen Studien mit erhöhten Entzündungsmarkern wie CRP und Interleukin-6 (IL-6) in Verbindung gebracht wurden (de Batlle et al., 2012).

In der heutigen Zeit wird vor allem ein großer Fokus auf so genannte „Nutraceuticals“ gelegt. Das Wort bildet sich aus den Begriffen, „Nährstoff“ und „Pharmazeutika“. Die französische Nutraceutical School definiert es, als weites Spektrum an Nährstoffen in einem Lebensmittel, sodass spezifische physiologische präventive und/oder gesundheitsfördernde Wirkungen erzielt werden können. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese in ihrer Zusammensetzung modifiziert werden, indem der Gehalt an Vitaminen, Mineralien, Fettsäuren, Antioxidantien oder Ballaststoffen verbessert wird, um dadurch die ernährungsphysiologischen Vorteile für den Menschen zu erhöhen. (Franco, 2018)

Ein hervorragendes Beispiel dafür ist HO-Sonnenblumenöl, das dank seines hohen Gehalts an einfach ungesättigten Fettsäuren trotzdem hitze- und oxidationsstabil ist. Um die physiologischen Eigenschaften von Sonnenblumenöl gezielt zu verbessern, wurde zunehmend der Fokus auf die Entwicklung sogenannter Sonnenblumenhybride gelegt. Dabei liegt ein großes Augenmerk auf der Fettsäurezusammensetzung, insbesondere auf der Erhöhung des Anteils an einfach ungesättigten Fettsäuren wie der Ölsäure (C18:1). Durch diese Modifikation wird nicht nur der Ölsäuregehalt maximiert, sondern gleichzeitig der Anteil an

Omega-6-Fettsäuren (z. B. Linolsäure) deutlich reduziert, was ernährungsphysiologisch einen deutlich besseren Vorteil bringt. (Alberio et al., 2016)

Dies wurde im Jahr 1976 von Soldatov erzielt, indem er die Sonnenblumensamen der Sorte VNIIMK 8931 mit einer Dimethylsulfat-Lösung (DMS) behandelte, wodurch gezielt Mutationen ausgelöst wurden. Aus den resultierenden Pflanzen wurde die erste High-Oleic-Sonnenblumensorte „Pervenec“ selektiert, die einen hohen Ölsäuregehalt von 80 bis 93% aufweist. DMS ermöglicht es, gezielt die Ölsäurewerte zu erhöhen und die Oxidationsstabilität signifikant zu verbessern, was ein entscheidender Faktor bei der Verwendung unter hohen Temperaturen, wie etwa beim Frittieren, ist. (Vasko & Kyrychenko, 2019) (Franco, 2018)

Tabelle 2: Vergleich von konventionellem und High-Oleic-Sonnenblumenöl

Eigenschaft	Konventionelles Sonnenblumenöl	High-Oleic-Sonnenblumenöl
Hauptfettsäure	Linolsäure	Ölsäure
Anteil Linolsäure	Hoch	Deutlich reduziert
Anteil Ölsäure	Gering	Hoch
Gesundheitswirkung	Potenziell proinflammatorisch	antiinflammatorisch
Oxidationsanfällig	Ja	Weniger

(Eigene Darstellung)

1.2.3 Lipidoxidation während des Frittierens

Beim Frittieren kommt das Speiseöl mit hohen Temperaturen in Kontakt. Während dieses Vorganges entstehen viele neue Verbindungen, darunter eine große Anzahl von unerwünschten oder sogar potenziell gesundheitsschädlichen Zwischenprodukten.

Ein großes Problem stellt die intermittierende Frittiermethode dar. Bei dieser Methode wird das Öl nicht durchgehend erhitzt, sondern es werden dazwischen Pausen eingelegt. Denn durch das wiederholte Erhitzen und Abkühlen wurde die höchste Abbaurate von Ölen festgestellt. Dieser Prozess führt zur Bildung von oxidierenden Verbindungen, Transfetten und weiteren Schadstoffen. Dies beeinflusst nicht nur den Geschmack, sondern auch die Gesundheit zum Negativen. (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015)

Zu den bekanntesten Reaktionen während des Frittierens gehören Hydrolyse, Oxidation und Polymerisation, die für die Zersetzung der Fettstruktur verantwortlich sind und für Qualitätsminderung sorgen. Durch diese Vorgänge kommt es zur Freisetzung von Fettsäuren, welche durch den Kontakt mit Feuchtigkeit aus dem Lebensmittel entstehen. Die Spaltung von Esterbindungen führt zur Bildung von Monoacylglycerolen und Diacylglycerolen. Ebenfalls begünstigen hohe Temperaturen und der Kontakt mit Luft die Entstehung von freien Radikalen, die die Fettmoleküle weiter verändern. (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015)

Triacylglycerole (TAGs) sind die Hauptbestandteile von Ölen und Fetten. TAG besteht aus einem Glycerinmolekül und ist durch Esterbindungen mit drei weiteren Fettsäuren verknüpft (Abb.1). Dadurch bleibt dieses Fettmolekül stabil.

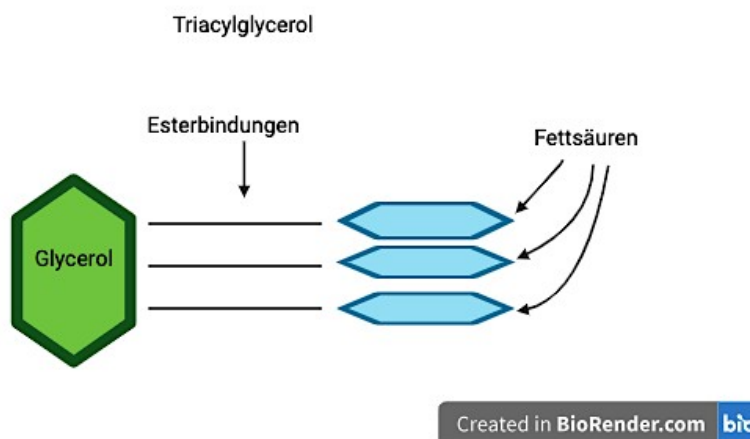


Abbildung 1: TAG-Molekül, welches aus einem Glycerin-Rückgrat besteht, an das drei Fettsäuren über Esterbindungen verbunden sind. Quelle: Eigene Darstellung nach (M. C. Dobarganes, 2009)

Sobald es zu einer Spaltung kommt, entstehen einzelne Fettsäuren sowie auch kürzere Glycerinverbindungen wie Monoacylglycerole und Diacylglycerole. Diese sind im Gegensatz zu ihrem Vorgänger instabiler und können daher leichter mit anderen Stoffen reagieren. Dieser Vorgang führt zu einer Veränderung der Fettsäurestruktur, da sie weiter oxidiert, insbesondere bei hohen Temperaturen. Zudem bilden sich schädliche Nebenprodukte, wie zum Beispiel freie Radikale und polare Verbindungen. Polare Verbindungen werden unter anderem auch als Indikator für den Abbau des Öles eingesetzt. Daraufhin entstehen weitere

Abbauprodukte wie TAG-Polymere (TAG-Dimere und -Oligomere) und oxidierte TAG-Monomere. (siehe Tabelle3) (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015)(Erickson, 2007)

Jedoch ist die genaue Abbaugeschwindigkeit schwer vorherzusagen, da Faktoren wie Temperatur, die Dauer des Erhitzens, kontinuierliches oder diskontinuierliches Erhitzen, ebenfalls auch die Art des Lebensmittels und das verwendete Öl eine Rolle spielen. Diese Parameter sind nicht nur für den Abbauprozess entscheidend, sondern auch maßgeblich für die Vorhersage der Lebensdauer des Frittieröls. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist dabei neben dem Gehalt an ungesättigten Fettsäuren auch die Zugabe von Antioxidantien. (Erickson, 2007)

Neben klassischen kinetischen Ansätzen zeigen jüngere Arbeiten, dass sich die Standzeit von Frittierölen datengetrieben prognostizieren lässt: FTIR (Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie kombiniert mit PLS (Partial-Least-Squares-Regression)) sagt Säurewert und die Gesamtzahl polarer Verbindungen voraus (J. Y. Chen et al., 2015).

Impedanz-/elektrochemische Signale kombiniert mit Machine Learning (ML) ermöglichen praxistaugliche Vorhersagen zur Anzahl der gesamten polaren Verbindungen (Patil et al., 2023). In einer aktuellen Studie zur schnellen Oxidationsbewertung von Erdnussöl erzielten neuronale Netzwerke eine 100- %ige Genauigkeit bei der Klassifikation von Peroxidstufen (W. Liu et al., 2024). Damit lässt sich sagen, dass dies ein effektives, schnelles Verfahren zur Vorhersage des Oxidationsstatus ist.

1.2.4 Chemische Veränderungen während des Frittierens

Beim Frittieren handelt es sich um ein thermisches Verfahren, bei dem nicht nur Wärme, sondern auch bestimmte Stoffe zwischen dem Öl und den Lebensmitteln ausgetauscht werden. Die Prozesse beim Frittieren bewirken eine Reihe von physikochemischen und strukturellen Veränderungen.(Wang et al., 2021) Während des Garprozesses tritt das Öl durch Wärme in das Lebensmittel und gleichzeitig entweicht Wasser in Form von Dampf aus dem Lebensmittel in das Öl. Durch die Wärmeübertragung und den Verlust von Wasser werden Proteine im Lebensmittel denaturiert, was zu einer Veränderung der Proteinstruktur führt. Daraufhin erscheint die Konsistenz der äußeren Schicht des Lebensmittels fester bzw. knuspriger. (Udomkun et al., 2019) Ebenfalls nimmt das Lebensmittel einen gewissen Anteil an Öl auf, wodurch es an Aromen und zusätzlichen Nährstoffen gewinnt. (Wang et al., 2021)

Durch das kontinuierliche Verwenden von demselben Frittieröl können sich Abbauprodukte bilden, die die Qualität als auch die Gesundheit negativ beeinflussen. (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015) Zu den schädlichen Abbauprodukten zählen Verbindungen wie FFA, Aldehyde, Ketone und flüchtige organische Verbindungen, die das Risiko für chronische Erkrankungen wie Krebs und Herzerkrankungen deutlich erhöhen. (Yildiz et al., 2024)

Traditionelle Frittiermethoden (TF) sind zwar in jedem Land anders, jedoch basieren sie auf einem ähnlichen Grundprinzip. Das Frittieröl wird zwischen 160 und 190 °C, solange bis das Lebensmittel die erwünschte Eigenschaft erreicht, erhitzt. Nichtsdestotrotz hängt die Garzeit von der Größe und dem Zustand des Lebensmittels ab und kann dadurch von der Dauer des Frittierens unterschiedlich lang oder kurz sein. Da das Lebensmittel für eine gewisse Zeit hohen Temperaturen ausgesetzt ist, kann es passieren, dass seine Bestandteile wie Proteine, Fette und Kohlenhydrate abgebaut werden, was sich durch unerwünschten Geschmack und Duft sowie auch durch veränderte Farbe bemerkbar macht. (Devi et al., 2021)

Wie bereits erwähnt finden während des Frittierens verschiedene chemische Reaktionen statt, wie etwa die Oxidation, die Polymerisation, die Hydrolyse, aber auch Maillard-Reaktion sowie die Denaturierung von Proteinen. In diesen Prozessen können sich schädliche Verbindungen wie heterozyklische Amine (HA), Acrylamid, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Transfette bilden, die gesundheitlich bedenklich sind. Besonders PAK gelten als hoch kanzerogen und treten bei einer Temperatur über 200 °C auf. Aufgrund zahlreicher Studien, die belegen, dass die Aufnahme von PAKs das Risiko für Brust-, Darm-, Lungen- und Prostatakrebs signifikant erhöht, wurde gemäß der Verordnung 835/2011 [European Union, 2011] ein Grenzwert von 10 µg/kg für den PAK-Gehalt in pflanzlichen Ölen festgelegt. (Xu et al., 2023) (Yildiz et al., 2024)

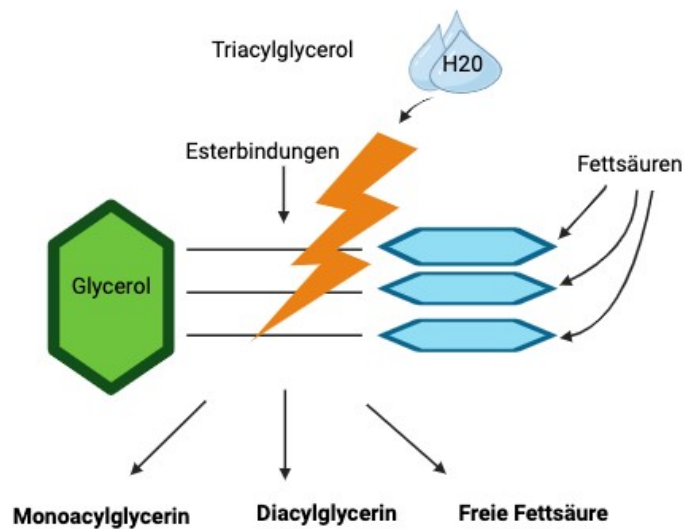
1.3 Hydrolyse, Oxidation und Polymerisation während des Frittierens

Beim Frittieren laufen verschiedene chemische Prozesse wie die Oxidation, Polymerisation und Hydrolyse ab. Diese Prozesse führen dazu, dass sich die Zusammensetzung und Qualität des Frittieröls sowie der zubereiteten Speisen verschlechtern, was sowohl ernährungsphysiologische als auch sensorische Nachteile mit sich bringen kann.

1.3.1 Hydrolyse

Hydrolyse ist jene Reaktion, die das TAG-Molekül aufbricht. Daraus entstehen Monoacylglycerine, Diacylglycerine und FFA. Diese weisen ein niedrigeres Molekulargewicht als ihr Vorgänger auf, sind instabiler und somit anfälliger sich oxidativ zu verändern. (M. C. Dobarganes, 2009)

Viele frittierte Speisen, wie Gemüse, Fleisch oder Fisch, enthalten Wasser. Während des Frittierprozesses tritt Wasser aus dem Lebensmittel heraus und mischt sich mit dem Speiseöl. Dort findet anschließend die Hydrolyse statt. Während der Hydrolyse bilden sich FFA, die die Stabilität und die Rauchgrenze des Öls senken. Sobald das Öl zu rauchen beginnt, wird das Frittieren schwieriger und dadurch kann die sensorische Qualität der zubereiteten Speise negativ beeinflusst werden. Durch die Entstehung von freien Fettsäuren, Monoacylglycerinen und Diacylglycerinen, kommt es nicht nur zur Verringerung der Hitzebeständigkeit des Öls, sondern auch zur Bildung von kleinen, flüchtigen Molekülen, die sich durch veränderten Geruch und Geschmack bemerkbar machen. Ebenfalls verringert sich auch die Oberflächenspannung des Frittieröls, was dazu führt, dass es zu keiner gleichmäßigen Hitzeverteilung kommt und somit das Lebensmittel ungleichmäßig angebraten wird. (M. C. Dobarganes, 2009)



Created in BioRender.com 

Abbildung 2: Hydrolyse ist jene Reaktion, die das TAG-Molekül aufbricht. Daraus entstehen Monoacylglycerine, Diacylglycerine und FFA. Quelle: Eigene Darstellung nach (M. C. Dobarganes, 2009)

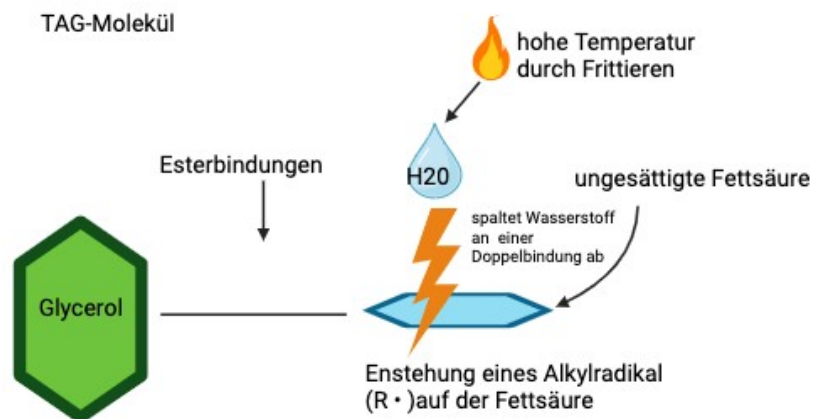
1.3.2 Oxidation

Während des Frittierens spielt Lipidoxidation eine zentrale Rolle. Sie ist ein ausgesprochener komplexer Prozess, da hier oxidative und thermische Reaktionen parallel ablaufen. Darüber hinaus entsteht eine Vielzahl von chemischen Veränderungen.

Normalerweise löst sich der vorhandene Sauerstoff im Öl. Wenn aber die Temperatur steigt, nimmt zwar die Menge an vorhandenem Sauerstoff ab, jedoch führen die hohen Temperaturen dazu, dass der verbleibende Sauerstoff schneller mit dem Fettmolekül reagiert und somit die Oxidation beschleunigt. Das bedeutet, dass die Oxidation auch bei geringer Sauerstoffmenge im Öl stattfinden kann, wenn die Temperatur ausreichend hoch ist. Je höher die Temperatur, desto höher die chemischen Reaktionen. (M. C. Dobarganes, 2009)

Der Oxidationsprozess durchläuft drei Schritte. Zuerst beginnt die Initiation, dann Propagation und am Ende die Termination:

1. Initiation (Startphase): In dieser Phase wird einer Doppelbindung einer ungesättigten Fettsäure des TAG-Moleküls ein Wasserstoffatom entzogen. Daraus entsteht das Alkylradikal ($R\bullet$), das aufgrund seines ungepaarten Elektrons sehr reaktiv ist und leicht mit anderen Molekülen reagiert. Dieser Schritt führt zur Destabilisierung und beschleunigt die Oxidationskette. (M. C. Dobarganes, 2009)

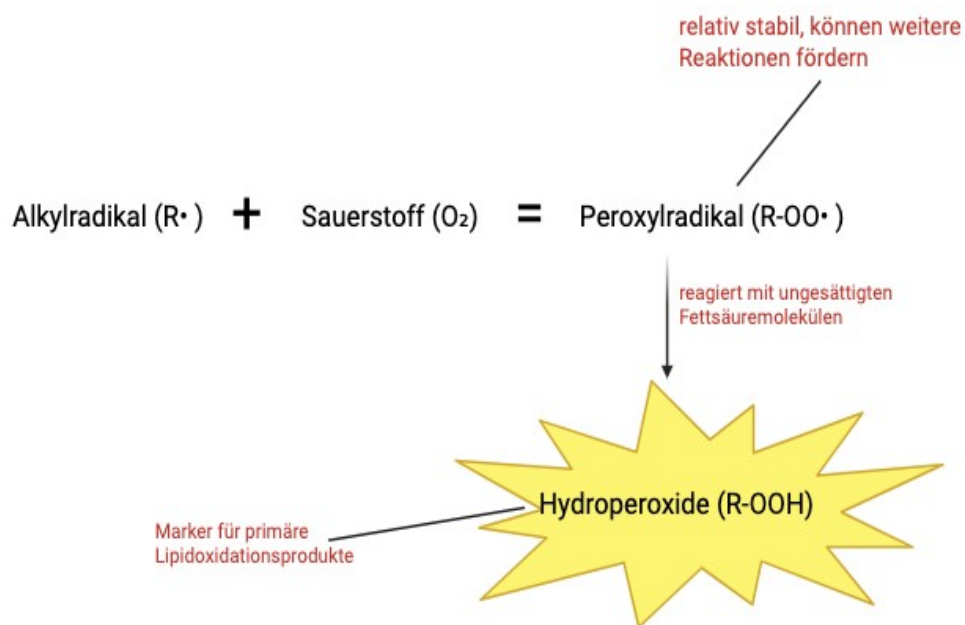


Created in BioRender.com 

Abbildung 3: Initiation der Lipidoxidation: Angriff des Initiators, hier Hitze, führt zur Wasserstoffabspaltung an der Doppelbindung der ungesättigten Fettsäure und zur Bildung des reaktiven Alkylradikals ($R\bullet$). Quelle: Eigene Darstellung nach (M. C. Dobarganes, 2009)

2. Propagation (Fortsetzung): Das im Initiationsschritt gebildete Alkylradikal ($R\bullet$) reagiert mit molekularem Sauerstoff (O_2) zu einem Lipidperoxyradikal ($R-OO\bullet$). Dieses Zwischenprodukt bleibt reaktiv, da es selbst ein ungepaartes Elektron trägt, und setzt die Radikalkettenreaktion fort. Dadurch können sie weitere Reaktionen mit anderen Molekülen bilden. Somit reagiert das Peroxyradikal mit anderen ungesättigten Fettsäurenmolekülen, was zur Bildung von Hydroperoxiden ($R-OOH$) führt. $R-OOH$ ist das erste Oxidationsprodukt und wird als Marker für den

Oxidationsgrad von Fetten und Ölen verwendet. Daraufhin entstehen weitere Kettenreaktionen und es kommt zur Oxidation der Fettsäuren. Aus diesen Oxidationen bilden sich neue chemische Verbindungen wie Aldehyde, Ketone und andere sekundäre Produkte, die sich negativ auf die Qualität, den Geschmack des Lebensmittels und die Gesundheit auswirken können. (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015) (M. C. Dobarganes, 2009)



Created in BioRender.com bio

Abbildung 4: Propagation-Phase der Lipidoxidation: Das Alkylradikal ($R\cdot$) reagiert mit Sauerstoff (O_2) und bildet das Peroxylradikal ($R-OO\cdot$). Dieses greift weitere ungesättigte Fettsäuremoleküle an und führt zur Bildung von Hydroperoxiden ($R-OOH$), den primären Oxidationsprodukten im Prozess. Quelle: Eigene Darstellung nach (M. C. Dobarganes, 2009) (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015)

3. Termination (Endphase): Da freie Radikale hochreaktive Moleküle sind und nur gestoppt werden können, wenn das ungepaarte Elektron gepaart ist, reagieren sie so lange, bis jedes sein Partnerradikal gefunden hat. Während dieser Reaktion kann es zur Bildung von dimeren, trimeren oder oligomeren Verbindungen kommen. (M. C. Dobarganes, 2009) (Yildiz et al., 2024)

1.3.3 Polymerisation

Die Bildung von dimeren, trimeren oder oligomeren Verbindungen, auch als TAG-Polymere bezeichnet, führt letztendlich zur Polymerisation. Diese Polymere bestehen aus Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen (-C-C-), Kohlenstoff-Sauerstoff-Kohlenstoff-Bindungen (-C-O-C-) und Kohlenstoff-Sauerstoff-Sauerstoff-Kohlenstoff-Bindungen (-C-O-O-C-) (Yildiz et al., 2024). Da es sich um einen fortlaufenden Prozess handelt, können sich diese Verbindungen so lange vermehren, bis das ungepaarte Elektron des Radikals durch ein Elektron eines anderen Moleküls gestoppt wird. Daraus können lange Ketten entstehen und zu einem Netzwerk zusammenwachsen. Durch hohe Temperaturen, wie sie beim Frittieren üblich sind, kann die Polymerisationsreaktion beschleunigt werden. (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015)

Es existieren zwei Arten von Polymerisationsreaktionen:

1. Polymerisation in Abwesenheit von Sauerstoff:

Hier erfolgt die Reaktion über -C-C-Bindungen. Da hier kein Sauerstoff benötigt wird, werden Polymere durch radikalische Kettenreaktionen oder über Diels-Alder-Reaktionen (DA-Reaktion) gebildet. Bei dieser DA-Reaktion reagieren ein Dien (ein Molekül mit zwei Doppelbindungen) und ein Dienophil (ein Molekül mit einer Doppel- oder Dreifachbindung) miteinander. Daraus ergibt sich ein Cyclohexan-Derivat. (Q. Zhang et al., 2012) (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015)

2. Polymerisation in Anwesenheit von Sauerstoff:

Durch die Anwesenheit von Sauerstoff bilden sich aus dem TAG so genannte ox-TAG-Monomere. Diese Monomere können sich dann zu einem größeren Netzwerk polymerisieren. Dabei entstehen -C-C-, -C-O-C- und -C-O-O-C- Verbindungen. Aus diesen Verbindungen bilden sich Dimere, Trimere oder Oligomere. Durch die Anwesenheit von Sauerstoff wird die Stabilität und Komplexität des gebildeten Polymers verstärkt. (Yildiz et al., 2024) (Byrdwell & Neff, 2004)

Welche Produkte bei der Polymerisation entstehen, ist von der Fettsäurezusammensetzung im Speiseöl und schlussendlich vom Sauerstoffgehalt abhängig.

Die Produkte der Polymerisation lassen sich in zwei Hauptkategorien unterteilen:

1. Nichtpolare TAG-Polymere:

Diese Polymere entstehen durch Dehydrierung oder durch die Bildung von Dimeren. Sie werden als Dehydrodimere, nichtzyklische Dimere und zyklische Dimere bezeichnet. Sie sind in der Lage, die Viskosität im Öl zu erhöhen, was zur Verschlechterung der Ölqualität führen kann. (Q. Zhang et al., 2012) (Khor et al., 2019) (Q. Zhang et al., 2015)

2. Polare TAG-Polymere:

Die genaue Zusammensetzung dieser Polymere ist noch nicht genau erforscht. Dennoch weiß man, dass polare TAG-Polymere die Stabilität und die sensorische Eigenschaft des Öls negativ beeinflussen können. (Q. Zhang et al., 2015)

Während des Polymerisationsprozesses färbt sich das Frittieröl häufig dunkel und führt zu einer erhöhten Viskosität. Diese Veränderungen deuten darauf hin, dass sich das Öl zersetzt und weisen somit auf einen Ölwechsel hin. Deshalb werden in der Praxis TAG-Polymere oft als Qualitätsindikator verwendet, um diesen Veränderungen, die der Qualität des Lebensmittels und der Haltbarkeit des Öls schaden, entgegenzuwirken. (siehe Tabelle 3) (Khor et al., 2019)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein hoher Gehalt an Polymeren ein Zeichen für ein minderwertiges Öl ist und dass durch die Verwendung des Indikators die Haltbarkeit von Ölen und die Qualität des Lebensmittels gesichert werden können. (siehe Tabelle 3) (Khor et al., 2019) (Q. Zhang et al., 2015)

1.4 Maillard-Reaktion in frittierten Lebensmitteln

Die Maillard-Reaktion ist eine nicht-enzymatische chemische Reaktion, die zwischen reduzierenden Zuckern und Aminosäuren stattfindet, bei Temperaturen über 50 °C und langen Kochzeiten (Pérez-Burillo et al., 2019). Typische Merkmale sind eine Braunfärbung und Aromabildung des Lebensmittels. Neben der gewünschten Aromabildung und Farbbildung entstehen jedoch auch unerwünschte und gesundheitsschädliche Nebenprodukte wie Acrylamid und Advanced Glycation End Products (AGEs). (C. Zhang et al., 2025)

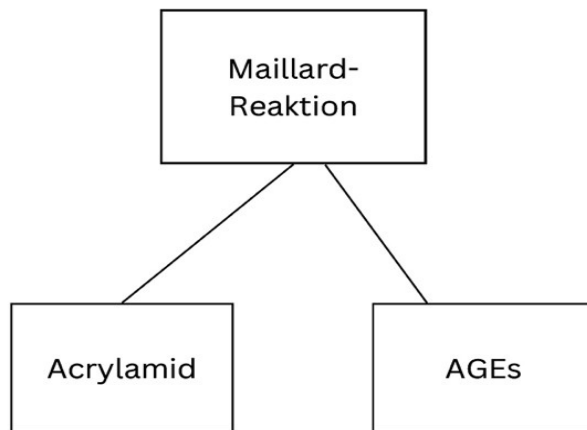


Abbildung 5: Flussdiagramm der Maillard-Reaktion, in der die Produkte Acrylamid und AGEs entstehen. Quelle: Eigene Darstellung nach (C. Zhang et al., 2025).

Um den Fortschritt der Bildung der Maillard-Reaktion zu bestimmen, existieren zwei chemische Verbindungen, die als Indikator herangezogen werden (siehe Tabelle 3) (Rufián-Henares et al., 2013):

1. Furosin: Furosin ist ein Produkt der sauren Hydrolyse von Amadori-Verbindungen und wird als Indikator in den Anfangsstadien der Maillard-Reaktion verwendet (siehe Tabelle 3) (Rufián-Henares et al., 2013).
2. 5-Hydroxymethylfurfural (HMF): HMF bildet sich in den fortgeschrittenen Stadien der Maillard-Reaktion und dient ebenfalls als Indikator (siehe Tabelle 3) (Rufián-Henares et al., 2013).

1.4.1 Entstehung von Acrylamid und AGEs als Nebenprodukt der Maillard-Reaktion

Die Maillard-Reaktion führt bei hohen Temperaturen zur Bildung der Nebenprodukte Acrylamid und Advanced Glycation End Products (AGEs), die gesundheitlich bedenklich sind. Beide Produkte fördern oxidative Schäden und Entzündungen, was die Bedeutung von Maßnahmen zur Minimierung ihrer Bildung, insbesondere beim Einsatz und der Optimierung von Frittierölen, hervorhebt. (Pérez-Burillo et al., 2019) (Bethke & Bussan, 2013)

1.4.1.1.1 Acrylamid

Acrylamid ist eine chemische Verbindung, die bei hohen Temperaturen (über 100 °C) und verringerter Feuchtigkeit im Lebensmittel (Bethke & Bussan, 2013) während des Bratens, Backens oder Frittierens entsteht. Acrylamid wird als Nebenprodukt während der Maillard-Reaktion gebildet, jedoch nur, wenn die Aminosäure Asparagin mit den Carbonylgruppen eines reduzierenden Zuckers, wie Glucose oder Fruktose, bei hohen Temperaturen miteinander reagiert. Daraus bildet sich ein instabiles Zwischenprodukt, auch genannt Schiff-Base. Anschließend folgt die Amadori-Umlagerung, wodurch ein stabiles Zwischenprodukt entsteht. Daraufhin findet eine Decarboxylierung statt, in der sich Acrylamid entwickelt. Besonders stärkehaltige Lebensmittel wie Kartoffeln sind am meisten betroffen, da sie reich an Asparagin und Zucker sind. Auf Grund dessen weisen sie beim Frittieren, Braten oder Backen hohe Acrylamidwerte auf. (Bethke & Bussan, 2013) (Smit et al., 2025) (Muttucumaru et al., 2013)

In Tierversuchen wurde bewiesen, dass Acrylamid genotoxische, kanzerogene, neurotoxische und spermienschädigende Eigenschaften besitzt. Auch existieren Humanstudien, die beobachten, dass es das periphere Nervensystem schwer beschädigen kann, da unter anderem die Nerven Reize nicht vollständig weiterleiten können. Weiteres können auch Symptome wie Muskelschwäche, verminderter Muskeltonus, Tremor der Hände und Schmerzempfindlichkeit an den Armen auftreten. Ebenfalls wurde berichtet, dass Acrylamid zu Appetitlosigkeit, Gewichtsverlust, Müdigkeit und Störung des Gleichgewichts führen kann. (Madle et al., 2003)

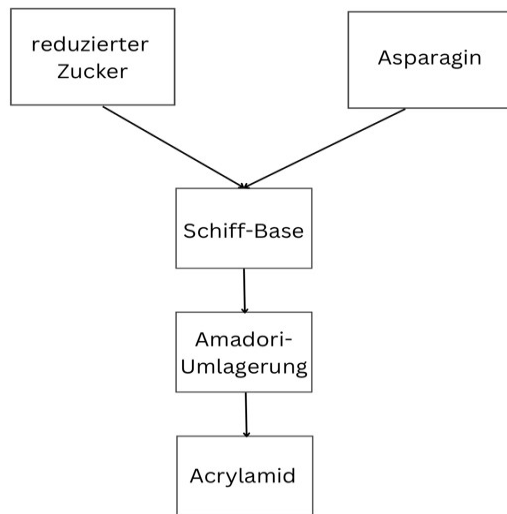


Abbildung 6: Flussdiagramm der Maillard-Reaktion zur Acrylamidbildung durch die Reaktion von reduzierenden Zuckern und Asparagin. Quelle: Eigene Darstellung nach (Smit et al., 2025) (Muttucumaru et al., 2013) (Bethke & Bussan, 2013)

1.4.1.1.2 Advanced Glycation End Products (AGEs) vs. Advanced Lipoxidation End Products (ALEs)

Advanced Glycation End Products (AGEs) sind ein Produkt der Maillard-Reaktion, indem reduzierte Zucker nicht-enzymatisch mit Aminogruppen reagieren (Pérez-Burillo et al., 2019). Wenn die primäre Aminogruppe ($-NH_2$), beispielsweise aus einem Protein, mit der Carbonylgruppe eines reduzierenden Zuckers, wie Glucose oder Fructose, reagiert, bildet sich zuerst die so genannte Schiff-Base (Reddy & Beyaz, 2006) (Pérez-Burillo et al., 2019). Auf die Bildung der Schiff-Base folgt die Amadori-Umlagerung (ähnlich wie bei Acrylamid), indem es zu einer intramolekularen Umlagerung in ein stabileres Keton- oder Aldehyd-Derivat kommt (Reddy & Beyaz, 2006). Weiters kommt es zur Oxidation der Amadori-Produkte durch Sauerstoff oder oxidative Stressfaktoren. Dabei entstehen hochreaktive Zwischenprodukte wie Methylglyoxal, die kovalente Quervernetzungen zwischen Proteinen und anderen Molekülen bewirken können. Dadurch kann es zu einem Abfall der

Enzymaktivität kommen. (Van Nguyen, 2006) (Reddy & Beyaz, 2006) (Pérez-Burillo et al., 2019) Dies kann unter anderem die Entstehung von Diabetes, neurologischen Erkrankungen wie Alzheimer, Gefäßversteifung, Atherosklerose, Osteoarthritis, entzündlicher Arthritis und Katarakten begünstigen. (Pérez-Burillo et al., 2019)

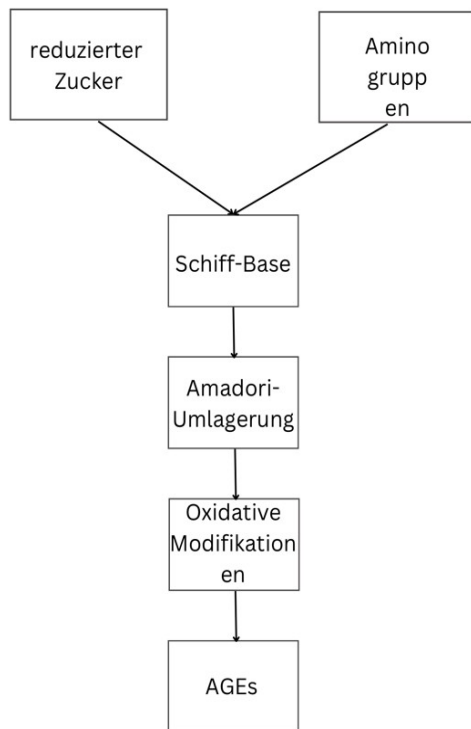


Abbildung 7: Flussdiagramm der Maillard-Reaktion zur Bildung von AGEs durch die nicht-enzymatische Reaktion von reduzierenden Zuckern mit freien Aminogruppen aus Proteinen. Quelle: Eigene Darstellung nach (Pérez-Burillo et al., 2019) (Reddy & Beyaz, 2006)

AGEs können kovalent mit funktionellen Gruppen von Proteinen vernetzen und in geringerem Maße auch mit Lipiden oder Nukleinsäuren reagieren. Die klassische Maillard-Reaktion betrifft hauptsächlich Aminogruppen in Proteinen, während Lipide vor allem durch oxidativen Stress, wie hohe Temperaturen, reaktive Carbonylverbindungen, wie Malondialdehyd und 4-Hydroxynonenal (4-HNE), bilden. Die Bezeichnung wird als Advanced Lipoxidation End Products (ALEs) verwendet. Diese hochreaktiven Lipidabbauprodukte, die ähnliche strukturelle Veränderungen hervorrufen können wie AGEs, können kovalent mit Aminogruppen in Proteinen reagieren, wodurch Lipid-Protein-Addukte entstehen. Dadurch

sind sie in der Lage, die Proteinstruktur und ihre funktionellen Eigenschaften zu verändern. Dies hat zur Folge, dass biologisch aktive Enzyme und Proteine beeinträchtigt werden und daraufhin ihre Funktionen nicht mehr ausüben können. Unter anderem sind sie nicht mehr in der Lage, sich proteolytisch abzubauen, und tragen dazu bei, dass es die Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) fördern kann. Weiters löst ROS entzündliche Reaktionen aus, beeinflusst intrazelluläre Signalwege und fördert metabolische und biochemische Dysfunktionen. (Khalid et al., 2022)

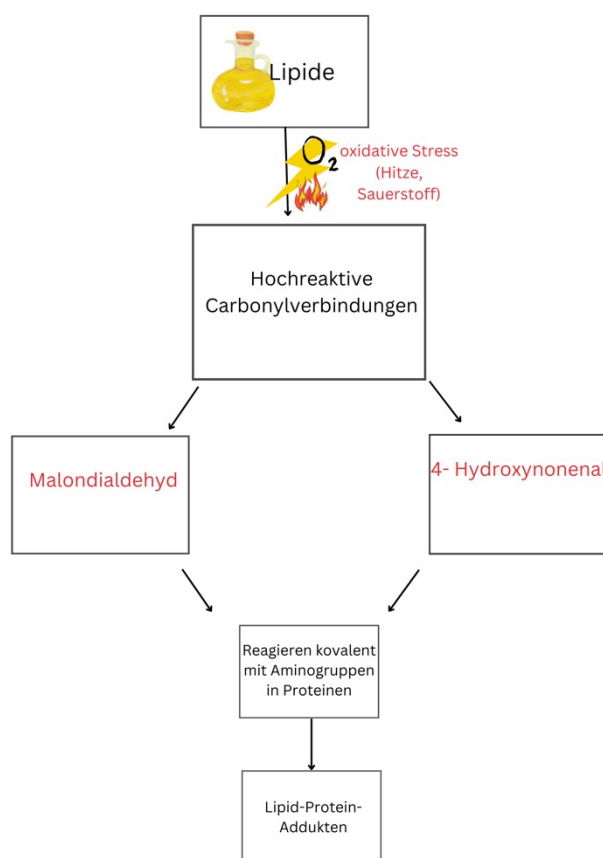


Abbildung 8: Flussdiagramm der lipidoxidationsabhängigen Adduktbildung. Darstellung der Entstehung reaktiver Lipidoxidationsprodukte wie Malondialdehyd und 4-Hydroxynonenal durch oxidative Prozesse in Lipiden und deren kovalente Vernetzung mit Aminogruppen in Proteinen, was zur Bildung von Lipid-Protein-Addukten und strukturellen Proteinveränderungen führt. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Khalid et al., 2022)

Die gesundheitsschädlichen Auswirkungen von Oxidationsprodukten verdeutlichen die Notwendigkeit, geeignete Maßnahmen zur Reduzierung ihrer Bildung während der Lebensmittelverarbeitung zu entwickeln. Eine vielversprechende Strategie zur Minimierung dieser Risiken könnte der Einsatz von Antioxidantien sein.

Antioxidantien können die Bildung von Acrylamid beeinflussen, da sie reaktive Zwischenprodukte wie Schiff-Base (Aldimin) und Azomethinylid hemmen, indem sie die reaktiven Carbonyle mindern. Dies hat zur Folge, dass oxidativer Stress verringert wird. Zusätzlich beeinflussen Antioxidantien den pH-Wert und die Mineralstoffzusammensetzung, insbesondere Kalzium (Ca^{2+}), wodurch die Bildung von Aldimin-Vorstufen von Asparagin weiter eingeschränkt wird. (L. Zhang et al., 2023) (Hegab et al., 2017)

Auch die Entstehung von AGEs kann durch Antioxidantien beeinflusst werden, jedoch ist der Mechanismus etwas anders als bei Acrylamid. Dies geschieht, indem sie reaktive Dicarbonyl/Carbonyle abfangen und Übergangsmetalle (Fe/Cu) chelatieren und so die glyoxidativen Schritte unterbrechen. Die im Lebensmittel vorkommenden Kationen, wie Ca^{2+} und Magnesium (Mg^{2+}), wirken in der Maillard-Reaktion als Inhibitor oder als Promoter (abhängig von Ionenstärke und/oder Wasseraktivität), indem sie die reaktiven Schiff-Basen und Amadori-Produkte chemisch modifizieren, wodurch der weitere Verlauf der Glykationskette und somit die Bildung von AGEs beeinflusst wird. Nennenswert ist auch, dass ein niedriger pH-Wert die Bildung von Schiff-Basen reduzieren kann. Antioxidantien (z. B. Polyphenole) können reaktive Carbonylverbindungen wie Glyoxal und Methylglyoxal abfangen und dadurch entweder selbst Schiff-Basen-ähnliche Addukte bilden oder die Bildung von Schiff-Basen und Amadori-Produkten mit Proteinen hemmen. Ebenfalls bilden sie einen Komplex mit Metallionen, wie zum Beispiel Kupfer (Cu^{2+}) oder Eisen (Fe^{2+}), was die Autoxidation von reaktiven Zwischenprodukten hemmt. Studien zeigen zudem, dass bestimmte Antioxidantien direkt auf die Amadori-Produkte wirken, indem sie deren Enolisierung oder β -Eliminierung beeinflussen. (Yan et al., 2014) (Hegab et al., 2017) (Valgimigli, 2023) (Sasaki et al., 2014)

Darüber hinaus hemmen Antioxidantien die Lipidperoxidation, indem sie die reaktive Kettenreaktion ($\text{ROO} \bullet$) unterbrechen und so die Entstehung sekundärer Oxidationsprodukte wie Malondialdehyd und 4-HNE reduzieren. (Valgimigli, 2023)

Wie bereits erwähnt, hat der pH-Wert einen wesentlichen Einfluss auf die Reaktionskinetik der Maillard-Reaktion, da sie einen pH-Bereich von neutral bis leicht alkalisch (ca. pH 6-8) bevorzugen. In diesem neutralen bis basischen Bereich sind die Aminogruppen nukleophiler und fördern die Entstehung von Schiff-Basen und Amadori-Produkten. Ein pH-Wert unter 6 kann die Reaktionsgeschwindigkeit deutlich verlangsamen, da in diesem Bereich die Aminogruppen protonieren und dadurch weniger reaktiv sind. (El Hosry et al., 2025)

1.5 Analytische Methoden zur Qualitätskontrolle

Die Qualitätskontrolle spielt bei Frittierölen eine entscheidende Rolle, insbesondere bei der Verwendung unter hohen Temperaturen, da sich während des Frittierprozesses komplexe chemische Verbindungen bilden, wie beispielsweise Lipidoxidation oder thermische Zersetzungen. Diese wirken sich nicht nur negativ auf die sensorische Eigenschaft aus, sondern stellen ein potenzielles Risiko für die Gesundheit dar. (Yildiz et al., 2024)

Ein wesentlicher Punkt ist die Sicherstellung des Rauchpunkts als Qualitätsindikator, da sich bei hohen Temperaturen das Öl sichtbar zersetzt. Durch den entstehenden Dampf, eine Mischung aus Wasser, FFA und flüchtigen Zersetzungsprodukten, werden schädliche Verbindungen freigesetzt. Neben dem Rauchpunkt ist auch die Oxidationsstabilität des Öls relevant, um die Bildung von ROS und weiteren oxidativen Abbauprodukten zu minimieren. (siehe Tabelle 3) (Ahmad et al., 2021) (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015)

Im Zuge dieser Masterarbeit liegt ein weiterer Fokus auf der Zugabe und Wirksamkeit von hitzestabilen Antioxidantien, um die thermische Stabilität zu verbessern und oxidative Schäden zu reduzieren.

Die Implementierung und Entwicklung präziser analytischer Methoden ist essenziell, damit die Stabilität und Sicherheit von Frittierölen während des gesamten Verarbeitungsprozesses gewährleistet sind.

1.5.1 Rauchpunkt

Wie bereits erwähnt, dient der Rauchpunkt als Qualitätsindikator, da dieser die Temperatur markiert, in der das Öl sichtbar beginnt, zu rauchen. Dies deutet auf eine thermische Zersetzung hin und fördert gleichzeitig die Freisetzung von flüchtigen Verbindungen wie

Acrolein. (siehe Tabelle 3) (Mishra et al., 2023) (Jiang et al., 2022) Acrolein (C_3H_4O) erkennt man an ihrer farblosen bis gelblichen Farbe mit stechendem Geruch und sie kann bei langfristiger Exposition zu chronischen Atemwegserkrankungen führen. (Jiang et al., 2022)

Einflussfaktoren auf den Rauchpunkt:

1. Freie Fettsäuren: Ein niedriger Gehalt an freien Fettsäuren erhöht den Rauchpunkt. Jedoch erhöht man durch wiederholtes Erhitzen die Bildung von freien Fettsäuren im Öl und vermindert dadurch die Temperatur des Rauchpunkts. Dieser Prozess führt dazu, dass die Haltbarkeit und die Wiederverwendbarkeit des Frittieröls abgeschwächt werden. (Chiang et al., 2022)
2. Verarbeitungsgrad des Öls: Es existieren raffinierte und unraffinierte Öle. Der Unterschied zum raffinierten Öl ist, dass hier freie Fettsäuren entfernt sowie auch Verunreinigungen reduziert wurden. Dadurch ist der Rauchpunkt in raffinierten Ölen deutlich höher als in unraffinierten. (Pal et al., 2015)
3. Fettsäurezusammensetzung und Zusatzstoffe: Öle, die reich an gesättigten Fettsäuren oder hitzestabilen Zusätzen wie Methylsilikonen sind, sind robuster gegenüber thermischen Zersetzungen. Methylsilikone können die Stabilität des Öls bei hohen Temperaturen schützen, indem sie auf der Oberfläche eine schützende Filmschicht bilden, wodurch die Einwirkung von Sauerstoff und Hitze auf die Lipidmoleküle reduziert wird. (Totani et al., 2018)

Für das Frittieren werden oft Temperaturen zwischen 150 und 190 °C erreicht. Daher ist es sinnvoll, Öle mit einem Rauchpunkt von über 190 °C zu verwenden, damit sie unter diesen Bedingungen nicht beginnen, sich zu zersetzen (Choe & Min, 2007). Extra natives Kokosöl weist auf einen Rauchpunkt von 177 °C hin (Boateng et al., 2016). Beim raffinierten Kokosöl liegt der Rauchpunkt bei 232 °C (Ng et al., 2021). Raffiniertes Avocadoöl zeigt von allen den höchsten Rauchpunkt auf, da dieser über 250 °C liegt (Lin & Li, 2024). Danach folgt gleich Ghee mit einem Rauchpunkt von 252°C (Kataria & Singh, 2024) gefolgt von raffiniertem Olivenöl mit einem Rauchpunkt von 240°C (Li et al., 2016). Der Rauchpunkt von raffiniertem Sonnenblumenöl liegt bei 227 °C (Prarthana et al., 2024).

Jedoch spielen bei der Auswahl des geeigneten Öls bei der Zubereitung von Speisen mehrere Faktoren mit, da gewisse Öle wie beispielsweise Kokosöl einen sehr intensiven, kokoshaltigen Geschmack aufweisen. Neben dem Geschmack stehen auch Nährstoffgehalt und Rauchpunkt im Vordergrund. Wie bereits erwähnt, zeigen einige Studien, dass diverse Öle wie zum Beispiel natives Kokosöl einige gesundheitliche Aspekte aufweisen. (Marina et al., 2009) (Nitbani et al., 2022a) (Sandupama et al., 2022)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich vor allem Öle mit einem Rauchpunkt über 200 °C, wie etwa raffiniertes Kokosöl oder raffiniertes Sonnenblumenöl, besonders gut für diesen Einsatzzweck eignen. (Ng et al., 2021) (Prarthana et al., 2024)

Auch raffiniertes HO-Sonnenblumenöl, welches einen Rauchpunkt von etwa 225 °C bis 238 °C aufweist und noch temperaturbeständiger ist als herkömmliches raffiniertes Sonnenblumenöl, eignet sich daher besonders gut für längere Frittierprozesse. (Ruiz-Méndez et al., 2024) (J. Chen et al., 2023)



Abbildung 9: Die Darstellung zeigt die hohen Rauchpunkte beider Öle. 233°C bis 236°C für raffiniertes HO-Sonnenblumenöl und 232°C für raffiniertes Kokosöl, welche besonders für das Frittieren bei hohen Temperaturen geeignet sind. Quelle: Eigene Darstellung nach (Holgado et al., 2021) (Ng et al., 2021)

Sobald der Rauchpunkt überschritten wird, beginnt das Öl zu rauchen. Ebenfalls entwickelt sich ein scharfer, stechender Geruch und die Farbe des Öls wird immer dunkler. Gleichzeitig kann es auch dazu führen, dass das Frittieröl zu sprudeln oder schäumen beginnt, was ein Zeichen dafür ist, dass sich schädliche Verbindungen freisetzen. Auch kann es vorkommen,

dass sich die Konsistenz des Öls verändert, indem es dickflüssiger wird. (Ramroudi et al., 2022)

1.5.2 Oxidationsstabilität

Um die Haltbarkeit und Qualität des Speiseöls zu bestimmen, kann das mithilfe der Oxidationsstabilität erfolgen. Diese Stabilität wird als robuster Indikator gegenüber oxidativen Prozessen durch Sauerstoff, hohe Temperaturen und Lichteinwirkung angewendet. Dies kann zur Bildung von unerwünschten Verbindungen wie Peroxiden, Aldehyden und Ketonen führen. (siehe Tabelle 3) (Khor et al., 2019)

Während dieses oxidativen Prozesses entstehen monomere oxidierte Triacylglyceride (oxTAG), polymere Triacylglyceride (PTG) und polare Verbindungen (TPC). TPC sind solche Moleküle, die durch ungleiche Elektronenverteilung in der Molekülstruktur, aufgrund der Einführung von funktionellen Gruppen wie Hydroxyl-, Peroxid-, Carboxyl- oder Carbonylgruppen, eine erhöhte Polarität aufweisen und somit die Wasserlöslichkeit erhöhen und die Lipideigenschaft ändern, was die Stabilität und Qualität des Öls signifikant verschlechtert. Eine Studie zeigte anhand von raffiniertem, gebleichtem und desodoriertem Palmöl, dass nach 24 h kontinuierlichem Erhitzen bei Temperaturen von 160 bis 180 °C ein signifikanter Anstieg der TPC und Triacylglyceride-Oligomere beobachtet wurde. Die Proben wurden in einem vierstündigen Intervall gemessen. Ebenfalls wurde festgestellt, dass sich mehr Epoxy-Säuren als Keto- und Hydroxysäuren bildeten. Auch der Gesamtoxidationswert und der ox-TAG-Wert stiegen kontinuierlich an. PTG und oxTAG können zur Entstehung von Atherosklerose, Leberschäden, Diabetes und zur Krebserkrankung beitragen (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2003). (Khor et al., 2019) (Abeyrathne et al., 2021)

Um die oxidative Stabilität zu messen, sind drei Parameter dafür notwendig:

1. Peroxid-Wert (PV): PV zeigt die Konzentration primärer Oxidationsprodukte an.
2. p-Anisidin-Wert (AV): AV misst die sekundären Oxidationsprodukte wie Aldehyde.
3. Total-Oxidationwert (TOTOX): Ist die Summe aus AV und PV und zeigt die Gesamtanzahl der oxidierten Produkte an.

(Khor et al., 2019)

1.6 Antioxidantien in Frittierölen

Antioxidantien sind entscheidend für die Erhaltung der Stabilität von Ölen während des Frittierprozesses, da sie den oxidativen Abbauprozess verlangsamen oder verhindern. Antioxidantien wirken, indem sie freie Radikale, die während des Frittierprozesses entstehen, neutralisieren und somit die Kettenreaktion der Lipidoxidation unterbrechen. (F. Liu et al., 2025)

Häufig werden synthetische Antioxidantien wie Butylhydroxytoluol (BHT) und Propylgallat (PG) verwendet, weisen jedoch erhebliche Risiken hinsichtlich der Lebensmittelsicherheit auf. Auf Grund dessen bevorzugt man natürliche, pflanzliche Antioxidantien, nicht nur wegen ihrer antioxidativen Eigenschaft, sondern auch wegen ihrer entzündungshemmenden und antibakteriellen Wirkungen. (Huang et al., 2019)

Es existieren mehrere natürliche hitzestabile Antioxidantien, die sich zur Stabilisierung von Ölen bei hohen Temperaturen eignen. Dazu zählen Tocopherole (Vitamin E), Rosmarinextrakt und Oreganoextrakt (Song et al., 2023). Für Anwendungen, bei denen die Beibehaltung eines neutralen Geschmacks besonders wichtig ist, kommen vor allem Tocopherole und standardisierte Rosmarinextrakte zum Einsatz. (Fadda et al., 2022) (Song et al., 2023)

In den letzten Jahren wurde Rosmarinextrakt aufgrund seiner herausragenden antioxidativen Eigenschaften verstärkt in den Fokus der Forschung gerückt. Zahlreiche Studien belegen, dass die Zugabe von Rosmarinextrakt aufgrund seiner ausgeprägten antioxidativen Eigenschaft,

häufig zur Stabilisierung von Speiseölen eingesetzt wird. (Song et al., 2023) (F. Liu et al., 2025)

1.6.1 Rosmarinextrakt als potenzielles hitzestabiles Antioxidans

Rosmarin (*Rosmarinus officinalis*) ist eine Pflanze, die viele gesundheitsfördernde Eigenschaften besitzt. In letzter Zeit stieg das Interesse erheblich an dieser Pflanze aufgrund ihrer therapeutischen Effekte auf die menschliche Gesundheit. Zu den wichtigsten bioaktiven und gesundheitsfördernden Bestandteilen von Rosmarin gehören Carnosinsäure, Carnosol, Kaffeesäure und Rosmarinsäure. (Borges et al., 2019) (Hassani et al., 2016) (Gonçalves et al., 2022)

Rosmarin ist für eine Vielzahl biologischer Aktivitäten bekannt, aufgrund seiner antioxidativen, antibakteriellen, antimykotischen, krebshemmenden und entzündungshemmenden Eigenschaften. Laut Abschnitt 409 des Gesetzes der Food and Drug Administration (FDA, 2014a, FDA, 2014b) und gemäß der Verordnung der Kommission 2010/67/EU sowie der Verordnung der Kommission 2010/69/EU wurde Rosmarinextrakt (E 392) als Lebensmittelzusatzstoff anerkannt, da dieser antimikrobielle und antioxidative Wirkstoffe besitzt. Die akzeptable tägliche Aufnahmemenge (ADI) beträgt 0-0,03 mg/kg Körpergewicht pro Tag, basierend auf den wirksamen Inhaltsstoffen Carnosinsäure und Carnosol. (Younes et al., 2018) (Ribeiro-Santos et al., 2015)

Die Verwendung von Rosmarinextrakt (E 392) als Lebensmittelzusatzstoff ist durch die Verordnung (EU) Nr. 723/2013 der Kommission vom 26. Juli 2013 geregelt, die Anhang II der Verordnung (EG) Nr. 1333/2008 ändert. Demnach beträgt die zulässige Höchstmenge bei Lebensmitteln mit einem Fettgehalt bis 10 % 15 mg/kg, während sie bei Lebensmitteln mit mehr als 10% Fett, einschließlich pflanzlicher Öle, 150 mg/kg Fett beträgt. Diese Regelung gilt für alle Lebensmittel unabhängig vom Öltyp und stellt sicher, dass die antioxidative Wirkung gewährleistet ist, ohne die Sicherheit zu beeinträchtigen. (Younes et al., 2018)

1.6.2 Rosmarin-Extraktionsprozess nach der Robert-und-Georges-Methode (1989)

Rosmarinextrakt (E 392) wird aus den Blättern von Rosmarin mittels der Lösungsmittel Hexan und/oder Ethanol extrahiert, um die aromatischen Komponenten zu entfernen, sodass überwiegend antioxidativ wirksame Verbindungen, insbesondere Carnosol und

Carnosinsäure, enthalten bleiben. Alternativ ist auch Hochdruckextraktion mittels Kohlendioxids (CO₂) eine gängige, schonende Methode, um Carnosinsäure aus Rosmarin zu extrahieren. (Gonçalves et al., 2022)

Nach der Gewinnung des Ethanolextrakts wird dieser zunächst gefiltert und konzentriert. Anschließend erfolgt eine Behandlung mit Natriumhydroxidlösung, gefolgt von einer Phasentrennung in wässrige und organische Phase. Die erhaltene Lösung wird mittels Schwefelsäure angesäuert und anschließend mit Ethanol behandelt, um das Antioxidans zu gewinnen. Die Extraktlösung wird mittels Rotationsverdampfer konzentriert und anschließend schonend in einem Vakuumofen getrocknet, um den Abbau der enthaltenen Antioxidantien zu verhindern. Anschließend wird Rosmarinextrakt mittels Ultra-High-Performance-Liquid-Chromatography (UHPLC, Acquity H-Class, Waters®) mit gepulster amperometrischer Detektion (PAD) analysiert. Als Referenzstandard dienen dabei Carnosol und Carnosinsäure, welche das stärkste Antioxidans in getrockneten Rosmarinblättern ist, die dort mit einem Gehalt von etwa 1,5 bis 2,5 Prozent vorkommen und bei einer UV-Wellenlänge von 284nm nachgewiesen werden können. Nennenswert ist auch, dass Carnosinsäure in Öl löslich ist, was die sensorische Eigenschaft begünstigt. (MOUFAKKIR et al., 2022) (Moufakkir et al., 2023) (Nieto et al., 2018)

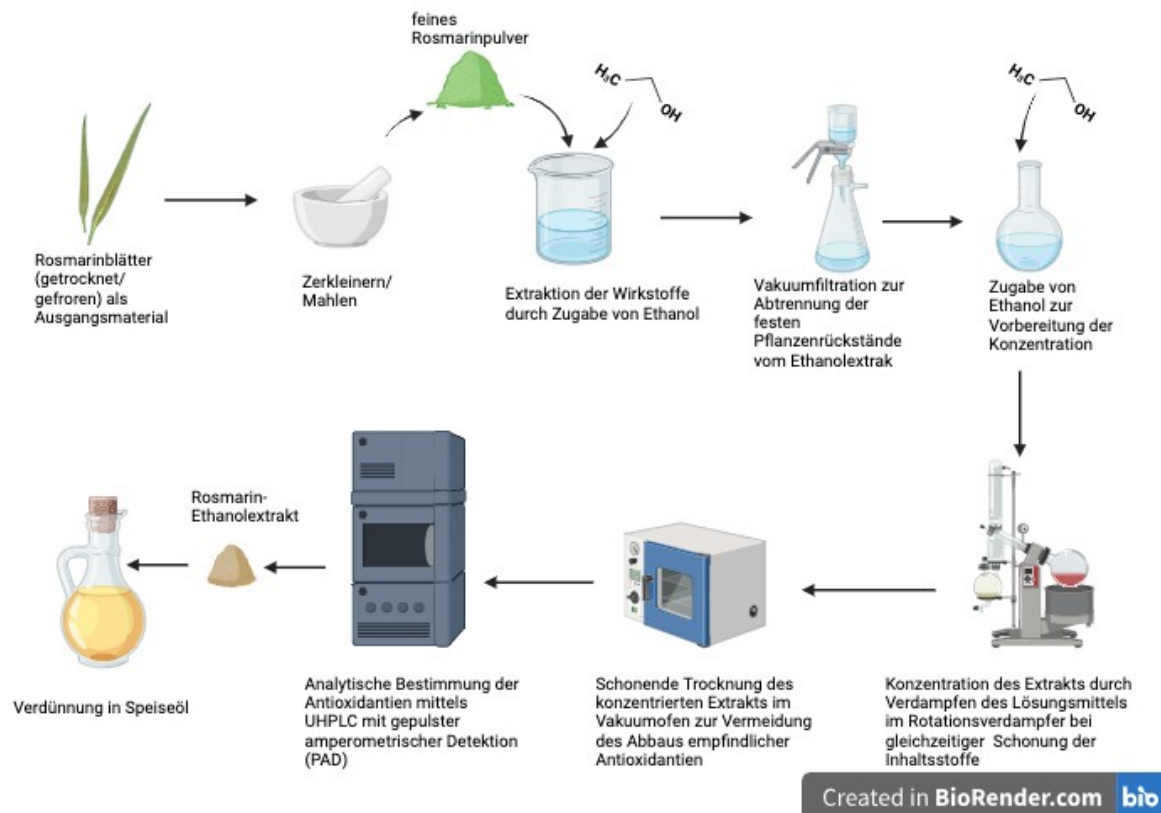


Abbildung 10: Die Abbildung zeigt die einzelnen Arbeitsschritte von der Rohstoffvorbereitung bis zur Analyse und Aufbereitung des Rosmarinextrakts. Dabei werden die wichtigsten Methoden wie Filtration, Konzentration im Rotationsverdampfer, schonende Trocknung im Vakuumofen und chromatographische Analyse (UHPLC) dargestellt. (Eigene Darstellung in Anlehnung an (MOUFAKKIR et al., 2022) und nach der Robert-und-Georges-Methode (1989))

2 Ziel der Arbeit

In dieser Masterarbeit wird die potenzielle Anwendung von Rosmarinextrakt (E 392) als Zusatzstoff in Frittieröl untersucht. Es wird angenommen, dass die bioaktiven phenolischen Diterpene des Rosmarins, wie Carnosinsäure und Carnosol, aufgrund ihrer antioxidativen und antimikrobiellen Eigenschaften einen positiven Einfluss auf die Haltbarkeit des Frittieröls haben. (Gonçalves et al., 2022) Dies könnte dazu beitragen, die Bildung schädlicher Verbindungen wie freier Radikale und toxischer Stoffe während des Erhitzungsprozesses zu verhindern, was nicht nur die Qualität des Öls verbessert, sondern auch potenziell gesundheitliche Vorteile bietet. Ziel ist, die öltypabhängige Wirksamkeit von Rosmarinextrakt (E 392) beim Frittieren vergleichend zu bewerten und daraus praxisnahe Empfehlungen zu Dosierung, Ölwechselintervallen und Kosten-Nutzen abzuleiten.

3 Hypothese: Öltyp-spezifische Wirkung von Rosmarinextrakt auf Frittieröle

Die vorliegende Übersichtsarbeit untersucht, inwieweit der Öltyp die Wirksamkeit hitzestabiler Antioxidantien wie Rosmarinextrakt auf die thermo-oxidative Stabilität von Frittierölen beeinflusst. Im Fokus stehen die öltyp- und dosisabhängigen Wirkmechanismen während des Erhitzens sowie die Bewertung der Stabilität anhand etablierter Qualitätsparameter (Peroxidzahl, freie Fettsäuren, Gesamtpolare Stoffe, flüchtige Aldehyde).

3.1 Verbesserung der thermischen Stabilität durch die Kombination von Ölen mit hohem Rauchpunkt und hitzestabilen Antioxidantien

Die thermische Stabilität des verwendeten Frittieröls ist ein zentraler Parameter für die Qualität der frittierten Lebensmittel sowie für die Minimierung gesundheitsbedenklicher Abbauprodukte wie Oxidations- und Polymerisationsprodukte, die bei hohen Temperaturen entstehen können. Besonders geeignet für den Frittierprozess sind Öle mit einem hohen Rauchpunkt und einer geringen Neigung zur Oxidation. (Shahidi & Zhong, 2010)

Raffiniertes Kokosöl zeichnet sich durch eine hohe Hitzestabilität, einen niedrigen Gehalt an mehrfach ungesättigten Fettsäuren sowie durch einen neutralen Geruch und Geschmack aus, was es für den vielseitigen Einsatz in der Lebensmittelverarbeitung relevant macht. Auch sogenanntes HO-Sonnenblumenöl zeigt aufgrund seines hohen Gehalts an Ölsäure eine deutlich verbesserte oxidative Stabilität im Vergleich zu herkömmlichem Sonnenblumenöl. Während konventionelles Sonnenblumenöl reich an mehrfach ungesättigten Omega-6-Fettsäuren ist, die bei übermäßigem Verzehr potenziell proinflammatorisch wirken können, bietet HO-Sonnenblumenöl ein ausgewogenes Fettsäureprofil bei gleichzeitig höherer Temperaturstabilität. (Franco, 2018) (Holgado et al., 2021)

Die Kombination solcher hitzebeständigen Öle mit thermisch stabilen Antioxidantien wie beispielsweise Rosmarinextrakt (E 392) stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Oxidation während des Frittierprozesses zu verlangsamen, die Bildung unerwünschter

Abbauprodukte zu vermindern und somit die Qualität sowie die Haltbarkeit des Öls nachhaltig zu verbessern.

3.2 Zersetzungsresistenz während des Frittierprozesses durch antioxidativen Schutz durch Rosmarinextrakt (E 392)

Rosmarinextrakt (E 392) ist ein natürlicher Antioxidans- Zusatzstoff, der vor allem in einigen Pflanzenölen, die reich an ungesättigten Fettsäuren sind, eingesetzt wird. Wie bereits erwähnt helfen die phenolischen Diterpene Carnosinsäure und Carnosol, die oxidative Zersetzung zu minimieren. (Borges et al., 2019) (Nieto et al., 2018)

Da die oxidative Stabilität von Pflanzenölen während des Frittierprozesses entscheidend für die Produktqualität, die Haltbarkeit und die Gesundheit ist, bietet hier Rosmarinextrakt einen großen Mehrwert. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist, dass dieses Extrakt bei hohen Temperaturen stabil ist und somit seine antioxidative Wirkung entfalten kann. (Nieto et al., 2018) (Moufakkir et al., 2023)

Carnosinsäure und Carnosol wirken während des Frittierprozesses als Radikalfänger, da sie freie Radikale und reaktive Sauerstoffverbindungen, die während des Erhitzens entstehen, neutralisieren. (MOUFAKKIR et al., 2022) (Harlina et al., 2022) Sie sind in der Lage, die Kettenreaktion der Lipidoxidation zu unterbrechen. Sie schützen die Fettsäuren vor weiterer Oxidation und verhindern die Bildung schädlicher Abbauprodukte wie beispielsweise Triacylglycerol-Polymere (TAG-Polymere), FFA, Aldehyde, Ketone sowie weiterer potenziell toxischer Verbindungen wie Acrylamid und flüchtige organische Verbindungen. (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015) (Yildiz et al., 2024)

Die Kombination hitzestabiler Öle mit bioaktiven, hitzestabilen antioxidativen Substanzen wie Rosmarinextrakt kann somit die oxidative Stabilität signifikant erhöhen und die Nutzungsdauer des Öls im Frittierprozess verlängern, während die Bildung gesundheitsschädlicher Nebenprodukte reduziert wird. (MOUFAKKIR et al., 2022) (Harlina et al., 2022)

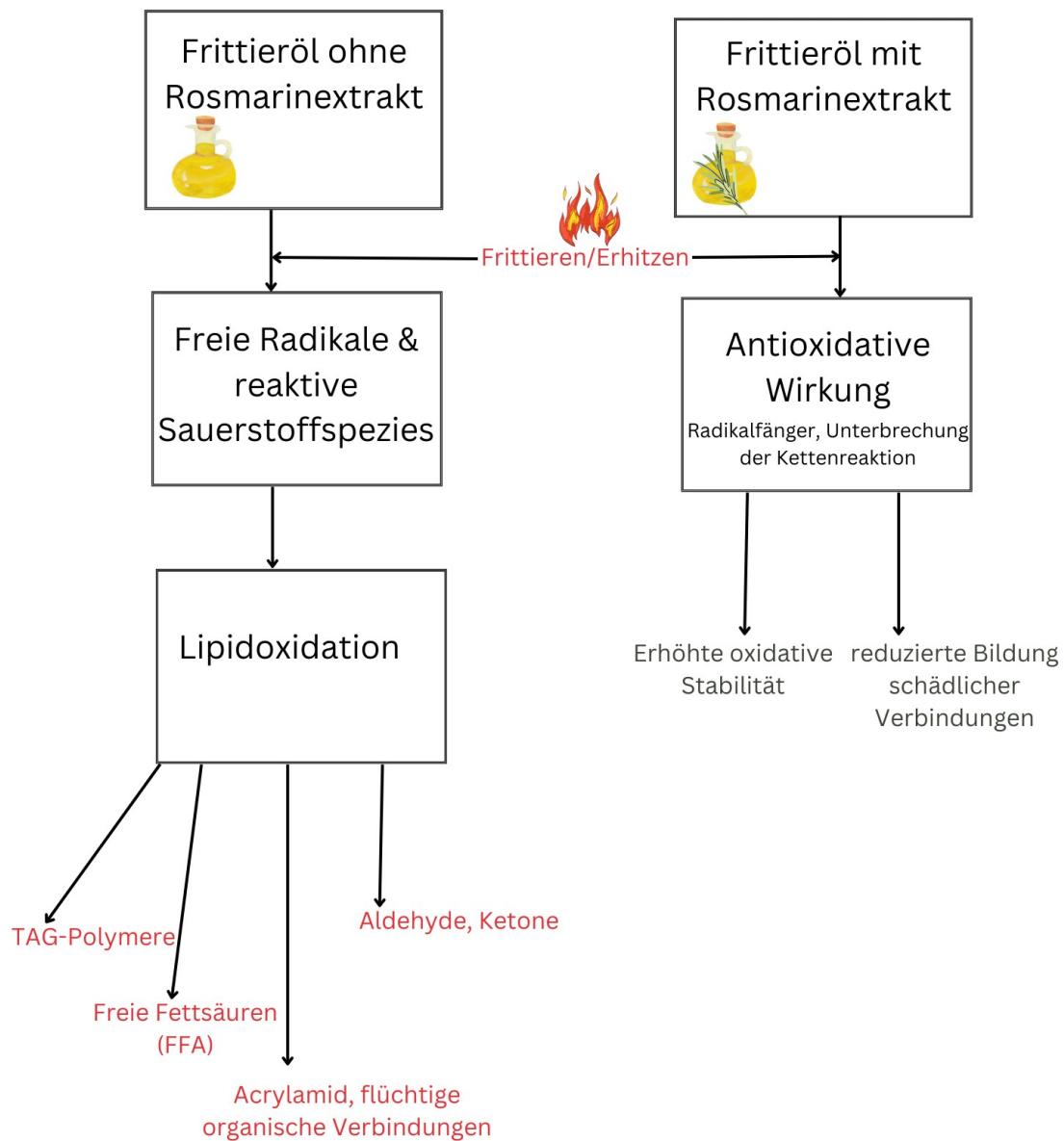


Abbildung 11: Das Flussdiagramm zeigt, dass Rosmarinextrakt, insbesondere die phenolischen Diterpene Carnosinsäure und Carnosol, als Radikalfänger wirkt und die Kettenreaktion der Lipidoxidation unterbricht, die während des Frittierens in Pflanzenölen mit

ungesättigten Fettsäuren stattfindet. Dadurch wird die Bildung von toxischen Abbauprodukten wie TAG-Polymeren, freien Fettsäuren, Ketonen, Aldehyden, Acrylamid und flüchtigen organischen Verbindungen signifikant reduziert, was zu einer verbesserten Stabilität und Qualität des Frittieröls führt. Eigene Darstellung in Anlehnung an (Harlina et al., 2022).

3.3 Mechanismus der antioxidativen Wirkung beim Erhitzen

Wie bereits erwähnt, kommt es während des Frittierprozesses zu komplexen chemischen Veränderungen. Darunter Hydrolyse, Oxidation und Polymerisation (Ahmad et al., 2021). Während des Erhitzens von Pflanzenölen entstehen zahlreiche freie Radikale, darunter Peroxidradikale, und reaktive Sauerstoffverbindungen, welche die Lipidketten des Öls angreifen und die Oxidation der Fettsäuren initiieren (Grootveld, 2022).

Im Rahmen der Maillard-Reaktion entstehen so genannte ALEs, die während des Frittierprozesses von Ölen eine bedeutende Rolle spielen. Wie vorhin erwähnt, bildet sich nach der Hydrolyse, in der Wasser mit den Triglyzeriden des Öls reagiert und anschließend die Esterbindung abspaltet, die primäre Lipidoxidation. Durch die Anwesenheit von O_2 und Hitze auf den Fettsäuren des reaktiven Lipidperoxyradikals ($LOO\cdot$) entwickeln sich instabile Lipidhydroperoxide ($LOOH$). Weiters bilden sich in der sekundären Oxidation reaktive Carbonylverbindungen wie Malondialdehyd und 4-HNE, die kovalent mit Proteinen im Lebensmittel reagieren. Nach mehrfacher Nutzungsdauer des Öls kommt es zur Polymerisation, in der sich Abbauprodukte wie TAG-Polymere bilden. (Vistoli et al., 2013) (Choe & Min, 2007) (Shahidi & Zhong, 2010) (Ayala et al., 2014)

Während dieses Prozesses greifen Carnosinsäure und Carnosol die daraus entstandenen freien Radikale an, welche die ungesättigten Fettsäuren des Öls schwächen. Durch ihre phenolische Hydroxylgruppe können sie die freien Radikale und ROS neutralisieren, wodurch die Lipidoxidation gehemmt wird (Kamal-Eldin & Appelqvist, 1996). Ebenfalls reagieren Carnosinsäure und Carnosol direkt mit den reaktiven Carbonylverbindungen. Da das elektrophile Kohlenstoffatom der Carbonylgruppe ($C=O$) positiv geladen ist und somit anfälliger für nukleophile Gruppen, wie es in der Hydroxylgruppe von Carnosinsäure und Carnosol ist, entsteht ein weniger reaktives Addukt, welches nicht mehr die Fähigkeit besitzt, kovalent an Proteine zu binden. Dadurch wird die Proteinstruktur geschützt und sie tragen zur Aufrechterhaltung der Proteinfunktion bei. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch

diesen Mechanismus durch die Zugabe von Rosmarinextrakt, insbesondere die Wirkstoffe Carnosinsäure und Carnosol, ein schützender Effekt vor oxidativen Schäden im Öl während des Erhitzens bewirkt wird und somit zur Aufrechterhaltung der biologischen Funktion von Proteinen beigetragen wird. (Loussouarn et al., 2017)(Wei et al., 2021) (Valgimigli, 2023)

$R\cdot + CAH \text{ (oder CSH)} \rightarrow RH + CA\cdot$ (stabile phenoxylische Radikale)

Während der Lipidoxidation reagieren Carnosinsäure (CAH) oder Carnosol (CSH) mit $R\cdot$, indem sie ein Wasserstoffatom (H) aus ihrer phenolischen Hydroxylgruppe auf $R\cdot$ übertragen und neutralisieren.

$RC=O + CA - OH \rightarrow CA - C(OH) - R$

Durch die nukleophile Addition der phenolischen Hydroxylgruppe von CA oder CSH an das elektrophile $C=O$ bildet sich ein stabiles Addukt $CA - C(OH) - R$, das nicht mehr kovalent an Proteine binden kann.

3.4 Qualitätsindikatoren und Analyseverfahren zur Bewertung der thermischen Stabilität von Speiseölen

Um die Wirksamkeit von Rosmarinextrakt bei der Minimierung des Ölabbaus von raffiniertem Kokosöl und HO-Sonnenblumenöl zu überprüfen, sollten geeignete und aussagekräftige Qualitätsindikatoren (siehe Tabelle 3) herangezogen werden. Diese Indikatoren spiegeln in der Literatur bewährte Messgrößen wider, mit denen Veränderungen in der thermischen Stabilität und Qualität von Speiseölen erfasst werden können.

Tabelle 3: Wichtige analytische Parameter zur Bewertung der thermischen Stabilität und Qualität von Speiseölen.

Indikatoren	Beschreibung / Bedeutung	Anwendung/Aussagekraft
Polymerisation (TAG-Polymere)	Bildung von Triacylglycerid-Polymeren durch thermische Oxidation	Hohes Gehalt = minderwertiges, stark beanspruchtes Öl Indikator für Ölalterung und Qualitätsverlust
Polare Verbindungen	Summe polarer oxidierter und polymerer Verbindungen	Gesamtindikator für Ölabbau und Degradation bei intermittierender Frittiermethode
Furosin	Produkt der sauren Hydrolyse von Amadori-Verbindungen (Anfangsstadium der Maillard-Reaktion)	Marker für thermisch bedingte Qualitätsverluste und Maillardreaktionsfortschritte
5-Hydroxymethylfurfural (HMF)	Produkt fortgeschrittener Maillard-Reaktion	Hinweis auf starke thermische Beanspruchung und Bildung gesundheitsschädlicher Nebenprodukte
Rauchpunkt	Temperatur, bei der das Öl sichtbar zu rauchen beginnt	Maß für thermische Stabilität Rauchpunkt sinkt jedoch bei einem hohen Anteil an freien Fettsäuren (z. B. auch wiederholtes Erhitzen)
Freie Fettsäuren (FFA)	Inhalt freier Fettsäuren	Anstieg bei wiederholtem Erhitzen Hohe FFA senken den

		Rauchpunkt Verschlechtern die Ölqualität
Acrolein	Toxische Abbauprodukte freier Fettsäuren bei Überhitzung	Indikator für Überhitzung und fortgeschrittenen Ölabbau
Peroxidwert (PV)	Gehalt an primären Oxidationsprodukten (Hydroperoxiden)	Früher Oxidationsmarker, zeigt beginnende Lipidoxidation
p-Anisidinwert (AnV,AV)	Gehalt an sekundären Oxidationsprodukten (Aldehyden)	Zeigt fortgeschrittene Lipidoxidation und Zersetzungsprodukte
Total Oxidation (TOTOX)	Summe aus PV und AV	Gesamtindikator für den Oxidationszustand des Öls

(Eigene Darstellung; (C. Dobarganes & Márquez-Ruiz, 2015) (Erickson, 2007) (Q. Zhang et al., 2015) (Khor et al., 2019) (Ahmad et al., 2021) (Rufián-Henares et al., 2013) (Harlina et al., 2022))

4 Methodik (systematischer Review)

4.1 Recherchemethode

4.1.1 Nutzung von Datenbanken

Für den systematischen Review wurden gängige wissenschaftliche Datenbanken genutzt, die umfassende und qualitative Literaturen im Bereich Lebensmittelforschung und Antioxidantien enthalten. Datenbanken wie PubMed, Scopus, Web of Science, ResearchGate, ScienceDirect und Google Scholar wurden dabei genutzt, um eine breite Abdeckung zu gewährleisten.

4.1.2 Suchstrategien und Stichwörter:

Stichwörter wie „high smoke point“ AND „heat-resistant oils“ AND „antioxidants“ OR „phenolic compounds“ AND „oxidation“ OR „thermal stability“ OR „heat stability“ AND „frying oil“ OR „lipid oxidation“ OR „fat oxidation“ AND „carnosic acids“ OR „carnosol“ AND „rosemary extract“ OR „rosmarinic acid“ AND „frying process“

OR „heat treatment” OR „intermittent frying” OR „lipid degradation” AND „antioxidant synergy” OR „thermal oil oxidation”

4.2 Einschluss- und Ausschlusskriterien

4.2.1 Relevante Studien zur thermischen Zersetzung und Antioxidantienwirkung

Eingeschlossen wurden Studien, die sich mit thermischer Zersetzung von Speiseölen beschäftigen, insbesondere unter Einsatz von hitzestabilen Antioxidantien. Es wurden Studien untersucht, ob der Einfluss des hitzestabilen Antioxidans „Rosmarinextrakt“ einen positiven Effekt auf die oxidative Stabilität und Lipidoxidation bei hohen Temperaturen bewirkt.

4.2.2 Einschluss von Studien zu Frittierölen bei hohen Temperaturen

Studien, die temperaturabhängige Zersetzungsprozesse in Frittierölen (typischerweise $\geq 170^{\circ}\text{C}$) untersuchen, wurden dabei bevorzugt.

Es wurden Arbeiten berücksichtigt, die sowohl den Einfluss von Antioxidantien auf die Hitzestabilität als auch die Qualitätserhaltung von Frittierölen erforschen.

Studien zu anderen Kochmethoden oder Temperaturen unterhalb der typischen Frittierbedingungen wurden ausgeschlossen oder nur berücksichtigt, wenn sie relevant sind.

4.3 Zeitraum der Studien

4.3.1 Eingrenzung auf Forschungsergebnisse der letzten 10-15 Jahre

Um den aktuellen Stand der Forschung abzubilden, werden Studien aus dem Zeitraum von etwa 2010 bis 2025 einbezogen.

Ältere Studien sind nur zugelassen, wenn sie als Meilensteine oder grundlegende Arbeiten Ergebnisse liefern.

4.4 Berichte über Effekte auf die thermische Stabilität mittels

Rosmarinextrakt

Die thermische Stabilität von Frittierölen und somit auch die Qualität von frittierten Lebensmitteln sind entscheidend, um deren Nährwert und sensorische Eigenschaften wie Geruch und Farbe zu erhalten. Ein zentrales Ziel ist dabei, die Fettsäuren vor Oxidation zu schützen und den Oxidationsgrad zu reduzieren.

Eine Studie von Moufakkir et al. untersuchte den Einfluss von Rosmarinextrakt auf die thermische Stabilität und Qualität von mittelölsäurehaltigem Sonnenblumenöl während des Frittierprozesses. Analytische Parameter wie FFA, Peroxidindex und polare Verbindungen wurden dabei analysiert. Um die Wirksamkeit von Rosmarinextrakt, insbesondere Carnosinsäure und Carnosol, zu bestätigen, wurden jeweils zwei Proben Sonnenblumenöl mit Rosmarinextrakt zu je 600 ppm und 800 ppm beigemischt und zwei weitere Proben Sonnenblumenöl mit Tocopherol zu je 600 ppm und 800 ppm behandelt. Zusätzlich zu den vier Proben wurde ein Kontrollöl- Sonnenblumenöl als Referenz herangezogen. Um die Ölstabilität zu messen, wurden Hähnchenflügel fünfmal pro Stunde bei 175 °C frittiert zu je 10 Minuten, bis das Öl vollständig oxidiert war. Sie fanden heraus, dass die Zugabe von 600 ppm Rosmarinextrakt effektiver war als die Zugabe von 800 ppm. Auch zeigten die Indikatoren, dass beim Kontrollöl oder durch Zugabe von 600 ppm und 800 ppm Tocopherol das Öl schneller oxidierte. Die polaren Verbindungen wurden mittels Säulenchromatographie oder durch den Tester (Testo 270) gemessen, wobei Tester (Testo270) die zuverlässigere Methode war. Bei einer Frittierdauer von 5 Stunden im Kontroll-Sonnenblumenöl waren die polaren Verbindungen signifikant höher, nämlich bei einem Wert von 25 % TPM, als beim Tocopherol-behandelten Sonnenblumenöl und beim Rosmarin-behandelten Öl. Dieser Wert wurde erst nach 7 Stunden bei 35 Frittiervorgängen im Tocopherol-behandelten Sonnenblumenöl und sogar beim Rosmarin-behandelten Sonnenblumenöl erst bei 9 Stunden zu je 45 Frittiervorgängen beobachtet. Mehrere Studien zeigen, dass die Anzahl der polaren Verbindungen im Frittieröl mit zunehmender Anzahl an Frittierzyklen signifikant steigt. Um die Anzahl an FFA zu messen, wurde alle drei Stunden Öl während des Frittierprozesses entnommen. Hier wurde gezeigt, dass die Anzahl an FFA von 0,6 % FFA nach 6 Stunden zu je 30 Frittierzyklen im Kontrollöl, nach 7 Stunden zu je 35 Frittierzyklen im Tocopherol-behandelten Öl und erst nach 9 Stunden zu je 45 Frittierzyklen im Öl mit Rosmarinextrakt gemessen wurde. Ebenfalls stieg der Peroxidwert während eines 6-stündigen Frittierprozesses

mit Rosmarin behandelten Sonnenblumenöls von 30 Pommes frites langsam an und konnte nicht einmal 9 meq O₂/kg Öl erreichen, obwohl im unbehandelten Öl 23 meq O₂/kg Öl und im Tocopherol-behandelten Öl 17 meq O₂/kg Öl gemessen wurden. Auch wurde der Oxidationsgrad von Sonnenblumenöl ermittelt, indem der Peroxidindex in An- und Abwesenheit von Rosmarinextrakt bei 60 °C über einen Zeitraum von 21 Tagen gemessen wurde. Als Vergleich zwischen den Antioxidantien wurden hier BHA und BHT verwendet. Es wurde gezeigt, dass die antioxidative Wirkung von Rosmarinextrakt signifikant stärker war und die Peroxidbildung deutlich verzögerte als bei BHA und BHT. Diese Studie beweist, dass durch die Zugabe von Rosmarinextrakt die Hemmung der Autoxidation und Photooxidation in den Fettsäuren bewirkt und schlussendlich die Hitzestabilität und Haltbarkeit erhöht. Ebenfalls wurde gezeigt, dass das Öl mit Rosmarinextrakt eine deutlich bessere sensorische Eigenschaft aufweist im frittierten Lebensmittel. Der ranzige Geruch, der oft während des Frittierprozesses entsteht, sowie der Farbverlust wurden ebenfalls reduziert. (MOUFAKKIR et al., 2022)

Eine weitere Studie von Moufakkir et al. zeigte, dass durch die Wirkung von Rosmarinextrakt die Oxidationsstabilität von Sojaöl, das durch Hitzeeinwirkung instabil wird, beim Frittieren von panierten Butterfly Shrimps signifikant erhöht wurde. Parameter wie polare Verbindungen, FFA und Peroxidindex wurden auch hier für analytische Messungen analysiert. Es wurden Soja-Frittieröle mit 1000 ppm und 800 ppm Rosmarinextrakt mit unbehandeltem Sojaöl (Kontrolle) verglichen. Die Proben wurden auf 190 °C erhitzt, und pro Stunde wurden 15 Frittiervorgänge durchgeführt. Jede Garzeit betrug ungefähr 30 Sekunden. Während des gesamten Frittierprozesses wurde die Ölqualität kontinuierlich überwacht und mithilfe der vorhin erwähnten Parameter wie polare Verbindungen, FFA und PI analysiert. Auch hier wurden die polaren Verbindungen mittels eines Testers (Testo 270) gemessen und weisen in der unbehandelten Kontrolle nach 6 Stunden einen Wert von 25 % TPM auf, in der Probe mit Zugabe von 800 ppm Rosmarinextrakt einen Wert knapp unter 25 % TPM (obwohl hier die genaue Zahl nicht erwähnt wurde), und in der Probe mit Zugabe von 1000 ppm Rosmarinextrakt wurde der Wert von 25 % TPM erst nach 10 Stunden Frittieren erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugabe von 1000 ppm Rosmarinextrakt in Sojaöl die Entstehung von polaren Verbindungen deutlich reduziert. Neben der Messung polarer Verbindungen wurde auch der Gehalt an FFA analysiert. Diese zeigten nach 6 Stunden Frittierdauer, dass in der Kontrolle der Gehalt an FFA bei 0,6 % FFA lag, bei 800 ppm Rosmarinextrakt behandeltes Sojaöl bei leicht über 0,4 % FFA lag und sogar beim mit 1000 ppm

Rosmarinextrakt behandelten Öl ein Wert von unter 0,4 % FFA erreicht wurde. Als weitere Analysemethode wurde auch noch der Peroxidwert ermittelt. Es wurde bewiesen, dass die Zugabe von Rosmarinextrakt in beiden Proben den PI-Wert signifikant verbesserte, indem nach 10-stündiger Frittierdauer Werte von 23 bzw. 16 meq O₂/kg Öl erreicht wurden. Im Gegensatz zur Kontrolle wurde ein Wert von 28 meq O₂/kg Öl gemessen. Dies beweist wieder, dass Rosmarinextrakt die Fähigkeit besitzt, Hydroperoxide, die während der Lipidoxidation entstehen, zu hemmen. Die Ergebnisse belegen, dass die Zugabe von 800 bzw. 1000 ppm Rosmarinextrakt die durch den Frittierprozess induzierten Oxidationsmechanismen im Sojaöl signifikant verlangsamt, während in der Kontrolle eine deutliche Zunahme der Oxidation zu beobachten war. Zudem wurde in dieser Studie der Ölverbrauch analysiert. Dabei zeigte sich, dass Sojaöl, das mit Rosmarinextrakt behandelt wurde, insbesondere bei 1000 ppm, das eine signifikant höhere Stabilität gegenüber Lipidoxidation aufwies, den Ölverbrauch deutlich reduzierte. Dies ist auf die verzögerte Bildung schädlicher Verbindungen zurückzuführen, was anhand der Indikatoren FFA, polare Verbindungen und PI-Wert bestätigt wurde. Mittels OXIPRES-Tests (Mikrolab Aarhus A/S, Højbjerg, Dänemark), eines Verfahrens zur schnelleren Messung der Oxidationsstabilität von Frittierölen bei einer Temperatur von 90 °C und einem Druck von 5 bar, bei dem die Induktionszeit gemessen wird, wurde bewiesen, dass die Zugabe von hitzestabilen Antioxidantien wie Rosmarinextrakt die Oxidation signifikant verzögert und somit die thermische Stabilität und Haltbarkeit des Öls deutlich verbessert.

(Moufakkir et al., 2023)

Diese Studie beschreibt, dass die Kombination von 0,05 % Carnosinsäure und Carnosol eine ähnliche Wirkung aufweist wie 0,02 % TBHQ. Auch hier wurde deutlich unterstrichen, dass synthetische Antioxidantien toxisch und sogar kanzerogen wirken. Dies zeigt erneut, dass natürliche Antioxidantien wie Rosmarinextrakt auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen dürften. Leider liegen in der zitierten Studie keine detaillierten Angaben zur Konzentration des verwendeten Rosmarinextrakts und keine Messergebnisse vor, da der Zugriff auf den vollständigen Artikel eingeschränkt ist. (Zhao et al., 2021) Aufgrund ähnlicher Studien wird üblicherweise eine Konzentration zwischen 600 ppm und 1000 ppm Rosmarinextrakt im Frittieröl verwendet, um eine wirksame Verzögerung der Lipidoxidation zu gewährleisten. (Moufakkir et al., 2023) (MOUFAKKIR et al., 2022)

Auch Yang et al. verdeutlichen in ihrer Arbeit, dass Rosmarinextrakt, mit einem Carnosinsäuregehalt von 70 % ein potenzielles, hitzestabiles und natürliches Antioxidans während des Frittiervorgangs im Speiseöl ist. Es weist sogar höhere Stabilität gegenüber Lipidoxidation auf als herkömmliche synthetische Antioxidantien wie BHA und BHT. Es wurde mittels Rancimat-Analyse, welche die während des Frittierens entstandenen flüchtigen Säuren misst, bewiesen, dass Rosmarinextrakt den Gesamtphenolgehalt im Speiseöl und die antioxidative Kapazität im Öl deutlich erhöht. Ebenfalls besitzt es die Fähigkeit, den PV zu senken, was die Stabilität des Öls signifikant verbessert. (Yang et al., 2016) Leider liegen auch in dieser zitierten Studie keine detaillierten Angaben zur Konzentration des verwendeten Rosmarinextrakts und keine Messergebnisse vor, da der Zugriff auf den vollständigen Artikel eingeschränkt ist.

Zusammenfassend zeigen die vorliegenden Forschungsergebnisse, dass Rosmarinextrakt wirksam den oxidativen Lipidabbau während des Frittierprozesses verzögern kann. Dies ist in erster Linie auf die antioxidativen Hauptbestandteile Carnosinsäure und Carnosol zurückzuführen, die dazu beitragen, unerwünschte sensorische Veränderungen und potenziell gesundheitsschädliche Effekte wirksam zu hemmen.

4.5 Vergleich der untersuchten Frittieröle

4.5.1 Vergleich zwischen raffiniertem Kokosöl, nativem Kokosöl, kaltgepresstem High-Oleic Sonnenblumenöl und raffiniertem High-Oleic Sonnenblumenöl mit Zugabe von Rosmarinextrakt

Beim Frittieren stellen sowohl raffiniertes Kokosöl als auch HO-Sonnenblumenöl eine sichere Option dar. Beide Öle unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer Fettsäurezusammensetzung und ihrer ernährungsphysiologischen Bewertung. Raffiniertes Kokosöl ist reich an gesättigten Fettsäuren wie Laurinsäure, und HO-Sonnenblumenöl ist reich an Ölsäure, was sie robuster gegenüber thermischer Zersetzung macht. Konkrete wissenschaftliche Studien zu unraffiniertem HO- Sonnenblumenöl sind derzeit noch nicht genau erforscht. Jedoch lässt sich sagen, dass unraffiniertes HO- Sonnenblumenöl aufgrund des hohen Gehalts an einfach ungesättigten Fettsäuren wie Ölsäure trotz fehlender Raffination, wodurch natürliche Begleitstoffe wie Phytosterole und Tocopherole erhalten bleiben, eine Möglichkeit ist, um Lebensmittel zu frittieren. (Voon et al., 2024)

Tabelle 4: Vergleich der Eigenschaften von raffiniertem Kokosöl (RBD), nativem Kokosöl (VCO), kaltgepresstem HO-Sonnenblumenöl und raffiniertem HO-Sonnenblumenöl im Hinblick auf Frittieranwendung.

Öl	RBD	Raffiniertes HO-Sonnenblumenöl	VCO	kaltgepresstes HO-Sonnenblumenöl
Fettsäureprofil	Überwiegend gesättigte Fettsäuren - Laurinsäure	Hoher Anteil an einfach ungesättigter Fettsäure - Ölsäure	Überwiegend gesättigte Fettsäuren Laurinsäure	Hoher Anteil an einfach ungesättigter Fettsäure - Ölsäure
Rauchpunkt	232 °C	233-236 °C	177 °C	Rauchpunkt unter 200 °C - in Anlehnung an Ölsäure Jedoch etwas geringer als raffiniertes HO-Sonnenblumenöl
Geruch/ Geschmack	neutral	neutral	Leicht kokosspezifischer Geschmack	Mild, nussig
Thermische Stabilität	Sehr gut durch hohe Sättigung hitzestabil	Gut aufgrund hoher Ölsäure hitzestabil	Mittel bis hoch, hitzestabil	Gut, aufgrund hoher Ölsäure hitzestabil
Oxidationsbeständigkeit	Geringe Oxidationsanfälligkeit	Geringe Oxidationsanfälligkeit	Geringe Oxidationsanfälligkeit	Geringe Oxidationsanfälligkeit
Haltbarkeit	lange	lange	lange	lange
Ernährungsphysiologisch	Hoher Anteil an gesättigten	Gesundheitsfördernd aufgrund	Gesundheitsfördernd - Phenolische	Gesundheitsfördernd - Phytosterole

che Bewertung	Fettsäuren, kontrovers	der Ölsäure	Verbindungen	-Tocopherole
------------------	---------------------------	-------------	--------------	--------------

(Eigene Darstellung in Anlehnung an (Ng et al., 2021), (Boateng et al., 2016), (Prarthana et al., 2024), (Voon et al., 2024) und (J. Chen et al., 2023))

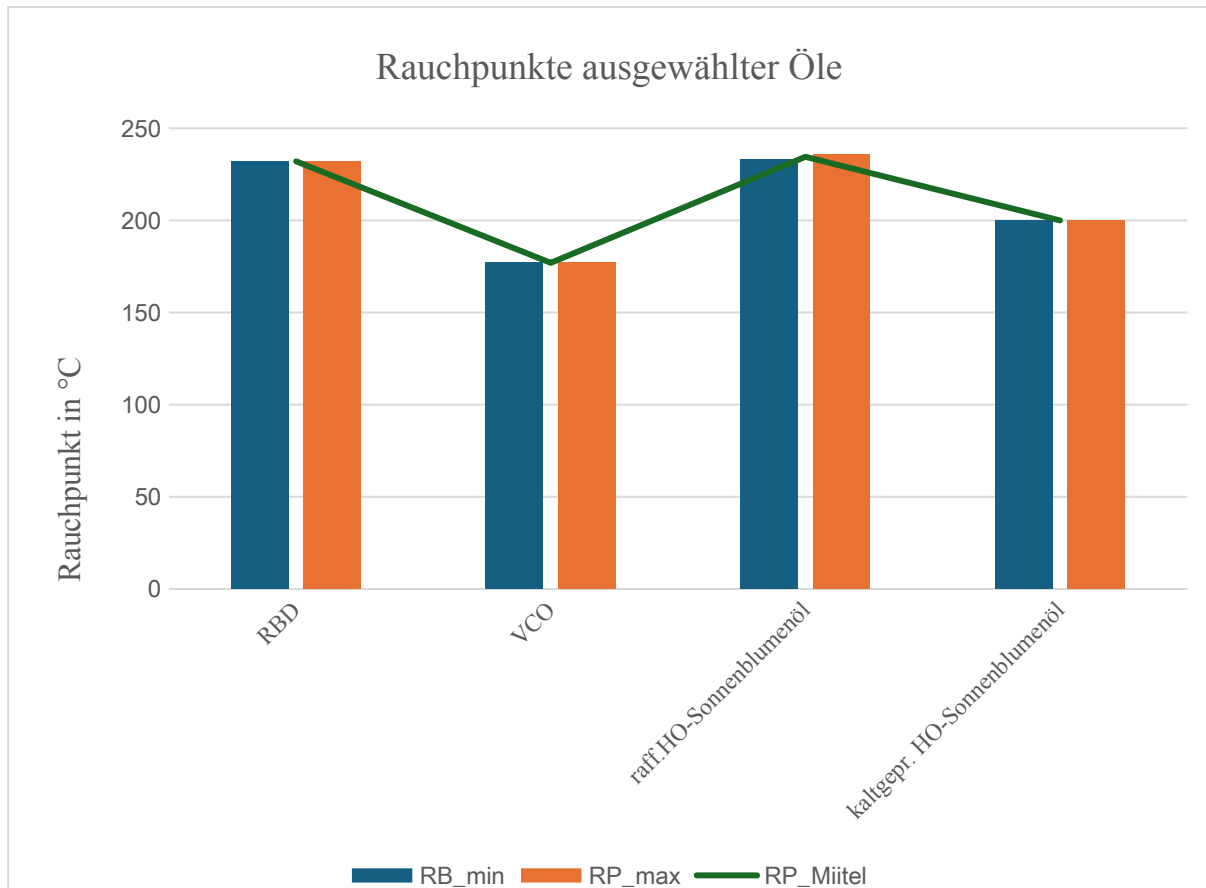


Abbildung 12: Vergleich der Rauchpunkte sowie Mittelwerte. Aus der Literaturrecherche ergibt sich nur für raffiniertes HO-Sonnenblumenöl ein Rauchpunkt-Bereich von 233–236 °C. Für die anderen Öle liegen keine Bereiche, sondern Einzelwerte vor: RBD-Kokosöl 232 °C, VCO 177 °C, kaltgepresstes HO-Sonnenblumenöl < 200 °C. Eigene Darstellung nach (Ng et al., 2021), (Boateng et al., 2016), (Prarthana et al., 2024), (Voon et al., 2024) und (J. Chen et al., 2023).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl beide raffinierten Öle als auch kaltgepresstes HO-Sonnenblumenöl aufgrund ihres Fettsäureprofils eine sehr hohe thermische Stabilität sowie ein geringes Oxidationsrisiko aufweisen (siehe Abbildung 12). Jedoch stellt HO-Sonnenblumenöl die bevorzugte Wahl aufgrund seiner ernährungsphysiologischen Vorteile dar. Als weiterer Ansatz könnte VCO anstatt von RBD in Betracht gezogen werden, da natives Kokosöl ernährungsphysiologisch vorteilhafter ist und Rosmarinextrakt die Fähigkeit

besitzt, MUFAs wie auch die im VCO enthaltenen phenolischen Verbindungen während des Frittierprozesses zu schützen (Yang et al., 2016) (Marina et al., 2009). Jedoch wäre raffiniertes Kokosöl geschmacksneutraler als VCO (Villarino et al., 2007). Eventuell könnte man eine Mischung aus einem geschmackneutralen Öl wie raffiniertem HO-Sonnenblumenöl beimengen, um den Kokosgeschmack zu mildern, ohne komplett auf die vorteilhaften Eigenschaften von VCO zu verzichten. Dasselbe gilt auch für unraffiniertes HO-Sonnenblumenöl, das aufgrund seines milden, nussigen Geschmacks als störend empfunden werden kann. Auch hier wäre ein denkbarer Ansatz, dieses Öl mit raffiniertem HO-Sonnenblumenöl zu mischen, um von den gesundheitsfördernden natürlichen Wirkstoffen wie Tocopherolen und Phytosterolen zu profitieren.

4.6 Effizienz von HO-Sonnenblumenöl, VCO und RBD mit Rosmarinextrakt unter hohen Temperaturen

Wie bereits erwähnt, sind Antioxidantien, insbesondere solche mit hoher Hitzestabilität, von großer Bedeutung, um die Oxidationsprozesse in Frittierölen wirksam zu verlangsamen. Vor allem Rosmarinextrakt, da seine Hauptwirkstoffe Carnosinsäure und Carnosol (Loussouarn et al., 2017) auch bei den hohen Temperaturen des Frittierens ihre antioxidative Wirkung behalten und somit das Öl effektiv vor Lipidoxidation schützen und dadurch auch die Bildung gesundheitsschädlicher Nebenprodukte verhindern. (Zhao et al., 2021)

Zahlreiche Studien belegen die Wirksamkeit von Rosmarinextrakt in Frittierölen. Wie vorhin erwähnt, zeigen experimentelle Untersuchungen von Moufakkir et al., dass durch die Zugabe von Rosmarinextrakt die Induktionszeit signifikant verlängert wird. Ebenfalls wurde anhand von Parametern wie FFA, Peroxidzahl und polaren Verbindungen bewiesen, dass Rosmarinextrakt die Autoxidation und Photooxidation signifikant senkt. Ein weiterer Vorteil ist auch, dass es sich hier um ein natürliches Antioxidans handelt, im Gegensatz zu BHT und PG, die gesundheitlich oft kritisch hinterfragt werden. Ebenfalls hemmen die im Rosmarinextrakt enthaltenen Wirkstoffe, Carnosinsäure und Carnosol, die Bildung von ALEs. Allgemein lässt sich sagen, dass Rosmarinextrakt nicht nur zur Qualitätsverbesserung beiträgt, sondern auch die Gesundheit unterstützen kann. (Moufakkir et al., 2023) (MOUFAKKIR et al., 2022) (Zhao et al., 2021)

Durch die Kombination von Rosmarinextrakt und HO-Sonnenblumenöl oder VCO wird die Oxidationsstabilität des Frittieröls deutlich verbessert. Durch den hohen Anteil an Ölsäure im HO-Sonnenblumenöl, welches von Natur aus eine starke Hitzestabilität aufweist, und die Zugabe von ungefähr 800 ppm bis 1000 ppm hitzestabilem Rosmarinextrakt, der die oxidative Zersetzung weiter effektiv hemmt, werden die Haltbarkeit und die Ölqualität während des Frittierens deutlich erhöht. (Moufakkir et al., 2023) (MOUFAKKIR et al., 2022) (J. Chen et al., 2023)

Laut den Studien von Moufakkir et al. wurden wichtige Parameter wie polare Verbindungen, FFA und Peroxidzahlen als Qualitätsindikatoren herangezogen. Anhand der Messung von polaren Verbindungen (TPC), die einen Wert von 25 % TPM erst nach 10 Stunden im Rosmarinextrakt behandelten Öl aufweisen, im Gegensatz zur unbehandelten Kontrolle, welche schon nach 6 Stunden diesen Wert aufzeichnete, wird verdeutlicht, dass die Stabilität vom Öl durch die Wirkung von Carnosinsäure und Carnosol erhöht wird. Auch der Gehalt an FFA, der ebenfalls ein essenzieller Indikator ist, erreichte FFA einen Wert von 0,6 FFA in der Kontrolle, jedoch in der behandelten Probe einen Wert sogar unterhalb 0,4 FFA. Ein weiterer wichtiger Qualitätsparameter wie die Peroxidzahl zeigte ebenfalls einen bemerkenswerten Wert von 16 meqO₂/kg Öl in dem mit Rosmarinextrakt behandelten Speiseöl. Auch hier wurde in der Kontrolle ein deutlich höherer Wert gemessen, nämlich 28 meq O₂/kg Öl. Zusammenfassend zeigt sich anhand dieser Werte, dass die Qualität und Stabilität des Öls durch die Zugabe von Rosmarinextrakt gewährleistet sind. (Moufakkir et al., 2023) (MOUFAKKIR et al., 2022)

4.6.1 HO vs. konventionelles Sonnenblumenöl sowie VCO/RBD: TPC-Grenzzeiten und Qualitätsindikatoren im Vergleich

Bei raffiniertem Sonnenblumenöl wurde die Überschreitung von 25 % TPM erst nach ungefähr 48 Stunden von frittierten Churros beobachtet, während konventionelles Sonnenblumenöl diesen bereits schon nach 24 Stunden erreicht (Álvarez Graña et al., 2025). Der FFA-Gehalt von 0,09 %-0,16 % FFA wurde sogar erst nach sechs Tagen zu je 8 Stunden Frittierstunden gemessen (Romano et al., 2021). Bemerkenswert ist auch ein PV-Wert von ungefähr 2,95 meq O₂/kg Öl nach ungefähr vier Stunden (Onacik-Gür et al., 2024). Für HO-Sonnenblumenöl liegen unter Frittierbedingungen bislang keine kontrollierten mit/ohne-Rosmarinextrakt-Studien vor. Jedoch lässt sich aufgrund des hohen Ölsäureanteils (MUFA)

und der antioxidativen Wirkmechanismen von Rosmarin-Diterpenen ableiten, dass der Zusatz die bereits hohe thermo-oxidative Stabilität weiter verbessert.

Wie bereits erwähnt, könnte auch VCO, welches normalerweise nicht so hohen Rauchpunkt wie RBD hat, verwendet werden, da Rosmarinextrakt die Fähigkeit besitzt, die im Öl enthaltenen phenolischen Verbindungen während des Frittierens zu schützen. (Marina et al., 2009) (Sandupama et al., 2022) (Nitbani et al., 2022)

Eine Studie von Srivastava & Semwal zeigt anhand von VCO, dass ein TPM-Wert von 8,1 % TPM und ein PV-Wert von ungefähr 9,1 meq O₂/kg Öl bei einer Temperatur von rund 185 °C nach 8 Stunden kontinuierlichem Frittieren von Kichererbsen erreicht. (Srivastava & Semwal, 2015)

Eine weitere Studie bezüglich RBD berichtet, dass nach 80-maligem Frittieren bei einer Temperatur von ungefähr 180 °C (genaue Zeitangabe ist nicht bekannt) der TPM-Bereich bei 8,1-9,5 % TPM lag. Also deutlich unter der üblichen Ablehnungsgrenze von zirka 25% TPM. (Yu et al., 2018) Auch hier existieren keine Studien in Kombination mit Rosmarinextrakt. Jedoch lässt sich auch hier ableiten, dass durch die Zugabe von Rosmarinextrakt die oxidative Stabilität weiter verbessert werden kann.

Zur Visualisierung des potenziellen Effekts von Rosmarinextrakt auf HO-Sonnenblumenöl wurde der relative mit/ohne-Effekt (Zeit-bis-Grenzwert, FFA, PV) aus der Studie von Moufakkir et al. (2023) übertragen. Die Kontrolle wurde auf 100 normiert und der Balken „mit Rosmarinextrakt“ entspricht dem Faktor $\times 100$. Für Absolute wurde $\text{Standzeit_mit} = \text{Standzeit_ohne} \times \text{Faktor}$ verwendet. Es wurden keine fremden Absolutzahlen für HO übernommen (relative Projektion).

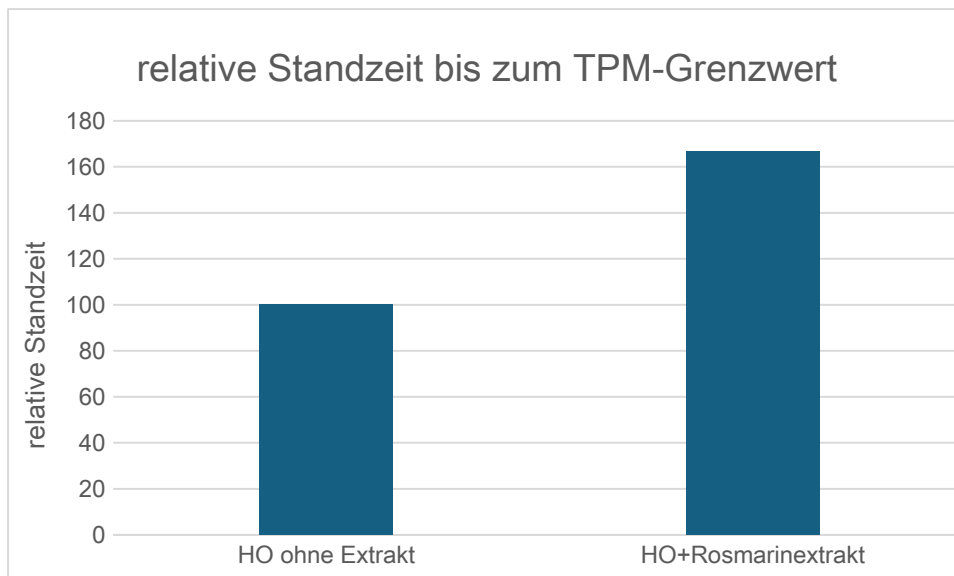


Abbildung 13 zeigt für HO-Sonnenblumenöl eine verlängerte Standzeit (Index) unter Rosmarinextrakt ($\approx +67\%$). Eigen Darstellung in Anlehnung an (Moufakkir et al., 2023)

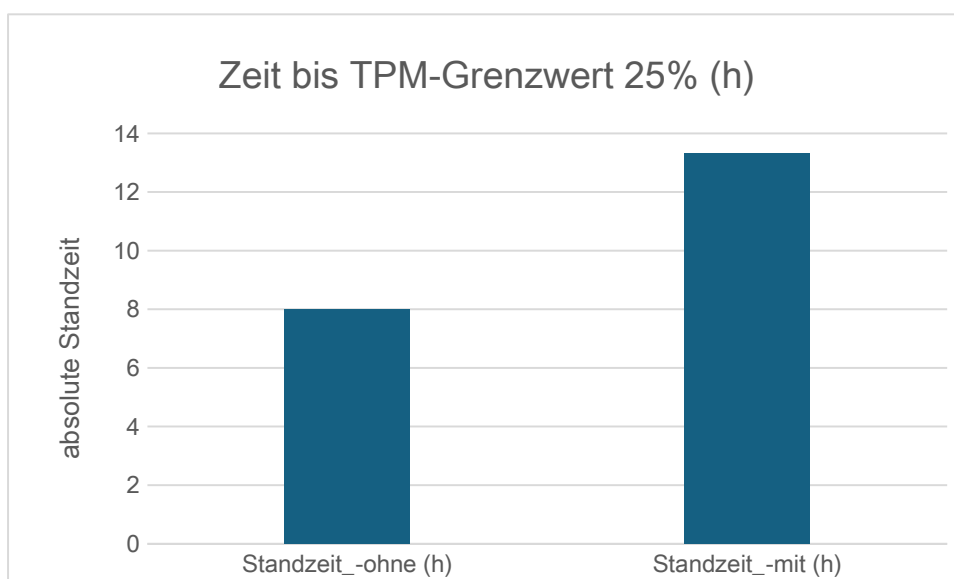


Abbildung 14: Rosmarinextrakt verlängert die Zeit bis 25 % TPM in HO-Sonnenblumenöl von 8,0 Stunden auf 13,3 Stunden (+66,7 %). Der Wert „mit Rosmarinextrakt“ ist eine Projektion des mit/ohne-Verhältnisses nach Moufakkir et al. auf eine HO-Baseline. Es wurden keine fremden Absolutzahlen übernommen.

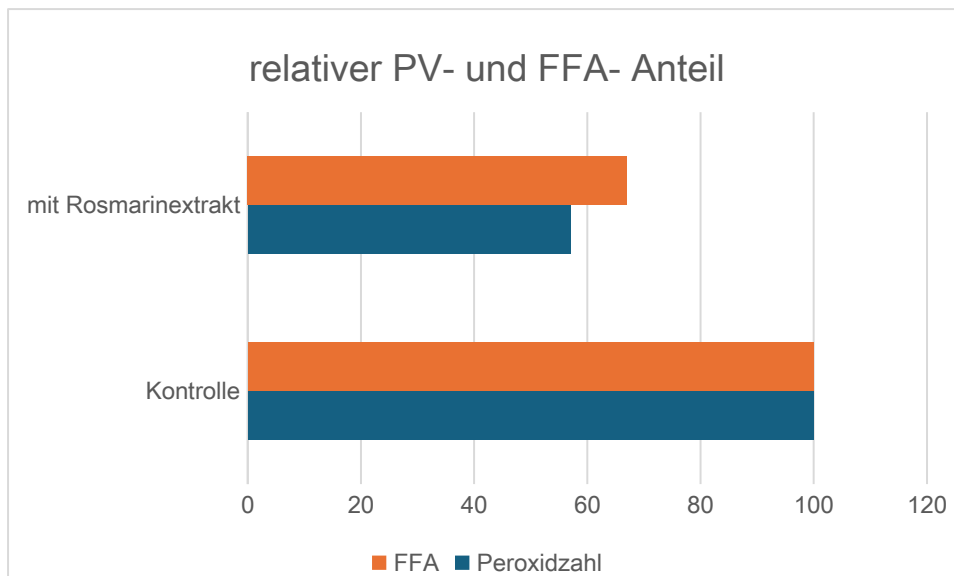


Abbildung 15: HO-Sonnenblumenöl: relative Peroxidzahl (PV) und freie Fettsäuren (FFA) (Kontrolle = 100; niedriger = besser). Die Werte „mit Rosmarinextrakt“ sind auf HO projizierte Effekte, berechnet aus den mit/ohne-Verhältnissen nach (Moufakkir et al., 2023)

Für VCO, RBD und kaltgepresstes HO-Sonnenblumenöl wird auf grafische Darstellung verzichtet, da keine Daten mit/ohne Rosmarinextrakt vorliegen und die publizierten Frittierprozesse stark variieren (Temperatur, Matrix und Messmethode).

4.7 Limitationen der Studien

Da einige Studien Öle, wie beispielsweise mittelsäurehaltiges Sonnenblumenöl und Sojaöl, mit unterschiedlichen Konzentrationen an Rosmarinextrakt, Erhitzungszeiten und Temperaturen verwenden, erschwert es den Vergleich.

In den Studien werden die natürlichen Antioxidantien und Ölinhaltsstoffe im Frittieröl häufig nicht vollständig berücksichtigt, wodurch ein möglicher synergistischer Effekt zwischen Rosmarinextrakt und den im Öl vorkommenden Antioxidantien unzureichend bewertet wird. Dies kann zu einer Überschätzung der Wirksamkeit des Rosmarinextrakts führen. Ebenfalls kann die Zusammensetzung von Rosmarinextrakt je nach Herkunft, Aufbereitung und Lagerung stark beeinflusst werden, was die Umsetzung einschränkt.

Während viele Studien die oxidative Stabilität von Frittierölen unter Laborbedingungen untersuchen, fehlen bisher umfangreiche klinische Studien, die die tatsächlichen Auswirkungen von antioxidativ behandelten Ölen auf die menschliche Gesundheit bestätigen.

Daher sind Aussagen zur gesundheitlichen Wirksamkeit der Antioxidantien in Frittierölen am Menschen bisher nur begrenzt belegbar.

Für HO-Sonnenblumenöl gibt es bisher keine Studien, die mit und ohne Rosmarinextrakt unter Frittierbedingungen direkt vergleichen. Die gezeigten Effekte (Abbildung 13, 14 und 15) sind daher plausible Projektionen, die noch experimentell bestätigt werden müssen.

Ebenfalls fehlen für VCO/RBD mit/ohne Zusatz von Rosmarinextrakt Studien. Es existieren keine kontrollierten mit/ohne-Studien mit Rosmarinextrakt unter Frittierbedingungen. Aussagen zum Zusatznutzen bleiben daher plausibel, aber unbestätigt.

4.8 Implikationen für die Lebensmittelindustrie und Gastronomie

4.8.1 Anwendung der Erkenntnisse zur Verbesserung von Frittierprozessen

Frittieren ist in der heutigen Zeit nicht wegzudenken, da viele Speisen unter diesem Verfahren zubereitet werden. Üblicherweise werden raffinierte Öle verwendet, aufgrund ihrer Hitzebeständigkeit. Jedoch enthalten diese wenig ernährungsphysiologische Eigenschaften, da Vitamine und ungesättigte Fettsäuren während der Raffination verloren gehen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist auch, dass während der Raffination gesundheitsschädliche Trans-Fettsäuren entstehen. (An et al., 2022) (Kemény et al., 2001)

VCO und HO-Sonnenblumenöl in Kombination mit Rosmarinextrakt wären somit für die Lebensmittelindustrie und Gastronomie ein innovativer Ansatz, um zum einen die im Öl enthaltenen Vitamine, phenolischen Verbindungen und MUFAs während des Frittierprozesses zu erhalten, was sich positiv auf die Qualität des frittierten Lebensmittels auswirkt. (Yang et al., 2016) Gleichzeitig sorgt dieser Effekt dafür, dass die Haltbarkeit und damit die Nutzungsdauer des Öls verlängert wird. (Moufakkir et al., 2023) (MOUFAKKIR et al., 2022)

4.8.2 Kostenaufstellung: Vergleich Österreich Deutschland

Durch die Zugabe von etwa 600 ppm bis 1000 ppm (0,6-1 g pro kg Öl) Rosmarinextrakt im Frittieröl kann es seine antioxidative Wirkung während des Erhitzens wirksam entfalten. (Moufakkir et al., 2023) (MOUFAKKIR et al., 2022)

Die Kosten von Rosmarinextrakt lassen sich direkt über den Extraktpreis pro Gramm berechnen. In Österreich und Deutschland liegen die Preise auf ziemlich gleichem Niveau (siehe Tabelle 5), während der Einkaufspreis von raffiniertem HO-Sonnenblumenöl gering unterschiedlich ist (siehe Tabelle 6).

Tabelle 5: Kostenvergleich von Rosmarinextrakt-Pulver in Österreich und Deutschland im Jahr 2025. Die aufgeführten Preise sind Endkundenpreise und nicht mit Einkaufskonditionen vergleichbar.

Land	Österreich	Deutschland
Produktname / Anbieter	natürlich lang leben / shop-apotheke.at	natürlich lang leben /medpex.de
Verpackungsgröße (g oder ml)	100 g	100 g
Preis (€)	29,90 €	29,90 €
Grundpreis (€ pro g)	2,99 € pro g	2,99 € pro g
Versandkosten (€)	9,95 € innerhalb Österreich	4,95 € innerhalb Deutschland
Gesamtpreis (€ inkl. Versand)	39,85 €	34,85 €
Bemerkungen	Produktinformation: enthält Carnosinsäure	Produktinformation: enthält Carnosinsäure

Tabelle 6: Kostenvergleich von raffiniertem HO-Sonnenblumenöl in Österreich und Deutschland im Jahr 2025.

Land	Österreich	Deutschland
Produktname / Anbieter	METRO Chef High Oleic Frittieröl - 10 l Kanister/ metro.de	METRO Chef High Oleic Frittieröl - 10 l Kanister/ metro.de
Verpackungsgröße (kg oder l)	10 L = 9,13 kg	10 L = 9,13 kg

L)		
Preis (€)	24,99€	22,99 €
Grundpreis (€ pro L)	2,49 € pro L	2,29 € pro L
Versandkosten (€)	Direkt im Markt	Direkt im Markt
Gesamtpreis (€ inkl. Versand)	24,99€	22,99 €
Bemerkungen	Raffiniertes HO-Sonnenblumenöl Frei von Palmöl	Raffiniertes HO-Sonnenblumenöl Frei von Palmöl

Zur quantitativen Bestimmung der Zugabe von Rosmarinextrakt in raffiniertem HO-Sonnenblumenöl wird die Einheit ppm (parts per million) als Massenanteil verwendet. Im Lebensmittelbereich entspricht 1 ppm 1 mg/kg (IUPAC, 2014). Daraus ergibt sich die Formel (Wong & Amster, 2006):

$$m_{\text{Extrakt}} (\text{kg}) = \frac{\text{ppm} \times m_{\text{öl}} (\text{kg})}{10^6}$$

bzw.

$$m_{\text{Extrakt}} (\text{g}) = \frac{\text{ppm} \times m_{\text{öl}} (\text{kg})}{10^3}$$

Diese Formel ist eine Standardmethode zur Umrechnung von ppm-Konzentration in absolute Mengen.

Da für die oben genannte Formel Kilogramm (kg) benötigt werden, müsste zuerst von Litern auf Kilogramm umgerechnet werden. Dies geschieht mittels dieser Formel (IUPAC, 2014):

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Umrechnung:

$$\text{Masse (kg)} = \text{Dichte (kg/L)} \times \text{Volumen (L)}$$

- ρ = Dichte (z. B. in g/cm³ oder kg/L)
- m = Masse (z. B. in g oder kg)
- V = Volumen (z. B. in cm³ oder L)

Die Dichte von Sonnenblumenöl kann anhand von handelsüblichen Angaben berechnet werden. Für 10 Liter Öl mit einer Masse von 9,13 kg ergibt sich eine Dichte von 0,913 g/cm³. Dieser Wert liegt leicht unter den von Dos Santos & Pereira (2024) berichteten Literaturwerten von 0,918–0,923 g/cm³ bei 20 °C, was auf Temperaturunterschiede oder Unterschiede in der Raffination zurückgeführt werden kann. (Dos Santos & Pereira, 2024)

$$\text{Dichte} = \frac{9,13\text{kg}}{10\text{ L}} = 0,913\text{ g/cm}^3$$

Beispiel:

Für die Berechnung der Mehrkosten durch die Zugabe von Rosmarinextrakt wurde eine Konzentration von 1000 ppm (= 1 g Extrakt pro kg Öl) verwendet. In Österreich und Deutschland liegt der Preis bei 2,99 € pro g. Somit ergibt sich eine Rechnung von:

$$\text{Kosten (Rosmarinextrakt pro g)} = 1\text{ g} \times 2,99\text{ €/g} = 2,99\text{€}$$

Da 9,13 kg Öl gekauft werden, wird die Menge des Rosmarinextrakts bei 1000 ppm (1g pro kg Öl) folgendermaßen berechnet:

$$\text{Menge Rosmarinextrakt(g)} = \frac{1000 \times 9,13}{10^3} = 9,13\text{ g}$$

Für 9,13 kg raffiniertes HO-Sonnenblumenöl werden 9,13 g Rosmarinextrakt benötigt. 1 g Rosmarinextrakt kostet 2,99 €. Somit ergeben sich Kosten von:

$$9,13 \times 2,99 = 27,29\text{€}$$

Da 9,13 kg 10 Liter raffiniertes HO-Sonnenblumenöl entsprechen, wären es pro Liter:

$$\frac{27,29 \text{ €}}{10 \text{ L}} = 2,73 \text{ €/L}$$

Tabelle 7: Beispiel HO-Sonnenblumenöl: Kosten- und Standzeitvergleich ohne vs. mit Rosmarinextrakt. (Österreich/Deutschland. Standzeit ohne (h) und Standzeit mit (h) wurden in Anlehnung an Abbildung 14 durchgeführt.

	Ölpreis €/L	E392_ppm	Extraktpreis €/g	Extrakt €/L	Standzeit ohne (h)	Standzeit mit (h)	€/h ohne	€/h mit
Österreich	2,49	1000	29,9	2,73	8	13,33	2,49	5,22
Deutschland	2,29	1000	29,9	2,73	8	13,33	2,29	5,02

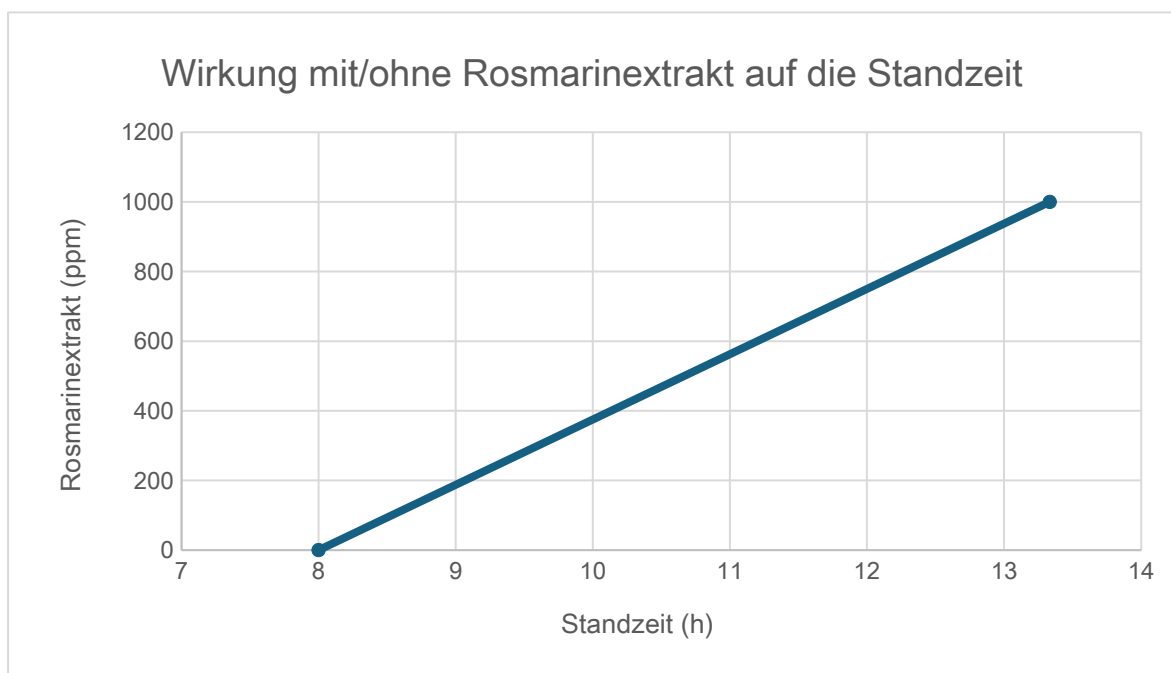


Abbildung 16: Dieses Diagramm, angelehnt an Abbildung 14, zeigt, dass sich die Standzeit durch die Zugabe von Rosmarinextrakt um etwa fünf Stunden verlängern lässt, was sich günstig auf die Kosten auswirken könnte. Zur endgültigen Bestätigung sind jedoch noch direkte Vergleichsexperimente erforderlich.

Die Zugabe von Rosmarinextrakt zur Verbesserung der Oxidationsstabilität von HO-Sonnenblumenöl führt einerseits zu zusätzlichen Kosten, andererseits zeigt die Projektion (Abbildung 16), dass sich dadurch die Standzeit verlängern kann. Zur Bestätigung dieser

Annahme sind jedoch experimentelle Untersuchungen erforderlich. Eine verlängerte Nutzung des Frittieröls durch Rosmarinextrakt könnte außerdem Auswirkungen auf die Produktionskosten haben, was ebenfalls experimentell überprüft werden müsste. Auch dies müsste experimentell durchgeführt werden, um die Annahme zu bestätigen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Zugabe von 1000 ppm, sprich 1g Rosmarinextrakt pro kg Öl, Mehrkosten in Höhe von 2,99 € pro Kilogramm Öl entstehen. Diese Kosten müssen vom Unternehmen mitberücksichtigt werden. Jedoch bietet es eine Reihe von Vorteilen, denn die Ölwechselintervalle werden reduziert, wodurch Material- und Entsorgungskosten eingespart werden, und die Haltbarkeit des Frittieröls kann verlängert werden. Durch diese Optimierung können Unternehmen nicht nur die sensorische und ernährungsphysiologische Qualität ihrer Produkte steigern, sondern auch wirtschaftliche Vorteile erzielen. Darüber hinaus trägt die verbesserte Stabilität zur Nachhaltigkeit des Frittierprozesses bei, wodurch weniger Abfall entsteht und Ressourcen geschont werden.

Des Weiteren ist die genaue Nutzungsdauer von Frittierölen in der Gastronomie nicht bekannt, da Faktoren wie Beanspruchung und die verwendete Ölqualität eine große Rolle spielen. Wie bereits erwähnt, ist die Nutzungsdauer von den untersuchten Qualitätsparametern, wie FFA, polaren Verbindungen und Peroxidzahl, abhängig. (Moufakkir et al., 2023). Die Empfehlungen zum Wechselintervall von Frittierölen orientieren sich nach praxisorientierten Leitlinien wie der der Wirtschaftskammer Österreich. Der Grenzwert für die Gesamtheit an polaren Verbindungen liegt bei 25 % TPM. Meist liegt der Ölwechsel zwischen 20 und 60 Frittierstunden (ca. 4 bis 6 Wechsel pro Monat). Die Dokumentation erfolgt anhand eines HACCP (Hazard Critical Control Points)-Systems, was eine Liste mit speziellen Anforderungen, wie Tag, Heizzeit in Stunden, Frisch-Öl in Litern, Filtration, Reinigung, Temperatur und die Prozente der Gesamtpolarverbindungen, ist.

Tabelle 8: Vergleich der wichtigsten Eigenschaften von RBD, VCO, raffiniertem und kaltgepresstem High-Oleic-Sonnenblumenöl hinsichtlich Zusammensetzung, Hitzebeständigkeit, Verarbeitungsart, Zusatzstoffen und Kosten.

Eigenschaften	RBD	VCO	Raffiniertes HO-Sonnenblumenöl	Kaltgepresstes HO-Sonnenblumenöl
Menge/Preis pro Liter (kg/Liter)	1 kg / 21,90 €	1 kg /13,00€	9,13 kg zu	1 Liter zu 11,98

			24,99€ 1kg = ca. 2,74 €	€ 1kg = ca. 13,02 €/kg **
Anbieter	Naturkosmetik- werkstatt.at	Koro-shop.at	Metro Österreich	BioKing
Zusammensetzung	Reich an gesättigten Fettsäuren wie Laurinsäure	Reich an phenolischen Verbindungen	Reich an Ölsäure	Reich an Ölsäure, Phytosterole und Tocopherole
Hitzebeständigkeit	hitze stabil	hitze stabil	hitze stabil	hitze stabil
Raffiniert/ Kaltgepresst	raffiniert	kaltgepresst	raffiniert	kaltgepresst
Zusätze von Rosmarin	nein	nein	nein	nein
Kosten der Zusätze	2,73 €/ L = 2,99 €/ kg *	2,73 €/ L = 2,99€/ kg *	2,73 €/ L = 2,99€/ kg *	2,73 €/ L = 2,99€/ kg *
Gesamtkosten pro kg	24,89 €/ kg	15,99 €/ kg	5,73 €/ kg	16,01 €/ kg

* $\frac{2,73\text{€}}{\text{L}} = 2,99\text{ € /kg}$.

0,913 kg/L

**Preis pro kg = $\frac{11,98\text{ €}}{0,913} = 13,02\text{ €/kg}$.

(es wurde dieselbe Dichte wie bei raffiniertem HO-Sonnenblumenöl verwendet, da kaltgepresstes HO-Sonnenblumenöl sich im physikalischen Dichtewert kaum unterscheidet)

Es zeigt sich, dass raffiniertes HO-Sonnenblumenöl tendenziell kostengünstiger ist als kaltgepresstes HO-Sonnenblumenöl, RBD und VCO. Dies macht es zu einer wirtschaftlich attraktiven Option für industrielle Anwendungen.

5 Diskussion

Obwohl die antioxidative Wirksamkeit von Rosmarinextrakt (E 392) unter Frittierbedingungen vielfach belegt ist, werden Dosierungen und Extraktzusammensetzungen

in den Studien häufig unvollständig berichtet oder fehlen ganz, insbesondere für VCO, RBD und HO-Sonnenblumenöl.

VCO besitzt aufgrund seines hohen Gehalts an gesättigten Fettsäuren von Natur aus eine gewisse oxidative Stabilität. Jedoch kann es bei hohen Temperaturen oxidieren. Die Annahme, dass Rosmarinextrakt auch beim Frittieren von VCO stabilisierend wirkt, klingt daher plausibel, muss jedoch durch gezielte experimentelle Studien bestätigt werden.

Die Zugabe von Rosmarinextrakt zur Verbesserung der Oxidationsstabilität in RBD könnte zwar zur Verlängerung der Standzeit beitragen, führt jedoch auch zu zusätzlichen Kosten. Wie Tabelle 8 zeigt, liegt der Kilopreis für raffiniertes Kokosöl (RBD) bei 21,90 €, womit es das teuerste unter den vier betrachteten Frittierölen ist.

Als Einschränkung dieser Untersuchung ist hervorzuheben, dass die prognostizierte Verlängerung der Standzeit des HO-Sonnenblumenöls durch Rosmarinextrakt bislang nicht durch direkte Vergleichsexperimente bestätigt wurde. Die vorliegenden Ergebnisse basieren auf Projektionen, sodass weitere experimentelle Untersuchungen notwendig sind, um die tatsächliche Wirkung und Kosteneffizienz der Extraktzugabe zu bestätigen.

Wie sich die Produktionskosten und der mögliche wirtschaftliche Nutzen durch eine längere Nutzung des Öls tatsächlich verändern, lässt sich bislang nur vermuten. Zu einer endgültigen Bewertung sind praktische Untersuchungen nötig.

6 Schlussfolgerung

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Arbeit, dass sich durch die Zugabe von Rosmarinextrakt zu verschiedenen Ölen die thermo-oxidative Zersetzung signifikant verlangsamen lässt. Insbesondere die antioxidativen Verbindungen im Rosmarinextrakt, wie Carnosol und Carnosinsäure, tragen maßgeblich zur Hemmung oxidativer Abbauprozesse bei. Dieser Effekt bewahrt außerdem wertvolle Inhaltsstoffe wie Vitamine, phenolische Verbindungen und einfach ungesättigte Fettsäuren (MUFAs) während des Erhitzens. (Zhao et al., 2021) (Loussouarn et al., 2017)

Im Gegensatz zu herkömmlichen raffinierten Ölen muss das Frittieröl bei Verwendung von beispielsweise Sojaöl, wie sie in der Studie von Moufakkir et al. bewiesen wurde, nicht mehr

so häufig ausgewechselt werden, da durch Zugabe von 800-1000 ppm Rosmarinextrakt die Bildung von gesundheitsschädlichen Nebenprodukten wie Acrolein, hohen Peroxidwerten, polaren Verbindungen oder freien Fettsäuren verzögert wird (Moufakkir et al., 2023). Diese verzögerte Alterung des Öls führt zu einer längeren Standzeit und geringeren Ölwechselintervallen (Moufakkir et al., 2023). Dadurch wird gewährleistet, aufgrund der verzögerten Entstehung dieser oben genannten toxischen Stoffe, nicht nur das zubereitete Lebensmittel, sondern auch der Menschen sowohl sensorisch als auch gesundheitlich davon profitiert. (Van Nguyen, 2006)

Besonders in ölsäurereichen Ölen zeigt sich eine stabilere Hemmung gegenüber der thermo-oxidativen Zersetzung im Vergleich zu PUFA-reichen Ölen, die aufgrund ihres Fettsäureprofils anfälliger für Oxidation sind. Diese Erkenntnis wird durch die Studie von Moufakkir et al. gestützt, die zeigte, dass durch die Zugabe von Rosmarinextrakt (600 -800 ppm) in mittel-ölsäurereichem Sonnenblumenöl die Bildung polarer Verbindungen, freier Fettsäuren und Peroxide signifikant reduziert wurde und sowohl Tocopherol als auch synthetische Antioxidantien (BHA, BHT) übertraf. (MOUFAKKIR et al., 2022)

Die Ergebnisse legen nahe, dass die antioxidative Wirkung von Rosmarinextrakt im Frittierprozess öltypspezifisch ist. In mittel-ölsäurereichem Sonnenblumenöl konnte bereits eine Zugabe von 600 ppm Rosmarinextrakt die Bildung polarer Verbindungen, freier Fettsäuren und Peroxide signifikant verzögern (MOUFAKKIR et al., 2022). Dagegen zeigte eine weitere Studie zu Sojaöl, dass höhere Konzentrationen notwendig waren, um ähnliche Effekte zu erzielen, was auf die stärkere Oxidationsanfälligkeit der PUFA-reichen Matrix hinweist (Moufakkir et al., 2023). Somit beeinflusst das Fettsäureprofil maßgeblich die Effektivität des Antioxidans.

Dennoch wurde für die Projektion 1000 ppm Rosmarinextrakt gewählt, um eine Unterdosierung gegenüber Literaturwerten, wie bei mittel-ölsäurereichem Sonnenblumenöl (600–800 ppm), auszuschließen. Aus diesem Grund dient die Konzentration von 1000 ppm als vorsichtiger und praxisrelevanter Sicherheitsaufschlag, der es ermöglicht, die öltypspezifische Wirkung von Rosmarinextrakt in zukünftigen Studien zuverlässig zu überprüfen.

Die Verwendung von Rosmarinextrakt zur Verlängerung der Standzeit von Frittierölen könnte theoretisch zu selteneren Ölwechseln und damit zu geringeren Rohstoff- und Entsorgungskosten führen. Mit der Zugabe von Rosmarinextrakt und dem Einsatz teurerer Öle wie VCO oder RBD entstehen höhere Anschaffungskosten.

Raffiniertes HO-Sonnenblumenöl ist mit etwa 2,74 € pro Kilogramm (siehe Tabelle 8) deutlich kostengünstiger als raffiniertes Kokosöl (RBD) oder Virgin Coconut Oil (VCO), was es aus ökonomischer Sicht zu einer attraktiven Option für den Einsatz als Frittieröl macht.

Daten bezüglich der Abfallmenge von Altspeiseöl sind in Österreich nur eingeschränkt verfügbar.

Laut Umweltbundesamt (Umweltbundesamt [UBA], 2023) lag die Gesamtsumme aller Abfälle im Jahr 2022 (Stand 2023) bei ungefähr 73,9 Millionen Tonnen, wobei keine detaillierte Angabe zu Speiseölabfällen berichtet wurde. Nach Angaben der Stadt Wien (Ma, 2025) werden jährlich 320 Tonnen Altspeiseöl gesammelt. Das Bundesministerium Parlament Österreich (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023) berichtet, dass biogene Abfälle, darunter auch Speiseöle, rund 25% des gesamten Abfallaufkommens (Stand 2021) ausmachen. Innerhalb der Abfallkategorie zeigten biogene Abfälle die höchste Zunahme unter den Abfällen von rund 7,4 % im Vergleich zum Vorjahr.

Laut dem Jahresbericht 2023 der NÖ Umweltverbände (Statusbericht Zur Abfallwirtschaft in Österreich, o. D.), wurden in Niederösterreich insgesamt 1.011,4 Tonnen Altspeiseöl und -fette gesammelt (Haushalte und Gastronomie). Diese Menge stammt aus 69.312 Haushalts-NÖLI-Behältern und 4.230 Gastro-NÖLI-Behältern. Dies wird anhand eines NÖLI-Sammelbehälters (gelb, 3 Liter Fassungsvermögen) berechnet, welche vollgefüllt in Altstoffsammelzentren (ASZ) gesammelt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Verwendung des High-Oleic-angereicherten Öls mit Rosmarinextrakt potenziell die Standzeit erhöht, die Ölwechselintervalle verlängert und damit Kosten sowie Altölmengen reduziert. Da es sich um eine Projektion handelt, sind weitere Studien relevant, um diese Aussage zu bestätigen. Geplante Folgestudien sollten standardisierte Frittierzyklen, Dosis-Response-Vergleiche (600–1000 ppm), Oxidationsmarker (TPM, FFA, PV) und Sensorik umfassen, um die hier erwarteten Vorteile experimentell zu bestätigen.

7 Literaturverzeichnis

- Abeyrathne, E. D. N. S., Nam, K. & Ahn, D. U. (2021). Analytical Methods for Lipid Oxidation and Antioxidant Capacity in Food Systems. *Antioxidants (Basel, Switzerland)*, 10(10).
<https://doi.org/10.3390/antiox10101587>
- Ahmad, S. N. S., Tarmizi, A. H. A., Razak, R. A. A., Jinap, S., Norliza, S., Sulaiman, R. & Sanny, M. (2021). Selection of Vegetable Oils and Frying Cycles Influencing Acrylamide Formation in the Intermittently Fried Beef Nuggets. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(2).
<https://doi.org/10.3390/foods10020257>
- Alberio, C., Izquierdo, N. G., Galella, T., Zuñil, S., Reid, R., Zambelli, A. & Aguirrezábal, L. A. N. (2016). A new sunflower high oleic mutation confers stable oil grain fatty acid composition across environments. *European Journal of Agronomy*, 73, 25–33.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.10.003>
- Álvarez Graña, S., Abarquero, D., Claro, J., Combarros-Fuertes, P., Fresno, J. M. & Tornadijo, M. E. (2025). Behaviour of sunflower (*Helianthus annuus* L.) oil and high oleic sunflower oil during the frying of churros. *Food Chemistry Advances*, 6, 100899.
<https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100899>
- An, H., Ma, Y., Wang, X. & Zheng, Y. (2022). Effects of Deodorization on the Formation of Processing Contaminants and Chemical Quality of Sunflower Oil. *Journal of Oleo Science*, 71(7), ess22050. <https://doi.org/10.5650/jos.ess22050>
- Ayala, A., Muñoz, M. F. & Argüelles, S. (2014). Lipid Peroxidation: Production, Metabolism, and Signaling Mechanisms of Malondialdehyde and 4-Hydroxy-2-Nonenal. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2014, 1–31. <https://doi.org/10.1155/2014/360438>
- Bethke, P. C. & Bussan, A. J. (2013). Acrylamide in Processed Potato Products. *American Journal of Potato Research*, 90(5), 403–424. <https://doi.org/10.1007/s12230-013-9321-4>
- Boateng, L., Ansong, R., Owusu, W. B. & Steiner-Asiedu, M. (2016). Coconut oil and palm oil's role in nutrition, health and national development: A review. *Ghana Medical Journal*, 50(3), 189–196.
- Borges, R. S., Ortiz, B. L. S., Pereira, A. C. M., Keita, H. & Carvalho, J. C. T. (2019). Rosmarinus officinalis essential oil: A review of its phytochemistry, anti-inflammatory activity, and mechanisms of action involved. *Journal of Ethnopharmacology*, 229, 29–45.
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.09.038>

- Byrdwell, W. C. & Neff, W. E. (2004). Electrospray ionization MS of high M.W. TAG oligomers. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 81(1), 13–26. <https://doi.org/10.1007/s11746-004-0853-3>
- Chandran, J., Nayana, N., Roshini, N. & Nisha, P. (2017). Oxidative stability, thermal stability and acceptability of coconut oil flavored with essential oils from black pepper and ginger. *Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 144–152. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2446-y>
- Chen, J. Y., Zhang, H., Ma, J., Tuchiya, T. & Miao, Y. (2015). Determination of the Degree of Degradation of Frying Rapeseed Oil Using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy Combined with Partial Least-Squares Regression. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2015, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2015/185367>
- Chen, J., Zhao, Y., Wu, R., Yin, T., You, J., Hu, B., Jia, C., Rong, J., Liu, R., Zhang, B. & Zhao, S. (2023). Changes in the Quality of High-Oleic Sunflower Oil during the Frying of Shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/foods12061332>
- Chen, L., McClements, D. J., Yang, T., Ma, Y., Ren, F., Tian, Y. & Jin, Z. (2021). Effect of annealing and heat-moisture pretreatments on the oil absorption of normal maize starch during frying. *Food Chemistry*, 353, 129468. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129468>
- Chiang, K.-M., Xiu, L., Peng, C.-Y., Lung, S.-C. C., Chen, Y.-C. & Pan, W.-H. (2022). Particulate matters, aldehydes, and polycyclic aromatic hydrocarbons produced from deep-frying emissions: comparisons of three cooking oils with distinct fatty acid profiles. *Npj Science of Food*, 6(1), 28. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00143-5>
- Choe, E. & Min, D. B. (2007). Chemistry of Deep-Fat Frying Oils. *Journal of Food Science*, 72(5). <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>
- Dangal, A., Tahergorabi, R., Acharya, D. R., Timsina, P., Rai, K., Dahal, S., Acharya, P. & Giuffrè, A. M. (2024). Review on deep-fat fried foods: physical and chemical attributes, and consequences of high consumption. *European Food Research and Technology*, 250(6), 1537–1550. <https://doi.org/10.1007/s00217-024-04482-3>
- Dayrit, F. M. (2015). The Properties of Lauric Acid and Their Significance in Coconut Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 92(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2562-7>
- de Batlle, J., Sauleda, J., Balcells, E., Gómez, F. P., Méndez, M., Rodríguez, E., Barreiro, E., Ferrer, J. J., Romieu, I., Gea, J., Antó, J. M. & Garcia-Aymerich, J. (2012). Association between $\Omega 3$ and $\Omega 6$ fatty acid intakes and serum inflammatory markers in COPD. *The*

Journal of Nutritional Biochemistry, 23(7), 817–821.

<https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2011.04.005>

Devi, S., Zhang, M. & Mujumdar, A. S. (2021). Influence of ultrasound and microwave-assisted vacuum frying on quality parameters of fried product and the stability of frying oil. *Drying Technology*, 39(5), 655–668. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1702995>

Dobarganes, C. & Márquez-Ruiz, G. (2003). Oxidized fats in foods. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 6(2), 157–163. <https://doi.org/10.1097/00075197-200303000-00004>

Dobarganes, C. & Márquez-Ruiz, G. (2015). Possible adverse effects of frying with vegetable oils. *British Journal of Nutrition*, 113(S2), S49–S57. <https://doi.org/10.1017/S0007114514002347>

Dobarganes, M. C. (2009). *Formation of New Compounds during Frying - General Observations*. <https://doi.org/10.21748/LipidLibrary.39209>

Dos Santos, C. M. A. & Pereira, R. G. (2024). Sunflower oil obtained by a new device and extraction system using hydrostatic pressing. *Grasas y Aceites*, 75(4), 2244. <https://doi.org/10.3989/gya.1200232.2244>

El Hosry, L., Elias, V., Chamoun, V., Halawi, M., Cayot, P., Nehme, A. & Bou-Maroun, E. (2025). Maillard Reaction: Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages, and Food Industrial Applications: A Review. *Foods*, 14(11), 1881. <https://doi.org/10.3390/foods14111881>

Erickson, M. D. . (2007). *Deep frying : chemistry, nutrition, and practical applications*. AOCS Press.

Fadda, A., Sanna, D., Sakar, E. H., Gharby, S., Mulas, M., Medda, S., Yesilcubuk, N. S., Karaca, A. C., Gozukirmizi, C. K., Lucarini, M., Lombardi-Boccia, G., Diaconeasa, Z. & Durazzo, A. (2022). Innovative and Sustainable Technologies to Enhance the Oxidative Stability of Vegetable Oils. *Sustainability*, 14(2), 849. <https://doi.org/10.3390/su14020849>

Franco, R. (2018). Sunflower Oil Functional Properties for Specialty Food. *Nutrition & Food Science International Journal*, 5(4). <https://doi.org/10.19080/NFSIJ.2018.05.555668>

Ghasemian, S., Rezaei, K., Abedini, R., Poorazarang, H. & Ghaziani, F. (2014). Investigation of different parameters on acrylamide production in the fried beef burger using Taguchi experimental design. *Journal of Food Science and Technology*, 51(3), 440–448. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0514-x>

Gonçalves, C., Fernandes, D., Silva, I. & Mateus, V. (2022). Potential Anti-Inflammatory Effect of *Rosmarinus officinalis* in Preclinical In Vivo Models of Inflammation. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(3). <https://doi.org/10.3390/molecules27030609>

- Grootveld, M. (2022). Evidence-Based Challenges to the Continued Recommendation and Use of Peroxidatively-Susceptible Polyunsaturated Fatty Acid-Rich Culinary Oils for High-Temperature Frying Practises: Experimental Revelations Focused on Toxic Aldehydic Lipid Oxidation Products. *Frontiers in Nutrition*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.711640>
- Harlina, P. W., Ma, M., Shahzad, R. & Khalifa, I. (2022). Effect of Rosemary Extract on Lipid Oxidation, Fatty Acid Composition, Antioxidant Capacity, and Volatile Compounds of Salted Duck Eggs. *Food Science of Animal Resources*, 42(4), 689–711. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2022.e30>
- Hassani, F. V., Shirani, K. & Hosseinzadeh, H. (2016). Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) as a potential therapeutic plant in metabolic syndrome: a review. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 389(9), 931–949. <https://doi.org/10.1007/s00210-016-1256-0>
- Hegab, Z., Mohamed, T. M. A., Stafford, N., Mamas, M., Cartwright, E. J. & Oceandy, D. (2017). Advanced glycation end products reduce the calcium transient in cardiomyocytes by increasing production of reactive oxygen species and nitric oxide. *FEBS Open Bio*, 7(11), 1672–1685. <https://doi.org/10.1002/2211-5463.12284>
- Holgado, F., Ruiz-Méndez, M. V., Velasco, J. & Márquez-Ruiz, G. (2021). Performance of Olive-Pomace Oils in Discontinuous and Continuous Frying. Comparative Behavior with Sunflower Oils and High-Oleic Sunflower Oils. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/foods10123081>
- Huang, W.-W., Hong, B.-H., Sun, J.-P., Tan, R., Bai, K.-K., Yang, T., Wu, H. & Yi, R.-Z. (2019). Comparing the simultaneous determination of cis- and trans-palmitoleic acid in fish oil using HPLC and GC. *Lipids in Health and Disease*, 18(1), 86. <https://doi.org/10.1186/s12944-019-1033-4>
- Iranloye, B., Oludare, G. & Olubiyi, M. (2013). Anti-diabetic and antioxidant effects of virgin coconut oil in alloxan induced diabetic male Sprague Dawley rats. *Journal of Diabetes Mellitus*, 03(04), 221–226. <https://doi.org/10.4236/jdm.2013.34034>
- IUPAC. (2014). Density. In *The IUPAC Compendium of Chemical Terminology*. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). <https://doi.org/10.1351/goldbook.D01590>
- Jiang, K., Huang, C., Liu, F., Zheng, J., Ou, J., Zhao, D. & Ou, S. (2022). Origin and Fate of Acrolein in Foods. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/foods11131976>
- Juby, A. G., Blackburn, T. E. & Mager, D. R. (2022). Use of medium chain triglyceride (MCT) oil in subjects with Alzheimer's disease: A randomized, double-blind, placebo-controlled,

- crossover study, with an open-label extension. *Alzheimer's & Dementia (New York, N. Y.)*, 8(1), e12259. <https://doi.org/10.1002/trc2.12259>
- Kamal-Eldin, A. & Appelqvist, L. (1996). The chemistry and antioxidant properties of tocopherols and tocotrienols. *Lipids*, 31(7), 671–701. <https://doi.org/10.1007/BF02522884>
- Kandiyil, S. P., Jose, A., Mohanan, C., Illam, S. P. & Raghavamenon, A. C. (2024). Virgin coconut oil mitigates ageing-associated oxidative stress and dyslipidaemia in male Wistar rats. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 34(12), 2834–2841. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2024.08.012>
- Kariminejad, M., Naimabadi, A., Morshedi, A., Mohammadi-Moghaddam, T., Shokuhi, A. & Bordbar, M. (2023). Oxidative stability of sunflower and soybean oils enriched with black plum peel extract in comparison with synthetic antioxidants. *PLOS ONE*, 18(1), e0279735. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279735>
- Kataria, D. & Singh, G. (2024). Health benefits of ghee: Review of Ayurveda and modern science perspectives. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*, 15(1), 100819. <https://doi.org/10.1016/j.jaim.2023.100819>
- Kemény, Z., Recseg, K., Hénon, G., Kővári, K. & Zwobada, F. (2001). Deodorization of vegetable oils: Prediction of *trans* polyunsaturated fatty acid content. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 78(9), 973–979. <https://doi.org/10.1007/s11746-001-0374-0>
- Khalid, M., Petroianu, G. & Adem, A. (2022). Advanced Glycation End Products and Diabetes Mellitus: Mechanisms and Perspectives. *Biomolecules*, 12(4), 542. <https://doi.org/10.3390/biom12040542>
- Khor, Y. P., Hew, K. S., Abas, F., Lai, O. M., Cheong, L. Z., Nehdi, I. A., Sbihi, H. M., Gewik, M. M. & Tan, C. P. (2019). Oxidation and Polymerization of Triacylglycerols: In-Depth Investigations towards the Impact of Heating Profiles. *Foods (Basel, Switzerland)*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/foods8100475>
- Kim, H. K., Kang, E. Y. & Go, G.-W. (2022). Recent insights into dietary ω -6 fatty acid health implications using a systematic review. *Food Science and Biotechnology*, 31(11), 1365–1376. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01152-6>
- Li, X., Bremer, G. C., Connell, K. N., Ngai, C., Pham, Q. A. T., Wang, S., Flynn, M., Ravetti, L., Guillaume, C., Wang, Y. & Wang, S. C. (2016). Changes in Chemical Compositions of Olive Oil under Different Heating Temperatures Similar to Home Cooking. *Journal of Food Chemistry and Nutrition*, 4(1), 07–15. <https://doi.org/10.33687/jfcn.004.01.1532>
- Lin, X. & Li, Z. (2024). Key components and multiple health functions of avocado oil: A review. *Journal of Functional Foods*, 122, 106494. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2024.106494>

- Liu, F., Xie, Y., Geng, X., Li, Z., Wang, Y., Liu, Z. & Cai, Q. (2025). The development and application of compound formulation of natural antioxidants in *Idesia polycarpa maxim.* *Oil. Helijon*, 11(1), e41648. <https://doi.org/10.1016/j.helijon.2025.e41648>
- Liu, W., Hong, F., Sun, S., Liu, Y., Deng, H., Liu, C. & Zheng, L. (2024). Rapid detection of peanut oil oxidation by data fusion strategy based on SERS and electronic nose technology. *Journal of Food Composition and Analysis*, 125, 105845. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2023.105845>
- Loussouarn, M., Krieger-Liszkay, A., Svilar, L., Bily, A., Birtić, S. & Havaux, M. (2017). Carnosic Acid and Carnosol, Two Major Antioxidants of Rosemary, Act through Different Mechanisms. *Plant Physiology*, 175(3), 1381–1394. <https://doi.org/10.1104/pp.17.01183>
- Madle, S., Broschinski, L., Mosbach-Schulz, O., Schöning, G. & Schulte, A. (2003). Zur aktuellen Risikobewertung von Acrylamid in Lebensmitteln. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 46(5), 405–415. <https://doi.org/10.1007/s00103-003-0610-9>
- Marina, A. M., Che Man, Y. B., Nazimah, S. A. H. & Amin, I. (2009). Chemical Properties of Virgin Coconut Oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 86(4), 301–307. <https://doi.org/10.1007/s11746-009-1351-1>
- Mishra, S., Firdaus, M. A., Patel, M. & Pandey, G. (2023). A study on the effect of repeated heating on the physicochemical and antioxidant properties of cooking oils used by fried food vendors of Lucknow city. *Discover Food*, 3(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s44187-023-00046-8>
- MOUFAKKIR, C., KHARBACH, Y., TANGHORT, M., DASSOULI, A. & REMMAL, A. (2022). Antioxidant effect of natural rosemary on the oxidation of mid-oleic sunflower frying oil on chicken wings. *Food Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.70122>
- Moufakkir, C., Kharbach, Y., Tanghort, M., Dassouli, A. & Remmal, A. (2023). Preserving Soybean Oil for the Frying of Breaded Butterfly Shrimp Using Natural Rosemary Antioxidant. *International Journal of Food Science*, 2023, 5984636. <https://doi.org/10.1155/2023/5984636>
- Muttucumaru, N., Powers, S. J., Elmore, J. S., Mottram, D. S. & Halford, N. G. (2013). Effects of Nitrogen and Sulfur Fertilization on Free Amino Acids, Sugars, and Acrylamide-Forming Potential in Potato. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(27), 6734–6742. <https://doi.org/10.1021/jf401570x>

- Nagy, K., Iacob, B.-C., Bodoki, E. & Oprean, R. (2024). Investigating the Thermal Stability of Omega Fatty Acid-Enriched Vegetable Oils. *Foods (Basel, Switzerland)*, 13(18).
<https://doi.org/10.3390/foods13182961>
- Ng, Y. J., Tham, P. E., Khoo, K. S., Cheng, C. K., Chew, K. W. & Show, P. L. (2021). A comprehensive review on the techniques for coconut oil extraction and its application. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 44(9), 1807–1818. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02577-9>
- Nieto, G., Ros, G. & Castillo, J. (2018). Antioxidant and Antimicrobial Properties of Rosemary (*Rosmarinus officinalis*, L.): A Review. *Medicines (Basel, Switzerland)*, 5(3).
<https://doi.org/10.3390/medicines5030098>
- Nitbani, F. O., Tjitda, P. J. P., Nitti, F., Jumina, J. & Detha, A. I. R. (2022). Antimicrobial Properties of Lauric Acid and Monolaurin in Virgin Coconut Oil: A Review. *ChemBioEng Reviews*, 9(5), 442–461. <https://doi.org/10.1002/cben.202100050>
- Onacik-Gür, S., Ptaszniak, S., Żbikowska, A. & Marciniak-Łukasiak, K. (2024). The effect of frying time and the addition of rice bran wax to high-oleic sunflower oil (HOSO) on selected quality parameters of potato starch crackers and frying medium. *Food Biotechnology and Agricultural Science*, 78, 13–18. <https://doi.org/10.70734/fbas/190277>
- Pal, U. S., Patra, R. K., Sahoo, N. R., Bakhara, C. K. & Panda, M. K. (2015). Effect of refining on quality and composition of sunflower oil. *Journal of Food Science and Technology*, 52(7), 4613–4618. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1461-0>
- Patil, A. C., Mugilvannan, A. K., Liang, J., Jiang, Y.-R. & Elejalde, U. (2023). Machine learning-based predictive analysis of total polar compounds (TPC) content in frying oils: A comprehensive electrochemical study of 6 types of frying oils with various frying timepoints. *Food Chemistry*, 419, 136053. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136053>
- Pérez-Burillo, S., Rufián-Henares, J. Á. & Pastoriza, S. (2019). Effect of home cooking on the antioxidant capacity of vegetables: Relationship with Maillard reaction indicators. *Food Research International*, 121, 514–523. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.007>
- Prarthana, J., Nischitha, N., Shraddha, S. & Ramu, R. (2024). Effect of repeated heating on Chemical Properties of selected edible plant oil and its Health Hazards. *International Journal of Health and Allied Sciences*, 12(3). <https://doi.org/10.55691/2278-344X.1081>
- Ramroudi, F., Yasini Ardakani, S. A., Dehghani-Tafti, A. & Khalili Sadrabad, E. (2022). Investigation of the Physicochemical Properties of Vegetable Oils Blended with Sesame Oil and Their Oxidative Stability during Frying. *International Journal of Food Science*, 2022, 3165512. <https://doi.org/10.1155/2022/3165512>

- Ravi Kiran, C., Sasidharan, I., Soban Kumar, D. R. & Sundaresan, A. (2015). Influence of natural and synthetic antioxidants on the degradation of Soybean oil at frying temperature. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 5370–5375. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1774-7>
- Reddy, V. P. & Beyaz, A. (2006). Inhibitors of the Maillard reaction and AGE breakers as therapeutics for multiple diseases. *Drug Discovery Today*, 11(13–14), 646–654. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2006.05.016>
- Ribeiro-Santos, R., Carvalho-Costa, D., Cavaleiro, C., Costa, H. S., Albuquerque, T. G., Castilho, M. C., Ramos, F., Melo, N. R. & Sanches-Silva, A. (2015). A novel insight on an ancient aromatic plant: The rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *Trends in Food Science & Technology*, 45(2), 355–368. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.015>
- Romano, R., Filosa, G., Pizzolongo, F., Durazzo, A., Lucarini, M., Severino, P., Souto, E. B. & Santini, A. (2021). Oxidative stability of high oleic sunflower oil during deep-frying process of purple potato Purple Majesty. *Heliyon*, 7(3), e06294. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06294>
- Rufián-Henares, J. Á., Guerra-Hernández, E. & García-Villanova, B. (2013). Effect of red sweet pepper dehydration conditions on Maillard reaction, ascorbic acid and antioxidant activity. *Journal of Food Engineering*, 118(1), 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.03.034>
- Ruiz-Méndez, M.-V., Velasco, J., Lastrucci, A. S. & Márquez-Ruiz, G. (2024). Lipid Quality Changes in French Fries, Chicken Croquettes, and Chicken Nuggets Fried with High-Linoleic and High-Oleic Sunflower Oils in Domestic Deep Fryers. *Foods*, 13(15), 2419. <https://doi.org/10.3390/foods13152419>
- Saguy, I. S. & Dana, D. (2003). Integrated approach to deep fat frying: engineering, nutrition, health and consumer aspects. *Journal of Food Engineering*, 56(2–3), 143–152. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00243-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00243-1)
- Sandupama, P., Munasinghe, D. & Jayasinghe, M. (2022). Coconut oil as a therapeutic treatment for alzheimer's disease: a review. *Journal of Future Foods*, 2(1), 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.03.016>
- Sasaki, K., Chiba, S. & Yoshizaki, F. (2014). Effect of natural flavonoids, stilbenes and caffeic acid oligomers on protein glycation. *Biomedical Reports*, 2(5), 628–632. <https://doi.org/10.3892/br.2014.304>
- Schwingshackl, L. & Schlesinger, S. (2023). Coconut Oil and Cardiovascular Disease Risk. *Current Atherosclerosis Reports*, 25(5), 231–236. <https://doi.org/10.1007/s11883-023-01098-y>

- Shahidi, F. & Zhong, Y. (2010). Lipid oxidation and improving the oxidative stability. *Chemical Society Reviews*, 39(11), 4067. <https://doi.org/10.1039/b922183m>
- Smit, I., Vosmann, K., Weber, L., Truberg, B., Muders, K., Bülbül, M. K., Demirel, U., Çalışkan, M. E. & Haase, N. U. (2025). Potential of near-infrared spectroscopy (NIRS) for prediction of acrylamide formation in French fries in the potato breeding process. *Food Chemistry*, 463, 141214. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141214>
- Song, X., Sui, X. & Jiang, L. (2023). Protection Function and Mechanism of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) Extract on the Thermal Oxidative Stability of Vegetable Oils. *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/foods12112177>
- Srivastava, Y. & Semwal, A. D. (2015). A study on monitoring of frying performance and oxidative stability of virgin coconut oil (VCO) during continuous/prolonged deep fat frying process using chemical and FTIR spectroscopy. *Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 984–991. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1078-8>
- Tian, J., Chen, J., Ye, X. & Chen, S. (2016). Health benefits of the potato affected by domestic cooking: A review. *Food Chemistry*, 202, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.120>
- Totani, N., Yawata, M. & Yasaki, N. (2018). Polydimethylsiloxane Shows Strong Protective Effects in Continuous Deep-Frying Operations. *Journal of Oleo Science*, 67(11), 1389–1395. <https://doi.org/10.5650/jos.ess18047>
- Udomkun, P., Niruntasuk, P. & Innawong, B. (2019). Impact of novel far-infrared frying technique on quality aspects of chicken nuggets and frying medium. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(5), e13931. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13931>
- Valgimigli, L. (2023). Lipid Peroxidation and Antioxidant Protection. *Biomolecules*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/biom13091291>
- Van Nguyen, C. (2006). Toxicity of the AGEs generated from the Maillard reaction: On the relationship of food-AGEs and biological-AGEs. *Molecular Nutrition & Food Research*, 50(12), 1140–1149. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600144>
- Vasko, V. O. & Kyrychenko, V. V. (2019). Induced Mutagenesis for the Creation of New Starting Material in Sunflower Breeding. *Helia*, 42(70), 17–36. <https://doi.org/10.1515/helia-2017-0024>
- Vieira, S. A., Zhang, G. & Decker, E. A. (2017). Biological Implications of Lipid Oxidation Products. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 94(3), 339–351. <https://doi.org/10.1007/s11746-017-2958-2>

- Villarino, B. J., Dy, L. M. & Lizada, Ma. C. C. (2007). Descriptive sensory evaluation of virgin coconut oil and refined, bleached and deodorized coconut oil. *LWT - Food Science and Technology*, 40(2), 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.11.007>
- Vistoli, G., De Maddis, D., Cipak, A., Zarkovic, N., Carini, M. & Aldini, G. (2013). Advanced glycoxidation and lipoxidation end products (AGEs and ALEs): an overview of their mechanisms of formation. *Free Radical Research*, 47(sup1), 3–27. <https://doi.org/10.3109/10715762.2013.815348>
- Voon, P. T., Ng, C. M., Ng, Y. T., Wong, Y. J., Yap, S. Y., Leong, S. L., Yong, X. S. & Lee, S. W. H. (2024). Health Effects of Various Edible Vegetable Oils: An Umbrella Review. *Advances in Nutrition*, 15(9), 100276. <https://doi.org/10.1016/j.advnut.2024.100276>
- Wall, R., Ross, R. P., Fitzgerald, G. F. & Stanton, C. (2010). Fatty acids from fish: the anti-inflammatory potential of long-chain omega-3 fatty acids. *Nutrition Reviews*, 68(5), 280–289. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2010.00287.x>
- Wang, Y., Wu, X., McClements, D. J., Chen, L., Miao, M. & Jin, Z. (2021). Effect of New Frying Technology on Starchy Food Quality. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/foods10081852>
- Wei, J., Liang, Q., Guo, Y., Zhang, W. & Wu, L. (2021). A Deep Insight in the Antioxidant Property of Carnosic Acid: From Computational Study to Experimental Analysis. *Foods (Basel, Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/foods10102279>
- Wong, R. L. & Amster, I. J. (2006). Sub part-per-million mass accuracy by using stepwise-external calibration in fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 17(12), 1681–1691. <https://doi.org/10.1016/j.jasms.2006.07.019>
- Xu, X., Liu, X., Zhang, J., Liang, L., Wen, C., Li, Y., Shen, M., Wu, Y., He, X., Liu, G. & Xu, X. (2023). Formation, migration, derivation, and generation mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons during frying. *Food Chemistry*, 425, 136485. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136485>
- Yan, D., Luo, X., Li, Y., Liu, W., Deng, J., Zheng, N., Gao, K., Huang, Q. & Liu, J. (2014). Effects of advanced glycation end products on calcium handling in cardiomyocytes. *Cardiology*, 129(2), 75–83. <https://doi.org/10.1159/000364779>
- Yang, Y., Song, X., Sui, X., Qi, B., Wang, Z., Li, Y. & Jiang, L. (2016). Rosemary extract can be used as a synthetic antioxidant to improve vegetable oil oxidative stability. *Industrial Crops and Products*, 80, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.044>

- Yildiz, A. Y., Echegaray, N., Öztekin, S. & Lorenzo, J. M. (2024). Quality and stability of frying oils and fried foods in ultrasound and microwave–assisted frying processes and hybrid technologies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(4). <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13405>
- Younes, M., Aggett, P., Aguilar, F., Crebelli, R., Dusemund, B., Filipič, M., Frutos, M. J., Galtier, P., Gott, D., Gundert-Remy, U., Kuhnle, G. G., Lambré, C., Lillegaard, I. T., Moldeus, P., Mortensen, A., Oskarsson, A., Stankovic, I., Waalkens-Berendsen, I., Woutersen, R. A., ... Leblanc, J. (2018). Refined exposure assessment of extracts of rosemary (E 392) from its use as food additive. *EFSA Journal*, 16(8). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5373>
- Youness, R. A., Dawoud, A., ElTahtawy, O. & Farag, M. A. (2022). Fat-soluble vitamins: updated review of their role and orchestration in human nutrition throughout life cycle with sex differences. *Nutrition & Metabolism*, 19(1), 60. <https://doi.org/10.1186/s12986-022-00696-y>
- Yu, K. S., Cho, H. & Hwang, K. T. (2018). Physicochemical properties and oxidative stability of frying oils during repeated frying of potato chips. *Food Science and Biotechnology*, 27(3), 651–659. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0292-y>
- Zhang, C., Guo, Y., Hou, T., Ning, Q., Han, W., Zhao, X., Cui, F. & Li, H. (2025). Formation of advanced glycation end products in glucose–amino acid models of Maillard reaction under dry– and wet–heating conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 105(4), 2342–2351. <https://doi.org/10.1002/jsfa.14004>
- Zhang, L., Yang, L., Luo, Y., Dong, L. & Chen, F. (2023). Acrylamide-Induced Hepatotoxicity Through Oxidative Stress: Mechanisms and Interventions. *Antioxidants & Redox Signaling*, 38(16–18), 1122–1137. <https://doi.org/10.1089/ars.2022.0055>
- Zhang, Q., Qin, W., Li, M., Shen, Q. & Saleh, A. S. M. (2015). Application of Chromatographic Techniques in the Detection and Identification of Constituents Formed during Food Frying: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(5), 601–633. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12147>
- Zhang, Q., Saleh, A. S. M., Chen, J. & Shen, Q. (2012). Chemical alterations taken place during deep-fat frying based on certain reaction products: a review. *Chemistry and Physics of Lipids*, 165(6), 662–681. <https://doi.org/10.1016/j.chemphyslip.2012.07.002>
- Zhao, L., Zhang, M., Wang, H. & Devahastin, S. (2021). Effects of carbon dots in combination with rosemary-inspired carnosic acid on oxidative stability of deep frying oils. *Food Control*, 125, 107968. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.107968>
- Ma. (2025, 3. September). Altspeiseöle und -fette – Mülltrennung. Deutsch. <https://www.wien.gv.at/umwelt/altoel-kostenlose-sammlung>

die NÖ Umweltverbände. (2025, 17. Februar). *Altspeiseöl und Fett-Sammlung - die NÖ Umweltverbände*. Die NÖ Umweltverbände. <https://umweltverbaende.at/informationen-zu-abfall/abfallarten/altspeiseoel-und-fett-sammlung-niederoesterreich-nachhaltig-entsorgen/>
Verband der Speiseöl- und Fettindustrie (2006): Frittierempfehlung. Wien:
Wirtschaftskammer Österreich. Online verfügbar unter
<https://www.wko.at/oe/industrie/nahrungs-genussmittelindustrie/frittierempfehlung.pdf>