

Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg
Fakultät Life Sciences

Untersuchung der Wasserverdampfung
beim Frittierprozess von Pommes frites
und Prüfung möglicher Ersatzmedien
für die Energieverbrauchsmessung nach
DIN 18873-3 an gewerblichen Fritteusen

Bachelorarbeit
im Studiengang Ökotrophologie

vorgelegt von

Annika Krüger

Matr.nummer: XXXXXXXXXX

Hamburg

am 16. August 2017

Gutachter: Prof. Dr. Jörg Andreä (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl.-oec.troph. Andreas Helm (HKI)

Diese Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit dem HKI
Industrieverband Haus-, Heiz-, und Küchentechnik e.V.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen.....	3
Abbildungsverzeichnis	4
Diagrammverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	4
Formelverzeichnis.....	6
1. Einleitung.....	7
2. Zielsetzung	9
3. Industrieverband für Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V.	10
4. Grundlagen.....	11
4.1. Die Kartoffel	11
4.2. Pommes frites.....	12
4.3. Die Fritteuse	14
4.4. Der Frittierprozess	15
4.5. Die DIN 18873-3.....	16
4.6. Energie	17
4.7. Energieverbrauch	18
4.8. Energieeffizienz	18
4.9. Wärmemenge	18
4.10. Aktueller Forschungsstand	19
4.11. Mögliche Ersatzmedien.....	19
5. Prüfmedien	21
5.1. Voraussetzung.....	21
5.2. Knödel-Pulver	21
5.3. Kartoffelpüree-Pulver	22
5.4. Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern.....	23
6. Vergleich der Eigenschaft der Prüfmedien mit Pommes frites.....	25
6.1. Masse	25
6.2. Oberfläche	28
6.3. Spezifische Wärmekapazität.....	29

6.4. Preis und Wiederverwendbarkeit	30
6.5. Zusammenfassung der Ergebnisse	30
7. Messung des Energieverbrauchs nach DIN 18873-3.....	32
8. Versuchsdurchführung	36
8.1. Verwendete Materialien	36
8.2. Versuch zur Ausgangsmenge	39
8.3. Versuch zum Vorheiz- und Warmhaltezyklus	41
8.4. Versuche zum Massenverlust.....	43
8.4.1. Versuchsdurchführung zum Massenverlust bei Pommes frites.....	43
8.4.2. Versuchsdurchführung zum Massenverlust bei Knödel-Pulver	45
8.4.3. Versuchsdurchführung zum Massenverlust bei Kartoffelpüree-Pulver	48
8.4.4. Versuchsdurchführung zum Massenverlust beim Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern.....	51
9. Darstellung der Ergebnisse im Vergleich	60
10. Alternative: Berechnung des Energieverbrauchs.....	66
11. Diskussion	70
Zusammenfassung	74
Abstract	75
Literaturverzeichnis	76
Eidesstaatliche Erklärung	78
Anhang	79

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
c	Spezifische Wärmekapazität
cm bzw. cm ²	Zentimeter bzw. Quadratzentimeter
DGF	Deutsche Gesellschaft für Fettwissenschaften
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EU	Europäische Union
FAO	Ernährungs- und Landwirtschaftsorga- nisation der Vereinten Nationen
FHN	Normenausschuss Heiz-, Koch- und Wärmgerät
HKI	Industrieverband für Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V.
J bzw. kJ	Joule bzw. Kilojoule
K	Kelvin
kcal	Kilokalorien
kg bzw. g bzw. mg	Kilogramm bzw. Gramm bzw. Milligramm
l bzw. ml	Liter bzw. Milliliter
min	Minute(n)
r	Radius
s	Sekunde(n)
V	Volt
W	Watt
Wh bzw. kWh	Wattstunde(n) bzw. Kilowattstunde(n)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer Elektrofritteuse.....	14
Abbildung 2: Verdeutlichung des Wärme- und Massentransfers beim Frittieren.....	16
Abbildung 3: Halterungsvorrichtung bestückt.....	24
Abbildung 4: Aufbau Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern und Fritteuse.....	24
Abbildung 5: Skizze Pommes frites.....	28
Abbildung 6: Skizze Reagenzglas.....	29
Abbildung 7: Knödel-Pulver-Kugeln nach dem Frittieren.....	48
Abbildung 8: Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln nach dem Frittieren.....	50
Abbildung 9: Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern.....	51
Abbildung 10: Mit Stahlwolle verschlossene Reagenzgläser.....	52
Abbildung 11: Skizze eines Reagenzglases umgewickelt mit einem Thermoelement.....	52
Abbildung 12: Reagenzgläser mit Drahtfixierung.....	53

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Energieverbrauch und Temperaturverlauf während der Messung des Vorheizzyklus nach DIN 18873-3:2016-12.....	42
Diagramm 2: Energieverbrauch und Temperaturverlauf während der Messung des Warmhaltezyklus über zwei Stunden nach DIN 18873-3:2016-12.....	43
Diagramm 3: Massenverlust während des Frittierens von Pommes frites in Abhängigkeit von der Zeit.....	45
Diagramm 4: Massenverlust während des Frittierens von Knödel-Pulver-Kugeln in Abhängigkeit von der Zeit.....	47
Diagramm 5: Massenverlust während des Frittierens von Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln in Abhängigkeit von der Zeit.....	50
Diagramm 6: Massenverlust während des Frittierens des Verdampferkonstruktes aus Reagenzgläsern in Abhängigkeit von der Zeit.....	55
Diagramm 7: Temperaturverlauf während des Frittierens des Verdampferkonstruktes in Abhängigkeit von der Zeit.....	56
Diagramm 8: Massenverlust während des Frittierens des Verdampferkonstruktes mit zusätzlicher Fixierung in Abhängigkeit von der Zeit.....	58
Diagramm 9: Temperaturverlauf während des Frittierens des Verdampferkonstruktes mit zusätzlicher Fixierung in Abhängigkeit von der Zeit.....	59
Diagramm 10: Gewichtsverlauf der einzelnen Prüfmedien in Abhängigkeit von der Zeit im Vergleich.....	62
Diagramm 11: Übersicht des Energieverbrauchs der einzelnen Prüfmedien während des Frittierens.....	63
Diagramm 12: Energieverbrauch der einzelnen Prüfmedien in Abhängigkeit von der Zeit im Vergleich.....	64

Diagramm 13: Temperaturverlauf und Leistung der einzelnen Prüfmedien in Abhängigkeit von der Zeit im Vergleich	65
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nährwertgehalt je 100 g verzehrbarem Anteil von Kartoffeln.....	12
Tabelle 2: Nährwertgehalt je 100 g gesalzenen, verzehrfertigen Pommes frites	13
Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Stoffkonstanten für die Berechnung des Energiebedarfs ...	26
Tabelle 4: Übersicht der Anteile der einzelnen Vorgänge beim Frittieren von Pommes frites am Gesamtenergiebedarf.....	26
Tabelle 5: Vergleich der unterschiedlichen Prüfmedien in Bezug auf 1 kg Pommes frites.....	30
Tabelle 6: Zu ermittelnde Daten während des Vorheizzyklus	33
Tabelle 7: Zu ermittelnde Daten während des Warmhaltezyklus über zwei Stunden.....	33
Tabelle 8: Zu ermittelnde Daten während des Frittierzyklus.....	35
Tabelle 9: Nährwertangaben pro 100 g Pommes frites der Marke „McCain“	36
Tabelle 10: Übersicht der verwendeten Roh- und Werkstoffe mit Herstellerangaben.....	37
Tabelle 11: Für die Versuche zur Gewichtsbestimmung und zur Erfassung des Massenverlustes verwendete Waage mit spezifischen Angaben	37
Tabelle 12: Übersicht der Messgrößen, welche nach DIN 18873-3:2011-05 zur Bestimmung des Energieverbrauchs erfasst werden, und Angabe der Messtechnik.....	38
Tabelle 13: Ergebnisse zur Ermittlung der Ausgangsmenge	40
Tabelle 14: Ergebnisse der Messungen für den Vorheiz- und Warmhaltezyklus nach DIN 18873-3:2016-12	42
Tabelle 15: Ergebnisse der Versuche zum Massenverlust von drei Chargen Pommes frites à 175 g	44
Tabelle 16: Ergebnisse der Versuche zum Massenverlust von drei Chargen Knödel-Pulver-Kugeln à 175 g.....	46
Tabelle 17: Ergebnisse der Versuche zum Massenverlust von drei Chargen Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln à 175 g	49
Tabelle 18: Ergebnisse der Versuchsreihe zum Massenverlust von drei Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern	54
Tabelle 19: Ergebnisse der Versuchsreihe zum Massenverlust von drei Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern und zusätzlicher Halterung	57
Tabelle 20: Übersicht der Versuchsergebnisse der einzelnen Prüfmedien im Vergleich	60
Tabelle 21: Theoretische Berechnung des benötigten Gesamtenergieverbrauchs zum Frittieren von Pommes frites nach DIN 18873-3:2016-12.....	67
Tabelle 22: Berechnete und gemessene Energieverbräuche zum Frittieren von Pommes frites im Vergleich.....	68

Formelverzeichnis

Formel 1: Wärmemenge in J	S.19
Formel 2: Wärmemenge zum Erwärmen der Trockenmasse, des Wassers und des Eis in kJ.....	S.26
Formel 3: Wärmemenge zum Schmelzen des Eis und zum Verdampfen des Wassers in kJ....	S. 26
Formel 4: Masse, die an Glas benötigt wird in g.....	S.27
Formel 5: Oberfläche Quader in cm^2	S.28
Formel 6: Oberfläche Kugel cm^2	S. 28
Formel 7: Oberfläche Reagenzglas cm^2	S.28
Formel 8: Theoretische Wärmemenge in kJ	S. 33
Formel 9: Energieeffizienz in % kWh.....	S.33
Formel 10: Energieverbrauch pro Stunde in kWh	S. 33
Formel 11: Energieverbrauch pro Kilogramm Frittieröl in kWh/kg.....	S. 33
Formel 12: Massendifferenz der Pommes frites in %.....	S. 34
Formel 13: Zeitspanne des kompletten Frittierzykluses in h	S. 34
Formel 14: Gesamtgewicht der tiefgekühlten Pommes frites in kg	S. 34
Formel 15: Produktionsmenge pro Stunde in kg/h.....	S. 34
Formel 16: Energieverbrauch pro Kilogramm tiefgekühlter Pommes frites in kWh/kg.....	S. 34
Formel 17: Gesamtenergieverbrauch in kWh.....	S. 35
Formel 18: Gesamtenergieverbrauch pro Kilogramm tiefgekühlter Pommes frites in kWh/kg.....	S. 35

1. Einleitung

Weltweit steigt die Nachfrage an Energie. Doch die Ressourcen der Erde sind begrenzt. Und auch erneuerbaren Energien, wie Solar-, Wind- oder Wasserenergie werden den weltweit weiter steigenden Bedarf nicht decken können. Energie ist in den vergangenen Jahren zu einem kostbaren Gut geworden und die Preise für Strom und Gas steigen immer weiter an. Ein Fakt, den nicht nur private Haushalte, sondern auch die Industrie zu spüren bekommt. Abhilfe können hier energieeffiziente Geräte schaffen. Durch die Anschaffung solcher Geräte kann unter anderem der expandierende Sektor der Außer-Haus-Verpflegung profitieren. Ca. 40-60% der genutzten Energie einer Großküche wird für das Garen von Speisen benötigt (Braun, et al., 2005, S. 20). Durch die Nutzung energieeffizienter Geräte mit einem hohen Wirkungsgrad lässt sich Energie und Geld sparen. Mit der Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) des Europäischen Parlaments und des Rates wurde im Jahr 2009 ein gesetzlicher Rahmen geschaffen, um Anforderungen an eine umweltgerechte Produktgestaltung zu definieren. Um einen einheitlichen Standard zu schaffen und die Geräte untereinander vergleichbar zu machen, bedarf es Normen und standardisierter Verfahren.

Die DIN-Norm DIN 18873-3 „Methoden zur Bestimmung des Energieverbrauchs von Großküchengeräten - Teil 3: Fritteusen“ verkörpert ein solches standardisiertes Verfahren. Sie beschreibt die Anforderungen für die Ermittlung des Energieverbrauchs von gewerblichen Fritteusen. Die Versuchsdurchführung wird mit dem Frittiergut Pommes frites realisiert. Die Pommes frites als Prüfmedium ist aus zwei Gründen nicht geeignet. Es ist fraglich, inwiefern es nachhaltig und akzeptabel ist, ein Lebensmittel für einen Versuch zu gebrauchen, welches mit hoher Wahrscheinlichkeit anschließend nicht verzehrt, sondern weggeworfen wird. Der Begriff „Food Waste“ beschreibt das Wegwerfen von Lebensmitteln, die eigentlich noch zum Verzehr geeignet sind. Jährlich gehen laut der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) 1/3 der Lebensmittel global verloren oder werden weggeworfen (BLW.ch, 2016). Dabei hungern 795 Millionen Menschen weltweit (FAO.org, 2015). Unter anderem aus diesen Gründen sollen laut Europäischer Union (EU), die für die Messung des Energieverbrauchs verwendeten Lebensmitteln in sämtlichen Normen durch neutrale Prüfmedien ersetzt werden. Der

Rohstoffe Kartoffel, aus dem Pommes frites hergestellt werden, unterliegt saisonalen und Anbau bezogenen Schwankungen. Diese schlagen sich in der Zusammensetzung nieder und beeinflussen somit die Ergebnisse der Messungen.

Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich mit der Suche nach einem geeigneten Ersatzmedium für die Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 auf Grundlage der Wasserverdampfung und des zeitlichen Verlaufs des Massenverlustes. In Kapitel 2 werden die Ziele dieser Abschlussarbeit definiert. In Teil 3 und 4 werden die Grundlagen, die zum Verständnis notwendig sind, erläutert. Die unterschiedlichen Prüfmedien sowie erforderliche Voraussetzungen werden in Kapitel 5 und 6 näher untersucht. In Kapitel 7 wird die DIN 18873-3 vorgestellt, bevor in Teil 8 die praktische Versuchsdurchführung dargelegt wird. Ein Vergleich der gewonnenen Erkenntnisse findet in Kapitel 9 statt. Die Alternative, den Energieverbrauch zu berechnen, wird in Abschnitt 10 genauer untersucht, bevor in Kapitel 11 ein Fazit mit einer vorabstattfinden Diskussion gezogen wird.

2. Zielsetzung

Nachdem sich in einer Bachelorarbeit (Laure Glonner, 2014) sowie in einer Masterarbeit (Stefanie König, 2015) intensiv mit der Suche nach einem geeigneten Ersatzmedium, welches als Substitution der Pommes frites bei der Energieverbrauchsmessung gemäß nach DIN 18873-3 dienen soll, beschäftigt wurde, ohne eine optimale Lösung hervorzubringen, ist es Ziel dieser Bachelorarbeit insbesondere aufgrund des Massenverlustes, der beim Frittieren stattfindet, ein Ersatzmedium zu ermitteln. Dazu wird erstmalig der zeitliche Verlauf des Massenverlustes untersucht und in den Mittelpunkt gestellt. Diesbezüglich wird sowohl das aktuell in der Norm verwendete Frittiergut Pommes frites als auch die zu prüfenden Ersatzmedien hinsichtlich ihrer theoretischen Eignung, ihres Frittierverhaltens und speziell bezüglich ihres Massenverlustes untersucht.

3. Industrieverband für Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V.

1949 wurde der Industrieverband für Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. (HKI) gegründet. Er vertritt die Interessen der Hersteller von Großkücheneinrichtungen sowie auch jene von häuslichen Heiz- und Kochgeräten. Beide Herstellergruppen sind in getrennten Fachverbänden organisiert, die in gerätespezifische Fachabteilungen unterteilt sind. Als Non-Profit-Dienstleistungsunternehmen versteht sich der Verband nicht nur als Ansprechpartner für seine Mitglieder, sondern auch als Interessenvertretung der gesamten Branche. Der HKI hat sich dem freien und fairen Wettbewerb verschrieben und setzt sich für Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz ein. Unter www.grosskuechen.cert.hki-online.de hat der Verband in Kooperation mit seinen Mitgliedern die zentrale Informationsplattform HKI CERT Großküchentechnik Datenbank eingerichtet. Dort können Hersteller von Großküchengeräten ihre energieverbrauchsrelevanten Daten freiwillig eintragen. Kunden können sich so einen schnellen Überblick über die verschiedenen Anbieter und den Energieverbrauch unterschiedlicher Ausstattungen verschaffen. Die bereitgestellten Daten werden anhand geltender DIN-Normen erhoben, an deren Erstellung der Verband maßgeblich beteiligt ist. Der HKI arbeitet eng mit dem Deutschen Institut für Normung (DIN) zusammen. Seit mehr als dreißig Jahren besteht zwischen dem HKI und dem DIN eine Vereinbarung über den Normenausschuss Heiz-, Koch- und Wärmgerät, dem FHN. Der HKI ist finanzieller Träger der Kosten des FHN. Der FHN beschäftigt sich sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene mit der Erstellung von Normen für Heiz-, Koch- und Wärmegeräte. Diese dienen mit ihren Anforderungen vor allem dem Umweltschutz, der Energieeinsparung, der Sicherheit und der Vergleichbarkeit der Produkte (HKI-online.de, o.J.).

4. Grundlagen

Im Folgenden werden Grundlagen, die für den Zusammenhang der Abschlussarbeit und das Verständnis von Bedeutung sind, erklärt.

4.1. Die Kartoffel

Ursprünglich stammt die Kartoffel aus Südamerika. Wann und durch wen sie genau nach Europa kam ist bis heute noch nicht wissenschaftlich erwiesen. Fest steht jedoch, dass die Kartoffel gegen Ende des 18. Jahrhunderts ein Volksnahrungsmittel wurde. Damals erzwang Friedrich II. von Preußen den Anbau in Schlesien, Pommern und dem Odergebiet, um die steigenden Hungersnöte zu lindern und für die Zukunft zu vermeiden. Botanisch gesehen zählt die Kartoffel zu den Gemüsen und gehört der Gattung der Nachtschattengewächse an. Sie wird nicht nur als Nahrungsmittel angepflanzt, sondern wird unter anderem auch zur Gewinnung von Alkohol und Stärke genutzt. Die Stärkeerzeugnisse fungieren als Emulgier-, Trenn-, Trieb- und Backmittel oder Verzuckerungsprodukte. Durch ihre Zusammensetzung gilt die Kartoffel als ein ernährungsphysiologisch hochwertiges Nahrungsmittel. Sie versorgt den Organismus mit lebensnotwendigen Nährstoffen und ist dabei energiearm (Zirwes, 1987, S. 14 ff.).

Die Inhaltsstoffe der Kartoffel schwanken je nach Sorte, Art des Bodens, Anbau- und Düngemethoden sowie Reifegrad bei der Ernte und Lagerungsbedingungen. Grundsätzlich lässt sich jedoch sagen, dass die Kartoffel sich in etwa zu 2/3 aus Wasser und 1/3 aus Trockensubstanz zusammensetzt. Die Trockensubstanz besteht hauptsächlich aus Stärke. Der Nichtstärkeanteil, wie Zellwandmaterial, Mineralstoffe, Proteine usw., ist zwar nicht konstant, jedoch wenig veränderlich, sodass eine Schwankung im Anteil der Trockensubstanz durch Schwankungen im Stärkegehalt zustande kommt (Adler, 1971, S. 24 f.). Eine genauere Auflistung der Bestandteile einer Kartoffel je 100 g verzehrbarem Anteil liefert Tabelle 1. Die Kartoffel ist unter anderem wegen ihrer vielfältigen Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung beliebt. Aus ihr werden Pürees, Kartoffelpuffer, Kroketten, Chips, Knödel oder Pommes frites hergestellt.

Inhaltsstoff	Menge	Inhaltsstoff	Menge
Energie	68 kcal	Phosphor	50 mg
Eiweiß	2 g	Magnesium	20 mg
Fett	0,1 g	Eisen	0,4 mg
Kohlenhydrate	14,8 g	Vitamin A	1 µg
Ballaststoffe	2,1 g	Vitamin E	0,05 mg
Wasser	77,8 g	Vitamin B1	0,1 mg
Cholesterin	0 mg	Vitamin B2	0,05 mg
Natrium	3 mg	Niacin	1,2 mg
Kalium	411 mg	Vitamin B6	0,3 mg
Calcium	6 mg	Vitamin C	17 mg

Tabelle 1: Nährwertgehalt je 100 g verzehrbarem Anteil von Kartoffeln | Quelle: Elmadfa et al., 2016, S. 21 f.

4.2. Pommes frites

Als Pommes frites werden in heißem Fett oder Öl gebackene Kartoffelstreifen von etwa 1 cm Durchmesser und 6 bis 7 cm Länge bezeichnet. Seit 1945 werden Pommes frites überwiegend industriell hergestellt. Vorreiterland war die USA. Es wird zwischen drei Arten industriell vorgefertigter Pommes frites unterschieden:

- tiefgefrorene, fertig gebackene Pommes frites, die in der Bratpfanne oder im Backofen zubereitet werden
- tiefgefrorene, vorgebackene Pommes frites, die in der Fritteuse in heißem Fett fertig gebacken werden
- gekühlte, vorgebackene Pommes frites, die in der Fritteuse in heißem Fett fertig gebacken werden und eine kürzere Haltbarkeit haben als die an zweiter Stelle genannten

Für die Herstellung werden Kartoffeln ab einer Länge von 5 cm verwendet. Diese werden mittels Dampf oder Lauge geschält, anschließend in Waschtrommeln gewaschen und auf Verlesebändern nachgeputzt. Durch Schälen und Nachputzen entstehen Verluste von 15-40 %. Im nächsten Schritt erfolgt die Größensortierung. Kartoffeln unter einer Länge von 5 cm werden aussortiert und zu Nebenprodukten

verarbeitet. Die restlichen Kartoffeln werden in Vorratsbehältern unter Wasser aufbewahrt. Durch diese Art der Lagerung wird eine Verfärbung der Oberfläche verhindert. Nach und nach werden die Kartoffeln zu den Schneidemaschinen befördert. Zunächst werden sie auf eine rechteckige Form zugeschnitten, anschließend zu Streifen. Nach dem Schneiden werden zu kurze und/oder zu dünne Streifen durch Rüttelsiebe aussortiert. Bei der Herstellung werden 40-70 % der eingesetzten Kartoffel zur Pommes frites verarbeitet. Die fertigen Streifen werden durch Abbrausen von anhaftender Stärke befreit und gebraten. Um Produkte von gutem Aussehen und guter Konsistenz zu erhalten, bedarf es einer strengen Kontrolle des Bratprozesses. Die Fetttemperatur sollte je nach Kartoffelsorte zwischen 140-175 °C schwanken. Mit zunehmender Bratzeit steigt die Fettaufnahme der Stäbchen. Weitere Einflussfaktoren bezüglich der Fettaufnahme sind der Trockensubstanzgehalt sowie die Oberfläche der Stäbchen. Anschließend wird überschüssiges Fett durch Vibrationssiebe entfernt. Nun werden die Pommes frites gekühlt. Ausschlaggebend für die Qualität sind Farbe, Konsistenz, Knusprigkeit, Geschmack und Fettgehalt. Im Durchschnitt setzen sich tiefgefrorene Pommes frites wie folgt zusammen: 67 % Feuchtigkeit, 28 % fettfreie Trockensubstanz und 5 % Fett (Adler, 1971, S. 93 ff.). Eine genauere Auflistung der Zusammensetzung von gesalzenen, verzehrfertigen Pommes frites je 100 g verzehrbarem Anteil liefert Tabelle 2.

Inhaltsstoff	Menge	Inhaltsstoff	Menge
Energie	290 kcal	Phosphor	112 mg
Eiweiß	4,2 g	Magnesium	Keine Daten verfügbar
Fett	14,5 g	Eisen	1,9 mg
Kohlenhydrate	35,7 g	Vitamin A	1 µg
Ballaststoffe	4 g	Vitamin E	0,2 mg
Wasser	43,6 g	Vitamin B1	0,14 mg
Cholesterin	0 mg	Vitamin B2	0,09 mg
Natrium	6 mg	Niacin	2,5 mg
Kalium	926 mg	Vitamin B6	0,25 mg
Calcium	20 mg	Vitamin C	18 mg

Tabelle 2: Nährwertgehalt je 100 g gesalzenen, verzehrfertigen Pommes frites | Quelle: Elmadfa et al., 2016, S. 23 f.

4.3. Die Fritteuse

Fritteusen werden in der Großküche den Gar- und Wärmegeräten zugeordnet. Sie werden von verschiedenen Herstellern gebaut und verkauft. Üblich sind sowohl elektrische als auch gasbeheizte Fritteusen. Um die hohen Fetttemperaturen, die Sicherheit, einen reibungslosen Arbeitsablauf sowie eine hohe Qualität und guten Geschmack gewährleisten zu können, ist der Aufbau einer Fritteuse von entscheidender Bedeutung. Zum einen müssen die Geräte aus rostfreiem Edelstahl sein. Zum anderen sollten sie sich leicht reinigen und warten lassen. Ferner sollte eine gesicherte Auslaßöffnung für das Frittieröl vorhanden sein, die ein unbeabsichtigtes Betätigen verhindert. Um das Fett auf die gewünschte Temperatur zu bringen, muss die Heizeinrichtung gut steuerbar und mit einem Temperaturbegrenzer versehen sein. Unter anderem wird dadurch auch eine Überhitzung des Fettes ausgeschlossen. Im schlimmsten Fall kann eine Überhitzung zur Entzündung des Fettes und somit zu einem Fettbrandt führen (Gertz & Matthäus, 2012, S. 11). Es sind verschiedenen Baugrößen mit unterschiedlichen Fassungsvermögen auf dem Markt.

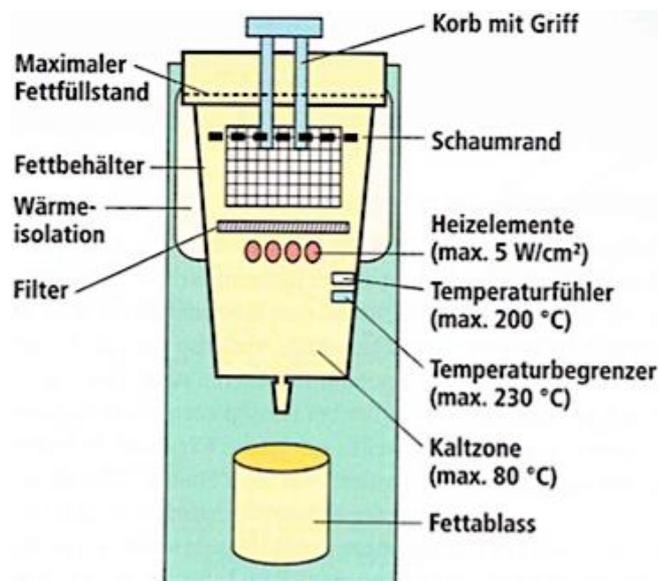


Abbildung 1: Aufbau einer Elektrofritteuse | Quelle: Braun et al., 2005, S.55

Bei der Anschaffung einer Fritteuse sind zwei Ausstattungsmerkmale von besonderer Bedeutung. Es sollte eine Kaltzone unter den Heizstäben vorhanden sein. Lose Bratgutreste können dort hinein absinken. Sie werden nicht weiter erhitzt, können nicht verkohlen und dem Frittiergut anhaften. Außerdem ist auf eine Sicherheitsabschaltung beim Herausschwenken der Heizstäbe zu achten (Braun et al., 2005, S. 55).

4.4. Der Frittierprozess

Frittieren ist ein Garprozess, bei dem wasserhaltige Lebensmittel vollständig in Öl oder Fett eingetaucht werden. Die Temperatur des Frittiermediums beträgt dabei zwischen 140-180 °C (Gertz & Matthäus, 2012, S. 5). Bei diesem Garverfahren findet in erster Linie ein Dehydratisierungsprozess statt. Dies bedeutet, dass Wasser und wasserlösliche Stoffe aus dem Frittiergut ins Frittiermedium abgegeben werden und gleichzeitig das Frittiergut Fett aufnimmt (testo AG, 2010, S.17 ff.). Wird das Frittiergut in das Frittiermedium gegeben, kommt es nach wenigen Sekunden zur Bildung einer dünnen Kruste. Die Struktur dieser Kruste ist für den weiteren Frittierprozess und die Qualität des Frittiermediums bezügliche Fettaufnahme und Knusprigkeit von entscheidender Bedeutung. Da Fette und Öle eine hohe Wärmekapazität haben, können sie Wärme bei Temperaturen weit über dem Siedepunkt von Wasser auf das Frittiergut übertragen. Dieser Vorgang wird als Wärmetransfer bezeichnet (Gertz & Matthäus, 2012, S. 5). Durch den Wärmetransfer kommt es zur Wasserverdampfung an der äußersten Schicht des Frittierguts, der sogenannten Randzone. Das Wasser im Kern des Frittierguts wird nach und nach an die Randzone geführt, um den dort entstandenen Wasserverlust auszugleichen (testo AG, 2010, S.17 ff.). Dieser Vorgang wird als Massentransfer bezeichnet (Gertz & Matthäus, 2012, S. 5). Zwischen Frittiermedium und Frittiergut bildet sich, bedingt durch die Verdampfung des Wassers in der Randzone, eine schützende Dampfschicht. Die Dampfschicht entsteht dadurch, dass das freie Wasser sich widersetzt, in das hydrophobe - wasserabweisende - Frittiermedium zu wandern. Sie erfüllt beim Frittierprozess zwei Funktionen. Zum einen verhindert sie, dass Fett in das Frittiergut eindringen kann, solange noch Wasser in diesem vorhanden ist. Zum anderen schützt sie das Frittiermedium vor An- und Verbrennen (testo AG, 2010, S.17 ff.). Abb. 2 verdeutlicht die Vorgänge bezüglich des Wärme- und Massentransfer während des Frittierens.

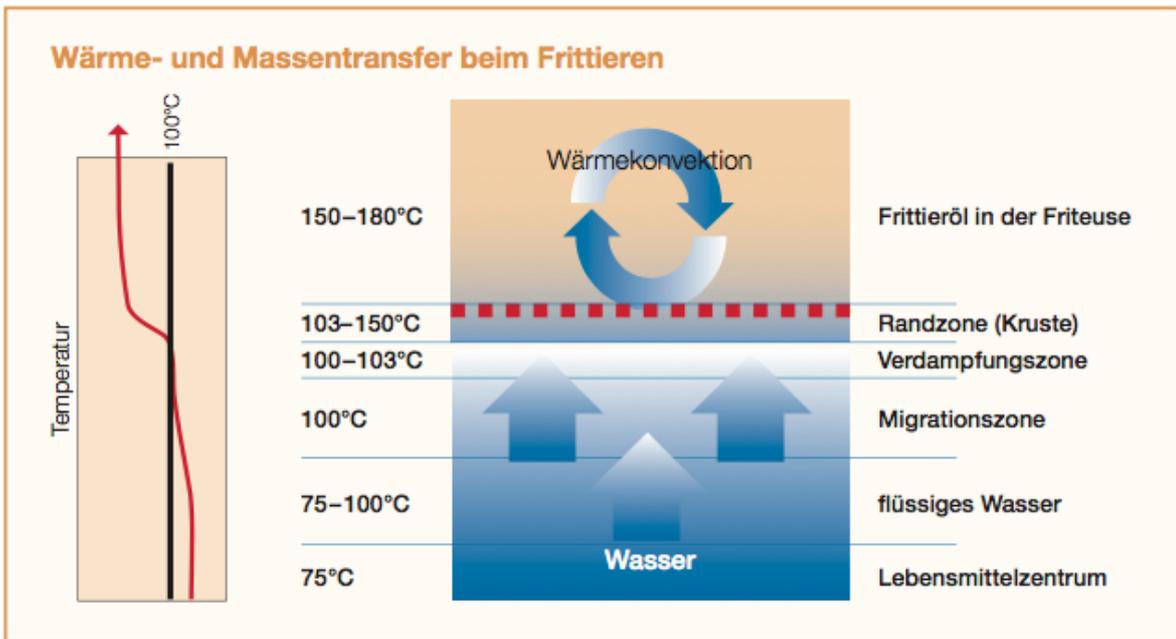


Abbildung 2: Verdeutlichung des Wärme- und Massentransfers beim Frittieren | Quelle: Gertz & Matthäus, 2012, S. 55

Das Frittiergut bildet, geschützt durch den Wasserdampf, eine Kruste aus. Diese Kruste enthält viele Poren und Hohlräume. Ist das Wasser fast vollständig verdampft, kann die Dampfschicht nicht mehr aufrechterhalten werden. Erst jetzt wird das Fett in die entstandenen Hohlräume und Poren gesaugt (testo AG, 2010, S.17 ff.). Die Temperatur steigt von außen nach innen auf weit über 100 °C an (Gertz & Matthäus, 2012, S. 5).

Durch die steigenden Temperaturen kommt es zur Maillard-Reaktion. Die Maillard-Reaktion beschreibt einen chemischen Prozess, bei dem die Eiweißbestandteile des Frittierguts mit den vorhandenen Zuckern im selbigen reagieren. Durch diesen Vorgang bekommt das Frittiergut eine Bräunung und erhält sein typisches Frittieraroma (testo AG, 2010, S.17 ff.).

4.5. Die DIN 18873-3

Bei der DIN 18873-3 handelt es sich um die nationale DIN-Norm „Methoden zur Bestimmung des Energieverbrauchs von Großküchengeräten - Teil 3: Fritteusen“. DIN-Normen werden vom DIN verfasst. Eine Norm legt Anforderungen an ein Produkt, eine Dienstleistung oder ein Verfahren fest. Sie hat zum Ziel Klarheit über die Eigenschaften von Produkten zu schaffen, erleichtert den freien Warenverkehr und unterstützt die Rationalisierung und die Qualitätssicherung in Wirtschaft, Technik,

Wissenschaft und Verwaltung. Zusätzlich dient sie der Sicherheit von Menschen (DIN e.V., o.J.).

Die Normenreihe 18873 „Methoden zu Bestimmung des Energieverbrauchs von Großküchengeräten“ besteht aus 20 Teilen. Sie beschreibt unter anderem Anforderungen an Methoden zur Bestimmung des Energieverbrauchs für Heißluftdämpfer, gewerbliche Heißgetränkbereiter, Kippbratpfannen sowie Standbratpfannen. Teil 3 beschäftigt sich mit Fritteusen. Sie berücksichtigt sowohl gas- als auch elektrisch betriebene Geräte.

Die Bestimmung des gesamten Energieverbrauchs von Fritteusen erfolgt durch mehrere Teilversuche. Dazu wird der Energieverbrauch des Frittiergerätes im Vorheizzyklus, im Warmhaltezyklus und Frittierzyklus bestimmt. Für jeden Teilversuch gibt die Norm Anweisungen zu Bedingungen während der Messung, zu ermittelnden Daten und zur Berechnung der Energieverbräuche vor. Nähere Erläuterung zur genauen Durchführung der Versuche und zu Bestimmung der Werte finden sich in Kapitel 7.

DIN-Normen werden spätestens alle fünf Jahre bezüglich ihrer Aktualität untersucht. Dabei wird der Inhalt geprüft und Fortschritte in der Technik berücksichtigt. Die aktuelle Norm für „Methoden zur Bestimmung des Energieverbrauchs von Großküchengeräten - Teil 3: Fritteusen“ ist die DIN 18873-3:2011-05 und stammt vom Mai 2011. Im Dezember 2016 wurde eine Revision der Norm durchgeführt. Die Revision ist als Entwurf online verfügbar als DIN 18873-3:2016-12. Der Entwurf steht der Öffentlichkeit im Normen-Entwurfs-Portal vom DIN unter www.din.de/de/mitwirken/entwuerfe zur Verfügung. Dort kann die Norm kommentiert werden, bevor Experten im Ausschuss über die Stellungnahmen beraten, sich über den Inhalt einigen und die Norm veröffentlicht wird (DIN e.V., o.J.).

Für die Versuchsdurchführung wird mit dem Entwurf DIN 18873-3:2016-12 gearbeitet.

4.6. Energie

Wenn von Energie im Zusammenhang mit Großküchengeräten gesprochen wird, ist im Allgemeinen von den Energieträgern Strom oder Gas die Rede. Die physikalische Definition fasst den Begriff der Energie enger. Stoffe und Systeme können Arbeit verrichten, wenn sie Energie beinhalten. Energie ist demnach die Fähigkeit,

Systeme arbeiten zu lassen. Arbeit und Energie hängen somit zusammen. Stoffe, die Energie enthalten, sind unter anderem Fett, Eiweiß, Erdöl oder Kunststoff. Die Einheit von Energie ist Joule (J) (Braun et al., 2005, S. 18).

4.7. Energieverbrauch

Für das Verständnis des Begriffes Energieverbrauch im physikalischen Sinne ist das Gesetz der Energieerhaltung von erheblicher Bedeutung. Es besagt, dass Energie weder erzeugt noch vernichtet werden kann (Grehn & Krause, 2009, S. 65). Der wörtliche Sinn und die umgangssprachliche Verwendung des Ausdrucks Energieverbrauch sind also nicht korrekt. Energie kann in unterschiedlichen Formen, wie zum Beispiel als potentielle, chemische oder kinetische Energie, vorliegen und in eine dieser Formen umgewandelt werden. Bei diesem Prozess wird Energie, die genutzt werden kann, frei. Der Energieverbrauch ist demnach der Betrag an Energie, der zum Verrichten von Arbeit genutzt werden kann.

4.8. Energieeffizienz

Energieeffizienz beschreibt das Verhältnis von Ertrag an Leistungen, Dienstleistungen, Waren oder Energie zur eingesetzten Energie (Art. 2 Nr. 4 RL 2012/27/EU). Sie charakterisiert kurzgefasst die optimale Nutzung der zur Verfügung stehenden Energie. Dabei werden die quantitativen und qualitativen Verluste, die bei der Wandlung, dem Transport und der Speicherung von Energie entstehen, durch optimierte Prozesse minimiert und so der Bedarf an Primär- bzw. Sekundärenergie gesenkt (Wesselak, 2013, S. 35).

4.9. Wärmemenge

Die Wärmemenge Q ist eine physikalische Größe, die in J angegeben wird. Sie beschreibt die Änderung der inneren Energie U , die von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedriger Temperatur fließt. Wird eine Wärmemenge Q auf ein System der Masse m übertragen und der Aggregatzustand ändert sich währenddessen nicht, erfolgt eine direkt proportionale Änderung der Temperatur $\Delta\vartheta$ in Kelvin (K).

Die Wärmemenge in Kilojoule (kJ) lässt sich mit Formel 1 berechnen.

$$(1) Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta$$

Die spezifische Wärmekapazität c in kJ/(kg·K) ist eine temperaturunabhängige, stoffspezifische Konstante. Sie gibt die Wärmemenge an, die gebraucht wird, um die Temperatur einer Masse von 1 kg um 1 K zu erhöhen (Demtröder, 2006, S. 266).

4.10. Aktueller Forschungsstand

Zu dem Thema der Arbeit ein Ersatzmedium zu ermitteln, das als Substitution von Lebensmitteln bei der Energieverbrauchsmessung gemäß nach DIN18873-3 dienen soll, wurden bereits eine Bachelorarbeit und eine Masterarbeit verfasst. Die Bachelorarbeit von Laura Glonner vom März 2014 beschäftigt sich mit der Verwendung von Filz als mögliches Ersatzmedium und der Entwicklung eines Verdampferkonstrukts. Filz ist zum einen teuer, zum anderen hat es als Frittiermedium zu großen Einfluss auf das Frittiergut und umgekehrt. Das Verdampferkonstrukt, eine Konstruktion aus Edelstahlrohren mit entsprechender Halterung, die das direkte Verdampfen von Wasser ermöglichen soll, stellte sich als vielversprechender Ersatz heraus. Jedoch muss die Konstruktion noch verbessert werden (Glonner, 2014, S. 97).

Frau Stefanie König befasst sich in ihrer Masterarbeit aus dem Jahr 2015 mit den Werkstoffen HIPOR, Porenbeton, Kalksandstein und Cordierit als mögliche Ersatzstoffe für Pommes frites. Kalkstein und Cordierit erwiesen sich als nicht geeignet, da diese zu wenig Wasser aufnehmen, welches im Vergleich zu Pommes frites beim Frittierprozess zu schnell entweicht. Porenbeton und HIPOR sind für den Ersatz als neutrales Prüfmedium grundsätzlich geeignet, jedoch nehmen beide Werkstoffe im Vergleich mit den Pommes frites mehr Fett auf. Zudem müssen die Steine klein geschnitten werden, dies führt zu einem erhöhten Zeitaufwand. Aus diesen Gründen wird die Verwendung dieser Werkstoffe als mögliche Ersatzmedien nicht weiterverfolgt (König, 2015, S. 100 f.).

4.11. Mögliche Ersatzmedien

Im Zuge dieser Bachelorarbeit werden verschiedene Medien aufgrund des zeitlichen Verlaufs ihres Massenverlustes auf die Tauglichkeit als Ersatzmedium für die

Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 für Fritteusen untersucht und beurteilt. Unter anderem wird die Verwendung von Knödel-Pulver und Kartoffelpüree-Pulver geprüft. Bei dem Rohstoff dieser Prüfmedien handelt es sich zwar um denselben Naturstoff aus dem Pommes frites hergestellt werden, jedoch kann durch die Pulverform der Wassergehalt immer exakt bestimmt werden. Auch wird die Idee eines Verdampferkonstrukts, welches das Wasser direkt als energieverbrauchsbestimmender Prozess verdampft, fortgeführt. Das von Frau Glonner entwickelte Konstrukt besteht aus Edelstahl. Dieser führt durch seine hohe Wärmeleitfähigkeit zu nicht optimal nutzbaren Ergebnissen. Ein Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern soll hier für Optimierung sorgen.

5. Prüfmedien

Im Folgenden wird auf die Voraussetzungen, die Herkunft, die Herstellung sowie die Eigenschaften der ausgewählten Prüfmedien eingegangen.

5.1. Voraussetzung

Um als Prüfmedium für die Messung des Energieverbrauches nach DIN 18873-3:2016-12 in Frage zu kommen, müssen die Materialien verschiedene Voraussetzungen erfüllen. Unter anderem zählt dazu eine Hitzebeständigkeit bis zu 180 °C, da laut Norm eine Öltemperatur von 175 ± 5 °C für den Startzeitpunkt des Frittierzykluses angesetzt ist. Neben der Hitzebeständigkeit ist die Gefrierfähigkeit ein weiterer zu berücksichtigender Faktor. Um die Gefrierfähigkeit zu testen, werden die unterschiedlichen Prüfmedien vor dem Frittieren auf -18 °C im Tiefkühlraum gefroren. Weitere wesentliche Prämissen sind der Anteil von Trockenmasse und Wassergehalt im Verhältnis von 1:2, die Größe und Beschaffenheit der Oberfläche, eine spezifische Wärmekapazität, die mit der von Pommes frites vergleichbar ist sowie eine mühelose und einfache Handhabung. Auf die genannten Punkte wird in Kapitel 6. näher eingegangen.

5.2. Knödel-Pulver

Knödel sind aus Kartoffeln hergestellte Lebensmittel. Durch ihre Beliebtheit gibt es eine Vielzahl industriell verarbeiteter Pulver, die mit Wasser angerührt, gekocht und verzehrt werden können. Als Ausgangsstoff für die industrielle Herstellung dient das Halbfabrikat Trockenspeisekartoffeln. Zur Gewinnung werden die Kartoffeln geschält, nachgeputzt, geschnitten, gewaschen und blanchiert. Anschließend erfolgt die Trocknung durch halbautomatische Hordentrockner oder Mehrbandtrockner. Nach dem Trocken liegt der Feuchtigkeitsgehalt der Trockenkartoffel bei 8 %. Durch die Bandbreite der Erzeugnisse an Knödel-Pulver, wie unter anderem von den Firmen Maggi, Pfanni oder Knorr, und somit auch an verschiedenen Rezepturen gibt es kein spezielles Herstellungsverfahren. Das Augenmerk liegt auf der Mischung der richtigen Komponenten, die sorgfältig vorgenommen werden muss. Sie ist ausschlaggebend für Eigenschaften wie Kaltquellung, Formbarkeit und Formhaltung beim Kochen. Zur industriellen Weiterverarbeitung werden die

Trockenspeisekartoffeln grob gemahlen und anschließend mit den Zutaten native Kartoffelstärke, Gewürze und Salz in einer Mischanlage vermengt. Je nach Rezeptur werden weitere Zutaten ergänzt. Für die Qualität der fertigen Knödel sind die Eigenschaften der Rohstoffe sowie das Mischungsverhältnis, wie auch der Vermahlungsgrad der Trockenspeisekartoffel ausschlaggebend (Adler, 1971, S.108 ff.).

Das für die Versuche verwendete Knödel-Pulver stammt von der Firma Pfanni. Es handelt sich um den Teig für Kartoffelknödel „halb & halb“. Nach Herstellerangaben ist er jeweils zur Hälfte aus blanchierten und gekochten Kartoffeln hergestellt. Laut Packungsanweisung wird das Pulver mit einem Schneebesen in 750 ml kaltes Wasser gerührt. Die entstandene Masse soll anschließend 10,00 min quellen. Danach soll der Teig mit den Händen zu 12 Knödeln geformt werden. In einer Packung sind 318 g Trockenmasse enthalten. Die Zutaten laut Zutatenliste der Packung mit dem Kaufdatum 18.04.2017 lauten wie folgt: 63% Kartoffeln, Stärke, Speisesalz, Aromen, Backtriebmittel, Natriumhydrogencarbonat, Zwiebelpulver, Palmöl, Stabilisator Ascorbinsäure, Curcuma.

5.3. Kartoffelpüree-Pulver

Im Gegensatz zum Knödel-Pulver, wird das Pulver für Kartoffelpüree aus gekochten und nicht aus blanchierten Kartoffeln hergestellt. Das Pulver muss somit nur mit heißem Wasser oder Milch aufgegossen werden, um tischfertig zu sein. Für die Herstellung von Kartoffelpüree-Pulver werden frische Kartoffeln verwendet, die geschält, nachgeputzt und geschnitten werden. Anschließend werden die Kartoffelscheiben bei 70-75 °C 20,00 min vorgekocht und weitere 20,00 min lang bei maximal 20 °C wieder abgekühlt, bevor sie endgültig gekocht werden. Diese Schritte sind für die Herstellung von Kartoffelpüree-Pulver wesentlich. So wird eine übermäßige Zerstörung der Kartoffelzellen verhindert. Werden die Zellen zu stark zerstört, tritt Stärkekleister aus ihnen aus. Erreichen die Kartoffeln beim Kochen Temperaturen von 50 °C, absorbieren die Stärkekörner das in den Zellen enthaltene Wasser. Bei Temperaturen von 60-70 °C beginnt diese Stärke zu verkleistern. Tritt das gebildete Stärkegel aus den Zellen aus, erhält der fertige Kartoffelpüree eine unerwünschte Klebrigkeit. Welche Veränderungen das Vorkochen auf das Kartoffelge-

webe im Einzelnen hat, ist wissenschaftlich noch nicht belegt. Es wird davon ausgegangen, dass sich die interzelluläre Kittsubstanz der Kartoffel so verändert, dass sich die Zellen leichter voneinander trennen lassen. Außerdem wird angenommen, dass die Stärke schonender verkleistert und die Zellen dadurch keinen Schaden nehmen.

Nach dem vollständigen Kochen mittels Dampf werden die Scheiben püriert. Die Kochzeit richtet sich nach dem Stärkegehalt der Kartoffel und liegt zwischen 20,00 und 40,00 min. Nach dem Pürieren werden der Masse Monoglyceride, Schwefeldioxid und Antioxidantien zugefügt, um Konsistenz und Haltbarkeit des Endproduktes zu verbessern. Die Masse wird in einer dünnen Schicht auf Einwalztrockner aufgetragen und getrocknet (Adler, 1971, S.112 ff.).

Das für die Versuche verwendete Kartoffelpüree-Pulver stammt von der Firma Maggi. Es handelt sich um Kartoffelpüree „Das Lockere“. Laut Packungsanweisung werden 375 ml Wasser mit 1/2 Teelöffel Salz aufgekocht. Anschließend wird der Topf von der Herdplatte genommen und es werden 125 ml kalte Milch sowie ein Stück Butter dazugegeben. Nun werden die Püreeflocken eingerührt und die Masse 1,00 min zum Quellen zur Seite gestellt. In der Packung sind 318 g Trockenmasse enthalten. Die Zutaten laut Zutatenliste der Packung mit dem Kaufdatum 18.04.2017 lauten wie folgt: Kartoffeln, Gewürze, Jodsalz, Emulgator Mono- und Diglyceride von Speisefettsäuren, Stabilisator Dinatriumdiphosphat, Antioxidationsmittel (Ascorbinsäure, Natriummetabisulfit, Extrakt aus Rosmarin).

5.4. Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern

Bei dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern handelt es sich um eine Weiterentwicklung des von Frau Glonner angefertigten Verdampferkonstrukt aus Edelstahl. Im Gegensatz zu dem Verdampferkonstrukt aus Edelstahl besteht bei der hier verwendeten Konstruktion nur die Halterungsvorrichtung aus Edelstahl. Dabei handelt es sich um eine Edelstahlplatte mit den Maßen 20×35 cm, die auf vier 23,5 cm hohen Füßen steht. Die Edelstahlplatte ist mit 26 Löchern, mit einem jeweiligen Durchmesser von 1,7 cm, versehen. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl kommt es bei dem von Frau Glonner verwendeten Verdampferkonstrukt zu Verlusten (Glonner, 2014, S. 97). Die Halterungsvorrichtung der hier verwendeten Konstruktion kommt nicht mit dem Frittieröl in Kontakt. Die Löcher in der Platte

der Halterungsvorrichtung werden mit Reagenzgläsern bestückt (Abb. 3). Glas hat eine wesentlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit als Edelstahl, sodass es zu geringeren Wärmeverlusten kommt. Bevor die Reagenzgläser in die Vorrichtung gehangen werden, werden sie mit Wasser befüllt und gefroren. Die Halterungsvorrichtung wird samt der Gläser über die Fritteuse gestellt (Abb. 4). Auf diese Weise gelangen nur die Reagenzgläser mit dem Frittiermedium in Kontakt. Nach den Versuchen können die Reagenzgläser gespült und wiederverwendet werden.



Abbildung 3: Halterungsvorrichtung bestückt mit Reagenzgläsern von oben



Abbildung 4: Aufbau Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern und Fritteuse

6. Vergleich der Eigenschaft der Prüfmedien mit Pommes frites

Im Folgenden werden die für die Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 und die Wasserverdampfung relevanten Eigenschaften der Pommes frites und der verschiedenen Prüfmedien gegenübergestellt.

6.1. Masse

Pommes frites bestehen, wie in Kapitel 4.1. erwähnt, im Wesentlichen aus Trockenmasse und Wasser, wobei der Wasseranteil 2/3 der Gesamtmasse ausmacht. Frau König hat in ihrer Masterarbeit durch die Trockenschrankmethode einen durchschnittlichen Wasseranteil von 72 % Gewicht der Gesamtmasse und eine Trockenmasse von 28 % Gewicht der Gesamtmasse ermittelt (König, 2015, S. 73). Mit diesen Werten wird im Verlauf der Bachelorthesis weitergearbeitet.

Den Hauptanteil von mehr als 50 % der Energie während des Frittierens wird für die Verdampfung von Wasser genutzt. Da die Pommes frites vor dem Frittieren gefroren sind, liegt es zunächst im festen Aggregatzustand Eis vor. Dieses muss erhitzt, anschließend geschmolzen und das entstandene Wasser erwärmt und verdampft werden. Die Energie, die für diese Prozesse notwendig ist, lässt sich durch theoretische Berechnungen nachvollziehen. Als Referenzmenge wird von einer Masse von 1 kg Pommes frites ausgegangen, die bei -18 °C gelagert wird. Diese besteht zu 720 g aus Wasser und zu 280 g aus Trockenmasse. Laut verschiedener Literaturangaben erwärmt sich das Frittiergut während des Frittierens auf eine Temperatur knapp unter dem Siedepunkt. Deswegen wird hier, wie auch schon in der Masterarbeit von Frau König, von einer Temperatur von 90 °C ausgegangen. Eine durchschnittliche Verdampfung von 38 % des Gewichts der Gesamtmasse wurde ebenfalls von Frau König durch die Trockenschrankmethode ermittelt (König, 2015, S. 89). Für die Berechnung müssen folgende Teilabschnitte des Frittierprozesses betrachtet werden:

- Erwärmen der Trockenmasse von -18 °C auf 90 °C
- Erwärmen von Eis von -18 °C auf 0 °C
- Schmelzen von Eis
- Erwärmen von Wasser von 0 °C auf 90 °C
- Verdampfen von 38 % Wasser

Formel 2 wird dabei für die Berechnung der benötigten Wärmemenge zum Erwärmen der Trockenmasse, des Eis und des Wassers in kJ verwendet. Mit Formel 3 wird die benötigte Wärmemenge zum Schmelzen des Eis und zum Verdampfen des Wassers in kJ berechnet.

$$(2) Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$$

$$(3) Q = c \cdot m$$

Q steht dabei für die Wärmemenge, c für die spezifische Wärmekapazität der einzelnen Stoffe, bzw. für die Schmelz- und Verdampfungsenthalpie von Wasser, und $\Delta\vartheta$ für die jeweilige Temperaturänderung. In Tabelle 3 sind die für die Berechnung notwendigen Konstanten dargestellt. Da der Hauptanteil der Trockenmasse aus Stärke besteht, wird für die Berechnung die spezifische Wärmekapazität von Stärke verwendet.

Größe	Einheit	Wert
Spezifische Wärmekapazität von Eis	kJ/(kg·K)	2,1
Spezifische Wärmekapazität von Wasser	kJ/(kg·K)	4,2
Spezifische Wärmekapazität von Stärke	kJ/(kg·K)	2,4
Schmelzenthalpie von Wasser	kJ/kg	333
Verdampfungsenthalpie von Wasser	kJ/kg	2256

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Stoffkonstanten für die Berechnung des Energiebedarfs | Quelle: Schöberl, 2010

Folgende Tabelle 4 listet den Anteil der einzelnen Prozesse am Energiebedarf auf.

Vorgang	Einheit	Energiebedarf	Anteil
Erwärmen der Trockenmasse von -18 °C auf 90 °C	Wh	72,6	4,9 %
Erwärmen von Eis von -18 °C auf 0 °C	Wh	27,2	1,9 %
Schmelzen von Eis	Wh	239,8	16,3 %
Erwärmen von Wasser von 0 °C auf 90 °C	Wh	272,4	18,5 %
Verdampfen von 38% Wasser	Wh	857,3	58,4 %
Gesamtenergiebedarf	Wh	408,1	100.0 %

Tabelle 4: Übersicht der Anteile der einzelnen Vorgänge beim Frittieren von Pommes frites am Gesamtenergiebedarf

Für das Frittieren von 1 kg Pommes frites werden insgesamt 408 Wh benötigt. Durch die Berechnung wird deutlich, dass 58 % davon für das Verdampfen von Wasser genutzt werden und dies somit den Hauptanteil des Energiebedarfs umfasst. Daher darf bei der Betrachtung möglicher Ersatzstoffe für die Energieverbrauchs-messung nach DIN 18873-3:2016-12 das Verhältnis von Trockenmasse und Wasser nicht außer Acht gelassen werden, um möglichst realistische Ergebnisse zu erhalten. Die Verteilung dieser Bestandteile bei den Prüfmedien sollte denen der Pommes frites ähnlich sein und im gleichen Verhältnis von 1:2 stehen. Durch die Pulverform der Prüfmedien Kartoffelpüree- und Knödel-Pulver kann der Anteil von Trockenmasse und Wasser genau bestimmt und eine Zusammensetzung generiert werden, welche mit der von Pommes frites identisch ist.

Das Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern stößt hier auf Schwierigkeiten. Stärke hat eine spezifische Wärmekapazität von 2,4 kJ/(kg·K). Die von Glas, welche bei dem Verdampferkonstrukt als Trockenmasse definiert ist, beträgt nur 0,83 kJ/(kg·K) (Büchner, S. 17, o.J.). Um die gleiche Wärmekapazität und somit den gleichen Energiebedarf zu erhalten, den 1 kg Pommes frites beim Frittieren benötigen, müsste der Anteil an Glas im Verhältnis zum Wassergehalt viel höher sein. Mit Hilfe von Formel 3 lässt sich ausrechnen das 280 g Trockenmasse von 1 kg Pommes frites eine Wärmekapazität von 672 kJ haben. Durch Einsetzen der spezifischen Wärmekapazität von Glas und der Wärmekapazität der Trockenmasse von 1 kg Pommes frites in Formel 4 lässt sich ermitteln, wieviel Glas erforderlich wäre, um die gleiche Wärmekapazität zu erhalten.

$$(4) m_{Glas} = \frac{Q_{Pommes}}{c_{Glas}}$$

Es ergibt sich eine Summe von 809 g Glas. Ein Reagenzglas wiegt ca. 10 g. Die Füllhöhe der Fritteuse mit Öl beträgt 4,5 cm. Um einen direkten Kontakt mit dem Boden der Fritteuse auszuschließen, besteht ein 0,5 cm großer Abstand zwischen Fritteusenboden und Reagenzglas. Das Reagenzglas taucht somit 4 cm tief ins Fett ein. Da dies der Anteil ist, der im Ölbad steht und effektiv erhitzt wird, wird er als Trockenmasse definiert. Die Trockenmasse liegt somit bei 3,2 g pro Glas. Es würden insgesamt 251 Gläser gebraucht, auf die insgesamt 720 g Wasser verteilt würden. Die Füllmenge der Gläser wäre mit 2,9 g sehr gering. Dazu kommt, dass der Anteil der Gläser, der nicht als Trockenmasse fungiert und daher auch nicht im Öl

steht, trotzdem erhitzt wird. Auch wenn die Wärmeleitfähigkeit von Glas nicht hoch ist, findet trotzdem Wärmetransport statt und es kommt zu Wärmeverlusten an die Umgebung.

6.2. Oberfläche

Die Oberfläche des Lebensmittels ist für die Energieverbrauchsmessung insofern relevant, als dass sie mitentscheidend dafür ist, wie viel Wasser und vor allem wie schnell es aus dem Inneren der Pommes frites verdampft. Die laut DIN 18873-3:2016-12 für die Messungen verwendeten Pommes frites müssen eine Schnittgröße von 9×9 mm aufweisen (DIN 18873-3:2016-12, S. 7). Im Durchschnitt ist eine Pommes frites 6 cm lang. Abb. 5 zeigt die Skizze einer Pommes frites Die Oberfläche der Pommes frites in cm^2 lässt sich mit Formel 5 berechnen und beträgt $23,2 \text{ cm}^2$.

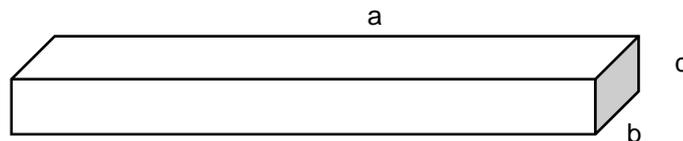


Abbildung 5: Skizze Pommes frites

$$(5) O = 2(ab + ac + bc)$$

Für die Versuche werden die Prüfmedien, die formbar sind, zu Kugeln gerollt. Durch umstellen von Formel 6 lässt sich der Radius bestimmen, den die Kugeln haben müssen, um die gleiche Oberfläche wie Pommes frites zu erhalten.

Dieser muss 1,4 cm betragen.

$$(6) O = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

Die Prüfmedien Knödel- und Kartoffelpüree-Pulver werden demnach zu Kugeln mit einem Radius von 1,4 cm geformt und erhalten dadurch eine Oberfläche von $23,2 \text{ cm}^2$. Bei den Reagenzgläsern ist die Geometrie jedoch festgelegt. Abb. 6 zeigt die Skizze eines Reagenzglases. Die äußere Oberfläche des Teiles des Reagenzglases, der im Öl steht, lässt sich durch Formel 7 berechnen und beträgt $20,1 \text{ cm}^2$.

$$(7) O = 2\pi \cdot r \cdot (h - r) + 2\pi \cdot r^2$$

Abbildung 6: Skizze Reagenzglas



Die Oberfläche ist somit 13,4 % kleiner als die von einer Pommes frites, liegt jedoch in einem akzeptablen Bereich. Ein weiterer Faktor, der zu berücksichtigen ist, ist die Beschaffenheit der Oberfläche. Pommes frites haben Poren und geben das Wasser in Form von Dampf an das Öl ab. Durch die Poren dringt auch im späteren Verlauf des Frittierprozesses das Fett in das Lebensmittel ein (testo AG, 2010, S.18). Ebenso weisen die Knödel- und die Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln Poren auf, die Reagenzgläser jedoch nicht. Sie geben keinen Dampf an das Frittiermedium ab und nehmen auch kein Öl auf. Der Dampf gerät nicht erst in das Öl und dann an die Oberfläche, sondern entweicht aus den Öffnungen der Gläser an der Oberfläche direkt.

6.3. Spezifische Wärmekapazität

Für die spezifische Wärmekapazität von Pommes frites wird die von Stärke mit $2,4 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ verwendet (Schöberl, 2010). Ebenso sind die Hauptzutaten von Knödel- und Kartoffelpüree-Pulver, wie in Kapitel 5.2. und 5.3. beschrieben, Kartoffeln und demnach der Hauptbestandteil Stärke. Daher wird für die Berechnungen und die Vergleiche von der gleichen spezifischen Wärmekapazität ausgegangen. Die restlichen Zutaten sind im Verhältnis zu dem vorhandenen Anteil an Stärke zu vernachlässigen.

Für die Reagenzgläser wird die spezifische Wärmekapazität von Fensterglas mit $0,83 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ verwendet (Büchner, S.17, o.J.). Sie haben folglich, wie schon im Kapitel 6.1. beschrieben, eine viel geringere spezifische Wärmekapazität. Die Wärmemenge in kJ, die nötig ist, um 1 kg des Stoffes um 1 K zu erhöhen ist somit viel geringer. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass mehr Masse an Glas als an Stärke erforderlich ist, um denselben Energieverbrauch zum Erwärmen zu erzielen, nämlich die 2,89-fache Menge.

6.4. Preis und Wiederverwendbarkeit

Für die Versuche werden die Pommes frites „1•2•3 Frites Original“ der Firma McCain verwendet. Der Preis pro Kilogramm liegt bei 2,65 Euro. Eine Packung des verwendeten Knödelpulvers kostet 1,79 Euro. Für eine Knödelmasse von 1 kg mit einer Trockenmasse von 28 % werden 280 g Pulver benötigt, woraus sich ein Kilogrammpreis von 1,58 Euro ergibt. Das verwendete Kartoffelpüree-Pulver hat einen Packungspreis von 1,35 Euro. Auch hier werden für 1 kg Püree Masse 280 g Pulver benötigt, so dass sich ein Preis von 1,57 Euro pro Kilogramm ergibt. Die Halterungsvorrichtung des Verdampferkonstrukts besteht aus Edelstahl und hat in etwa einen Materialwert von 10 Euro. Ein Reagenzglas hat einen Anschaffungswert von 0,15 Euro. Für die Referenzgröße von einem kg werden laut Berechnung 251 Gläser benötigt. Dies entspricht einem Warenwert von 37,65 Euro. Es ergibt sich ein Gesamtpreis von 47,65 Euro. Jedoch ist hier zu erwähnen, dass es sich um eine einmalige Anschaffung handelt. Die Reagenzgläser können im Gegensatz zu den anderen Prüfmedien gespült und wiederverwendet werden. Durch diese Gegebenheit liegen sie im Punkt Wiederverwendbarkeit vor den Pulvern und den Pommes frites, welche nur einmal verwendet werden können.

6.5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Folgende Tabelle 5 fasst die theoretisch erlangten Erkenntnisse des Vergleichs der Prüfmedien mit Pommes frites zusammen:

Eigenschaft	Einheit	Pommes	Knödel- Pulver	Kartoffel- püree-Pulver	Reagenz- gläser
Trockenmasse	g	280	280	280	280
Wassergehalt	g	720,0	720,0	720,0	809,6
Oberfläche	cm ²	23,22	23,22	23,22	20,1
spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg·K)	2,4	2,4	2,4	0,83
Preis	Euro	2,65	1,58	1,57	37,65
Wiederverwendbar	-	Nein	Nein	Nein	Ja

Tabelle 5: Vergleich der unterschiedlichen Prüfmedien in Bezug auf 1 kg Pommes frites

Auf Basis von Tabelle 5 lässt sich schließen, das Knödel- und Kartoffelpüree-Pulver als Ersatzmedium für die Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 besser geeignet sind, als die Reagenzgläser. Die Werte für Trockenmasse, Wassergehalt, Oberfläche und spezifische Wärmekapazität stimmen mit denen von Pommes frites überein. Im Anschaffungspreis liegen sie mit 1,58 Euro bzw. 1,57 Euro unter den Pommes frites. Auch wenn die spezifische Wärmekapazität von Glas mit $0,83 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ weit unter der von Stärke mit $2,3 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ liegt, wodurch sich auch die hohe Masse an benötigtem Glas ergibt, sind die Reagenzgläser nicht komplett auszuschließen. Das Glas steht nicht in Wechselwirkung mit dem Fett, gibt keine Stoffe an das Fett ab und ist wiederverwendbar. Zu berücksichtigen ist auch, dass die Gläser zu 6 cm aus dem Öl herausragen und somit durch Wärmeleitung mehr Masse erhitzt wird als die definierte Trockenmasse. Es kann im Endeffekt mit einem niedrigeren Gewicht als berechnet gearbeitet werden, da die eben genannten Faktoren dies ausgleichen.

7. Messung des Energieverbrauchs nach DIN 18873-3

Dieses Kapitel gibt lediglich ausgewählte Inhalte der DIN 18873-3:2016-12 wieder. Alle Informationen, die in diesem Kapitel nicht erwähnt werden, sind der Norm zu entnehmen. Sie definiert die Energieverbrauchsmessung für gewerbliche Fritteusen und besteht aus drei Teilen:

1. Energieverbrauch im Vorheizzyklus (DIN 18873-3:2016-12, Kapitel 6)
2. Energieverbrauch im Warmhaltezyklus (DIN 18873-3:2016-12, Kapitel 7)
3. Energieverbrauch im Frittierzyklus (DIN 18873-3:2016-12, Kapitel 8)

Die Messreihen sind bei einer Umgebungstemperatur von $23 \pm 3 \text{ °C}$ durchzuführen. Die Mischung des Öls beträgt 80 % reines Sonnenblumenöl und 20 % reines Rapsöl. Daraus ergibt sich für das Öl eine spezifische Wärmekapazität von $1,9 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Der TMP-Wert (Total Polar Materials) - Anteil an polaren Substanzen - des Öls sollte vor den Messungen einen Wert von $15 \pm 5 \text{ %}$ haben. Die für die Versuche verwendeten Pommes frites sollen die Schnittgröße $9 \times 9 \text{ mm}$ haben, bei einer Temperatur von -18 °C gelagert werden sowie blanchiert und vorgebacken sein. Die für die Messungen notwendige Menge an Pommes frites und die Frittierzeit ist in Vorversuchen zu ermitteln, da diese abhängig vom Gerätetyp und Pommes frites-Hersteller variieren kann. Dabei sind die Vorgaben der Norm entscheidend. Die Temperatur darf nach Zugabe der Pommes frites nicht unter 145 °C absinken und nach dem Frittieren muss der Gewichtsverlust der Pommes frites $36 \pm 2 \text{ %}$ betragen.

1. Energieverbrauch im Vorheizzyklus

Für die Energieverbrauchsmessung im Vorheizzyklus befindet sich das Gerät im Ruhezustand. Die Gerätetemperatur entspricht dabei der Umgebungstemperatur. Die Fritteuse wird bis zur Mindestfüllmenge mit der Ölmischung befüllt, welche nun auf $175 \pm 5 \text{ °C}$ erhitzt wird. Die erfassten Größen (Tabelle 6) werden in Formel 8 eingesetzt, um die theoretische Wärmeenergie Q in kJ zu berechnen. Anschließend wird mit Formel 9 die Energieeffizienz in Prozent bestimmt. Für die Messung des Energieverbrauchs im Vorheizzyklus spielt das Frittiergut keine Rolle.

Zu erfassende Größen	Formelzeichen	Einheit
Zeit bis zum Erreichen der Betriebstemperatur	t_1	h
Gesamtfüllmenge des Frittieröls	m_1	kg
TPM-Wert	-	%
Anfangstemperatur	ϑ_1	°C
Endtemperatur	ϑ_2	°C
Temperaturdifferenz	$\Delta\vartheta$	K
Energieverbrauch im Vorheizzyklus	E_1	kWh

Tabelle 6: Zu ermittelnde Daten während des Vorheizzyklus | Quelle: DIN 18873-3:2016-12, S. 7

$$(8) Q = m_1 \cdot c \cdot \Delta\vartheta$$

$\Delta\vartheta$: Differenz zwischen End- und Starttemperatur

$$(9) n = \frac{Q}{E_1} \cdot 100$$

E_1 : Energieverbrauch im Vorheizzyklus in kWh

2. Energieverbrauch im Warmhaltezyklus

Die Messung beginnt direkt nach Erreichen der Solltemperatur von 175 ± 5 °C im Anschluss an den Vorheizzyklus. Die Temperatur wird zwei Stunden lang gehalten. Tabelle 7 stellt die zu erfassenden Größen während des Warmhaltezyklus dar.

Zu erfassende Größen	Formelzeichen	Einheit
Minimale Frittieröltemperatur	$\vartheta_{Min(1)}$	°C
Maximale Frittieröltemperatur	$\vartheta_{Max(1)}$	°C
Gesamtenergieverbrauch des Warmhaltezyklus	E_2	kWh

Tabelle 7: Zu ermittelnde Daten während des Warmhaltezyklus über zwei Stunden | Quelle: DIN 18873-3:2016-12, S. 11

Mit Formel 10 wird aus den erhobenen Daten der Energieverbrauch pro Stunde in kWh bestimmt. Ferner wird durch das Einsetzen der erfassten Größen der Energieverbrauch pro Kilogramm Frittieröl in kWh/kg ermittelt (Formel 11).

$$(10) E_h = \frac{E_2}{2}$$

$$(11) E_{kg(\text{Öl})} = \frac{E_2}{m_1}$$

3. Energieverbrauch im Frittierzyklus

Ein Frittierzyklus beinhaltet drei Chargen Pommes frites. Die Messung startet direkt nach dem Erreichen der Solltemperatur von $175 \pm 5 \text{ °C}$ im Anschluss an den Warmhaltezyklus. Der Frittierkorb wird herausgenommen und die im Vortest ermittelte Menge an Pommes frites binnen 1,00 min nach Entnahme aus der Tiefkühlung in den Korb gegeben. Nach Ablauf der Frittierzeit wird der Korb aus dem Frittieröl herausgenommen und die Pommes frites in einen zweiten Korb umgefüllt. Dieser wird zum Abtropfen für 10,00 min zur Seite gestellt. Der erste Korb wird unmittelbar nach dem Entleeren wieder zurück ins Frittieröl getaucht. Die zweite bzw. dritte Charge beginnt, sobald das Frittieröl wieder seine Solltemperatur von $175 \pm 5 \text{ °C}$ erreicht hat. Die Temperatur wird mit Hilfe eines Thermoelements überwacht. Nach dem Abtropfen werden die Pommes frites gewogen, um zu ermitteln, ob der erforderliche Gewichtsverlust von $36 \pm 2 \text{ %}$ eingehalten wurde. Das Ende des Frittierzyklus ist erreicht, sobald nach der dritten Charge erneut die Solltemperatur von $175 \pm 5 \text{ °C}$ erreicht ist. Mithilfe der erhobenen Daten (Tabelle 8) wird im Anschluss an die Messung die Massendifferenz, der Gewichtsunterschied zwischen tiefgekühlten und frittierten Pommes frites, in % bestimmt (Formel 12), die Zeitspanne des kompletten Frittierzykluses in h (Formel 13) und das Gesamtgewicht der tiefgekühlten Pommes frites in kg (Formel 14). Aus dem Gesamtgewicht und der Zeitspanne lässt sich durch Formel 15 die Produktionsmenge pro Stunde in kg/h ermitteln. Weiterhin wird der Energieverbrauch pro Kilogramm tiefgekühlter Pommes frites in kWh/kg berechnet (Formel 16).

$$(12) \Delta m = 100\% - \left(\frac{m_3 \cdot 100\%}{m_2} \right)$$

$$(13) t_4 = t_3 - t_2$$

$$(14) M = 3 \cdot m_2$$

$$(15) P = \frac{M}{t_4}$$

$$(16) E_{kg(1)} = \frac{E_3}{M}$$

Zu erfassende Größen	Formelzeichen	Einheit
Startzeitpunkt Frittierzyklus	t_2	h
Endzeitpunkt Frittierzyklus	t_3	h
Ausgangsgewicht der tiefgekühlten Pommes frites	m_2	kg
Massendifferenz	Δm	%
Gesamtenergieverbrauch des Frittierzyklus	E_3	kWh
Minimale Öltemperatur während des Frittierzyklus	$\vartheta_{Min(2)}$	°C
Maximale Öltemperatur während des Frittierzyklus	$\vartheta_{Max(2)}$	°C

Tabelle 8: Zu ermittelnde Daten während des Frittierzyklus | Quelle: DIN 18873-3:2016-12, S. 13

Auswertung

In der Auswertung wird die Bemessungsgröße zum spezifischen Energieverbrauch einer Fritteuse im Betrieb als Vergleichswert berechnet. Diese wird in kWh/kg angegeben. Dazu wird zunächst der Gesamtenergieverbrauch in kWh berechnet (Formel 17) und anschließend daraus der Gesamtenergieverbrauch pro Kilogramm tiefgekühlter Pommes frites in kWh/kg bestimmt (Formel 18).

$$(17) E_4 = E_1 + E_2 + n \cdot E_3$$

$$(18) E_{kg} = \frac{E_4}{n \cdot M}$$

n= Nutzungsfaktor zur Gewichtung des Frittierzyklus = 2

Weitere Informationen zur Bestimmung des Energieverbrauchs von gewerblichen Fritteusen können direkt aus der Norm entnommen werden (DIN 18873-3:2016-12).

8. Versuchsdurchführung

8.1. Verwendete Materialien

Das für die Versuche eingesetzte Gerät, die Elektrohaushaltsfritteuse Maxi Fry (Heizleistung 1,9 kW), wird von der Firma Tefal, zugehörig zu Groupe SEB Deutschland, entwickelt. Als Haushaltsfritteuse kann sie laut Herstellerangaben 1,2 kg frische bzw. 0,9 kg tiefgefrorene Pommes frites auf einmal frittieren. Die Wanne muss mit minimal 1,9 l Öl befüllt werden und kann maximal 2,1 l fassen. Durch einen Regler können Temperaturen von 170 °C bis 190 °C eingestellt werden.

Tabelle 10 zeigt eine Auflistung der für die Versuche verwendeten Roh- und Werkstoffe. Für die Erfassung der Daten werden die in Tabelle 11 und 12 aufgeführten Geräte verwendet. Die Umgebungstemperatur von 22-24 °C wird durch die Klimaanlage des LM-Technikums, Testraum A, konstant gehalten. Die Erfassung der Messdaten erfolgt durch die Software MCPS (Multi Channel Process System 7) der CAD Computer GmbH & Co. KG (Viersen, Deutschland). Für die Bearbeitung und Auswertung der Daten wurde das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel 2017 verwendet.

Nährwertangaben pro 100 g Pommes frites (9 × 9 mm, tiefgefroren) in g	
kcal	153
Fett	5,0
davon ungesättigte Fettsäuren	4,5
Kohlenhydrate	23
Eiweiß	3,0

Tabelle 9: Nährwertangaben pro 100 g Pommes frites der Marke „McCain“

Verwendete Materialien	Typ	Hersteller
Pommes frites	1•2•3 Frites Original (blanchiert, tiefgefroren, 9×9 mm)	McCain GmbH, Eschborn, Deutschland
Knödel-Pulver	Halb und Halb	Unilever Deutschland, Hamburg, Deutschland
Kartoffelpüree-Pulver	Das Lockere	Maggi GmbH, Singen (Hohentwiel), Deutschland
Reagenzgläser	160 mm x 16 mm, Gewicht 10 g	SCHWEFELFADEN®, Jena, Deutschland
Kaninchendraht	Verzinkter Stahl, Maschenweite 13 mm, Drahtstärke 0,8 mm	Bauhaus E-Business GmbH & Co.KG, Mannheim, Deutschland
Rapsöl	Reines Rapsöl	Bröckelmann & Co. Ölmühle GmbH & Co., Hamm, Deutschland
Sonnenblumenöl	Reines Sonnenblumenöl	Teutoburger Margarinewerke GmbH, Hilter, Deutschland

Tabelle 10: Übersicht der verwendeten Roh- und Werkstoffe mit Herstellerangaben

Modell	Hersteller	Messbereich	Reproduzierbarkeit	Linearität
Extended ED8201-CW	Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Göttingen, Deutschland	Max. 8200 g (d=0,1 g)	± 0,1 g	± 0,1 g

Tabelle 11: Für die Versuche zur Gewichtsbestimmung und zur Erfassung des Massenverlustes verwendete Waage mit spezifischen Angaben

Messgröße	Modell/Typ	Hersteller	Messbereich	Genauigkeit
Zeit	Rotilabo®-signal Timer with clock	Carl Roth GmbH & Co. KG, Karlsruhe, Deutschland	Maximaler Zählbereich 99:59:59 hh:mm:ss (vor- und rückwärts); Zählung erfolgt in Schrittgröße von 1 s	n. a.
Frittieröltemperatur	Data Acquisition Unit MX100-E-1F SL2; Seriennummer: 91G548161	Yokogawa, Tokyo, Japan	- 200 bis + 1370 °C	± 0,05 % des Messwerts
	Mantelthermoelement Typ K	Thermocoax Isopad GmbH, Heidelberg, Deutschland	- 200 bis + 800 °C	± 1,5 K
Leistung	Yokogawa WT330 Digital power meter; Seriennummer: C2QB06011V	Yokogawa Meters & Instruments Corporation, Tokyo, Japan	Spannungsbereich: 300 V Strombereich: 20 A	± 0,25 % des Messwerts
Energieverbrauch	Yokogawa WT330 Digital power meter; Seriennummer: C2QB06011V	Yokogawa Meters & Instruments Corporation, Tokyo, Japan	Spannungsbereich: 300 V Strombereich: 20 A	± 0,35 % des Messwerts

Tabelle 12: Übersicht der Messgrößen, welche nach DIN 18873-3:2011-05 zur Bestimmung des Energieverbrauchs erfasst werden, und Angabe der Messtechnik

8.2. Versuch zur Ausgangsmenge

Die Ausgangsmenge an tiefgekühlten Pommes frites muss wie in der Norm beschrieben mittels eines Vorversuches bestimmt werden. Dabei ist neben der Menge auch die Frittierzeit festzustellen. Während des Frittierens darf die Frittieröltemperatur nicht unter 145 °C absinken, gleichzeitig muss nach einer Abtropfzeit von 10,00 min der frittierten Pommes frites ein Gewichtsverlust von 36 ± 2 % der Gesamtmasse im Vergleich zu den tiefgekühlten erfolgt sein.

Bei dem verwendeten Gerät handelt es sich um die Haushaltsfritteuse Maxi-Fry der Firma Tefal. Dieses Modell wird für alle folgenden Versuche verwendet. Die Entscheidung, die Untersuchung zunächst an einer Haushaltsfritteuse durchzuführen, ist unter anderem auf die geringere Größe zurückzuführen. Durch die niedrigere Nennfüllmenge ist die Fritteuse einfacher im Umgang und verbraucht weniger Ressourcen. Sie wird mit weniger Öl befüllt und kann somit auch weniger Pommes frites gleichzeitig frittieren.

Laut Hersteller liegt die Mindestfüllmenge der Fritteuse bei 1,9 l Öl. Das Mischungsverhältnis beträgt, wie in der Norm vorgegeben, 20% reines Rapsöl und 80% reines Sonnenblumenöl. Um ein zu starkes Absinken der Temperatur zu verhindern, gibt die Deutsche Gesellschaft für Fettwissenschaften (DGF) ein Verhältnis von 1:10 von Frittiergut und Frittiermedium vor (Gertz & Matthäus, 2012, S. 11). Für die Ölmischung wird die in der Norm angegebene Dichte von $0,91 \text{ kg/dm}^3$ angenommen (DIN 18873-3:2016-12, S. 10). Demnach hat das Öl ein Gewicht 1,78 kg. Es werden zunächst 200 g und dann 175 g für die vom Gerätehersteller vorgegebene Frittierzeit tiefgekühlter Pommes frites von 9,00 min frittiert. Um zu kontrollieren, ob die Temperatur während der Frittiervorganges unter 145 °C absinkt, wird diese mit Hilfe eines Thermoelementes unterhalb des Frittierkorbs gemessen und aufgezeichnet.

Versuchsdurchführung

Zunächst wird die Fritteuse mit der Ölmenge von 1,9 l befüllt. Anschließend wird die Frittieröltemperatur von 175 °C eingestellt. Beim Erreichen derselben werden die vorher tiefgefrorenen Pommes frites abgewogen (m_1) in den Korb gegeben und für eine Zeit von 9,00 min frittiert. Nach dem Abtropfen werden die frittierten Pommes frites erneut gewogen (m_2). In die Mitte des Frittierkorbs wurde im Vorfeld ein Thermoelement eingefädelt. Die Spitze des Thermoelements zeigt mit einem Anstand

von 1 cm zum Frittierkorb nach unten. Es werden jeweils drei Chargen Pommes frites à 200 g und à 175 g frittiert. Die Messung der nächsten Charge beginnt, sobald die Temperatur erneut die $175 \pm 5 \text{ °C}$ erreicht hat.

Ergebnisse

Tabelle 13 zeigt die Ergebnisse der Messung. Das Startgewicht ist mit m_1 in g, das Abtropfgewicht mit m_2 in g und der Gewichtsverlust als Δm in % angegeben. Die grüne Einfärbung zeigt welche Chargen die Anforderungen der DIN 18873-3:2016-12 bezüglich der Minimaltemperatur und Gewichtsverlust eingehalten haben.

Charge	Zeit in min	m_1 in g	m_2 in g	Δm in g	Δm in %	ϑ_{min} in °C
Charge 1: 200 g	9	200,3	133,4	66,9	33,4	140,1
Charge 2: 200 g	9	201,0	126,3	74,8	37,2	140,6
Charge 3: 200 g	9	1998	127,2	72,6	36,3	143,7
Charge 1: 175 g	9	176,1	113,3	62,8	35,7	145,5
Charge 2: 175 g	9	175,1	110,2	64,9	37,1	145,7
Charge 3: 175 g	9	175,6	111,7	63,8	36,4	146,8

Tabelle 13: Ergebnisse zur Ermittlung der Ausgangsmenge

Wie in der Tabelle zu sehen ist, wird bei beiden Ausgangsmengen der gewünschte Gewichtsverlust von $36 \pm 2 \text{ %}$ erzielt. Jedoch ist bei der ersten Charge mit einer Masse von 200 g der Gewichtsverlust mit 33,4 % zu niedrig. Weiterhin sinkt bei dieser Masse an Pommes frites die Temperatur unter das laut DIN 18873-3:2016-12 vorgeschriebene Minimum von 145 °C. Bei einer Ausgangsmenge von 175 g Pommes frites werden die Anforderungen eingehalten, sodass die Versuche mit einer Menge von 175 g Pommes frites und einer Fritierzeit von 9,00 min durchgeführt werden.

8.3. Versuch zum Vorheiz- und Warmhaltezyklus

Um im weiteren Verlauf den Gesamtenergieverbrauch bestimmen zu können, wird der Energieverbrauch für den Vorheiz- und Warmhaltezyklus nach DIN 18873-3:2016-12 für die Fritteuse Maxi Fry von Tefal bestimmt. Da die Norm eigentlich für gewerbliche Fritteuse bestimmt ist, wird sie sinngemäß angewendet. Es wird nur ein Durchlauf mit der Mindestfüllmenge an Öl durchgeführt. Die Daten werden mit der Software MCPS aufgezeichnet.

Versuchsdurchführung

Die Fritteuse wird mit der Mindestfüllmenge von 1,9 l Öl befüllt und befindet sich im Ruhezustand. Die Gerätetemperatur entspricht der Umgebungstemperatur. Nun wird die Fritteuse eingeschaltet und es wird abgewartet, bis das Öl seine Betriebstemperatur von 175 °C erreicht hat. Es wird die Zeit zum Erreichen der Betriebstemperatur in h, die Anfangs- und Endtemperatur in °C sowie der Energieverbrauch in Wh aufgezeichnet. Im Anschluss daran folgt der Warmhaltezyklus über 2 Stunden. Währenddessen wird die Temperatur in °C und der Energieverbrauch in Wh aufgezeichnet. Bei den Versuchen befindet sich der Frittierkorb in der Fritteuse und der Behälter ist geöffnet.

Ergebnisse

Die Fritteuse braucht bis zum Erreichen der Betriebstemperatur 8,79 min. Sie erhöht die Temperatur des Öls dabei um 153 K. Dafür werden 232,7 Wh an Energie benötigt. In Diagramm 1 ist zu sehen, dass die Temperatur die ersten 1,50 min nicht ansteigt und dann proportional zunimmt. Auch der Energieverbrauch steigt erst nach ca. 0,66 min an und nimmt dann ebenfalls proportional zu. Nach 8,33 min heizt die Fritteuse nicht mehr nach, sodass der Energieverbrauch nicht weiter steigt. Während des zweistündigen Warmhaltezyklus liegt die Maximaltemperatur kurz im Anschluss an den Vorheizzyklus bei 179 °C. Das Minimum liegt bei 158,5 °C. In Diagramm 2 ist zu erkennen, dass, wenn die Temperatur abfällt, die Fritteuse also nicht nachheizt, auch der Energieverbrauch nicht weiter ansteigt. Nach zwei Stunden hat die Fritteuse 800,3 Wh Energie verbraucht, um immer wieder auf die Betriebstemperatur nachzuheizen. Die Solltemperatur von 175 ± 5 °C wird, wie in Diagramm 10 zusehen, nicht immer eingehalten. Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse der Messung.

Größe	Formelzeichen	Einheit	Gemessener Wert
Zeit zum Erreichen der Betriebstemperatur	t_1	min	8,79
Anfangstemperatur	ϑ_1	°C	22,1
Endtemperatur	ϑ_2	°C	177,5
Energieverbrauch im Vorheizzyklus	E_1	Wh	232,7
Minimale Frittieröltemperatur	$\vartheta_{\min(1)}$	°C	158,5
Maximale Frittieröltemperatur	$\vartheta_{\max(1)}$	°C	179,0
Energieverbrauch im Warmhaltezyklus	E_2	Wh	800,2

Tabelle 14: Ergebnisse der Messungen für den Vorheiz- und Warmhaltezyklus nach DIN 18873-3:2016-12

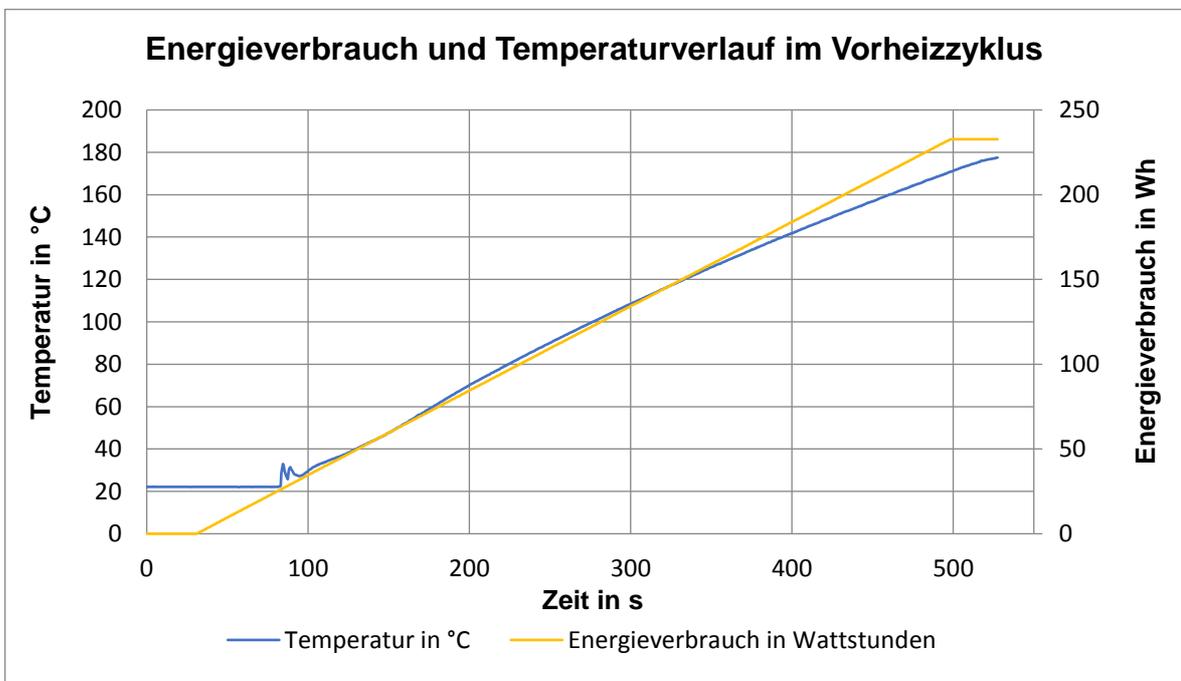


Diagramm 1: Energieverbrauch und Temperaturverlauf während der Messung des Vorheizzyklus nach DIN 18873-3:2016-12

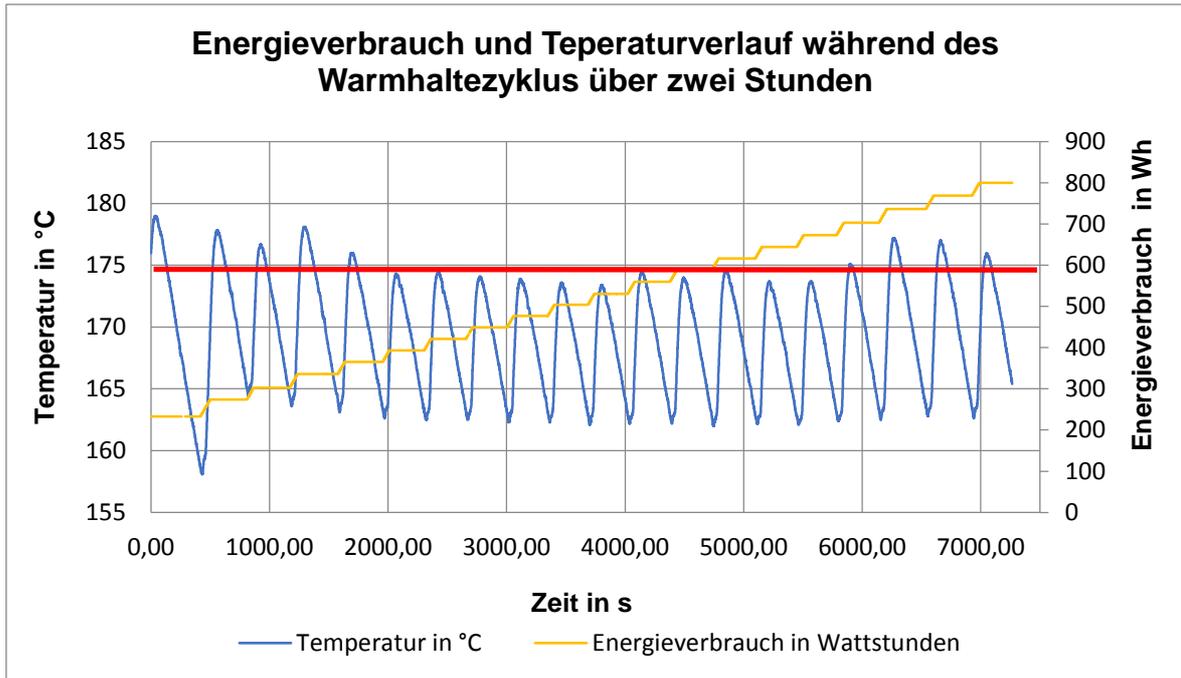


Diagramm 2: Energieverbrauch und Temperaturverlauf während der Messung des Warmhaltezyklus über zwei Stunden nach DIN 18873-3:2016-12

8.4. Versuche zum Massenverlust

Da, wie in Kapitel 6.1. bereits beschrieben, der Hauptanteil der Energie beim Frittieren für das Verdampfen von Wasser benötigt wird, wird im Folgenden der zeitliche Verlauf des Massenverlustes näher untersucht. Dazu wird die Fritteuse während des Frittierens auf einer Waage platziert, mit deren Hilfe der Gewichtsverlauf in g während des Vorganges aufgezeichnet wird. Die Fritteuse ist bis zur Mindestfüllmenge mit Öl befüllt und der Deckel ist geöffnet. Neben dem Gewicht wird mit Hilfe der Software MCPS der Energieverbrauch in Wh, die Leistung in W, die Temperatur in °C sowie die Spannung in V aufgezeichnet. Das Endgewicht der Prüfmedien entspricht der Anzeige der Waage nach 9,00 min. Ein Abtropfen nach dem Frittieren und ein erneutes Wiegen findet nicht statt. Die Messungen werden jeweils mit drei Chargen durchgeführt.

8.4.1. Versuchsdurchführung zum Massenverlust bei Pommes frites

Die im Vortest ermittelte Menge von 175 g Pommes frites wird für drei Chargen abgewogen. Die Messung startet, sobald das Öl die Solltemperatur von $175 \pm 5 \text{ °C}$

erreicht hat. Dazu wird der Frittierkorb aus der Fritteuse genommen und die Pommes frites hineingegeben. Der Korb wird zurück in das Frittieröl gehängt und die Messung wird gestartet. Nach der Frittierzeit von 9,00 min wird der Korb erneut aus der Fritteuse genommen und die Pommes frites in einen Behälter umgefüllt. Der leere Korb wird wieder in die Fritteuse gehängt. Die Messung der nächsten Charge beginnt, sobald das Frittieröl seine Solltemperatur von $175 \pm 5 \text{ °C}$ erreicht hat.

Ergebnisse

Die drei Chargen Pommes frites verhalten sich während des Frittierens ähnlich, so dass sich im Mittelwert ein Gewichtsverlust von $40,1 \pm 0,9 \%$ ergibt. Da kein Abtropfen nach dem Frittieren stattfindet ist der Wert höher als der vorgeschriebene Gewichtsverlust von $36 \pm 2 \%$. Die Öltemperatur ist bei allen drei Chargen mit einem Minimum von $145,3 \text{ °C}$ (Charge 2) im geforderten Bereich. Für eine Frittierzeit von 9,00 min ergibt sich ein mittlerer durchschnittlicher Gewichtsverlust von $0,13 \pm 0,01 \text{ g/s}$ und ein mittlerer Energieverbrauch von $85,6 \pm 1,1 \text{ Wh}$. Die Daten der einzelnen Chargen sind in folgender Tabelle 15 dargestellt.

Größe	Einheit	Charge 1	Charge 2	Charge 3	Mittelwert
Startgewicht	g	172,1	171,6	178,0	$173,6 \pm 1,7$
Endgewicht	g	103,1	102,1	112,7	$106,0 \pm 2,8$
Gewichtsverlust	g	69,0	69,5	65,3	$67,9 \pm 1,1$
Gewichtsverlust	%	40,1	40,5	39,7	$40,1 \pm 0,9$
Minimale Frittieröltemperatur	°C	145,5	145,3	145,7	$145,5 \pm 0,1$
Durchschnittlicher Gewichtsverlust*	g/min	0,13	0,13	0,12	$0,13 \pm 0,01$
Verdampfungsrate im Gleichgewicht**	g/s	0,15	0,15	0,13	$0,14 \pm 0,02$
Energieverbrauch	Wh	85,9	87,9	83,1	$85,6 \pm 1,1$

Tabelle 15: Ergebnisse der Versuche zum Massenverlust von drei Chargen Pommes frites à 175 g

* Der durchschnittliche Gewichtsverlust wird durch das Verhältnis $\frac{\text{Gewichtsverlust}}{\text{Frittierzeit}}$ beschrieben

** Die Verdampfungsrate im Gleichgewicht entspricht der Steigung der Trendlinie ab dem Zeitpunkt, an dem sich ein gleichbleibender Gewichtsverlust einstellt (nach etwa 40 s)

Der Verlauf des Massenverlustes während des Frittierens von Pommes frites ist in Diagramm 3 dargestellt. Alle drei Chargen weisen einen vergleichbaren S-förmigen Verlauf auf. Für etwa 0,66 min bleibt das Gewicht konstant. Dies liegt daran, dass das Wasser in den Pommes frites gefroren ist und zunächst auftauen und erwärmt werden muss. Danach beginnt das Gewicht langsam abzunehmen und das Wasser fängt an zu verdampfen. Nach 4.50 min flacht die Kurve ab. Das Wasser verdampft langsamer. Die Steigung der Kurve klingt zum Ende des Frittierprozesses, nach etwa 8,00 min, weiter ab. Dies lässt darauf schließen, dass die Poren der Pommes sich mit Fett vollgesogen haben und das Wasser bis zum gewünschten Grad verdampft ist.

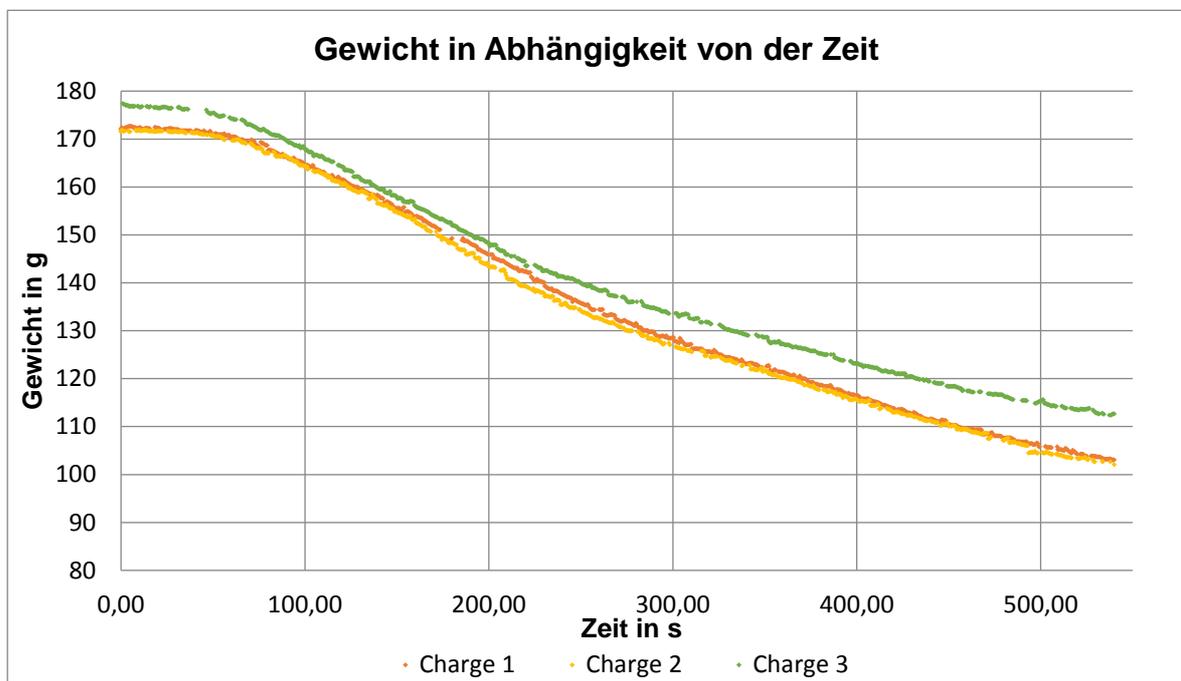


Diagramm 3: Massenverlust während des Frittierens von Pommes frites in Abhängigkeit von der Zeit

8.4.2. Versuchsdurchführung zum Massenverlust bei Knödel-Pulver

Die Versuche werden mit der ermittelten Chargengröße von Pommes frites durchgeführt. Zunächst wird das Knödel-Pulver mit Wasser angerührt. Für drei Versuche mit jeweils einer Chargengröße von 175 g werden 525 g fertige Knödelmasse benötigt. Um das gleiche Verhältnis von Trockenmasse und Wassergehalt zu generieren wie bei Pommes frites werden 378 g Wasser mit 147 g Pulver angerührt. Die Masse wird ansonsten wie in der Anweisung auf der Packung zubereitet (Kapitel 5.2.). Anschließend wird die Masse mit den Händen zu Kugeln mit einem Durch-

messer von 2,7 cm geformt. Die Kugeln werden bei -18 °C für mindestens 24 Stunden tiefgefroren, sodass eine Temperatur von -18 °C gewährleistet werden kann. Die Durchführung der Messung erfolgt wie bei den Pommes frites.

Ergebnisse

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der Messung. Die drei Chargen Knödel-Pulver-Kugeln weisen bezüglich ihres Frittierverhaltens Unterschiede auf. Besonders auffällig ist dabei Charge 1. Zum einen schwankt der Gewichtsverlust der drei Chargen zwischen 28,9 % (Charge 1) bis zu 33,3 %, (Charge 3). Somit variiert auch der durchschnittliche Gewichtsverlust zwischen 0,09 g/s und 0,11 g/s erheblich. Während die Verdampfungsrate im Gleichgewicht für Charge 1 bei 0,09 g/s liegt, ergibt sich für Charge 3 ein Wert von 0,12 g/s. Auch wurde die Grenze für die minimale Öltemperatur von 145 °C bei Charge 1 mit 126,8 °C und Charge 2 mit 144 °C unterschritten. Aus der Tabelle lässt sich erkennen, dass Charge 2 und 3 sich bezüglich der Werte analog verhalten. Daraus lässt sich schließen, dass die Messung von Charge 1 nicht fehlerfrei war. Die Wiederholbarkeit der Messungen wurde im Rahmen der Bachelorarbeit nicht untersucht. Auch der Energieverbrauch der drei Chargen schwankt von 84,9 Wh bis zu 92,1 Wh, so dass sich ein Mittelwert von $88,9 \pm 1,7$ Wh ergibt.

Größe	Einheit	Charge 1	Charge 2	Charge 3	Mittelwert
Startgewicht	g	178,1	174,8	179,2	177,4±1,1
Endgewicht	g	126,7	117,6	119,7	121,3±2,3
Gewichtsverlust	g	51,4	57,2	59,5	56,03±1,9
Gewichtsverlust	%	28,9	32,7	33,3	31,6±1,1
Minimale Frittieröltemperatur	°C	126,8	144	145,9	138,9±4,96
Durchschnittlicher Gewichtsverlust	g/s	0,09	0,11	0,11	0,10±0,04
Verdampfungsrate im Gleichgewicht	g/s	0,09	0,127	0,12	0,11±0,01
Energieverbrauch	Wh	84,9	89,8	92,1	88,9±1,7

Tabelle 16: Ergebnisse der Versuche zum Massenverlust von drei Chargen Knödel-Pulver-Kugeln à 175 g

Diagramm 4 bestätigt die Vermutung, des abweichenden Verhaltens während des Frittierens von Charge 1. Es beschreibt den Massenverlust während des Frittierens von Knödel-Pulver-Kugeln. Charge 2 und 3 weisen vergleichbar mit den Pommes frites einen S-förmigen Verlauf auf. Das Wasser beginnt jedoch schon nach etwa 0,25 min zu verdampfen. Nach ca.1,50 min steigt die Verdampfungsrate und die Kurve wird steiler, bevor sie nach 3,66 min abflacht. Nach ca. 5,83 min wird sie erneut steiler. Die Kurven von Charge 2 und Charge 3 liegen fast übereinander. Dies gilt bis zu einer Zeit von 2,50 min nach Frittierbeginn auch für die Kurve von Charge 1. Danach verdampft dort das Wasser viel langsamer als bei den anderen Versuchen. Nach etwa 5,00 min nimmt der Betrag der Steigung ab und ist ähnlich der der anderen Kurven.

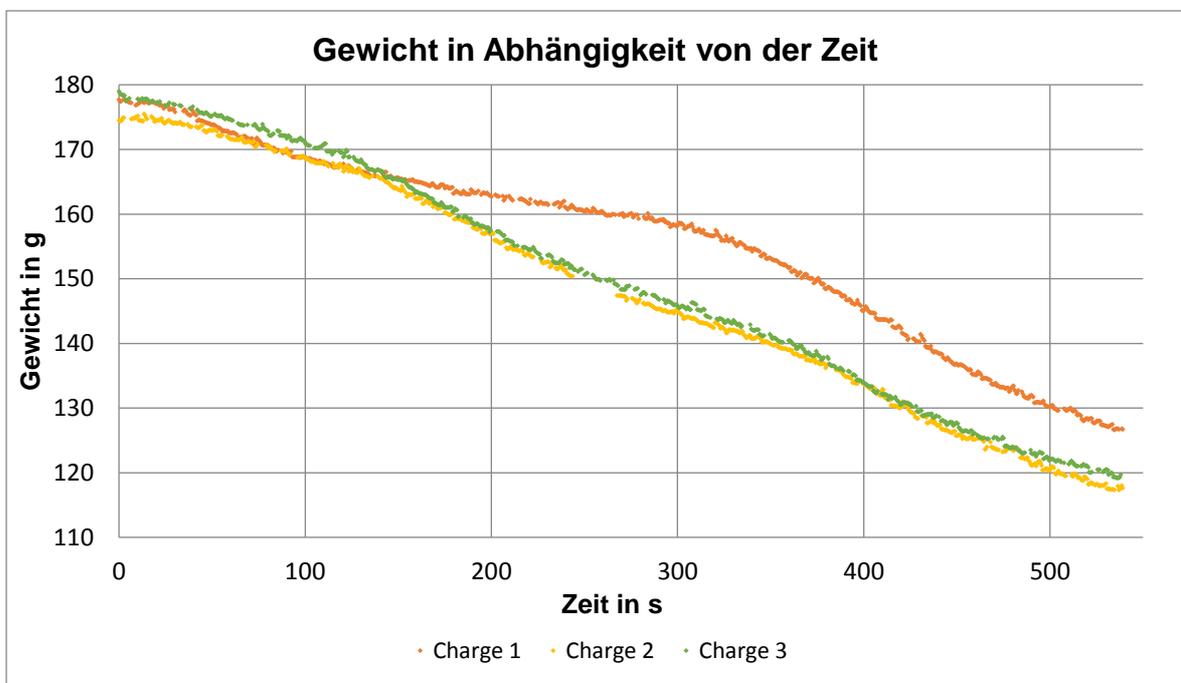


Diagramm 4: Massenverlust während des Frittierens von Knödel-Pulver-Kugeln in Abhängigkeit von der Zeit

Wie in Abb. 7 zu sehen ist, weisen die Knödel-Pulver-Kugeln nach dem Frittieren eine leichte Bräunung auf. Auffällig ist, dass einige der Kugeln während der Versuche aufgeplatzt sind. Dies ist an den Ausstülpungen zu erkennen.



Abbildung 7: Knödel-Pulver-Kugeln nach dem Frittieren

8.4.3. Versuchsdurchführung zum Massenverlust bei Kartoffelpüree-Pulver

Die Versuche werden mit der ermittelten Chargengröße von Pommes frites durchgeführt. Zunächst wird die Kartoffelpüreeemasse zubereitet. Für drei Versuche mit jeweils einer Charge von 175 g werden 525 g fertige Masse benötigt. Um das gleiche Verhältnis von Trockenmasse und Wassergehalt zu generieren wie bei Pommes frites, werden 378 Wasser mit 147 g Pulver angerührt. Zunächst wird das Wasser aufgekocht. Sobald dieses zu kochen beginnt, wird das Pulver mit einem Schneebesen untergerührt. Nach einer Quellzeit von 1,00 min wird die Masse erneut umgerührt. Anschließend muss die Masse abkühlen, bevor sie mit den Händen zu Kugeln mit einem Durchmesser von jeweils 2,7 cm geformt werden. Die Kugeln werden wie die Knödel-Pulver Kugeln für mindestens 24 Stunden bei -18 °C tiefgefroren. Die Durchführung der Messung erfolgt wie bei den Pommes frites.

Ergebnisse

Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse des Versuchs. Die drei Chargen weisen vergleichbare Daten mit geringen Streuung auf. Es ergibt sich ein Mittel von $33,8 \pm 0,3$ % für

den Gewichtsverlust und $0,12 \pm 0,01$ g/s für die Verdampfungsrate im Gleichgewicht. Lediglich bei dem Energieverbrauch fällt Charge 1 mit 108 Wh auf. Charge 2 und 3 haben nur 86,6 Wh bzw. 90,7 Wh Energie benötigt. Die Öltemperatur sinkt bei allen Chargen mit 143,8 °C (Charge 1), 142,4 °C (Charge 2) und 140,8 °C (Charge 3) knapp unter das laut Norm vorgeschriebene Minimum von 145 °C.

Größe	Einheit	Charge 1	Charge 2	Charge 3	Mittelwert
Startgewicht	g	175,6	174,5	173,8	174,6±0,4
Endgewicht	g	116,3	116,8	114,0	115,7±0,7
Gewichtsverlust	g	59,3	57,7	59,8	58,9±0,5
Gewichtsverlust	%	33,8	33,1	34,4	33,8±0,3
Minimale Frittieröltemperatur	°C	143,8	142,4	140,8	142,3±0,7
Durchschnittlicher Gewichtsverlust	g/s	0,11	0,11	0,11	0,11±0,00
Verdampfungsrate Im Gleichgewicht	g/s	0,13	0,12	0,13	0,12±0,01
Energieverbrauch	Wh	108,0	86,6	90,7	95,1±21,1

Tabelle 17: Ergebnisse der Versuche zum Massenverlust von drei Chargen Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln à 175 g

Auch der Gewichtsverlust über die Frittierzeit verhält sich bei allen drei Chargen ähnlich. Wie in Diagramm 5 zu erkennen ist, liegen die einzelnen Kurven dicht beieinander. Das Gewicht bleibt zunächst für ca. 0,66 min konstant, da das Eis erst schmelzen muss, bevor es allmählich anfängt zu verdampfen. Die Kurven flachen zwei bis dreimal ab, bevor die Steigung wieder steiler wird. Ein ausgeprägter S-förmiger Verlauf wie bei den Versuchen mit den Pommes frites (S. 43) und dem Knödelpulver (S. 45) ist nicht auszumachen.

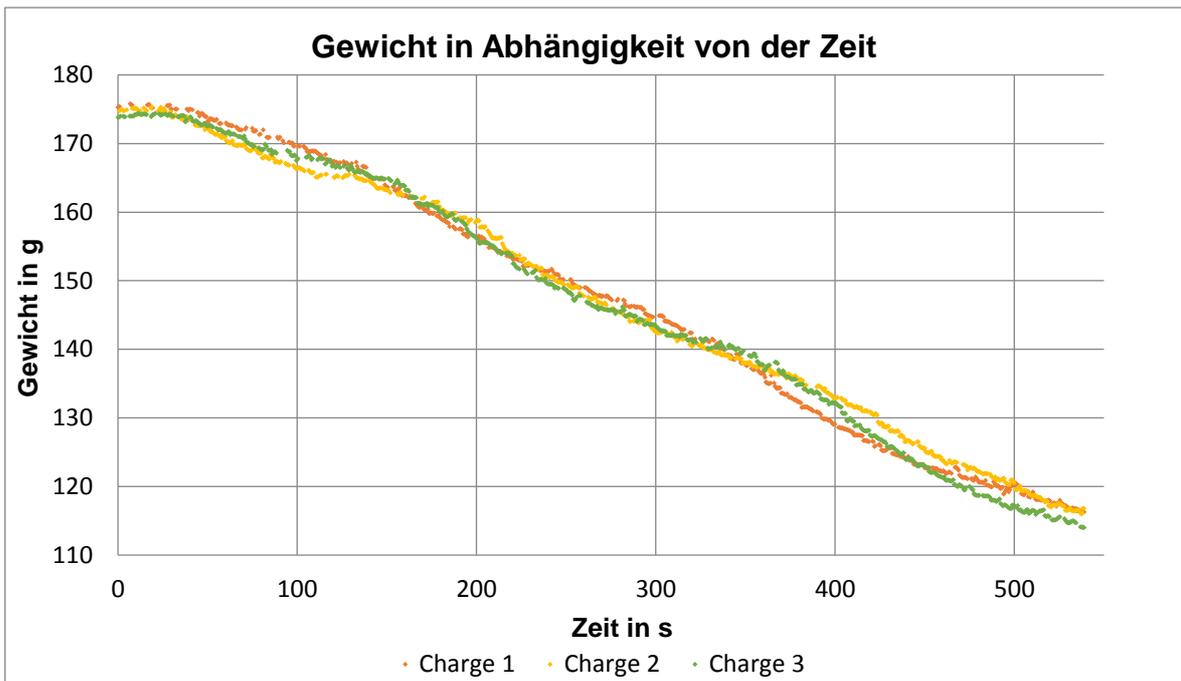


Diagramm 5: Massenverlust während des Frittierens von Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln in Abhängigkeit von der Zeit

Die Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln haben nach dem Frittieren einen braun-goldenen Farbton angenommen (Abb. 10). Von innen haben sie eine helle Farbe. Ebenso wie die Knödel-Pulver-Kugeln sind sie während des Frittierens teilweise aufgeplatzt.



Abbildung 8: Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln nach dem Frittieren

8.4.4. Versuchsdurchführung zum Massenverlust beim Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern

Für die Versuche wird mit 24 Reagenzgläsern gearbeitet. Diese Menge entspricht mit $482,6 \text{ cm}^2$ Oberfläche in etwa der Oberfläche von 175 g Pommes frites mit $464,4 \text{ cm}^2$ (Kapitel 6.2.). Es werden für drei Chargen dementsprechend 72 Reagenzgläser präpariert. Auf jede Charge Reagenzgläser werden mit einem Messbecher 126 g, der Wassergehalt von 175 g Pommes frites, verteilt. Dazu werden die Gläser in Reagenzglashalter gestellt und auf einer Waage platziert. Jedes Glas wird mit etwa 5 g Wasser befüllt. Anschließend werden die Reagenzgläser für 24 Stunden bei $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ tiefgefroren. Auf die Waage wird ein Tablett gelegt, darauf wird die Fritteuse platziert (Abb.9). Kurz vor Erreichen der Solltemperatur von $175 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ werden die Reagenzgläser in die Halterungsvorrichtung gehängt und mit kleinen Kugeln aus Stahlwolle verschlossen, um ein Überkochen des Wassers zu unterbinden (Abb. 10). Um das Reagenzglas in der Mitte der Halterungsvorrichtung wird der Temperaturfühler spiralförmig gewickelt, sodass seine Spitze die Gläser nicht berührt und nach unten zeigt (Abb. 11). Beim Erreichen der Solltemperatur von $175 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ wird das Konstrukt über die Fritteuse auf das Tablett gestellt, sodass die Reagenzgläser im Öl stehen und die Messung gestartet (Abb. 9). Nach Ablauf der Frittzeit wird die Konstruktion von dem Tablett gehoben und mit der nächsten Charge bestückt. Nach den Versuchen werden die Reagenzgläser in der Spülmaschine gereinigt.



Abbildung 9: Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern und Fritteuse "Maxi Fry" von oben

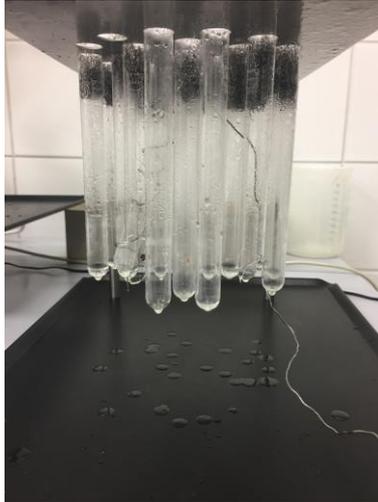


Abbildung 10: Mit Stahlwolle verschlossene Reagenzgläser in der Halterungsvorrichtung nach dem Frittieren



Abbildung 11: Skizze eines Reagenzglases umgewickelt mit einem Thermoelement

Für eine weitere Versuchsreihe werden die Reagenzgläser zusätzlich mit Kaninchendraht fixiert. Dazu werden sie, nachdem sie in der Halterungsvorrichtung hängen, durch den Kaninchendraht gefädelt (Abb. 12). Dieser soll ihnen Halt geben und eine genauere Aufzeichnung der Temperatur ermöglichen. Das Thermoelement wird so in den Draht eingeflochten, dass seine Spitze unter dem Ende der Reagenzgläser im Öl steht und nach unten zeigt. Die restliche Versuchsdurchführung entspricht der ersten Versuchsreihe.

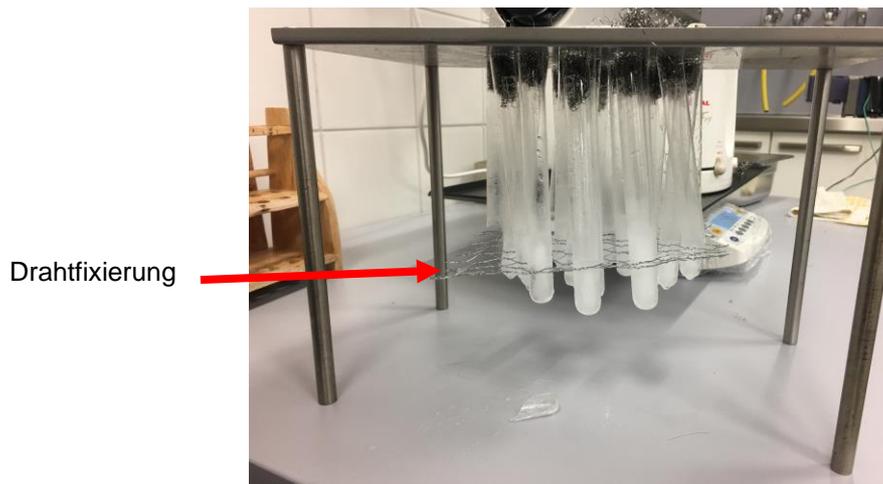


Abbildung 12: Reagenzgläser mit Drahtfixierung

Ergebnisse

Für die Ergebnisse werden die Daten des Zeitpunktes der Messung gewählt an dem 38 % des Wassers verdampft ist. Da das Wasser nicht gebunden ist, verdampft es viel schneller im Vergleich zu den weiteren Prüfmedien. Dies ist nach 3,70 min der Fall. Das Startgewicht entspricht der Trockenmasse der Reagenzgläser zuzüglich des Wassergehaltes von 126 g. Tabelle 18 zeigt einen Überblick der erhobenen Daten von Versuchsreihe 1. Der Gewichtsverlust der gesamten Masse der einzelnen Chargen schwankt zwischen 21,5 % (Charge 1), und 30,3 % (Charge 3). Beim durchschnittlichen Gewichtsverlust kommt es demzufolge auch zu erheblichen Unterschieden. Während bei Charge 1 durchschnittlich nur 0,09 g/s verdampfen, sind es bei Charge 3 0,13 g/s. Wie Tabelle 18 zu entnehmen ist, gibt es auch Unterschiede beim Energieverbrauch, so dass sich ein Mittelwert von $71,5 \pm 2,0$ Wh ergibt.

Größe	Einheit	Charge 1	Charge 2	Charge 3	Mittelwert
Startgewicht	g	227,3	228,0	227,4	227,6±0,2
Endgewicht	g	178,5	170,0	158,6	169,0±4,7
Gewichtsverlust	g	48,8	58,0	68,9	58,5±4,7
Gewichtsverlust	%	21,5	25,4	30,3	25,7±2,1
Minimale Frittieröltemperatur	°C	156,1	168,3	133,3	152,6±8,4
Durchschnittlicher Gewichtsverlust	g/s	0,09	0,11	0,13	0,11±0,01
Verdampfungsrate im Gleichgewicht*	g/s	0,30	0,25	0,39	0,31±0,04
Energieverbrauch	Wh	75,3	69,6	67,7	71,5±2,0

Tabelle 18: Ergebnisse der Versuchsreihe zum Massenverlust von drei Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern

* nach etwa 60 s

Beim Verlauf des Massenverlustes während des Frittierprozesses sind die Kurven von Charge 1 und 3 zunächst vergleichbar. Beide weisen einen leichten S-förmigen Verlauf auf, bei dem am Anfang keine Steigung zu sehen ist, da das Eis erst schmelzen muss. Die Kurve von Charge 1 flacht nach 3,50 min ab. Die Kurve von Charge 3 hingegen fällt nach der anfänglichen Verzögerung fast konstant. Bei Charge 2 bleibt das Gewicht zunächst auch konstant bevor es nach 0,75 min plötzliche rapide von ca. 230 g auf 215 g abfällt. Danach bleibt es für eine weitere Minute konstant, bevor ein gleichmäßiges Verdampfen stattfindet. Da während des Frittierens einige Reagenzgläser zerplatzt sind, lässt sich daraus schließen, dass dies bei Charge 2 zum Zeitpunkt des plötzlichen Gewichtsverlustes der Fall war und durch den Kontakt mit dem heißen Öl das Wasser schlagartig verdampft ist.

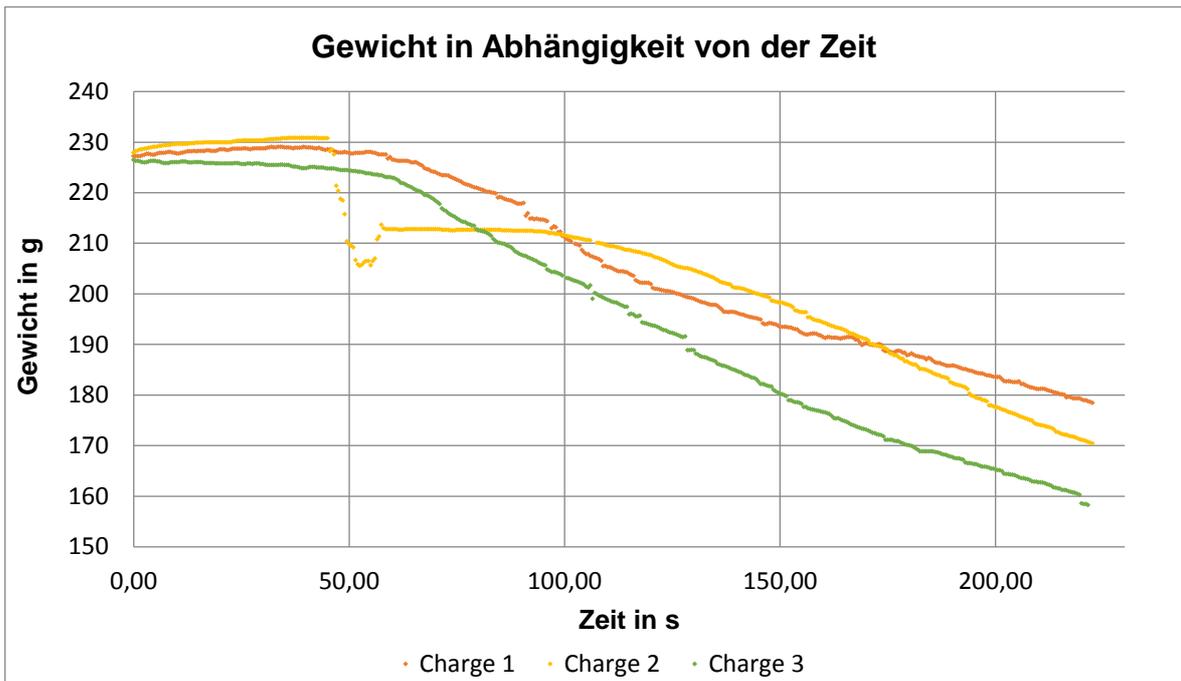


Diagramm 6: Massenverlust während des Frittierens des Verdampferkonstrukts aus Reagenzgläsern in Abhängigkeit von der Zeit

Nicht nur der plötzliche Gewichtsverlust ist auffällig, sondern auch der Verlauf der Öltemperatur-Kurven der einzelnen Chargen (Diagramm 7). Untypisch ist, dass die Öltemperatur bei allen Chargen in den ersten 0,16 (Charge 2 und 3) bis 0,66 min (Charge 1) ansteigt. Die Temperatur des Öls müsste durch den Kontakt mit den tiefgekühlten Reagenzgläsern normalerweise sinken. Die Kurven der einzelnen Chargen sind untereinander nicht vergleichbar, wie es bei den restlichen Prüfmedien der Fall ist. Dies kann zum einen an der Position des Temperaturfühlers liegen, als auch an der Taktung und somit an den Nachheizzeiten der Fritteuse.

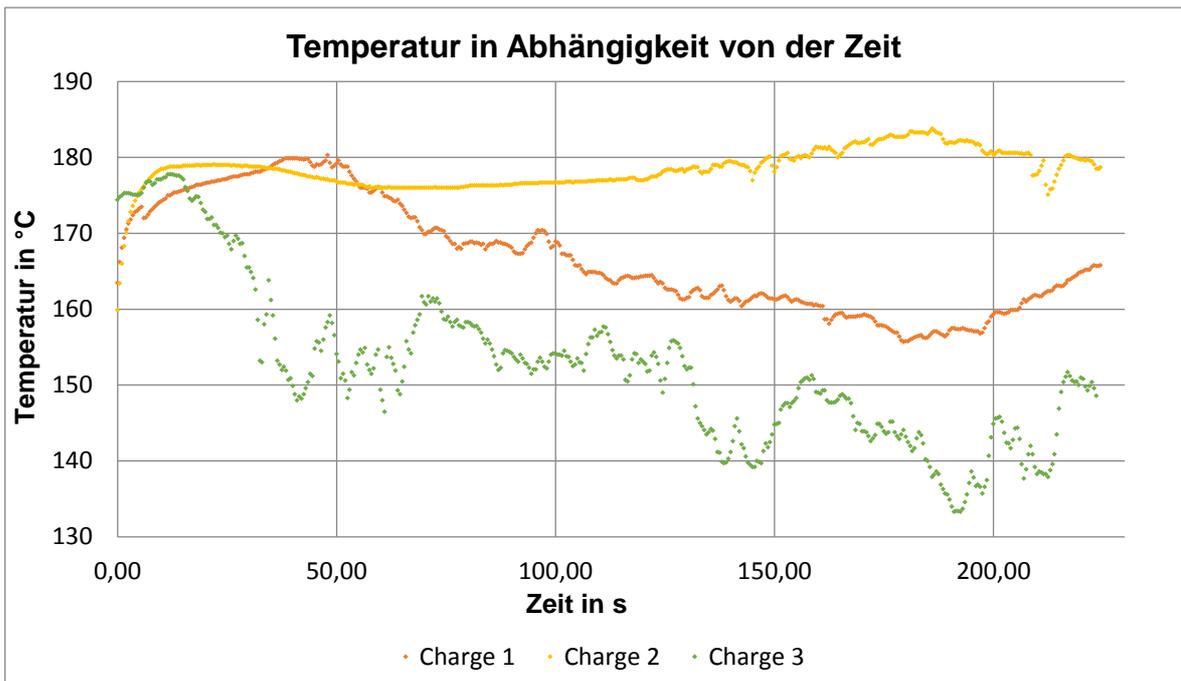


Diagramm 7: Temperaturverlauf während des Frittierens des Verdampferkonstrukts in Abhängigkeit von der Zeit

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden die Versuche erneut durchgeführt. Diesmal wurden die Reagenzgläser mit Hilfe von Kaninchendraht fixiert und der Temperaturfüller anders positioniert.

Tabelle 19 listet die Ergebnisse der Messung auf. Auffällig ist, dass die Werte für den Gewichtsverlust von Charge 3 bis zu 12 g geringer sind als bei Charge 1 und 2. Der Gewichtsverlust von Charge 3 liegt lediglich bei 70,3 g, während die anderen beiden Chargen einen Gewichtsverlust von 80,1 g (Charge 1) und 82,4 g (Charge 2) aufweisen. Der Gewichtsverlust ist mit einem Mittelwert von $33,7 \pm 1,4$ % deutlich höher als bei der Versuchsreihe ohne Fixierung. Dort lag er nur bei $25,7 \pm 2,1$ %. Der Energieverbrauch ist dem der ersten Versuchsreihe ähnlich. Es ergibt sich ein Mittelwert von $66,9 \pm 1,6$ Wh.

Größe	Einheit	Charge 1	Charge 2	Charge 3	Mittelwert
Startgewicht	g	229,9	229,7	231,5	230,4±0,5
Endgewicht	g	149,9	147,3	161,2	152,8±3,5
Gewichtsverlust	g	80,1	82,4	70,3	77,6±3,0
Gewichtsverlust	%	34,8	35,9	30,4	33,7±1,4
Minimale Frittieröltemperatur	°C	138,3	105,8	96,8	113,6±10,3
Durchschnittlicher Gewichtsverlust	g/s	0,15	0,15	0,13	0,14±0,01
Verdampfungsrate im Gleichgewicht*	g/s	0,25	0,19	0,27	0,24±0,02
Energieverbrauch	Wh	63,6	66,8	70,5	66,9±1,6

Tabelle 19: Ergebnisse der Versuchsreihe zum Massenverlust von drei Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern und zusätzlicher Halterung

* nach etwa 50 s

Beim Verlauf des Massenverlustes während des Frittierprozesses haben die Kurven einen untereinander vergleichbaren S-förmigen Verlauf. Der Zeitpunkt, an dem das Wasser anfängt zu verdampfen und somit das Gewicht sinkt, ist jedoch bei den einzelnen Chargen verschoben (Diagramm 8). Während bei Charge 2 die Wasserverdampfung schon nach ca. 0,66 min beginnt, fällt das Gewicht bei Charge 3 erst nach ca. 1,17 min. Danach bleibt die Steigung bei allen drei Chargen in etwa gleich, bevor sie nach weiteren 2,00 min abflacht.

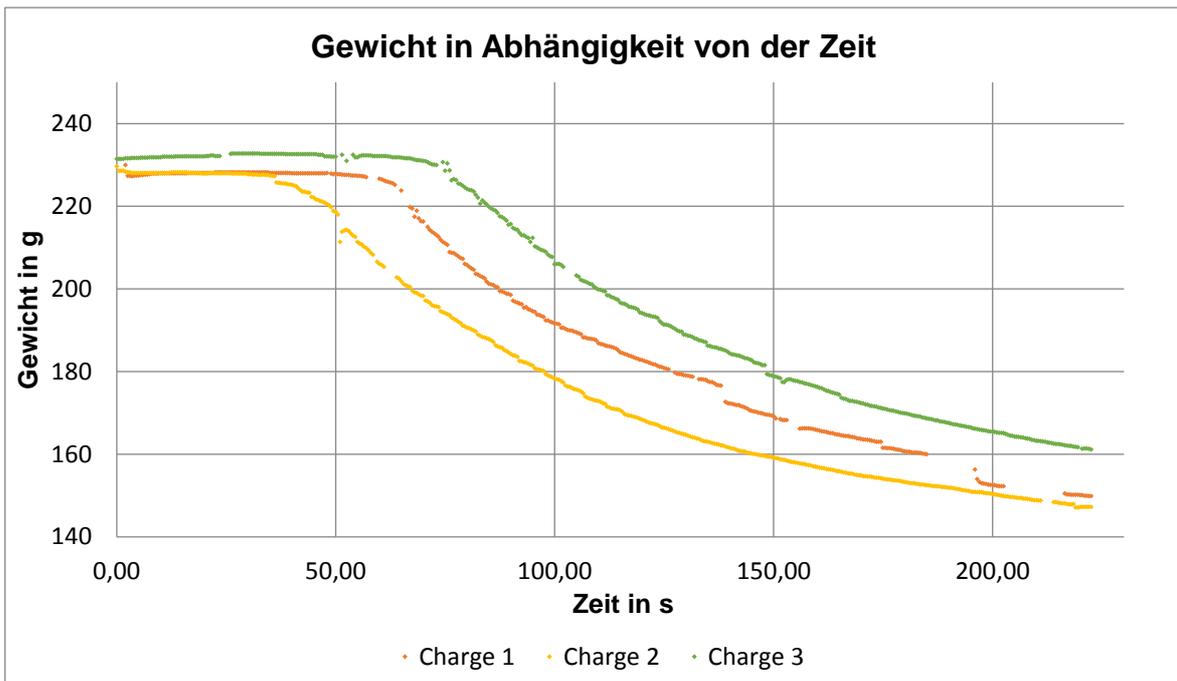


Diagramm 8: Massenverlust während des Frittierens des Verdampferkonstrukts mit zusätzlicher Fixierung in Abhängigkeit von der Zeit

Durch die zusätzliche Fixierung kann die Temperatur nicht besser erfasst werden. In Diagramm 9 ist zu sehen, dass sich die Kurven der einzelnen Chargen in keinsten Weise ähnlich verhalten und keine verwertbaren Ergebnisse liefern. Während bei Charge 1 und 2 die Temperatur zunächst auf 177,2 °C bzw. 170,5 °C ansteigt, sinkt sie bei Charge 3 auf 96,8 °C ab. Es wird angenommen, dass das Thermoelement während des Positionierens der Halterungsvorrichtung in der Fritteuse verrutscht ist und so zu starkem Kontakt mit den gefrorenen Reagenzgläsern hat. Es liefert keine verlässlichen Daten zu der Öltemperatur, sondern wird von der Temperatur der Reagenzgläser beeinflusst. Um verlässliche Daten zur Öltemperatur zu erhalten, müsste das Thermoelement anders fixiert werden. Trotz der Fixierung, durch die ein Aneinanderschlagen der Reagenzgläser verhindert wird, sind mehr als die Hälfte der Reagenzgläser zerbrochen. Dies liegt vermutlich daran, dass der Temperaturunterschied zwischen den -18 °C des Gefrierschranks und den 175 °C des Öls zu groß ist und die Gläser dem nicht standhalten. Bei der Versuchsreihe mit Fixierung sind einzelne Gläser schon beim Einfädeln in die Halterungsvorrichtung zerbrochen und wurden ersetzt. Da es sich um die gleichen Reagenzgläser handelt, die bei der Versuchsreihe ohne Fixierung verwendet worden sind, ist es denkbar, dass sie während der erstmaligen Benutzung durch das Frittieren porös geworden sind, sodass sie der Temperatur von -18 °C nicht standgehalten haben.

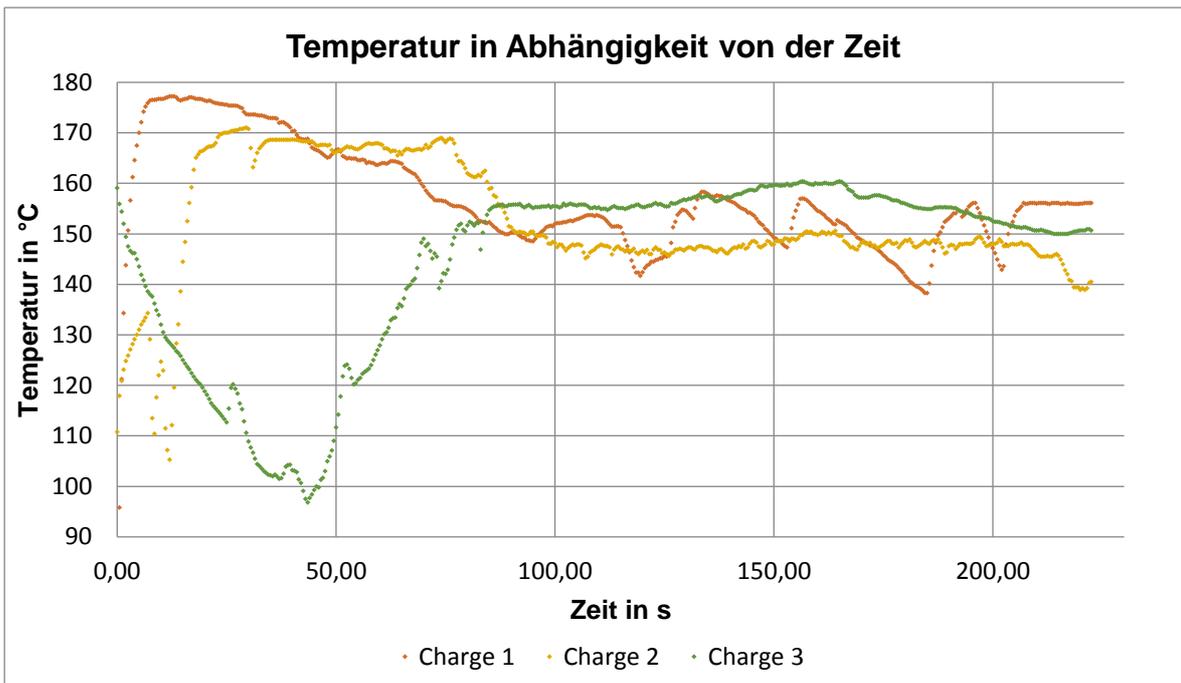


Diagramm 9: Temperaturverlauf während des Frittierens des Verdampferkonstrukts mit zusätzlicher Fixierung in Abhängigkeit von der Zeit.

9. Darstellung der Ergebnisse im Vergleich

Da es bei den Messungen jeweils immer eine Charge gibt, die von den Daten der anderen erheblich abweicht, wird für die die Darstellung der Ergebnisse im Vergleich nicht der Mittelwert, sondern jeweils eine charakteristische Charge, die das jeweilige Prüfmedium am besten widerspiegelt, gewählt. Für den Versuch mit den Pommes frites, dem Knödel- und Kartoffelpüree-Pulver wurde Charge 2 als charakteristische Charge gewählt. Für das Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläser ohne und mit Fixierung Charge 3. Folgende Tabelle zeigt die Daten im Überblick.

Messgröße	Einheit	Pommes frites	Knödel-Pulver	Kartoffelpüree-Pulver	Reagenzgläser	Reagenzgläser mit Fixierung
Masse	g	171,6	174,8	174,5	227,4	231,5
Wasseranteil	g	123,6	125,0	125,6	126,0	126,0
Wasseranteil	%	72,0	72,0	72,0	55,4	54,4
Trockenmasse	g	48,1	48,9	48,9	101,4	105,5
Trockenmasse	%	28,0	28,0	28,0	44,6	45,6
spezifische Wärmekapazität Trockenmasse	kJ/(kg·K)	2,40	2,40	2,40	0,83	0,83
Oberfläche	cm ²	464,4	348,3	348,3	482,4	482,4
Temperatur min	°C	145,3	144,0	142,4	133,3	96,8
Frittierzeit	s	540	540	540	222,5	222,5
Gewichtsverlust	g	69,5	57,2	57,7	68,78	70,5
Gewichtsverlust	%	40,5	32,7	33,1	30,3	30,4
durchschnittlicher Gewichtsverlust	g/s	0,13	0,11	0,11	0,13	0,13
Verdampfungsrate im Gleichgewicht	g/s	0,15	0,12	0,12	0,40	0,27
Energieverbrauch	Wh	87,9	89,8	86,6	67,7	70,5

Tabelle 20: Übersicht der Versuchsergebnisse der einzelnen Prüfmedien im Vergleich

Wie in Tabelle 20 zu sehen ist, beträgt der Wasseranteil bei allen fünf Prüfmedien 126 ± 2 g. Jedoch liegt das Startgewicht des Verdampferkonstrukts aus Reagenzgläsern mit 227,4 g bzw. 231,5 g deutlich über dem Startgewicht der anderen Prüfmedien. Dies ist auf die Trockenmasse zurückzuführen. Der als Trockenmasse definierte Glasanteil ist mit 100 g mehr als doppelt so schwer wie der Stärkeanteil mit ca. 48 g. Es braucht fast dreimal so viel Energie, die Trockenmasse der anderen

Prüfmedien um die gleiche Temperatur zu erhöhen wie das Glas. Die Oberfläche der Reagenzgläser ist mit $482,4 \text{ cm}^2$ nur $3,9 \%$ größer als die von 175 g Pommes frites mit $464,4 \text{ cm}^2$. Die Oberfläche der einzelnen Kugeln der Prüfmedien Kartoffelpüree- und Knödel-Pulver entsprechen der Oberfläche von einer Pommes frites. Die einzelnen Kugeln sind jedoch schwerer als eine einzelne Pommes frites. Somit werden weniger benötigt, um ein Gewicht von 175 g zu erreichen, und die Gesamtoberfläche ist dementsprechend um 25% kleiner. Sie beträgt $348,3 \text{ cm}^2$. Die minimale Öltemperatur liegt mit 144 °C (Knödel-Pulver) und $142,4 \text{ °C}$ (Kartoffelpüree-Pulver) 1 K bzw. $2,6 \text{ K}$ unterhalb der laut DIN-Norm vorgeschriebenen minimalen Temperatur von 145 °C des Frittieröls. Die Verläufe der Kurven sind jedoch analog zu denen von Pommes frites. Die Temperatur sinkt und steigt zu den gleichen Zeitpunkten (Diagramm 13). Die Heizung der Fritteuse taktet zweimal nach. Die Temperaturaufzeichnung der Versuche mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern werden aus den in Kapitel 8.3. genannten Gründen nicht weiter berücksichtigt. Die Frittierzeit beträgt bei den Pommes frites, dem Knödel-Pulver und dem Kartoffelpüree-Pulver $9,00 \text{ min}$. Wie in Diagramm 10 zu sehen ist verdampft das Wasser bei den Versuchen mit den Reagenzgläsern doppelt so schnell, da es nicht gebunden ist. Um bessere Vergleiche ziehen zu können, wurde für das Diagramm das Startgewicht des Verdampferkonstrukts aus Reagenzgläsern mit dem Startgewicht der anderen Versuchsmedien übereinandergelegt. Die Steigung der Kurven ist im Vergleich zu den anderen Prüfmedien viel steiler. Nach $3,71 \text{ min}$, dem Endpunkt des Frittierzyklus, sind mit $68,9 \text{ g}$ $30,3 \%$ des Wassers verdampft. Bei der Versuchsreihe mit Fixierung ist der Gewichtsverlust zu diesem Zeitpunkt in etwa gleich und beträgt $70,5 \text{ g}$. Der Gewichtsverlust des Knödel- und Kartoffelpüree-Pulvers ähnelt sich mit $32,7 \%$ und $33,1 \%$, liegt jedoch unter dem Gewichtsverlust der Pommes frites ($40,5 \%$). Die Steigung der Prüfmedien Knödel- und Kartoffelpüree-Pulver ist geringer als bei den Pommes frites. Ein S-förmiger Verlauf, der durch Schwankungen im Gewichtsverlust während des Frittierens zustande kommt, ist bei allen dreien zu erkennen.

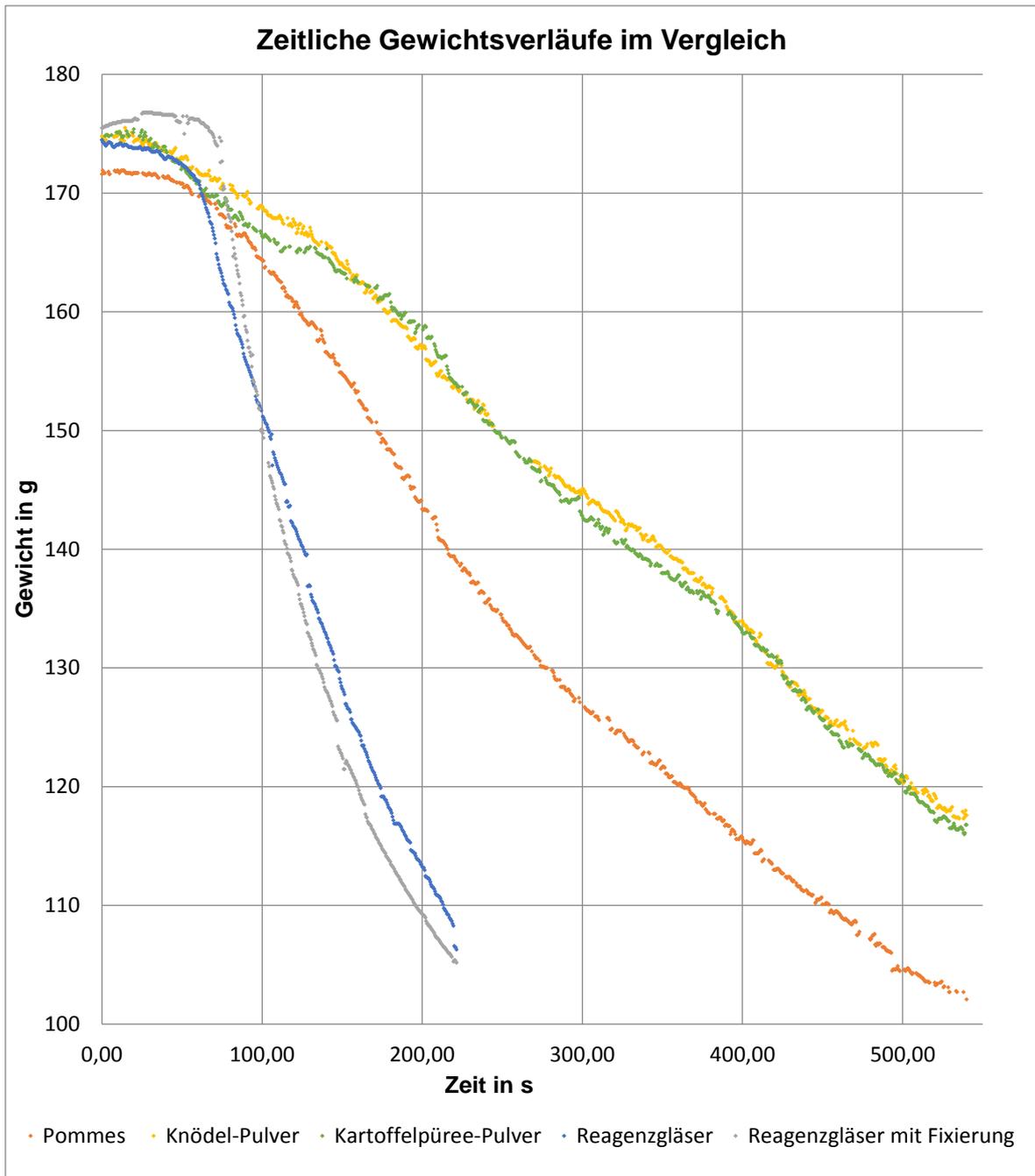


Diagramm 10: Gewichtsverlauf der einzelnen Prüfmedien in Abhängigkeit von der Zeit im Vergleich

Um 175 g Pommes frites zu frittieren, benötigt die Fritteuse 87,9 Wh. Der Energieverbrauch bei dem Knödel- und Kartoffelpüree-Pulver beträgt 89,8 Wh bzw. 86,6 Wh. Er ist damit um 2,3 % größer bzw. um 1 % kleiner als der Energieverbrauch bei den Pommes frites. Auch hier liegen die Werte dicht beieinander. Durch die kürzere Frittierzeit, werden bei dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern nur 67,7 Wh (ohne Fixierung) und 70,5 Wh (mit Fixierung), in etwa 20 % weniger, verbraucht. Diagramm 11 stellt die Energieverbräuche der einzelnen Prüfmedien gegenüber.

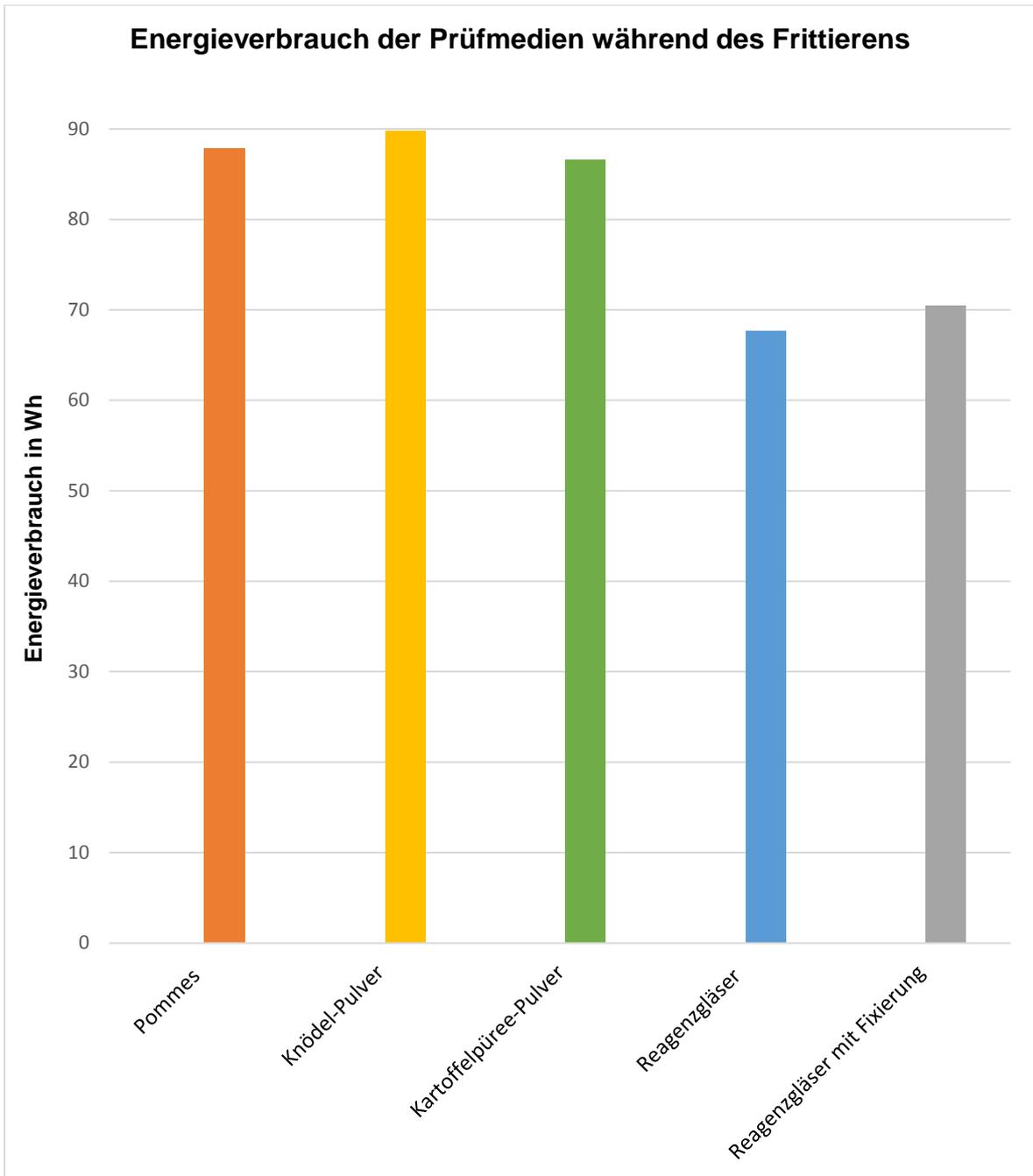


Diagramm 11: Übersicht des Energieverbrauchs der einzelnen Prüfmedien während des Frittierens

In Diagramm 12 ist zu sehen, dass der Energieverbrauch der anderen Prüfmedien zu diesem Zeitpunkt geringer ist. Bei den Pommes frites sind es ca. 45 Wh, bei dem Knödel-Pulver 50 Wh und bei dem Kartoffelpüree-Pulver 48 Wh. Weiterhin ist auffällig, dass die Kurven viel früher ansteigen. Bei beiden Versuchen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern ist dies nach etwa 0,33 min der Fall. Die Öltemperatur sinkt früher ab und die Fritteuse muss somit auch früher nachheizen,

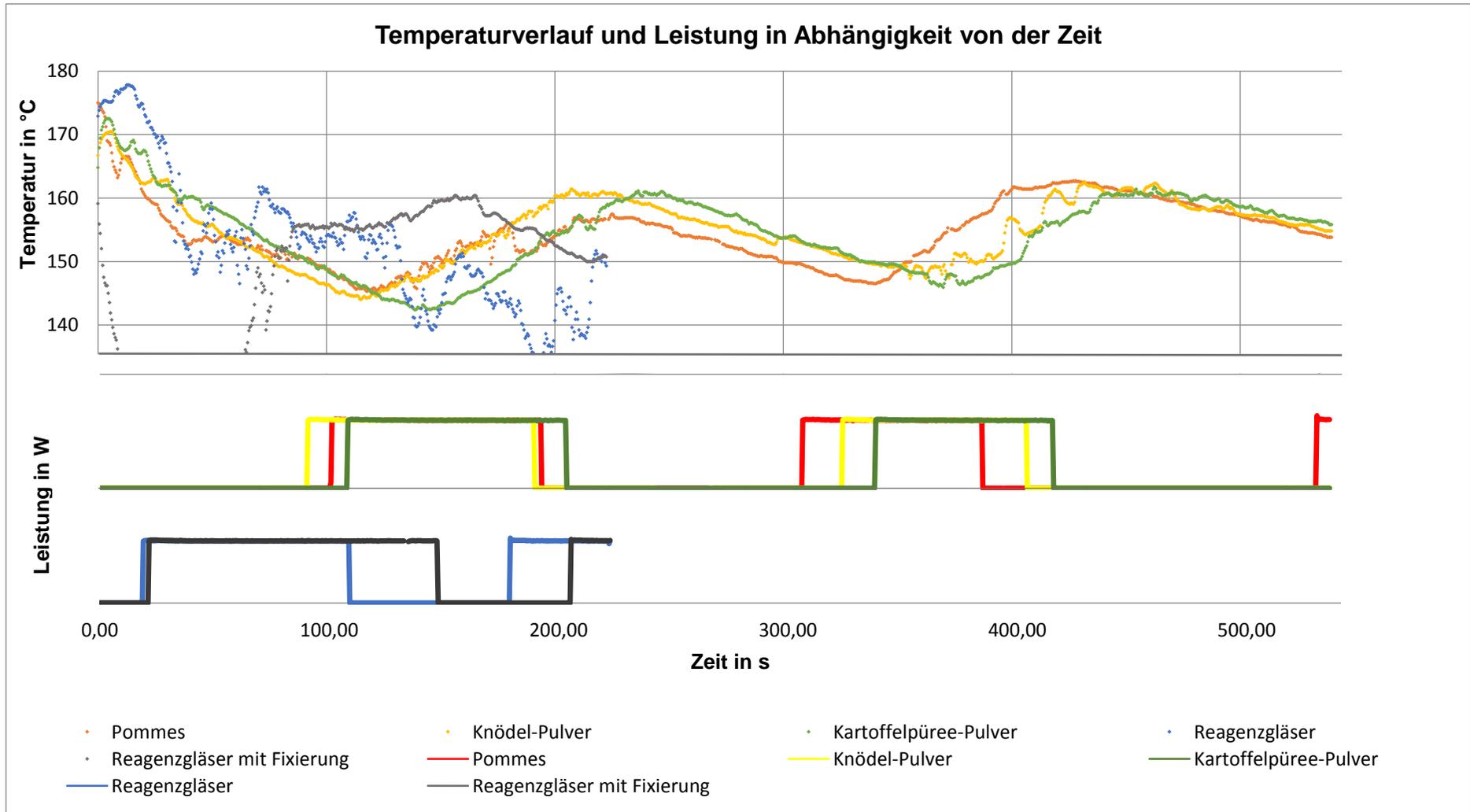


Diagramm 13: Temperaturverlauf und Leistung der einzelnen Prüfmedien in Abhängigkeit von der Zeit im Vergleich

10. Alternative: Berechnung des Energieverbrauchs

Wie in Kapitel 6.1. schon erwähnt, lässt sich der Energieverbrauch, der zum Frittieren von Pommes frites benötigt wird, auch berechnen. Lediglich der Energieverbrauch während des Warmhaltezyklus über zwei Stunden nach DIN 18873-3:2016-12 muss gemessen werden. Im Folgenden wird die Berechnung für den Aufheizzyklus und den Frittierzyklus näher erläutert.

Die Wärmemenge in kJ, die notwendig ist, um eine definierte Masse um eine definierte Temperatur zu erwärmen, lässt sich mit Formel 1 berechnen. Für die Masse m wird die Menge des Öls mit 1,9 kg eingesetzt. Die spezifische Wärmekapazität c der Ölmischung wird in der DIN 18873-3:2016-12 mit 1,9 kJ/(kg·K) angegeben (DIN 18873-3:2016-12, S. 7). Die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ des Öls von Raumtemperatur (23 °C) auf Betriebsöltemperatur (175 °C) beträgt 152 K. Für das Aufheizen des Öls auf Betriebstemperatur werden rechnerisch 152,4 Wh gebraucht.

Die Berechnung des Warmhaltezyklus über zwei Stunden hängt von vielen verschiedenen Einflussfaktoren, wie der Umgebungstemperatur sowie der Fläche und Isolierung der Fritteuse, ab und wäre sehr aufwendig zu berechnen. Da das Frittiergut noch nicht zugegeben ist und die Messergebnisse folglich nicht beeinflusst, wird hier das Ergebnis der Messung nach DIN 18873-3:2016-12 verwendet. Für den Warmhaltezyklus über zwei Stunden hat die Fritteuse Maxi Fry 567,3 Wh verbraucht.

Die Berechnung des Energieverbrauchs für eine Charge Pommes frites ist in Kapitel 6.1. ausführlich beschrieben. Für das Frittieren einer Charge von 175 g Pommes frites werden rechnerisch 71,4 Wh benötigt. Für die Messung nach DIN 18873-3:2016-12 werden drei Chargen frittiert. Nach jeder Charge sinkt die Öltemperatur ab und muss erst wieder auf die Betriebstemperatur von 175 °C aufgeheizt werden. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Öltemperatur nach dem Frittieren einer Charge 155 °C beträgt. Man erhält das Ergebnis von 20,1 Wh pro Charge, die zum erneuten Aufheizen auf 175 °C notwendig sind. Für den Frittierzyklus ergibt sich somit ein Gesamtenergieverbrauch von 60,2 Wh. Der berechnete Gesamtenergieverbrauch für die Messung nach DIN 18873-3:2016-12 liegt bei 1270 Wh. Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse im Überblick. Zusätzlich werden die Ergebnisse für die von MKN hergestellte Fritteuse London II mit einer Chargengröße von 800 g dargestellt, mit der Frau König in ihrer Masterarbeit gearbeitet hat.

Messgröße	Einheit	175 g	800 g
Masse Öl	kg	1,9	8,2
spezifische Wärmekapazität	Kj/(kg·K)	1,9	1,9
Umgebungstemperatur	°C	23,0	23,0
Temperatur max	°C	175,0	175,0
Chargengröße	g	175,0	800,0
Berechneter Energieverbrauch zum Aufheizen	Wh	152,4	657,0
Gemessener Energieverbrauch Warmhaltezyklus	Wh	567,3	811,0**
Berechneter Energieverbrauch beim Frittieren von drei Chargen	Wh	214,2	979,3
Berechneter Energieverbrauch zum erneuten Aufheizen des Öls	Wh	60,2	259,4
Berechneter Gesamtenergieverbrauch für den Frittierzyklus	Wh	274,4	1238,7
Gesamtenergieverbrauch*	Wh	1270	3950

Tabelle 21: Theoretische Berechnung des benötigten Gesamtenergieverbrauchs zum Frittieren von Pommes frites nach DIN 18873-3:2016-12

*Formel 17; ** Werte stammen aus der Masterarbeit von Frau König

Nachfolgend werden die berechneten Energieverbräuche mit den gemessenen verglichen. Zusätzlich werden die gemessenen Werte von der Versuchsreihe Pommes frites 175 g auf eine Masse von 800 g hochgerechnet, um die Werte mit den von Frau König erhobenen Daten vergleichbar zu machen. Da Frau König die 4,3-fache Menge an Öl und die 4,6-fache Menge an Pommes frites verwendet hat, werden die Daten für das Öl mit dem Faktor 4,3 und die Werte für die Pommes frites mit dem Faktor 4,6 multipliziert. Für den Warmhaltezyklus über 2 Stunden wird für die berechneten Werte jeweils der gemessene Wert verwendet.

Messgröße	Einheit	Gemessene Werte		Berechnete Werte		
		175 g	800 g	175 g	Hochrechnung auf 800 g	800 g
Energieverbrauch Vorheizen	Wh	232,7	672,0*	152,4**	1002,9	657,0**
Energieverbrauch Warmhalten	Wh	567,3	811,0*	567,3	811,0*	811,0*
Energieverbrauch Charge 1	Wh	85,9	356,0*	71,4	392,7	326,4
Energieverbrauch Charge 2	Wh	87,9	362,0*	71,4	401,8	326,4
Energieverbrauch Charge 3	Wh	83,1	339,0*	71,4	379,9	326,4
Nachheizen	Wh	60,2	259,4	60,2	259,4	259,4
Energieverbrauch Frittierzyklus	Wh	317,1	1316,4*	274,4	1433,8	1238,7
Gesamtenergieverbrauch	Wh	1434,1	4115,7	1268,5	4681,4	3945,4
Energieverbrauch pro kg***	Wh/kg	1361,9	858,3	1209,5	975,0	822,9

Tabelle 22: Berechnete und gemessene Energieverbräuche zum Frittieren von Pommes frites im Vergleich

* Werte stammen aus der Masterarbeit von Frau König, ** ohne Wärmeverluste, *** Formel 18

Die berechneten Werte liegen zwischen 4 und 11 % unter den gemessenen Daten. Für den Gesamtenergieverbrauch für die Fritteuse von Tefal werden 1268,5 Wh berechnet. Gemessen sind es aber mit 1434,1 Wh 11,2 % mehr. Bei der Fritteuse London II und somit für 800 g Pommes frites wird ein Gesamtenergieverbrauch von 3945,4 Wh berechnet. Gemessen sind es mit 4115,7 Wh 4,1 % mehr. In den einzelnen Teilschritten der Messung, die in Tabelle 21 aufgelistet sind, ist zu erkennen, dass diese Unterschiede vor allem durch das Frittieren der einzelnen Chargen zustande kommen. Die gemessenen Werte der Chargen liegen bei 175 g Pommes frites zwischen 14 und 17 % über den berechneten von 71,4 Wh. Bei den 800 g Pommes frites sind es zwischen 4 und 9%. Die Fritteuse ist ein offenes System die Wärme an die Umgebung abgibt. Diese Wärme muss nachproduziert werden,

wodurch sich ein höherer Energieverbrauch ergibt. Die Berechnungen berücksichtigen diese Verluste nicht. Auffällig ist auch, dass die gemessenen Werte von Frau König für 800 g Pommes frites deutlich unter den hochgerechneten Werten für 800 g Pommes frites liegen. Dies könnte zum einen daran liegen, dass die Frittierzeit bei der Fritteuse Maxi Fry trotz ihres kleineren Fassungsvermögens bei 9,00 min lag. Die London II von MKN hat nur eine Zeitspanne von 4,50 min für den Frittierprozess benötigt. Durch die längere Frittierzeit kommt es zu einem erhöhten Energieverbrauch für die einzelnen Chargen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Berechnungen Werte liefern, die nicht fernab von den gemessenen liegen, jedoch die Realität nicht zu 100 % widerspiegeln.

11. Diskussion

Die anfangs formulierte Zielsetzung dieser Bachelorarbeit konzentriert sich darauf, die Wasserverdampfung beim Frittierprozess von Pommes frites zu untersuchen und auf Grundlage des dadurch entstehenden zeitlichen Verlaufs des Massenverlustes ein Ersatzmedium zu ermitteln, welches für die Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 an gewerblichen Fritteusen verwendet werden kann.

Aus theoretischer Sicht ergeben sich für die Prüfmedien Knödel- und Kartoffel-Püree-Pulver viele Überschneidungen mit den Pommes frites. Sowohl der Anteil von Trockenmasse und Wassergehalt ist mit 28 zu 72 % derselbe als auch die spezifische Wärmekapazität mit 2,4 kJ/(kg·K). Die Oberfläche der einzelnen Kugeln entspricht mit 23,2 cm² der einer einzelnen Pommes frites. Lediglich die Oberfläche der Gesamtmasse ist bedingt durch das Gewicht der einzelnen Kugel um 25 % erhöht, was zu unterschiedlichen Ergebnissen führen kann.

Im Praxistest weist das Knödel-Pulver ebenfalls ein den Pommes frites ähnliches Verhalten auf. Der mittlere Gewichtsverlust der Knödel-Pulver-Kugeln beträgt $56,0 \pm 1,9$ g und liegt damit 17,5 % unter dem mittleren Gewichtsverlust der Pommes frites von $67,9 \pm 1,1$ g. Des Weiteren liegt er auch unter dem in der Norm vorgeschriebenen Gewichtsverlust von 36 ± 2 %. Bei näherer Betrachtung der Kurven im Vergleich zueinander (Diagramm 10) ist zu erkennen, dass das Gewicht der Knödel-Pulver-Kugeln langsamer sinkt und die Steigung insgesamt flacher ist als bei den Pommes frites. Dies könnte daran liegen, dass das Wasser besser gebunden ist und die Oberfläche der Kugeln zu dicht ist. Auch beginnt im Vergleich das Wasser um ca. 15 s schneller an zu verdampfen. Die minimale Frittieröltemperatur von 144,0 °C (Diagramm 12) liegt zwar 1 K unter dem laut Norm vorgeschriebenen Minimum von 145 °C, jedoch ist dies akzeptabel. Trotz allem ist der mittlere Energieverbrauch nur 3,71 % höher als beim Frittieren von Pommes frites.

Der mittlere Gewichtsverlust der Kartoffelpüree-Pulver-Kugeln liegt bei $58,9 \pm 0,5$ g und ist damit 14 % geringer als der von Pommes frites. Wie bei dem Knödel-Pulver ist er mit $33,8 \pm 0,3$ % 2,2 % geringer als in der Norm vorgeschrieben. Im Verlauf liegen die Kurven der Prüfmedien Kartoffelpüree-Pulver und Knödel-Pulver fast übereinander (Diagramm 10), so dass sich der zeitliche Verlauf des Masseverlustes gleicht. Für die mittlere minimale Frittieröltemperatur ergibt sich ein Wert von $142,3 \pm 0,7$ °C, der somit 2,7 K unter dem vorgeschriebenen Minimum von 145 °C

liegt. Jedoch liegt die Öltemperatur beim Start der Messung im Mittel lediglich bei 170,5 °C. Das Maximum von 175 ± 5 °C wird nicht ausgenutzt. Eine höhere Minimaltemperatur, die das in der Norm vorgeschriebene Minimum von 145 °C nicht unterschreitet, könnte durch eine höhere Starttemperatur erzielt werden. Der mittlere Energieverbrauch beträgt $95,1 \pm 21,1$ Wh, wobei er bei Charge 1 mit 108,0 Wh wesentlich höher ist als bei den anderen beiden Messungen. Charge 2 mit 86,6 Wh und Charge 3 mit 90,7 Wh weichen nur um 1,2 bzw. 6,0 % von dem Energieverbrauch von Pommes frites ab.

Von der theoretischen Betrachtung und den Versuchsergebnissen kommen sowohl das Knödel-Pulver als auch das Kartoffelpüree-Pulver als Ersatzmedium für die Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 an gewerblichen Fritteusen in Betracht. Auch wenn die Werte nicht exakt denen von Pommes frites entsprechen, weisen die beiden Prüfmedien ein ähnliches Frittierverhalten und Energieverbrauch beim Frittieren auf. Das Handling ist einfach und der Wassergehalt kann genau bestimmt werden. Wie bereits in Kapitel 5. erwähnt wurden beiden Prüfmedien Zutaten hinzugefügt. Eine weitere Abschlussarbeit könnte darüber Aufschluss geben, ob die Prüfmedien in ganz Europa erhältlich sind und die Zusammensetzung immer die gleiche ist. Außerdem unterscheiden sie sich im Vergleich zu Pommes frites in der Form. Die Form der Prüfmedien sollte von Kugeln auf Stäbchen geändert werden, um gleiche Voraussetzungen zu schaffen. Die Kugeln sind beim Frittieren teilweise aufgeplatzt, was an sich kein Problem für den Frittierprozess darstellt, jedoch vergrößert sich dadurch ihre Oberfläche. Daraus ergibt sich die Frage, ob geformte Stäbchen während des Frittierens ihre Form behalten oder auseinanderbrechen würden. Des Weiteren sollte eine Anpassung der Gesamtoberfläche vorgenommen werden. Weitere Versuchsreihen sowie die Prüfung ihrer Verfügbarkeit und Zusammensetzung sind durchaus lohnenswert und haben durchaus Potential eine Lösung für die Suche nach einem Ersatzmedium mit sich zu bringen.

Bei dem Verdampfkonstrukt aus Reagenzgläser ist die Trockenmasse mit 77,3 g um 37,9 % schwerer als der Stärkeanteil von 175 g Pommes frites mit 49 g. Durch die geringere spezifische Wärmekapazität von Glas ($0,83 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) wird dieser Faktor jedoch ausgeglichen. Übereinstimmung für das Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern und die Pommes frites ergeben sich für den Wasseranteil und die Gesamtoberfläche des im Öl stehenden Glases, welche mit 3,7 % unwesentlich größer als die der Pommes frites. Der mittlere Gewichtsverlust liegt bei $58,5 \pm 4,7$ g.

10 g weniger als der mittlere Gewichtsverlust von Pommes frites. Auch hier ist der mittlere Gewichtsverlust mit $25,7 \pm 2,1$ % geringer als der in Norm vorgeschrieben von 36 ± 2 %. Im Verlauf ist zu erkennen, dass das Wasser, da es nicht gebunden ist, deutlich schneller verdampft als bei den anderen Prüfmedien (Diagramm 10). Die Temperaturmessung wurde durch die Platzierung des Thermoelements beeinflusst und liefert keine eindeutigen Ergebnisse. Der mittlere Energieverbrauch liegt bei $71,5 \pm 2,0$ Wh und damit 19,7 % unter dem von Pommes frites. Dies könnte auf die kürzere Frittierzeit zurückzuführen sein. Neben dem Thermoelement gibt es noch weitere Fehlerquellen bei der Versuchsdurchführung mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern. Zum einen fängt das Wasser an zu kochen und spritzt aus der Öffnung der Gläser heraus. Die Stahlwolle, die dies verhindern soll, wird durch den entstehenden Druck im Inneren teilweise aus den Gläsern herausgedrückt. Auch bersten bei den Messungen jeweils 2 bis 5 Gläser, so dass das Wasser in das heiße Öl fließt und schlagartig verdampft. Eine Fixierung der Gläser mit Kaninchendraht kann das Zerschlagen der Gläser nicht verhindern. Auch konnte die Fixierung des Thermoelements an dem Kaninchendraht die Aufzeichnung der Temperatur nicht verbessern. Von seiner theoretischen Betrachtung gesehen, ist das Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern geeignet. Es muss nur einmal gebaut werden und ist wiederverwertbar. Ferner fallen die Fragen, die beim Knödel- und Kartoffelpüree-Pulver bezüglich der Verfügbarkeit und der Zusammensetzung aufkommen, weg. Die praktische Betrachtung in der Versuchsdurchführung hat jedoch ergeben, dass das Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern mit den genannten Punkten zu viele Fehlerquellen aufweist, die zu Abweichungen führen. Durchaus interessant wäre die Prüfung, ob durch die Verwendung von Reagenzgläsern mit einer größeren Wandstärke das Zerbersten der Gläser verhindert werden könnte. Weiterhin müssten die Fragen geklärt werden, wie ein Überkochen des Wassers aus der Öffnung der Reagenzgläser vermieden werden kann und wie das Thermoelement platziert werden muss, um verlässliche Daten bezüglich der Temperatur aufzuzeichnen.

Auch ist es durchaus möglich den Energieverbrauch theoretisch zu berechnen, jedoch wird hier von idealen Werten ausgegangen ohne Verluste an die Umgebung. Im Vergleich liegen die berechneten Ergebnisse 4 -11 % unterhalb des gemessenen Energieverbrauchs. Sie können als Richtwert fungieren, liefern aber keine realen

Werte. Durch den Vergleich der Daten der Energieverbrauchsmessung von Fritteusen unterschiedlicher Hersteller wäre zu prüfen, ob sich ein einheitlicher Prozentsatz ermitteln lässt, der die Wärmeverluste an die Umgebung beschreibt. Weiterhin müsste der Berechnung nach der Energieverbrauch der unterschiedlichen Fritteusen mit dem gleichen Fassungsvermögen und der gleichen Chargengröße derselbe sein. Individuelle Bauweisen und Ausstattungen bezüglich des Nachheizens und der Taktung, die für Unterschiede sorgen und für Marketingzwecke benutzt werden, werden nicht berücksichtigt.

Zusammenfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit zur Untersuchung der Wasserverdampfung beim Frittierprozess von Pommes frites und Prüfung möglicher Ersatzmedien für die Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 an gewerblichen Fritteusen zeigt anhand verschiedener Versuchsreihen, wie sich der Massenverlust beim Frittieren von Pommes frites und unterschiedlicher Prüfmedien zeitlich verhält.

Anhand einer theoretischen Berechnung wird deutlich, dass mit 58 % der größte Teil der Energie beim Frittieren von Pommes frites für das Verdampfen von Wasser benötigt wird. Die Verteilung von Trockenmasse und Wasser sowie deren Zusammensetzung und der Verlauf des Gewichtsverlustes während des gesamten Frittiervorganges sind von entscheidender Bedeutung bei der Suche nach einem Ersatzmedium.

Im Verlauf der Arbeit werden die Prüfmedien Knödel-Pulver, Kartoffelpüree-Pulver und ein Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern bezüglich ihrer theoretischen Eignung untersucht und bewertet. Im anschließenden Praxistest wird anhand der Versuchsdurchführung nach DIN 18873-3:2016-12 die praktische Eignung geprüft. Die theoretische Betrachtung ergibt, dass die Prüfmedien alle als mögliche Ersatzmedien für die Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 in Frage kommen. Im Laufe der durchgeführten Versuchsreihen zeigen sich jedoch große Unterschiede bezüglich der Praktikabilität, des zeitlichen Verlaufs des Massenverlustes sowie des Energieverbrauchs. Bei der Messung mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern gibt es mehrere Fehlerquellen, wie ein Zerbersten der Gläser oder ein Überkochen des Wassers aus der Öffnung, welches zu einer Verfälschung der Masse führen. Eine Verwendung des Verdampferkonstrukts aus Reagenzgläsern in der derzeitigen Ausführung wird daher als praxisnahes Ersatzmedium für die Energieverbrauchsmessung ausgeschlossen.

Sowohl das Knödel-Pulver als auch das Kartoffelpüree-Pulver können in ihrer theoretischen Betrachtung und im Praxistest teilweise überzeugen. Beide Medien weisen bei der Untersuchung des zeitlichen Massenverlustes ein den Pommes frites ähnliches Verhalten auf. Sie erweisen sich als mögliche Ersatzmedien für die Energieverbrauchsmessung an Großküchenfritteusen nach DIN 18873-3, wenn auch weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Verfügbarkeit, Zusammensetzung und Anpassung der Form besteht.

Abstract

The paper investigates into the evaporation of water during the frying process of french fries to examine potential substitutional mediums for measuring the energy usage of industrial deep fryers according to DIN 18873-3. Conducting a series of tests, the study outlines the temporal dependency of the weight loss of french fries on various test mediums during the frying process.

A theoretical calculation reveals that 58% of the energy usage during the frying process of french fries is required for the evaporation of water only. Therefore, the dispersion of dry weight, the proportion of water as well as the composition of both and the temporal course of the weight loss during the frying process are of vital importance for finding a substitutional medium.

The paper begins by examining and assessing the theoretical applicability of the various test mediums dumpling powder, mashed potato powder and an evaporator construct from test tubes. The following field test checks the practicability of the above-mentioned mediums according to DIN 18873-3:2016-12.

The theoretical approach shows that all test mediums verify as potential substitutional mediums for the measurement of energy usage according to DIN 18873-3. However, the mediums show ample differences in their practicability, their temporal course of weight loss and their usage of energy throughout the series of tests. For instance, there are multiple sources of error concerning the evaporator construct, which evoke a distortion of weight like rupture of test tubes or overboiling of water. Thus the usage of the evaporator construct as an applicable substitutional medium for measuring the energy usage is ruled out in its present realization.

The dumpling powder and the mashed potato powder prove to be possible substitutional mediums in the theoretical approach as well as in the field test. Concerning the temporal weight loss, both showed a similar performance to the french fries. Consequently these two mediums are potential substitutional mediums for measuring the energy usage of industrial deep fryers according to DIN 18873-3 albeit the need for further research concerning their availability, composition and adjustment of form.

Literaturverzeichnis

Adler, G. (1971). *Kartoffel und Kartoffelerzeugnisse*. Berlin: Verlag Paul Parey in Berlin und Hamburg.

Brau et al., B. (2005). *Küche und Technik - Handbuch für gewerbliche Küchen*. Bonn: aid Infodienst e.V..

Bwl.ch, (2016). *Food Waste*. Abgerufen am 9. August 2017 von https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/politik/food-waste.html#dokumente__content_blw_de_home_politik_food-waste_jcr_content_par_tabs

Demtröder, W. (2015). *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*. Berlin-Heidelberg: Springer.

DIN 18873-3:2016-12. *Methoden zur Bestimmung des Energieverbrauchs von Großküchengeräten - Teil 3: Fritteusen*.

Din.de, (2017). *Entstehung einer Norm*. Abgerufen am 29. Januar 2017 von <http://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/din-norm>

Dr. Büchner, F. (o.J.). *Technik im Haushalt*. Hamburg: Lichtenberg.

Elmadfa et al., I. (2016). *Die große GU Nährwert Kalorien Tabelle*. München: Gräfe und Unzer Verlag.

Fao.org, (2015). *The State of Food Insecurity in the World*. Abgerufen am 8. August 2017 von <http://www.fao.org/3/a-i4646e.pdf>

Gertz, C. & Matthäus, B. (2012). *Optimal Frittieren – Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Fettwissenschaft*. Abgerufen am 25. Januar 2017 von http://www.dgfett.de/material/frittierempfehlungen_dgf.pdf

- Glonner, L. (2014). *Untersuchungen zur Ermittlung von Ersatzstoffen zur Substitution von Lebensmitteln bei der Energieverbrauchsmessung gemäß nach DIN 18873-3*. (Ba) Hochschule Albstadt-Sigmaringen.
- Grehn, J. & Krause, J. (2009). *Metzler Physik*. Braunschweig: Westermann Schroedel Diesterweg Schöningh Winklers GmbH.
- Hki.de, (2017). *Leitbild des HKI Industrieverbandes Haus-, Heiz- und Küchentechnik e. V.*. Abgerufen am 21. Januar 2017 von <http://www.hki-online.de/de/pdf/leitbild-version.pdf>
- Hki.de, (2017). *Normenausschuss Heiz-, Koch- und Wärmegeräte*. Abgerufen am 21. Januar 2017 von <http://www.hki-online.de/de/downloads/gk/fnh-imagebroschuere.pdf>
- König, S. (2015). *Untersuchung des Frittierprozesses bei Pommes frites und Entwicklung eines neutralen Prüfmediums für die Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3 an Großküchenfritteusen*. (Ma) Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG.
- Schöberl, H. (2010). *Formelsammlung Verfahrenstechnik der Lebensmittelproduktion*.
- Testo AG, (o.J.). *Praxis Fibel - Frittierölmessung*. Lenzkirch.
- Wesselak, V. (2013). *Regenerative Energietechnik*. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag.
- Zirwes, K. (1987). *Kartoffeln und Pommes frites in der gewerblichen Speisezubereitung*. Hildesheim: Georg Olms Verlag.

Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

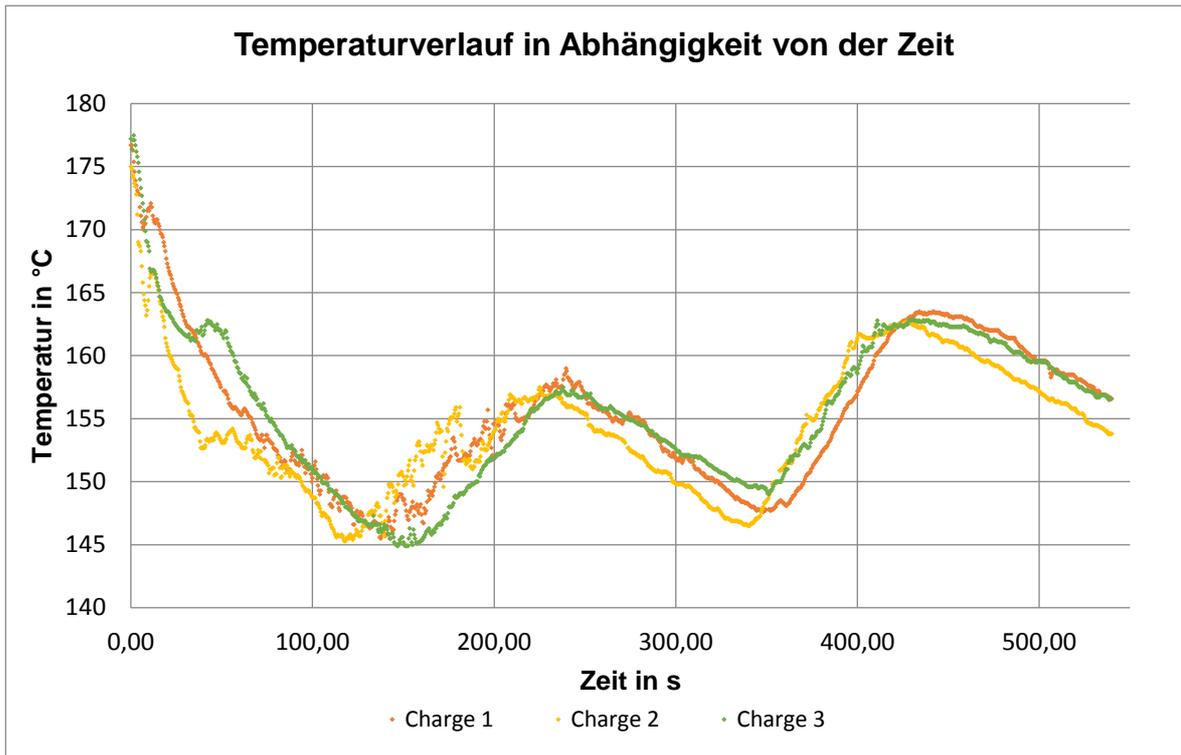
Datum, Ort

Unterschrift des Studierenden

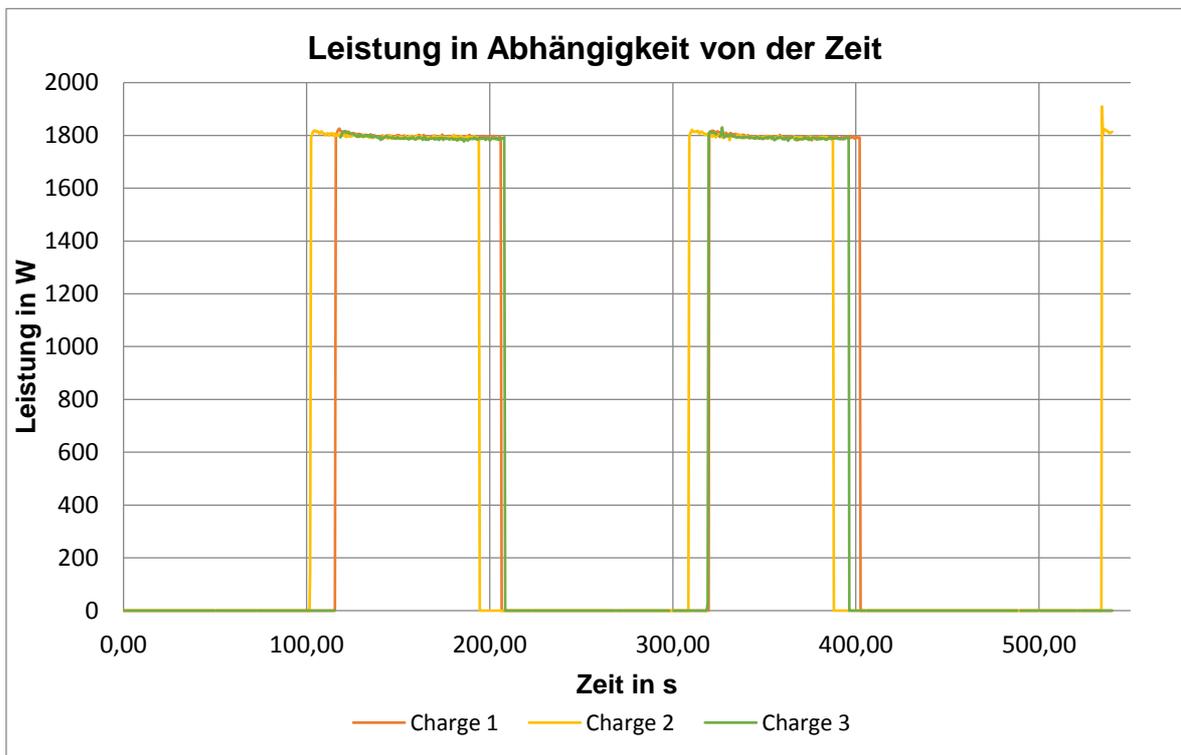
Anhang

Anhang 1: Temperaturverläufe der Messungen mit Pommes frites	80
Anhang 2: Leistungsverläufe der Messungen mit Pommes frites.....	80
Anhang 3: Spannungsverläufe der Messungen mit Pommes frites.....	81
Anhang 4: Energieverbrauch der Messungen mit Pommes frites.....	81
Anhang 5: Temperaturverläufe der Messungen mit Knödel-Pulver.....	82
Anhang 6: Leistungsverläufe der Messungen mit Knödel-Pulver	82
Anhang 7: Spannungsverläufe der Messungen mit Knödel-Pulver	83
Anhang 8: Energieverbrauch der Messungen mit Knödel-Pulver	83
Anhang 9: Temperaturverläufe der Messungen mit Kartoffelpüree-Pulver	84
Anhang 10: Leistungsverläufe der Messungen mit Kartoffelpüree-Pulver.....	84
Anhang 11: Spannungsverläufe der Messungen mit Kartoffelpüree-Pulver.....	85
Anhang 12: Energieverbrauch der Messungen mit Kartoffelpüree-Pulver	85
Anhang 13: Leistungsverläufe der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern	86
Anhang 14: Spannungsverläufe der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern	86
Anhang 15: Energieverbrauch der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern	87
Anhang 16: Leistungsverläufe der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern mit zusätzlicher Fixierung	87
Anhang 17: Spannungsverläufe der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern mit zusätzlicher Fixierung	88
Anhang 18: Energieverbrauch der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern mit zusätzlicher Fixierung	88

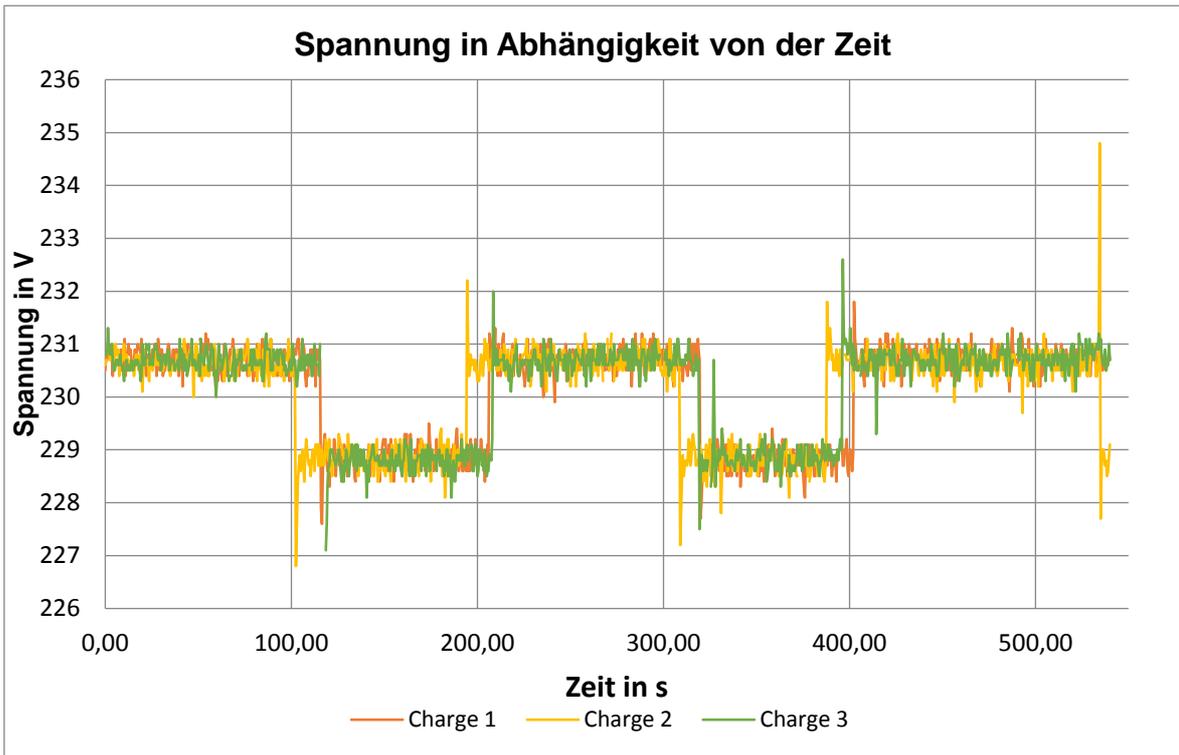
Auf einer beigelegten CD befinden sich die zu den Diagrammen zugehörigen Daten der Energieverbrauchsmessung nach DIN 18873-3:2016-12.



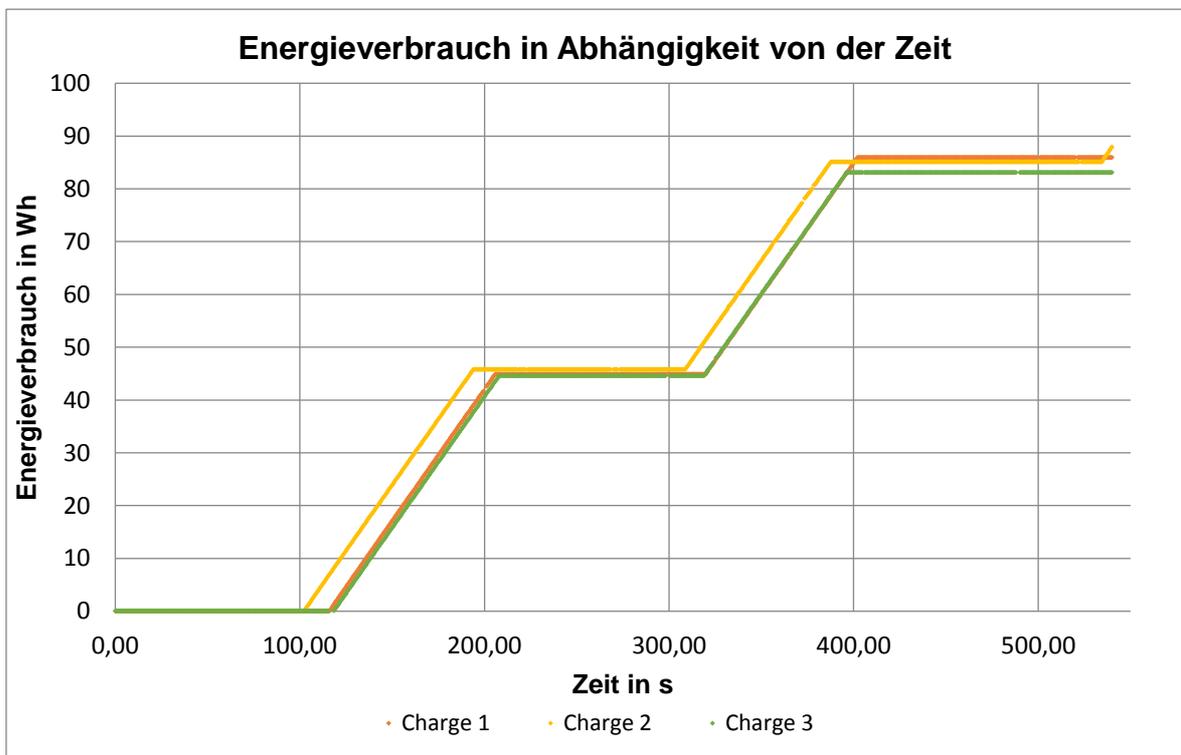
Anhang 1: Temperaturverläufe der Messungen mit Pommes frites



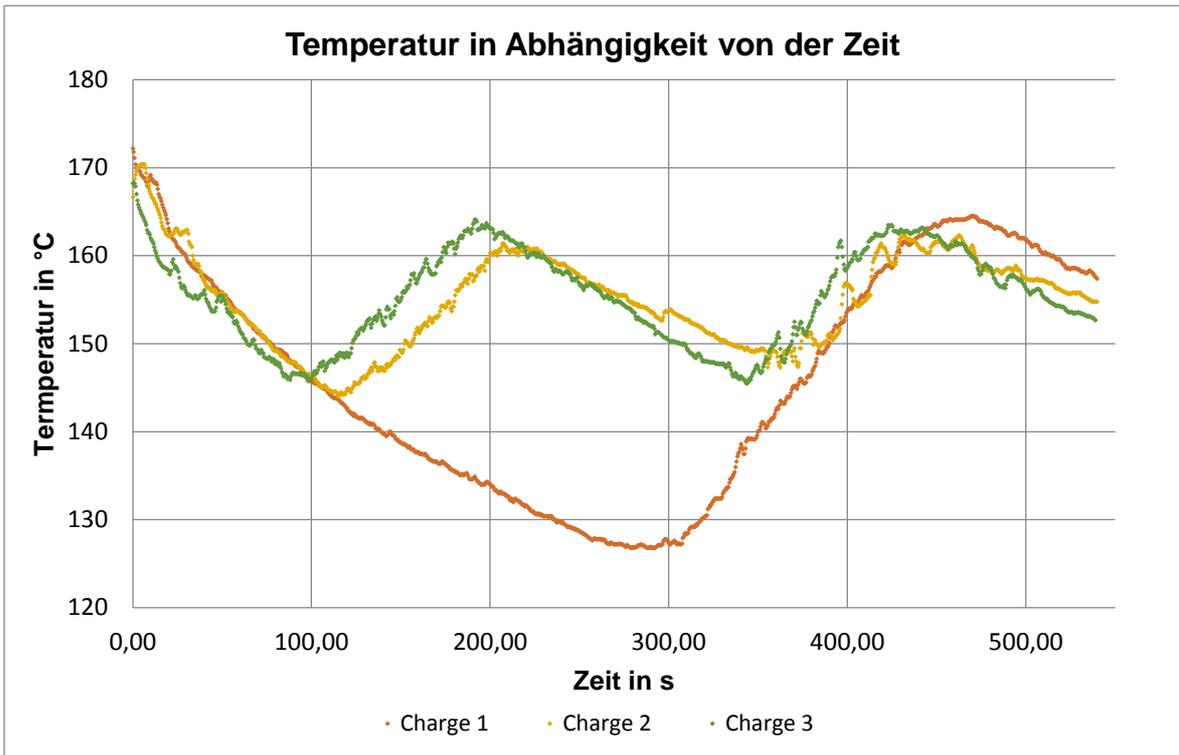
Anhang 2: Leistungsverläufe der Messungen mit Pommes frites



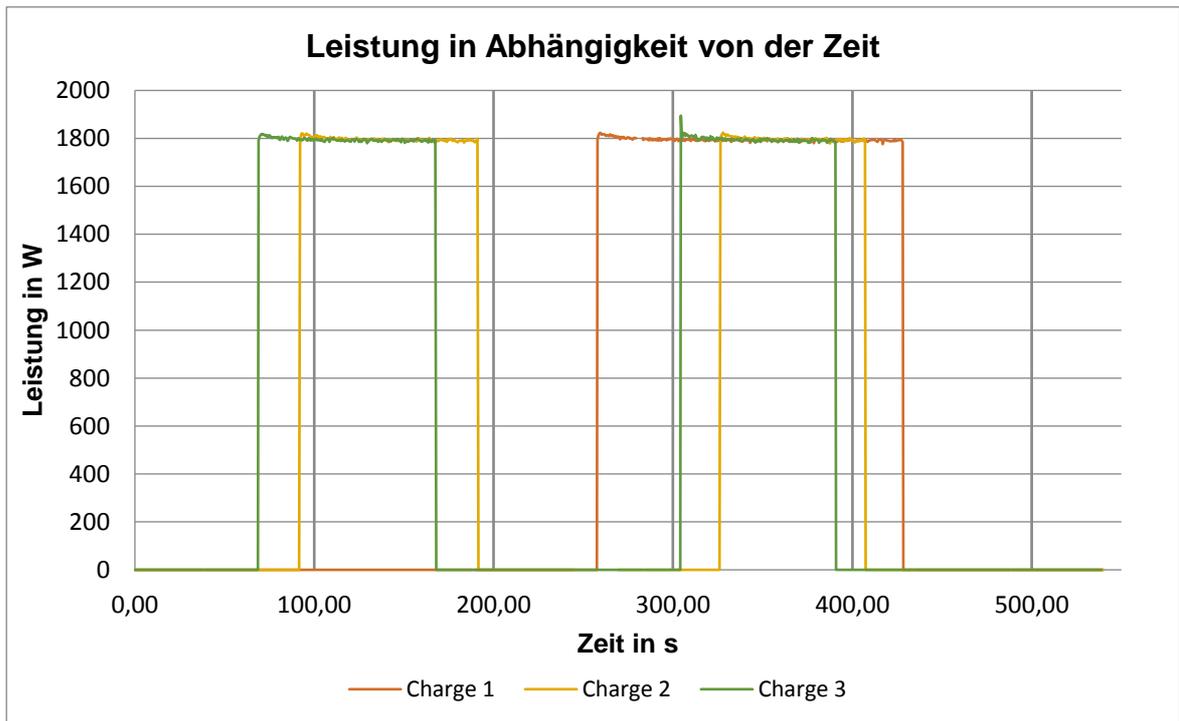
Anhang 3: Spannungsverläufe der Messungen mit Pommes frites



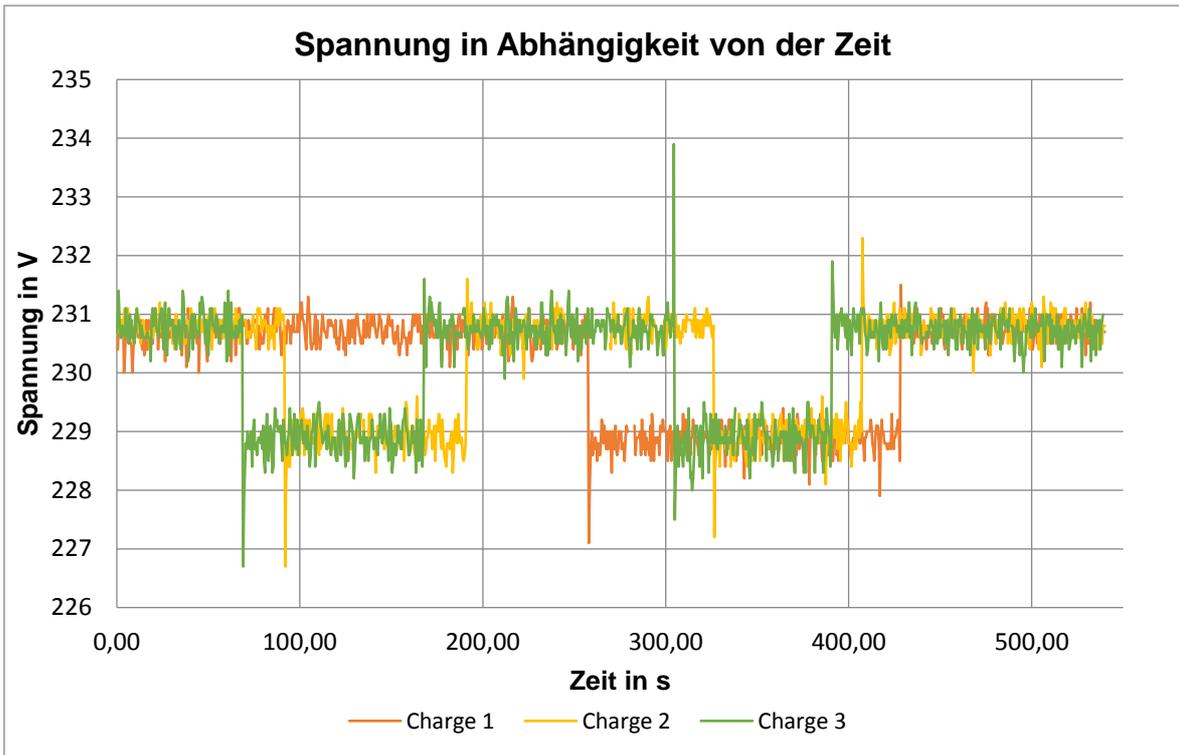
Anhang 4: Energieverbrauch der Messungen mit Pommes frites



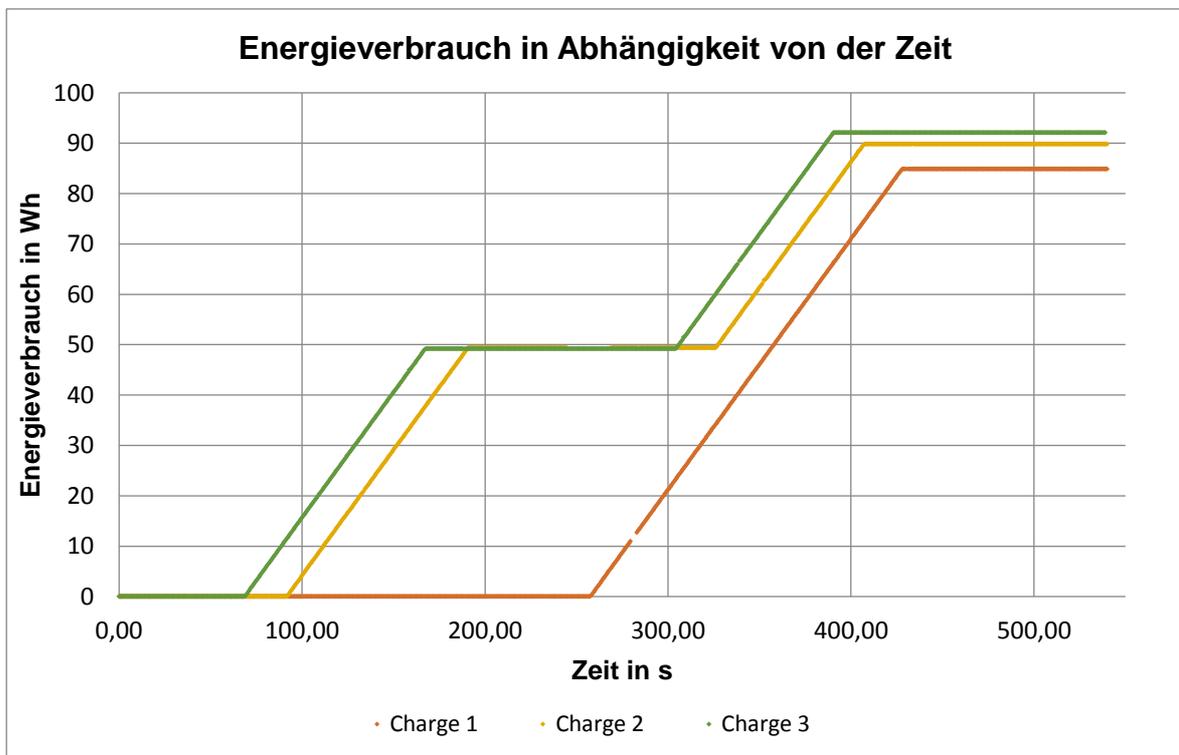
Anhang 5: Temperaturverläufe der Messungen mit Knödel-Pulver



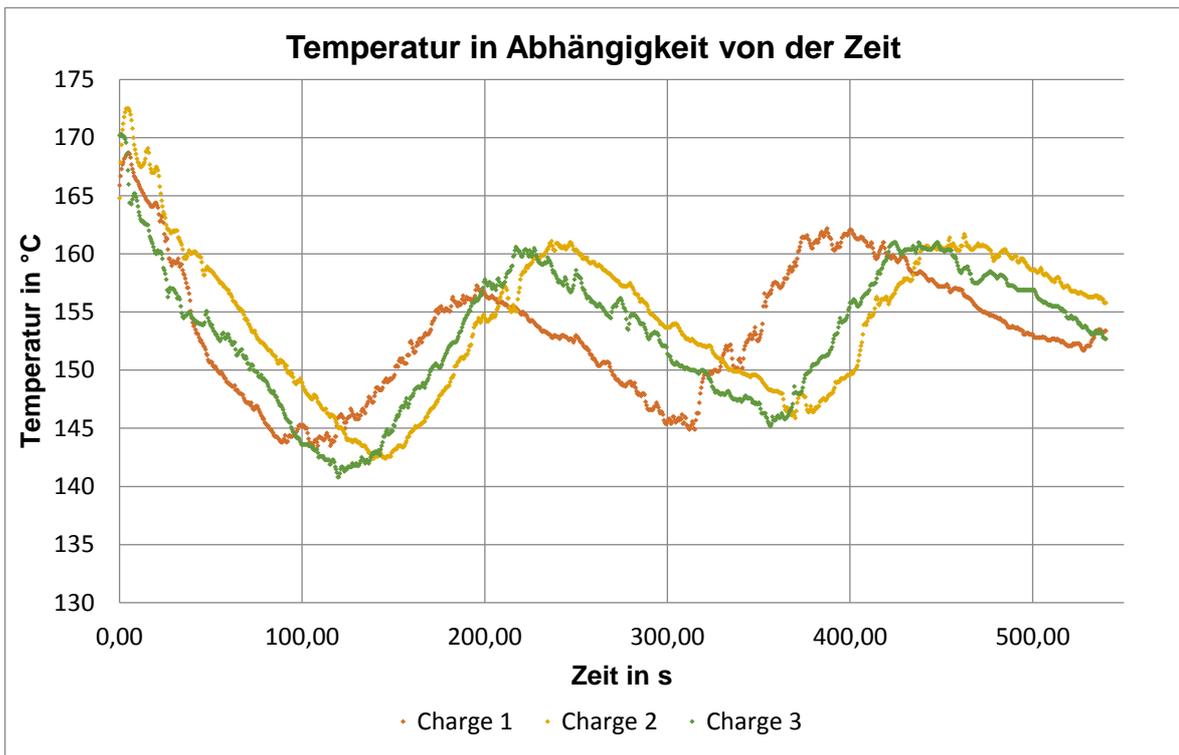
Anhang 6: Leistungsverläufe der Messungen mit Knödel-Pulver



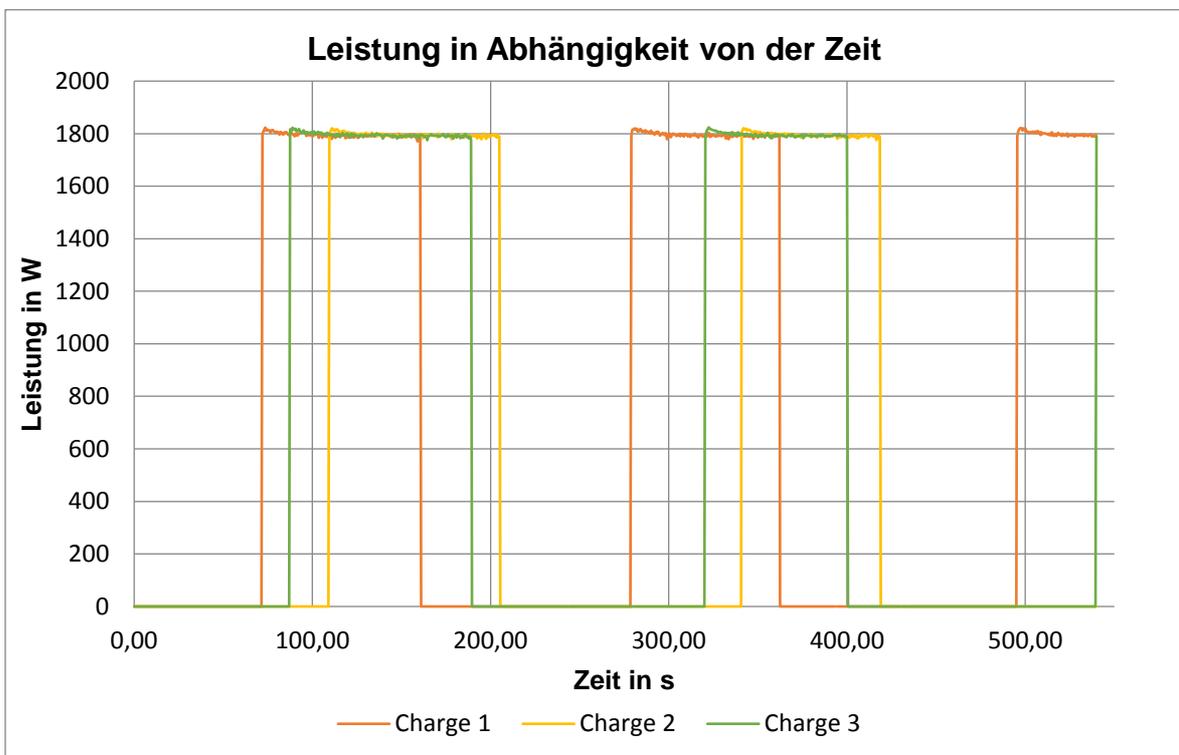
Anhang 7: Spannungsverläufe der Messungen mit Knödel-Pulver



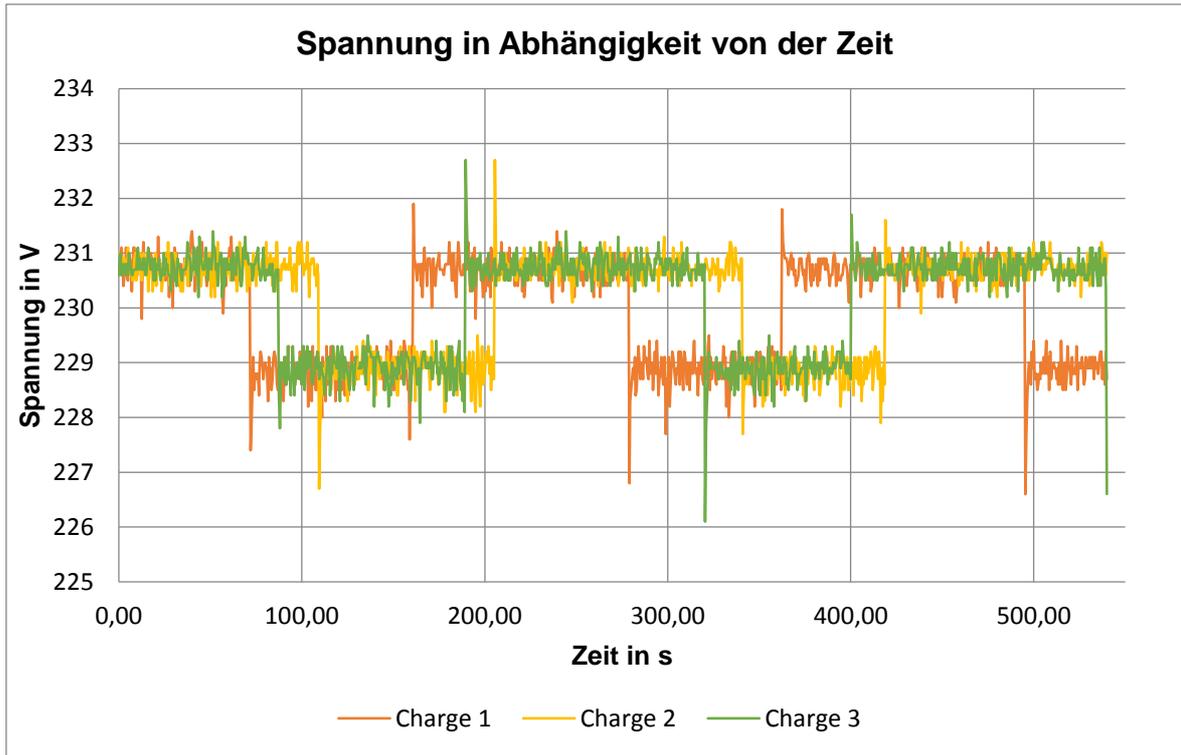
Anhang 8: Energieverbrauch der Messungen mit Knödel-Pulver



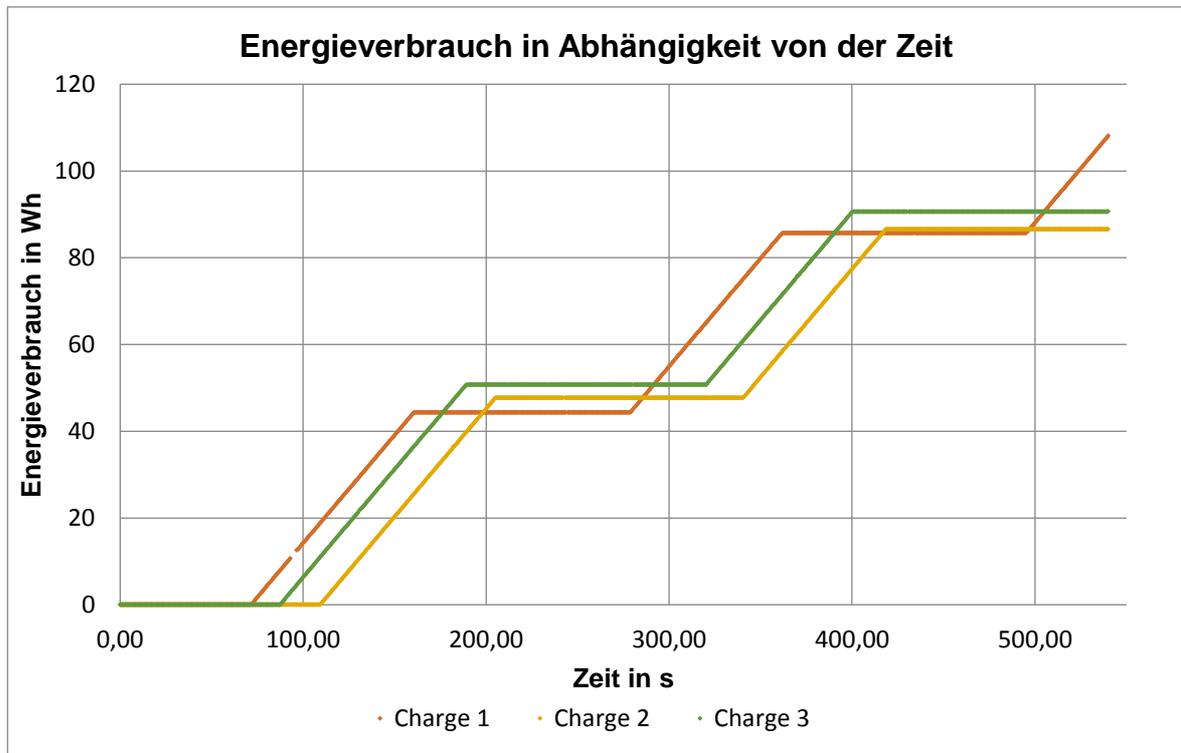
Anhang 9: Temperaturverläufe der Messungen mit Kartoffelpüree-Pulver



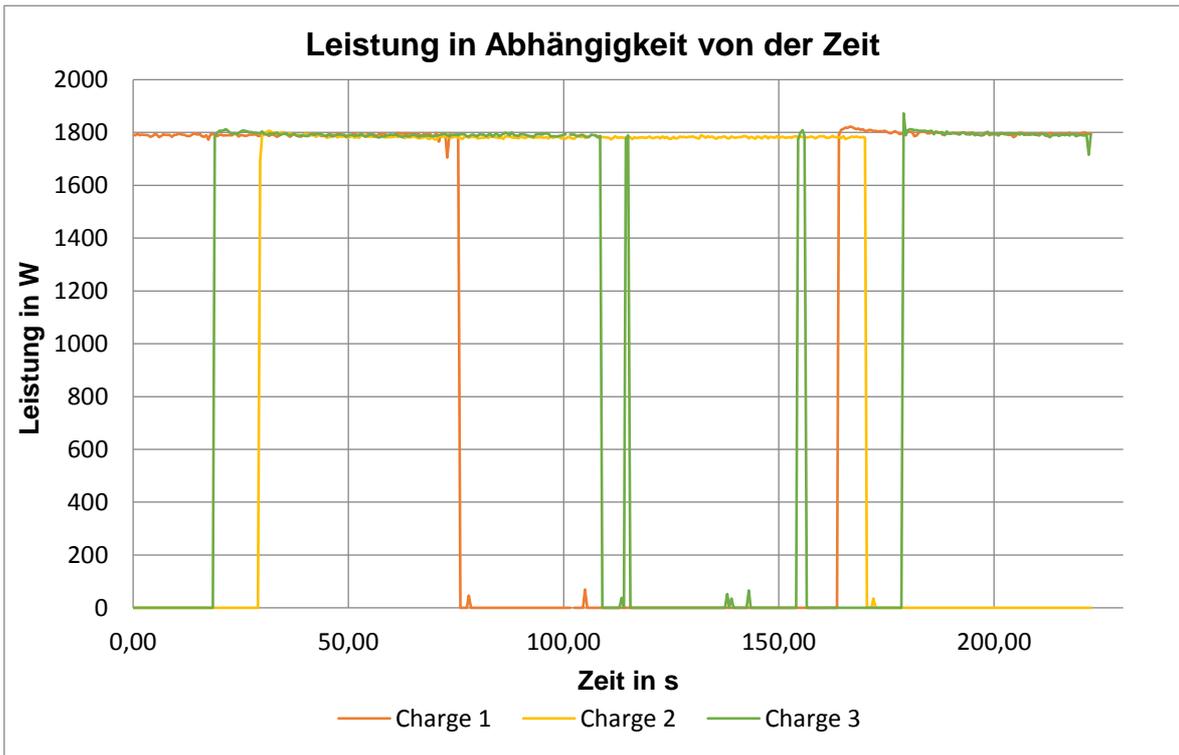
Anhang 10: Leistungsverläufe der Messungen mit Kartoffelpüree-Pulver



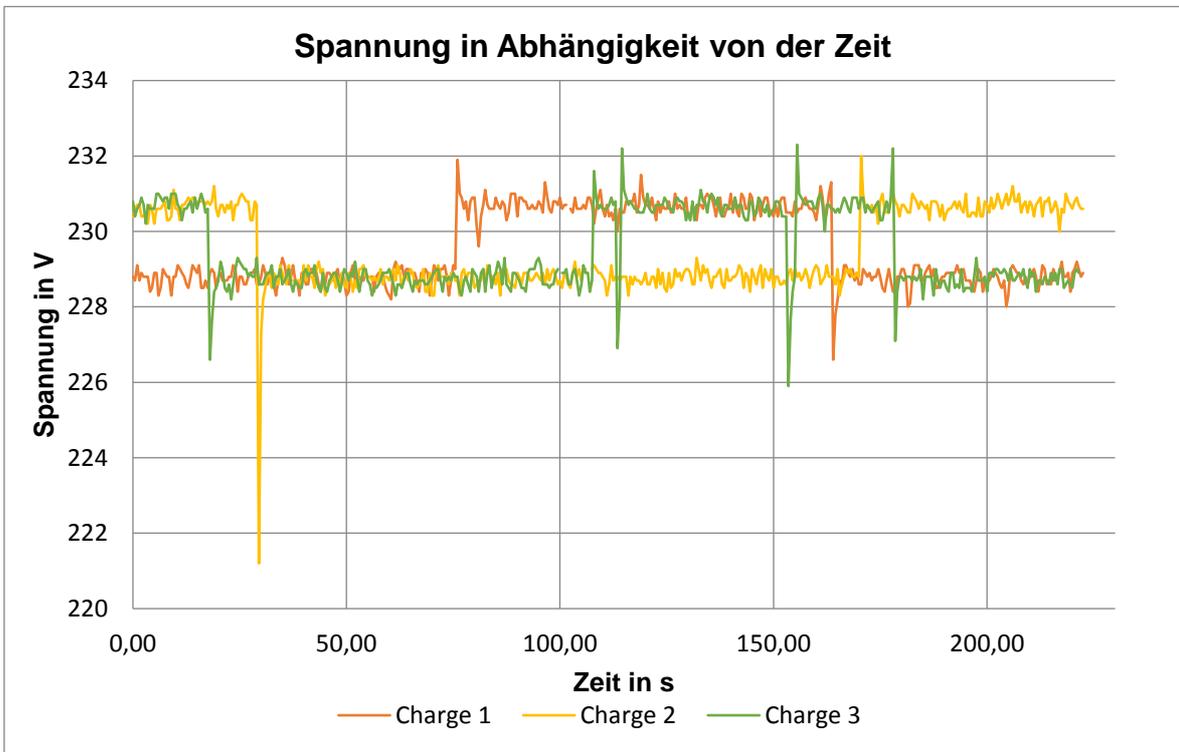
Anhang 11: Spannungsverläufe der Messungen mit Kartoffelpüree-Pulver



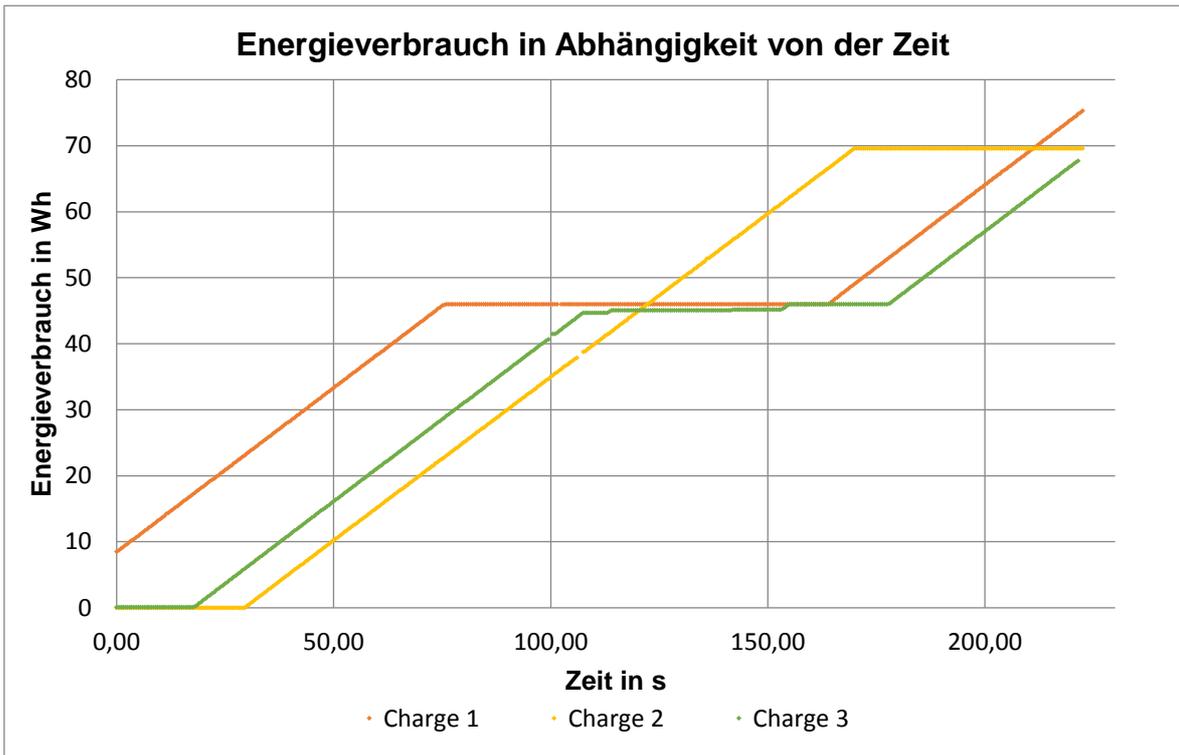
Anhang 12: Energieverbrauch der Messungen mit Kartoffelpüree-Pulver



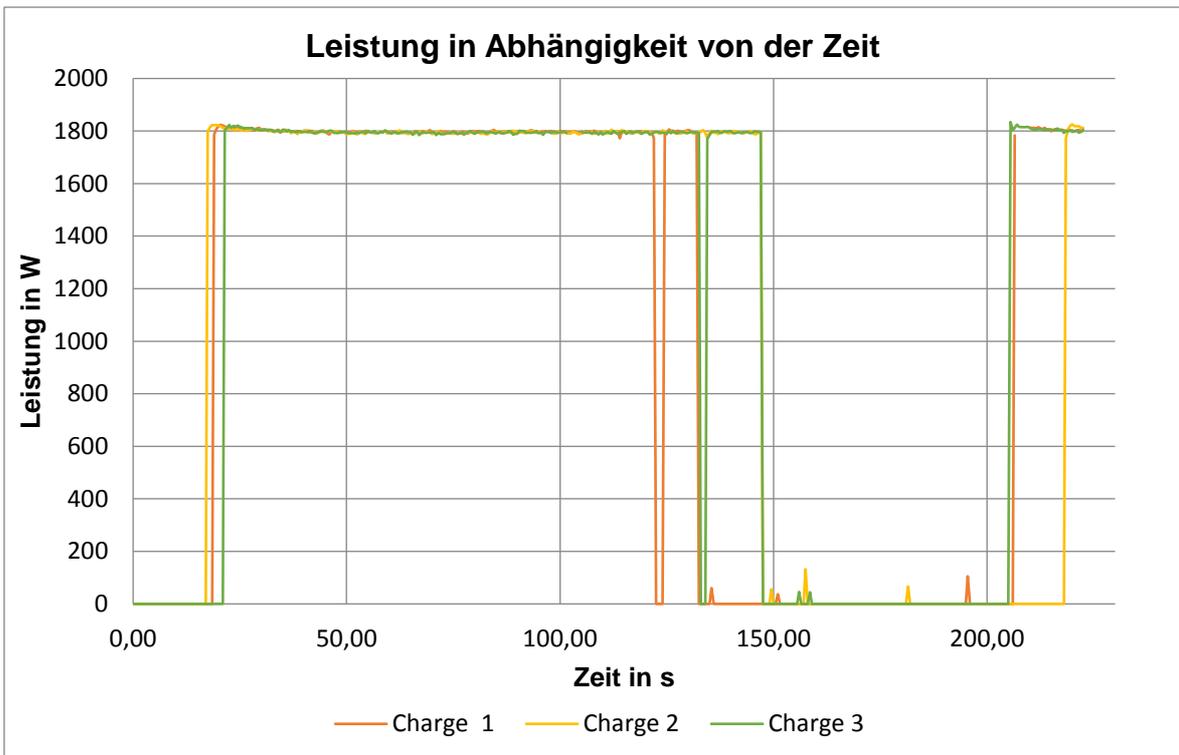
Anhang 13: Leistungsverläufe der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern



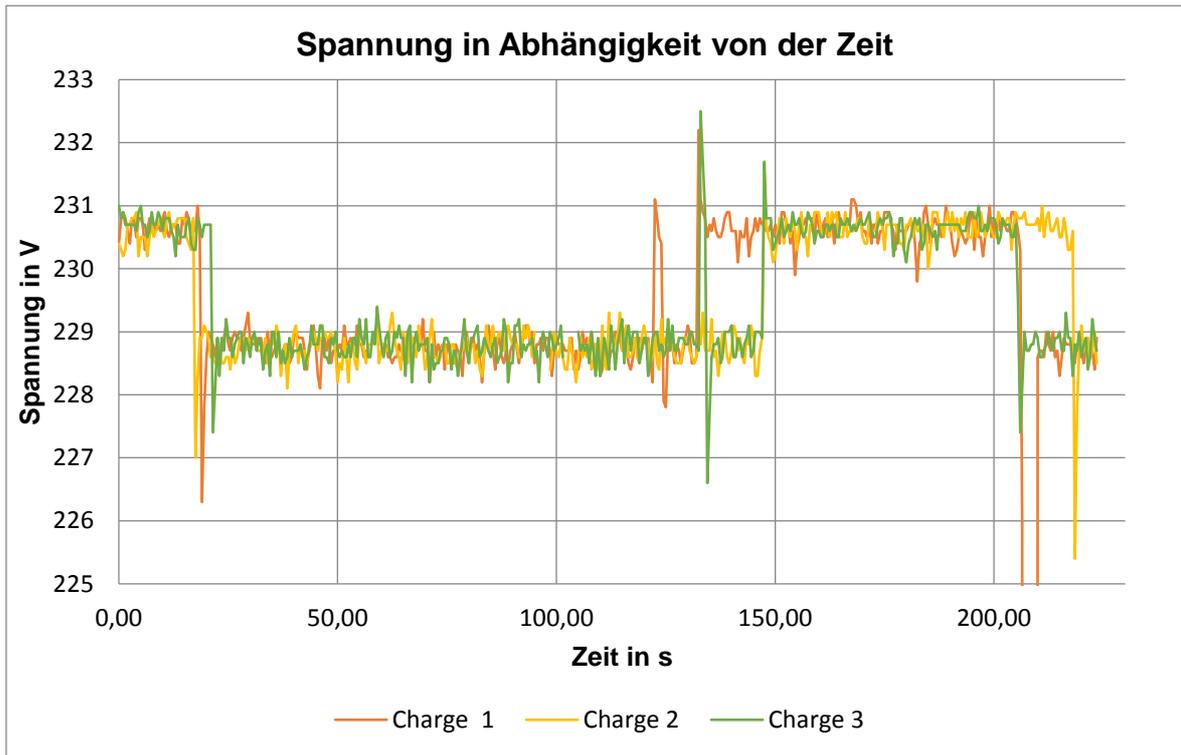
Anhang 14: Spannungsverläufe der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern



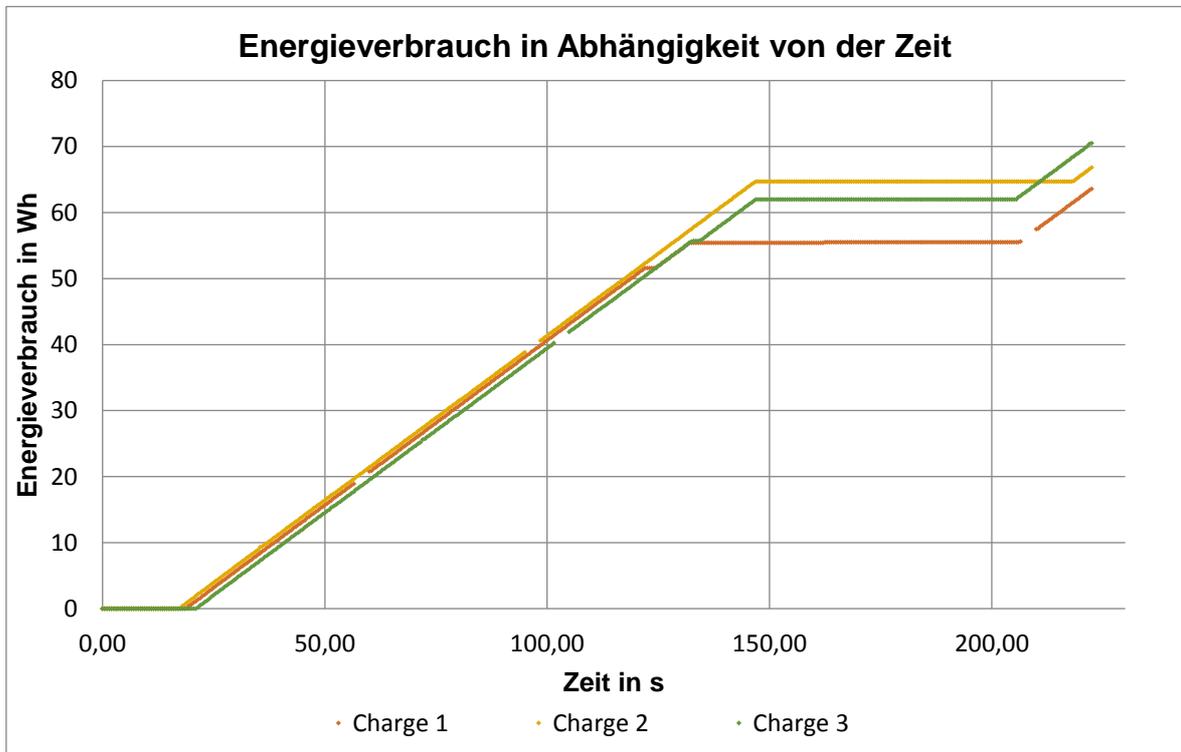
Anhang 15: Energieverbrauch der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern



Anhang 16: Leistungsverläufe der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern mit zusätzlicher Fixierung



Anhang 17: Spannungsverläufe der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern mit zusätzlicher Fixierung



Anhang 18: Energieverbrauch der Messungen mit dem Verdampferkonstrukt aus Reagenzgläsern mit zusätzlicher Fixierung