



INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK
Institute for Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Untersuchungen zur Entwicklung eines thermochemischen Energiespeichers für Haushaltsgeräte

*Simulationstechnische Charakterisierung des Mehrwerts eines
Energiespeichers unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz*

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Werner

Institut für Energietechnik und Thermodynamik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Maximilian Pößnecker, BSc.



Wien, im Oktober 2023

Maximilian, Pößnecker

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung Diplomarbeit nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre hiermit an Eides, statt, dass ich die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Des Weiteren erkläre ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Oktober 2023

Maximilian, Pößnecker

Danksagung

Ich bedanke mich bei meinen Eltern für ihre unermüdliche Unterstützung während meines Studiums und während dieser Arbeit.

Kurzfassung

Untersuchungen zur Entwicklung eines thermochemischen Energiespeichers für Haushaltsgeräte

Simulationstechnische Charakterisierung des Mehrwerts eines Energiespeichers unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz

Die Speicherung von Wärme mithilfe von thermochemischen Speichern rückte in den letzten Jahren immer mehr in den Fokus der Wissenschaft. Durch stetig steigende Energiepreise und gestiegene Anforderungen an den Energieverbrauch in Bezug auf dessen Nachhaltigkeit wird verstärkt nach alternativen Technologien zur herkömmlichen Wärmespeicherung gesucht. Diese herkömmlichen Systeme setzen dabei auf sensible oder latente Wärmespeicherung. Im Vergleich zu diesen Systemen besitzen thermochemische Speicher eine höhere Energiedichte, was sie zu einer attraktiven Alternative macht. Im Gegensatz zu den etablierten Systemen befinden sich thermochemische Speichersysteme aber noch in der Entwicklungs- bzw. Testphase. Des Weiteren liegt der Forschungsschwerpunkt aktuell im Bereich der Speicherung von Nutzwärme in Gebäuden, die durch Wärmepumpen oder Solarthermie erzeugt wird. Durch die im Vergleich zu herkömmlichen Systemen hohe Energiedichte von thermochemischen Speichern sind neben der Nutzung in Gebäuden weitere Anwendungsfälle denkbar. Die Untersuchung eines solchen Anwendungsfalls steht im Fokus dieser Arbeit. Dabei handelt es sich um die Analyse der Einsatzmöglichkeiten von thermochemischen Speichern in Backöfen zum Zweck der Rekuperation von Wärme.

Das Vorgehen gliedert sich in drei Teile. Im theoretischen Teil wird der aktuelle Stand der Technik betrachtet und allgemein die Möglichkeit des Einsatzes von thermochemischen Speichern in Backöfen untersucht. Im zweiten Teil werden die thermodynamischen und geometrischen Randbedingungen, die für ein solches System zu gelten haben, bestimmt. Das Ziel ist es, einen Rahmen für weitere simulationstechnische Analysen zu definieren und Arbeitspunkte, an denen Optimierungen vorgenommen werden können zu definieren. Im dritten und letzten Teil dieser Arbeit werden praktische Vorversuche an einem sich in der Entwicklung befindlichen Versuchsstand durchgeführt. Das Ziel dieser Arbeit ist das theoretische System mit dem praktischen zu verknüpfen, um optimal die benötigten Größen vom theoretischen Modell verifizieren und validieren zu können.

Abstract

Investigations into the development of a thermochemical energy storage system for household appliances

. Simulation characterization of the added value of an energy storage system from the point of view of energy efficiency

The storage of heat with the aid of thermochemical storage systems has increasingly become the focus of scientific attention in recent years. Due to constantly rising energy prices and increased demands on energy consumption in terms of sustainability, there is an increasing search for alternative technologies to conventional heat storage. These conventional systems rely on sensible or latent heat storage. Compared to these systems, thermochemical storage systems have a higher energy density, which makes them an attractive alternative. In contrast to the established systems, however, thermochemical storage systems are still in the development or test phase. Furthermore, the research focus is on the storage of useful heat in buildings, which is generated by heat pumps or solar thermal energy. Due to the high energy density of thermochemical storage systems compared to conventional systems, other applications are conceivable in addition to use in buildings. The investigation of such a use case is the focus of this work. This is an analysis of the possible use of thermochemical storage in baking ovens for the purpose of recuperating heat.

The approach is divided into three parts. In the theoretical part, the current state of the art is considered and, in general, the possibility of using thermochemical storage systems in baking ovens is investigated. In the second part, the thermodynamic and geometric boundary conditions that must apply to such a system are determined. The aim is to have a framework for further simulation analysis and working points where optimizations can be made. In the third and last part of this work, practical preliminary tests are carried out on a model under development. These have the goal of linking the theoretical system with the practical one to be able to verify and validate optimally the necessary sizes of theoretical model practically.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Forschungsfrage.....	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Grundlagen von Backöfen	4
2.2	Grundlagen von thermochemischen Speichern	8
2.3	Speicherkonzept für einen Backofen	14
3	Mathematische Systembeschreibung	16
3.1	Beschreibung des statischen Modells	16
3.1.1	Geometrie des Speichersystems	16
3.1.2	Rahmenbedingungen für das Laden bzw. Entladen der Batterie	19
3.1.3	Rahmenbedingungen für die Wärmespeicherung.....	20
3.1.4	Bewertung des statischen Systems	21
3.2	Berechnung der Wärmeströme.....	22
3.2.1	Berechnung des Verlustwärmestroms	22
3.2.2	Bestimmung der Reaktionskinetik.....	24
3.2.3	Beschreibung des Gesamtsystems.....	26
4	Darstellung der Simulation	28
4.1	Darstellung der statischen Simulation.....	28
4.1.1	Darstellung der Geometrieberechnung des Speichers	29
4.1.2	Darstellung der Rahmenbedingungen für das Laden und Entladen der Batterie	30
4.1.3	Bestimmung der thermischen Masse des Systems	34
4.2	Darstellung der zeitabhängigen Simulation.....	39
4.2.1	Darstellung der Wärmeverluste.....	39
4.2.2	Darstellung der Reaktionskinetik.....	44
4.2.3	Darstellung des gesamten Systems.....	46
5	Aufbau des Versuchstandes und Vorversuche	52
5.1	Experimentelle Voruntersuchungen	52
5.1.1	Untersuchung des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit der Luft bei der Evakuierung des Versuchstandes auf das Kalziumoxalat	52
5.1.2	Untersuchung des Verdampfens von Wasser bei Unterdruck	54
5.1.3	Untersuchung der Dehydratation von Kalziumoxalat bei Unterdruck	59
5.2	Inbetriebnahme des Versuchstands.....	61
6	Ergebnisse	64
	Anhang	68
	Nomenklatur.....	97

Tabellenverzeichnis	99
Abbildungsverzeichnis.....	99
Sonstige Anhänge (Programmcode)	103
Wörterbücher.....	103
Geometrische Funktionen	104
Statische Funktionen.....	112
Zeitabhängige Funktionen.....	115
Bestimmung eines Datenpunkts (Geometrisch).....	119
Bestimmung eines Datenpunkts (Thermisch)	120
Variation über die Füllhöhe des Speichers	121
Bestimmung der Kosten/Nutzen Funktion und der verlorenen Energiemenge (statisch).....	124
Bestimmung der Kosten/Nutzen Funktion und der verlorenen Wärme (zeitabhängig).....	131
Bestimmung der Reaktionszeit.....	137
Berechnung des zeitabhängigen Ladevorgangs der Batterie	139
Berechnung der Gleichgewichtstemperatur (Entladen)	142
Berechnung des zeitabhängigen Entladevorgangs der Batterie	145
7 Literatur	149

Abkürzungsverzeichnis

Bzw.	Beziehungsweise
Ca.	Circa
CaC ₂ O ₄	Kalziumoxalat
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EU	Europäische Union
h	Stunde
H ₂ O	Wasser
HEO	Highly-Efficient-Oven
KN-Faktor	Kosten-Nutzen-Faktor
LDF-Ansatz	Linear-Driving-Force-Ansatz
min	Minute
PCM	Phase Change Material
sec	Sekunde
TCS	Thermochemischer Speicher

1 Einleitung

Die Ausgangssituation dieser Diplomarbeit ist der aktuelle Stand der Technik von Backrohren in der nicht kommerziellen Nutzung, kombiniert mit dem aktuellen Stand der Technik in Bezug auf thermochemische Speicher. Diese beiden Technologien miteinander zu verbinden ist das erklärte Ziel des Projektes „Thermochemical Energy Storage for thermal boost and heat recovery in baking ovens“ (TECHEBAKOV). Die Verbindung erfolgt mit dem Wunsch, die Energieeffizienz aktuell erhältlicher Backrohre zu verbessern. Diese Untersuchungen sind dem Umstand geschuldet, dass bisherige Energiespeichertechnologien meist auf sensibler oder latenter Wärmespeicherung basieren und für diesen Einsatzbereich eine zu niedrige Energiedichte besitzen [1, S. 7]. Eine aussichtsreiche Alternative verspricht die thermochemische Rekuperation der Wärme. Sie besitzt theoretisch eine niedrigere Verlustrate und eine hohe Energiedichte, befindet sich aber noch im Forschungsstadium. Aktuell ist diese Technologie im Technologiereifegrad 3-4. Abbildung 1 zeigt zur Einordnung einen Überblick über die verschiedenen Reifegrade.

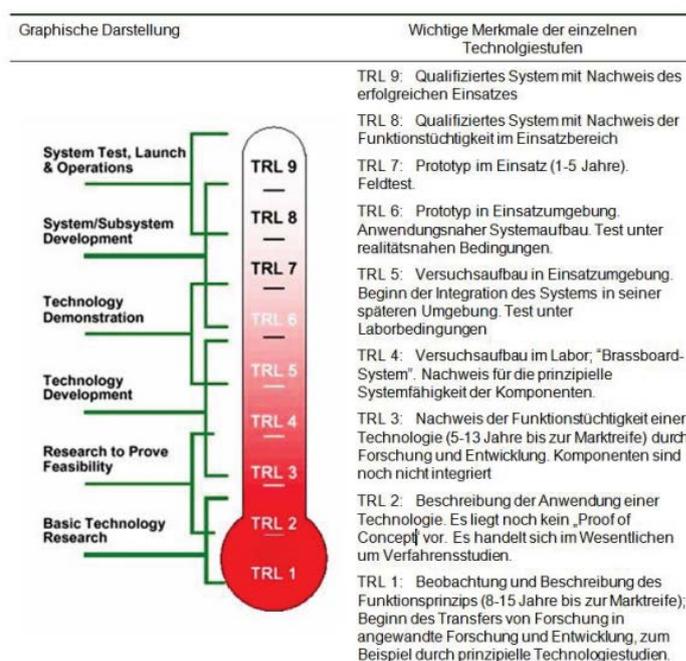


Abbildung 1: Darstellung der verschiedenen Technologiereifegrade [2, S. 10]

Dieser Reifegrad wurde durch schwerpunktartige Grundlagenforschung erreicht, die im Rahmen von drei Projekten mit den Titeln „Solid Heat Basics“, „Solid Heat Kinetics“ und „Solid Heat Pressure“ durchgeführt worden ist. Die Ergebnisse dieser Forschung sind in den folgenden Publikationen zu finden, [3], [4], [5], [6], [7], [8] und [9]. Es wird deutlich, dass die bisherige Forschung ihr Hauptaugenmerk auf die Untersuchung von unterschiedlichen Salzen zur chemischen Energiespeicherung gelegt hat und mit Kalziumoxalat ein vielversprechendes Salz für die Verwendung in einem thermochemischen Speicher unter den gegebenen

Einsatzbedingungen gefunden hat. Ein großer Vorteil des genannten Salzes ist seine Zyklen-Stabilität. Damit diese Technologie den nächsten Reifegrad erreichen kann, müssen nun praktische Fragen in Bezug auf die Implementierung eines solchen Speichers in Backöfen geklärt (erforscht) werden. Zu diesem Zweck soll ein erstes theoretisches Speicherkonzept entwickelt und analysiert werden, um anschließend in einem Versuchsstand realisiert werden zu können. Das theoretische Modell wird in Kapitel 2.3 ausführlich beschrieben, in Kapitel 3 die mathematischen Grundlagen für die Analyse des Systems definiert, um in Kapitel 4 angewendet zu werden. Abschließend werden in Kapitel 5 praktische Vorversuche durchgeführt mit dem Ziel, die Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zu vereinfachen.

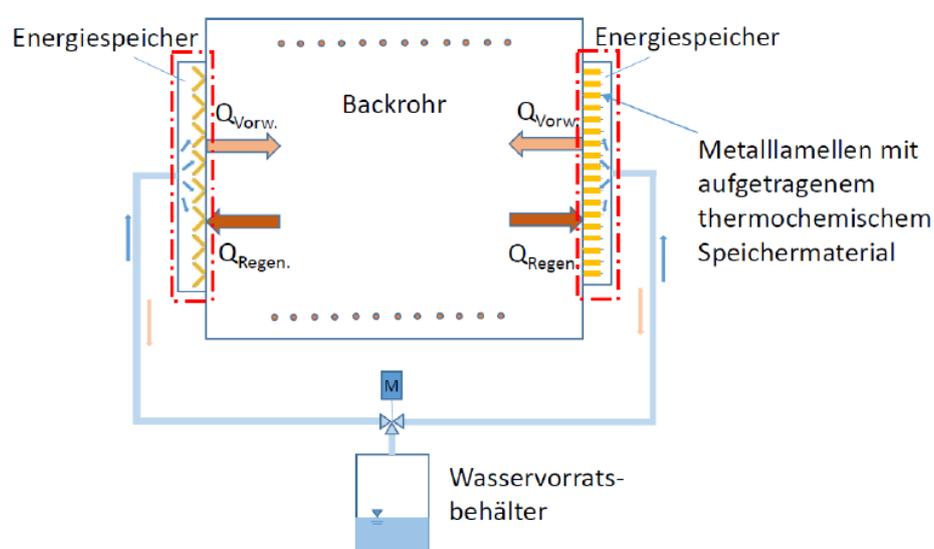


Abbildung 2: Schematische Zeichnung eines Backrohrs mit angeschlossenerm thermochemischem Speicher [1]

Im Rahmen dieses Konzeptes wurde festgelegt, dass das weitere Vorgehen simultan auf zwei Ebenen zu erfolgen hat. Zum einen müssen die experimentellen Daten in Bezug auf den praktischen Einsatz von Kalziumoxalat und vergleichbare Stoffe verbessert werden und zum anderen eine Simulation des chemischen Speichers erstellt werden. Diese Simulation hat zum Ziel, den experimentellen Daten einen Rahmen zu geben und damit die Bestimmung eines Zielerreichungsgrads zu ermöglichen. Gleichzeitig soll sie als Grundlage für die Konzeption verschiedener Experimente dienen. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf die jeweiligen theoretischen thermodynamischen Zustände der beteiligten Stoffe gelegt.

1.1 Forschungsfrage

Die Forschungsfrage, die dieser Arbeit zugrunde liegt, lautet, „Welchen Mehrwert erzeugt das Einbringen einer zusätzlichen thermischen Masse in Form eines thermochemischen Energiespeichers in das System Backofen?“.

Das Ziel der Untersuchungen ist es, eine wissenschaftlich fundierte Aussage über die Vorteile und die Nachteile eines thermochemischen Speichersystems in einem Backofen treffen zu können. Bisherige Untersuchungen in Bezug auf thermochemische Speicher beschäftigten sich zum größten Teil mit dem Einsatz dieser Speichersysteme in Gebäuden. Der Einsatz in einem Haushaltsgerät bringt im Gegensatz dazu neue Herausforderungen mit sich. Die Herausforderungen, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden und für die Beantwortung der Forschungsfrage Relevanz besitzen, sind die

- Bestimmung der optimalen geometrischen Abmessungen des Speichers
- Bestimmung der energietechnischen Eigenschaften des Speichers
- Beschreibung des Wärmemanagements des Systems
- Bestimmung der für den korrekten Betrieb nötigen kritischen Punkte in Bezug auf Gleichgewichtsdruck und Gleichgewichtstemperatur.

Diese Herausforderungen sind direkt mit der Beantwortung der Forschungsfrage gekoppelt. Die Bestimmung des Mehrwertes und der zusätzlichen thermischen Masse des Systems erfordert die Kenntnis der geometrischen Abmessungen sowie der energietechnischen Eigenschaften. Zusätzlich müssen für die Beschreibung des Auflade- und Entladevorgangs der thermochemischen Batterie das Wärmemanagement des Systems beschrieben werden und die nötigen Arbeitspunkte bekannt sein. Damit soll durch die Beantwortung der Forschungsfrage die Grundlage für weitere theoretische und praktische Forschung geschaffen werden.

2 Theoretische Grundlagen

Das Ziel dieses Kapitels ist es, die benötigten Grundlagen für die darauffolgenden Kapitel zu beschreiben. Es ist unterteilt in drei Abschnitte. Der erste Abschnitt beschäftigt sich mit dem technischen System Backofen. Es beschreibt dessen Aufbau und die Problematik in Bezug auf seinen Energieverbrauch sowie die im Betrieb entstehenden Energieverluste an die Umgebung. Der zweite Abschnitt beschreibt den aktuellen Stand der Technik von thermochemischen Speichern. Im Vordergrund steht dabei der im späteren Teil der Arbeit zu untersuchende Sachverhalt über den Einsatz in Backöfen. Der dritte und letzte Teil befasst sich mit der Kombination von Backofen und TCS. Dieses Konzept bildet den Ausgangspunkt dieser Arbeit und wird anschließend simulationstechnisch und praktisch analysiert.

2.1 Grundlagen von Backöfen

Backöfen sind neben Kühlschränken und Geschirrspülmaschinen in den meisten europäischen Haushalten vorhanden. Dies schlägt sich auch in den Verkaufszahlen von Backöfen im europäischen Raum nieder. Der Markt für Kochgeräte ist über die vergangenen Jahre stetig gewachsen. Die Menge der verkauften Systeme stieg von ca. 6,5 Millionen Stück im Jahr 2015 auf knapp über 7 Millionen im Jahr 2018 [10, S. 76]. Durch die weite Verbreitung dieser Geräte wäre eine Reduzierung des Energieverbrauches ein sinnvoller Beitrag zum Umweltschutz und in Zeiten von steigenden Energiepreisen auch ein zusätzlicher Kaufanreiz.

Der Energieverbrauch von aktuellen Haushaltsbacköfen ist über die Richtlinie 2010/30/EU festgelegt [11]. Die aktuelle Einteilung ist in Abbildung 3 zu sehen, in Kombination mit dem jeweiligen Energieeffizienzindex in Abbildung 4.

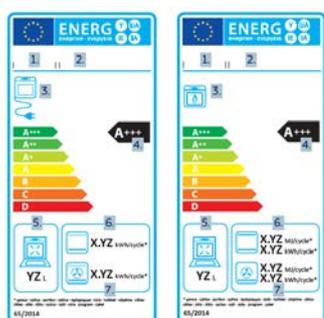


Abbildung 3: Energielabel von Haushaltsbacköfen [12, S. 1]

Energieeffizienzklassen von Haushaltsbacköfen

Energieeffizienzklasse	Energieeffizienzindex (EEL _{cavity})
A+++ (höchste Effizienz)	$EEL_{cavity} < 45$
A++	$45 \leq EEL_{cavity} < 62$
A+	$62 \leq EEL_{cavity} < 82$
A	$82 \leq EEL_{cavity} < 107$
B	$107 \leq EEL_{cavity} < 132$
C	$132 \leq EEL_{cavity} < 159$
D (geringste Effizienz)	$EEL_{cavity} \geq 159$

Abbildung 4: Effizienzklassen von Haushaltsbacköfen nach Energieeffizienzindex [13, S. 6]

Seit dem 1.3.2021 hat die Europäische Union damit begonnen, das bestehende System zu vereinfachen. Dies geschieht durch eine Reduzierung der Klassen auf A – G [14, S. 2] bzw. durch eine Abkehr von Klassen mit einem oder mehreren Pluszeichen.

Diese neue Regelung gilt in einem ersten Schritt ausschließlich für Waschmaschinen, Kühlschränke, Geschirrspüler und Fernseher. Backöfen werden in Zukunft aber auch mit diesem neuen Label gekennzeichnet. Mit dieser neuen Einteilung gehen auch strengere Richtwerte für das Erreichen der Klasse A einher. Es ist das erklärte Ziel der EU, dass zunächst nur wenige Geräte dieses Label erhalten. Diese Änderung erfolgt mit dem Ziel, einen zusätzlichen Anreiz für HerstellerInnen zu erzeugen, energieeffiziente Haushaltsgeräte zu produzieren [14, S. 1]. Die aktuelle Berechnung zur Einteilung von Backöfen über die Variable EEI_{cavity} ist in Gleichung (1) zu sehen [13, S. 8]. $EC_{electric\ cavity}$ ist der durchschnittlich benötigte Energieverbrauch für einen Backvorgang und $SEC_{electric\ cavity}$ wird über das Volumen des Backrohrs bestimmt (2).

$$EEI_{cavity} = \frac{EC_{electric\ cavity}}{SEC_{electric\ cavity}} * 100 \quad (1)$$

$$SEC_{electric\ cavity} = 0,0042 * V_l + 0,55 \text{ (in kWh)} \quad (2)$$

Abbildung 5 zeigt die Marktanteile der verschiedenen Kategorien zwischen 2014 – 2019. Es wird deutlich, dass unabhängig von der zukünftigen Verschärfung der Anforderungen schon jetzt selten Öfen mit besserem Label als A+ verkauft werden.

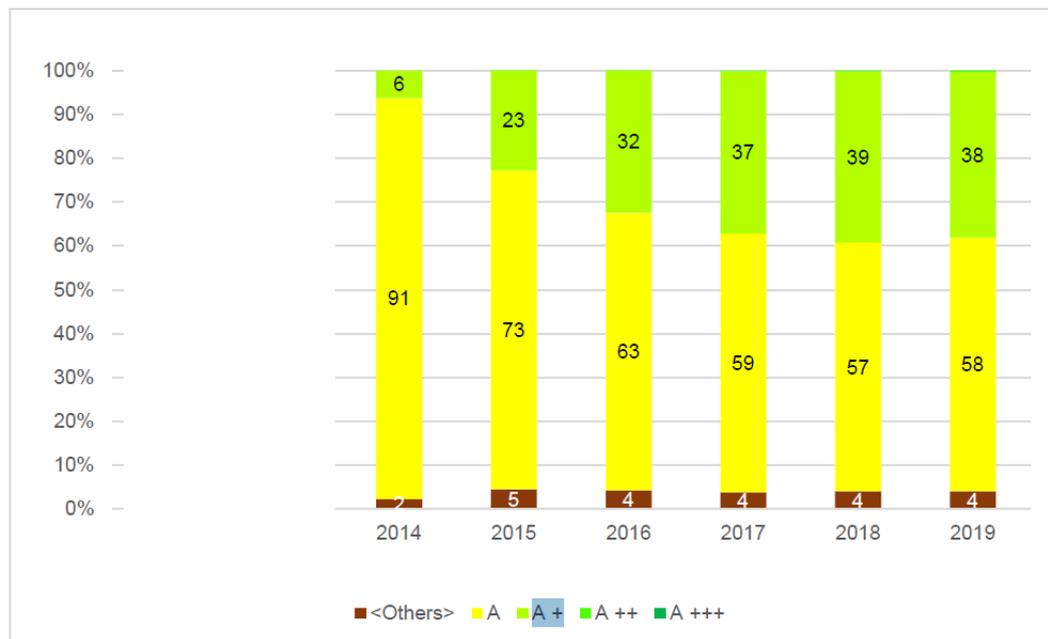


Abbildung 5: Marktentwicklung von Elektroherden / Backöfen nach Energieeffizienz-klasse 2014 bis 2019 (Marktanteile in %) [15, S. 19]

Zusätzlich zeigt Abbildung 5, dass der Anteil von A+ Öfen über den Zeitraum von 2017 – 2019 nahezu konstant geblieben ist. Dies ist nicht auf das Verhalten der KonsumentInnen zurückzuführen, sondern auf einen Mangel an entsprechenden Produkten [15, S. 19].

Aus dem mangelnden Angebot und den in Zukunft schärferen Bewertungskriterien lässt sich ein klarer Bedarf an energieeffizienteren Backsystemen ableiten.

Abbildung 6 zeigt, an welchen Stellen über die Lebenszeit eines Backofens Energie (dargestellt als CO₂-Äquivalent) verbraucht wird. Es wird deutlich, dass der mit Abstand größte Teil der verbrauchten Energie während der Nutzungsphase anfällt. Dieser Darstellung liegt die Annahme von 110 Backvorgängen pro Jahr zugrunde [16, S. 68]. Dies deckt sich mit den Annahmen der EU in Bezug auf die Klassifizierung von Backöfen. Um ein energieeffizientes System zu entwickeln, erscheint es entsprechend sinnvoll, die verbrauchte Energie während des Backvorganges zu reduzieren.

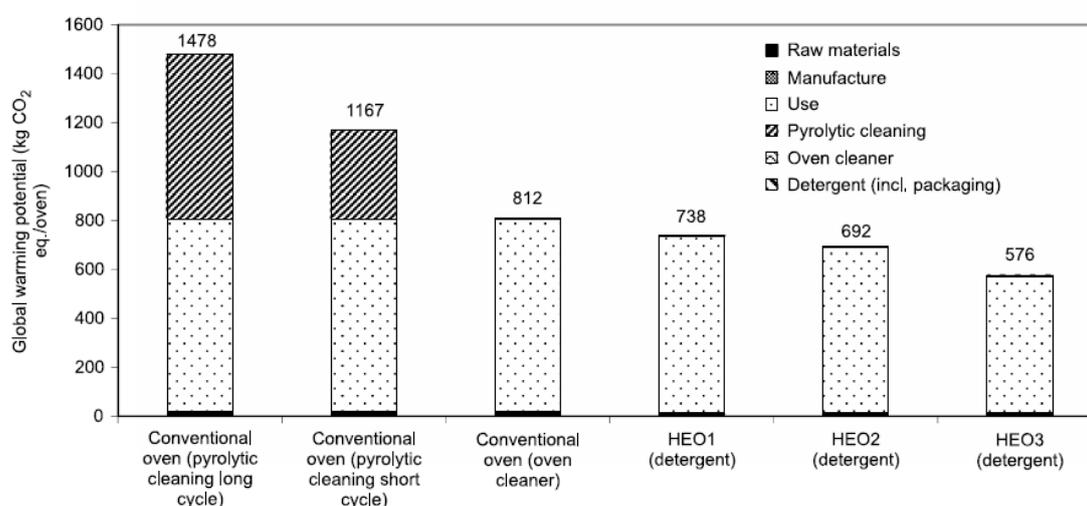


Abbildung 6: Verbrauchte Energie (als CO₂-Äquivalent) über die Lebenszeit (19 Jahre) von versch. Backöfen (Konventionell: 0,69 kWh/Backvorgang; HEO1: 0,63 kWh/Backvorgang; HEO2: 0,59 kWh/Backvorgang; HEO3: 0,49 kWh/Backvorgang [16, S. 72])

Der in [16] bzw. in Abbildung 6 gewählte Ansatz zur Reduzierung der verbrauchten Energie basiert auf der Verwendung anderer Materialien zum Bau eines Backofens. Diese „Highly-efficient oven“ sind im Gegensatz zu klassischen Backöfen, die aus emailliertem Stahl gefertigt werden, aus Edelstahl mit einer Sol-Beschichtung gefertigt. Dieser Ansatz steht nicht im Fokus dieser Arbeit. Der hier gewählte Ansatz basiert auf dem Ziel, die im Backofen nach Abschluss der Backvorgangs gespeicherte Energie zu rekuperieren. Zu diesem Zweck sind in Abbildung 7 exemplarisch ein Backofen und seine Hauptelemente dargestellt. Die dargestellten Elemente nehmen die gewünschte Backtemperatur während des Backvorgangs an. Diese in den jeweiligen Elementen gespeicherte Energie wird nach einem Backvorgang aktuell ungenutzt an die Umgebung abgegeben.

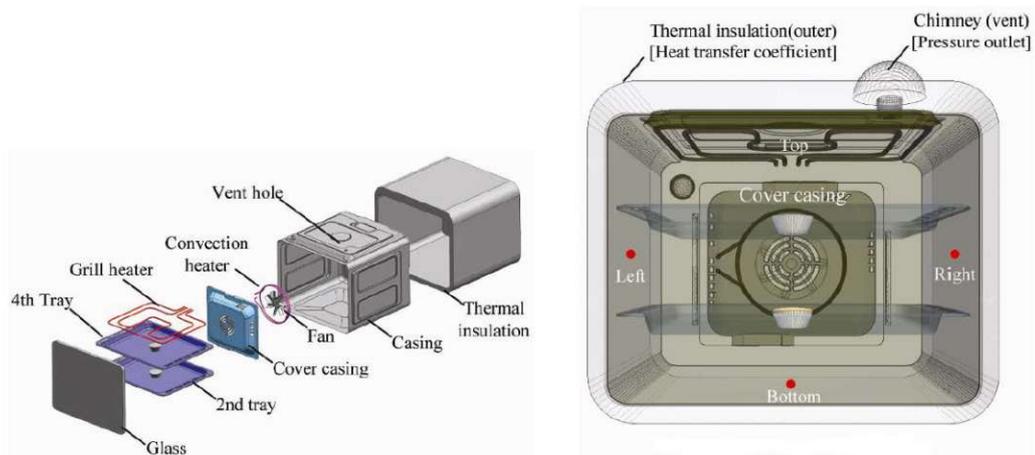


Abbildung 7: Exemplarische Explosionszeichnung eines Backofens [17, S. 908]

Die im Backofen gespeicherte Energie hat eine Größenordnung von ungefähr 0,3 kWh¹. Sollte ein Teil dieser Energie gespeichert werden können, wäre es möglich, die benötigte Energie für einen Backvorgang von 0,69 kWh auf niedrigere Werte zu reduzieren. Dies würde eine Verbesserung des EEl_{Cavity} Koeffizienten bedeuten, da die gespeicherte Energie zum Aufheizen des Geräts verwendet werden könnte. Dieses Ziel soll mit einem TCS-Modul erreicht werden. Ein solches System könnte einen Teil der im Backofen befindlichen Energie speichern und dem nächsten Backvorgang wieder zur Verfügung stellen. Das Herzstück dieses Moduls besteht dabei aus einem Salz, das in der Lage ist, diese Energie zu speichern und wieder freizugeben. Dieser Prozess findet unter der Abgabe und Aufnahme von Wasser statt. Im folgenden Teilkapitel werden detailliert die Grundlagen dieser Technologie beschrieben.

¹ Daten von BSH bestimmt anhand eines Bosch AV2 EOX 6021

2.2 Grundlagen von thermochemischen Speichern

Das in Kapitel 2.1 beschriebene Ziel ist, die nach einem Backvorgang im Backofen enthaltene Energie (Wärme) zu speichern. Für diese Aufgabe stehen aktuell verschiedene Technologien zur Auswahl. Eine Übersicht der aktuellen verwendeten Speichervarianten in Bezug auf Wärmespeicher ist in Abbildung 8 zu sehen.

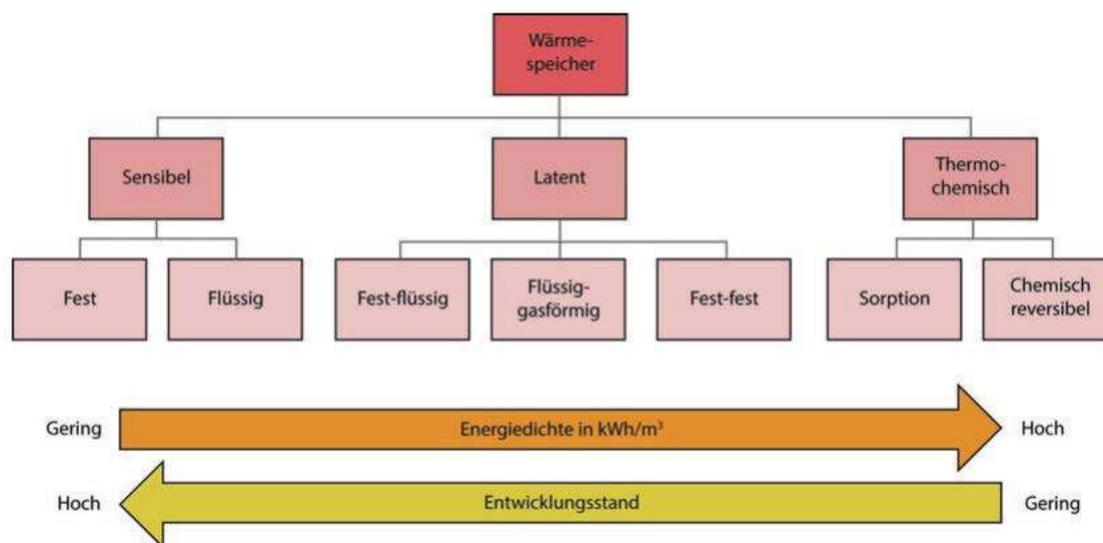


Abbildung 8: Darstellung der aktuellen Technologien zur Speicherung von Wärme [18, S. 582]

Die Speicherung von Wärme erfolgt entweder sensibel, latent oder thermochemisch. Die sensible Wärmespeicherung basiert auf einer reinen Temperaturänderung des Speichermediums. Die dabei gespeicherte Wärmemenge ergibt sich aus (3).

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m * c_p * dT \quad (3)$$

Die latenten Speichertechnologien setzen zusätzlich auf einen Phasenübergang des Speichermediums, umso die speicherbare Energiemenge zu steigern. Die gespeicherte Wärmemenge erhöht sich entsprechend wie in (4) gezeigt. Der betrachtete Phasenübergang ist z.B. fest - flüssig und die gesamte gespeicherte Energie setzt sich aus den sensiblen Anteilen und der Enthalpie des Phasenübergangs zusammen.

$$Q = \int_{T_1}^{T_m} m * c_{p,s} * dT + m * \Delta h + \int_{T_m}^{T_2} m * c_{p,l} * dT \quad (4)$$

Die im Fokus dieser Arbeit stehende Speichertechnologie ist die thermochemische Speicherung. Dieser Prozess basiert auf der Reaktion zweier Stoffe, wobei Wärme bzw. Energie gespeichert und wieder abgegeben wird. Er fällt unter die Kategorie thermochemische Wärmespeicherung. Abbildung 9 zeigt den allgemeinen Ablauf eines solchen Prozesses. Neben den Sorptionsprozessen fallen auch reversible chemische Reaktionen unter die Kategorie der thermochemischen Energiespeicherung. Diese besitzen zwar eine höhere Energiedichte, benötigen aber eine Reaktionstemperatur, die über dem gewählten Anwendungsbereich liegt. Dieser Umstand führt dazu, dass sie für den betrachteten Anwendungsrahmen nicht zu verwenden sind. Abbildung 10 zeigt die verschiedenen Energiedichten über den entsprechenden Temperaturbereich der unterschiedlichen Technologien. Die sensible Wärmespeicherung ist als blaue Linie am Beispiel von Wasser dargestellt und die latente Wärmespeicherung (Phase Change Materials; PCM) in Grün. Dabei wird deutlich, dass die Sorption in Bezug auf die Energiedichte einen klaren Vorteil gegenüber der klassischen Wärmespeicherung in Form von sensibler und latenter Wärme besitzt. Dieser Vorteil ist der Grund für die Wahl eines TCS-Moduls zum Speichern, der im Backofen vorhandene Energie. Da der zur Verfügung stehende Bauraum begrenzt ist, bietet sich nur die Möglichkeit auf eine Technologie mit einer hohen Energiedichte zurückzugreifen. Zusätzlich ist der Temperaturbereich zur Freisetzung der gespeicherten Energie (80 °C – 350 °C) für den gewünschten Einsatzrahmen zweckmäßig.

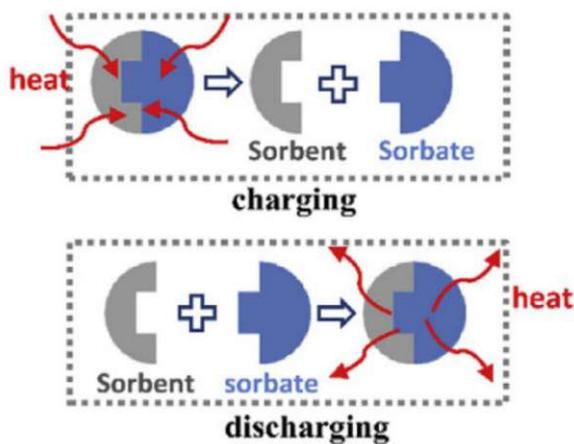


Abbildung 9: Allgemeiner Sorptionsprozess
[19, S. 353]

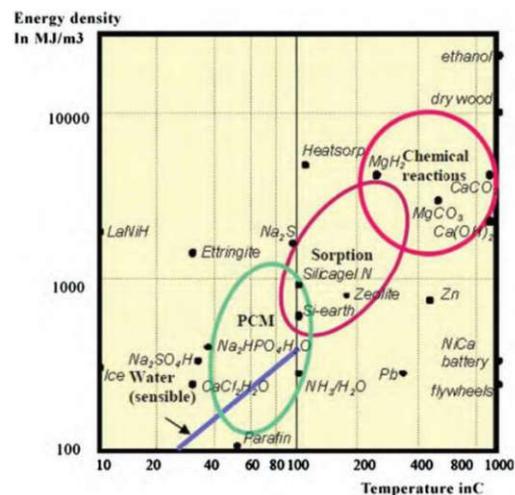


Abbildung 10: Übersicht über Energiedichten verschiedener Energiespeichertechnologien
[20, S. 109]

Dieser in Abbildung 9 gezeigte Sorptionsprozess kann mit verschiedenen Sorptionsmitteln und unterschiedlichen Sorptiven die zu einem Sorbat reagieren durchgeführt werden [20, S. 110]. Zusätzlich zu der Verwendung unterschiedlicher Materialien, fallen unter den Begriff Sorption verschiedene physikalisch/chemische Prozess, die einen Energiespeicherungsprozess ermöglichen.

Diese sind die flüssige Adsorption, die feste Adsorption, die chemische Sorption und die Sorption basierend auf Komposit-Materialien [21, S. 492]. Eine Zusammenstellung dieser Prozesse in Kombination mit verschiedenen Sorptionsmitteln und Sorptiven befindet sich im Anhang in Abbildung 62. Für eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Prozesse sei auf [22] verwiesen. Die in dieser Arbeit betrachtete Reaktion ist die feste Sorption, bestehend aus einem Feststoff und einem Gas. Allen Prozessen liegt das gleiche Ziel zugrunde, die Speicherung von Wärme. Da es sich dabei um eine langfristige Speicherung mit geringen Wärmeverlusten über die Zeit handelt, ist ein Vergleich zu einer herkömmlichen Batterie zur Speicherung von elektrischer Energie möglich. Dieser Vergleich ist grafisch in Abbildung 11 aufgezeigt.

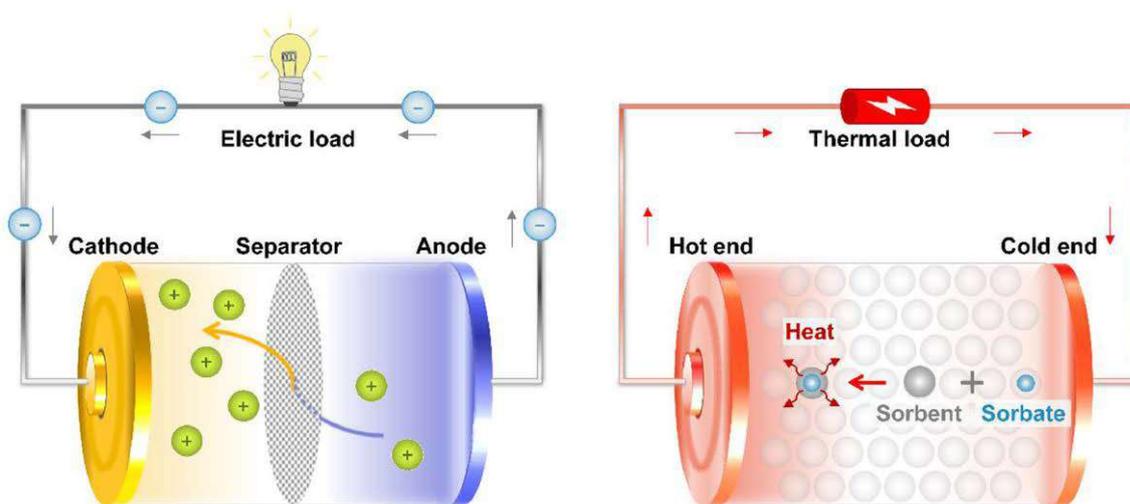


Abbildung 11: Vergleich von einer Batterie zum Speichern von elektrischer Energie mit einer Batterie zum Speichern von Wärme [23, S. 797]

Anhand Abbildung 11 werden nicht nur die Gemeinsamkeiten, sondern auch die Unterschiede der beiden Technologien deutlich. Eine herkömmliche Batterie stellt ihre Leistung direkt zur Verfügung, wohingegen ein TCS zunächst zu einem Sorbat reagieren muss, um diese bereitzustellen.

Diese Analogie ermöglicht es, die Bewertungscharakteristiken einer klassischen Batterie auf einen TCS zu übertragen. Diese Bewertungskriterien sind [23, S. 797].

- Die maximale Kapazität
- Der Entladestrom bzw. entzogene Wärmestrom
- Der innere Widerstand
- Die Effizienz

Die den einzelnen Bewertungskriterien zugrunde liegenden Gleichungen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Berechnungsvorschriften zur Bestimmung ausgewählter Batteriecharakteristika (Elektrisch / Thermisch)

Kriterium	Elektrische Batterie	TCS
Kapazität	$C_{e,max} = n * F (Ah)$	$C_{th,max} = m_{Sorptiv} * \Delta h_{Sorptiv} (Wh)$
Entladestrom / Wärmestrom	$I = \frac{\Delta V}{r_e} (A)$	$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{th}} (W)$
Innerer Widerstand	$r_e = r_{ion} + \frac{d}{\sigma * A} (VA^{-1})$	$R_{th} = \frac{d}{k * A} (kW^{-1})$
Effizienz	$\eta = \int \frac{I}{C_{e,max}} dt (%)$	$\eta = \int \frac{\dot{q}}{C_{th,max}} dt (%)$

Mithilfe dieser Gleichungen ist es möglich, verschiedene Batterien direkt zu vergleichen.

Aus Tabelle 1 werden auch die relevanten Größen in Bezug auf die Bewertung einer solchen Batterie klar. Diese sind die Masse des Sorptivs innerhalb der Batterie ($m_{Sorptiv}$), die reaktionsspezifische Absorptionenthalpie ($h_{Sorptiv}$) des Sorptivs und der thermische Widerstand des Systems (R_{th}). Diese Größen sind direkt verbunden mit den geometrischen Abmessungen sowie der verwendeten Stoffpaarung der Batterie und spielen eine zentrale Rolle bei der Entwicklung eines solchen Systems.

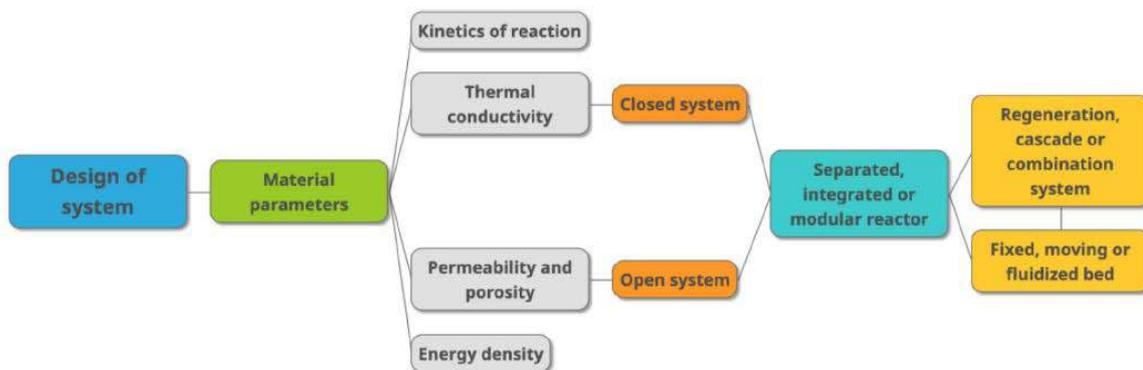


Abbildung 12: Methodik zur Entwicklung eines TCS [24, S. 6]

Abbildung 12 stellt eine mögliche Methodik für die Entwicklung eines TCS grafisch dar. Sie zeigt, dass das Design des Systems an erster Stelle steht. Dies ist abhängig von dem gewählten Einsatzgebiet (Backofen) und dem damit einhergehenden Anforderungsprofil.

Aufbauend auf diesem Profil werden die Materialparameter bestimmt. Diese basieren auf der verwendeten Stoffpaarung und den Materialien, aus denen die Ummantelung der Batterie bestehen soll. Mit diesen Informationen ist es möglich Reaktionskinetik, die mögliche Energiedichte und die thermische Masse des Systems zu bestimmen. Im nächsten Schritt muss anhand der Rahmenbedingungen entschieden werden, ob ein geschlossenes oder ein offenes System verwendet werden soll. Ein geschlossenes System beinhaltet das Sorptiv sowie das Sorptionsmittel. Es findet kein Massentransfer mit der Umgebung statt und ist damit auch aus thermodynamischer Sicht geschlossen. Ein offenes System hingegen führt das Sorptionsmittel von außen zu. Ein weiterer Unterschied sind die Arbeitsdrücke. Ein offenes System arbeitet mit Atmosphärendruck, wohingegen in einem geschlossenen System die Reaktionen meist bei Unterdruck stattfinden. Eine ausführliche Beschreibung der Eigenschaften aus thermodynamischer Sicht ist in [25] zu finden. Eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile zeigt Abbildung 13.

	Open System	Closed System
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • Atmospheric pressure • Simplified design and fewer components when compared to a closed system • Heat transfer increased by forced circulation and the heat transfer fluid is the gas carrier • No heat exchanger required • High system energy density 	<ul style="list-style-type: none"> • Higher discharge temperature when compared to an open system with a similar vapor pressure • No mass exchange with the environment and better control of the mass transfer • Can be used for both cooling and heating • Higher power density • No electrical energy is needed for fan operation • Toxic reactants can be used and avoids undesired side reactions • Low-pressure state possible and better control of the pressure • Stability during heat generation • Complex system • Heat transfer limiting step • Gas needs to be stored • Periodical evacuation required due to the formation of incondensable gases
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> • Fan and humidifier often needed to drive flow and provide partial humidification • Gas and side reactions have to be safe as being released to the atmosphere • High gas flow leads to pressure drops • Mass transfer limiting step • Electrical energy needed for auxiliary operation • Salt may not take up water vapor at atmospheric pressure • Low discharging temperature when compared to a closed system with a similar vapor pressure • Instability during heat generation 	<ul style="list-style-type: none"> • Large heat transfer area required • Low system energy density due to reaction components having to be stored and heat exchanger • Higher level of temperature needed during hydration reaction, leading to lower solar collector efficiency

Abbildung 13: Vor- und Nachteile eines offenen bzw. geschlossenen TCS-Systems [24]

Der vorletzte Schritt ist die Entscheidung, ob das System einen separierten, integrierten oder modularen Reaktor besitzen soll. Bei einem separierten System sind das Sorptiv und der Reaktionsort räumlich voneinander getrennt. Im Gegensatz dazu befindet sich bei einem integrierten Reaktor das gesamte Sorptiv zu jeder Zeit komplett am Ort der Dehydratation und Hydratation. Wenn in einem integrierten System das Sorptiv unterteilt wird, ist dies ein modularer Reaktor. Die Unterschiede der Systeme sind in [26] beschrieben. Das letzte Charakteristikum eines TCS ist die Lage bzw. die Bewegung des Speichermaterials. Diese wird in drei Kategorien eingeteilt. Diese sind „fixed bed“, „moving bed“ und „fluidized bed“. Ist das Sorptiv in Ruhe, spricht man von einem „fixed bed“. Sobald eine Bewegung innerhalb des Reaktors stattfindet, ist es ein „moving bed“. Wird das Sorptiv in einen wirbelnden Zustand versetzt, liegt ein „fluidized bed“ vor.

Durch die unterschiedlichen Bewegungen bzw. Verwirbelungen des Sorptivs soll eine bessere und gleichmäßigere Reaktion mit dem Sorptionsmittel erreicht werden. Dieser Vorteil geht aber mit stark steigenden Anforderungen an die Gestaltung des Reaktors einher. Die Vor- und Nachteile der drei verschiedenen Arten zeigt Abbildung 14.

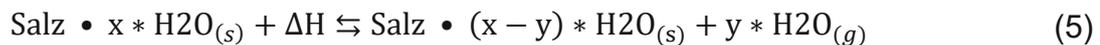
Reactor	Advantages	Disadvantages
Fixed/packed bed	Easy to model, design and manufacture Small size Small capital costs	Low heat and mass transfer High-pressure drop Temperature gradients
Moving Bed	Direct heat transfer between solid and gas Less energy required than fluidized bed	Complex fluid dynamics Complex reactor design Moving parts
Fluidized Bed	Good temperature control Minimizes the risk of hotspots and thermal instability Heat transfer coefficients high Uniform particle mixing	Lowest conversion per unit volume Complex fluid dynamics and modeling Erosion of internal parts Pumping (energy) requirements Increased reactor vessel size Lack of understanding

Abbildung 14: Vor- und Nachteile von verschiedenen Bewegungsarten des Sorptivs [24]

Als letzte Einteilung wird zwischen kombinierten, kaskadenartigen und regenerativen Systemen unterschieden. Als kombinierte Systeme werden Systeme bezeichnet, die verschiedene Energiespeichermethoden miteinander verbinden. Kaskadenartige Systeme hingegen setzen auf verschiedene thermochemische Materialien und in regenerative Systemen findet wie bei den separierten Reaktoren eine örtliche Trennung zwischen Prozess und Lagerung des Sorptivs statt, nur dass in diesem Fall die Vorgänge Hydratation und Dehydratation auch örtlich voneinander getrennt sind [24]. Diese Konzepte spielen aufgrund ihrer Komplexität und des benötigten Bauraums nur bei Systemen eine Rolle, die für den Einsatz in Gebäuden entwickelt werden. Entsprechend können sie bei der Entwicklung eines TCS-Systems für Haushaltsgeräte vernachlässigt werden. Damit ist die Methodik, nach der TCS-Systeme ausgelegt werden beschrieben. Es ist zu beachten, dass dies ein iterativer Prozess ist. Wenn im Rahmen der Entwicklung eines solchen Systems neue Informationen gewonnen werden, kann dies zu einer Neugestaltung verschiedener Parameter oder zu der Wahl einer anderen Systemkategorie führen. Im folgenden Kapitel wird diese Methodik auf den TCS für einen Backofen angewandt.

2.3 Speicherkonzept für einen Backofen

Das Speicherkonzept wird schematisch im Projektantrag für das Projekt „Thermochemical Energy Storage for thermal boost and heat recovery in baking ovens“ beschrieben [27], diese schematische Darstellung ist in Abbildung 15 bzw. in Abbildung 2 zu finden. Es ist zu erkennen, dass an beiden Seiten des Backofens ein Speicher angebracht werden soll. Diese Speicher bilden mit dem Behälter für das Sorptionsmittel und der entsprechenden Verrohrung das Speichersystem. Die Form der Speicher soll zunächst quadratisch sein. Die Entscheidung für einen quadratischen Speicher wurde aufgrund der einfachen Fertigung eines Versuchsträgers und der damit einhergehenden experimentellen Handhabung getroffen. Die endgültige Form der Speicher kann auf Basis von neuen Forschungsergebnissen angepasst werden. Als Stoffpaar für die chemische Energiespeicherung wurde eine Salz-Wasserpaarung gewählt. Die entsprechende allgemeine Reaktionsgleichung zeigt Formel (5).



Die Wahl für eine Salz-Wasserpaarung liegt in ihrer Umweltverträglichkeit in Bezug auf den Einsatzort. Bei Leckage kann nur Wasser aus dem System austreten, das keine gesundheitliche Gefahr darstellt. Zusätzlich ist der Partialdruck des Sorptionsmittels, der einzig relevante Wert für das Ablaufen der Reaktion. Bei einem Leck im System fällt dieser ab und die Reaktion kommt sofort zum Erliegen. Diese Größe wird in Kapitel 3 analysiert.

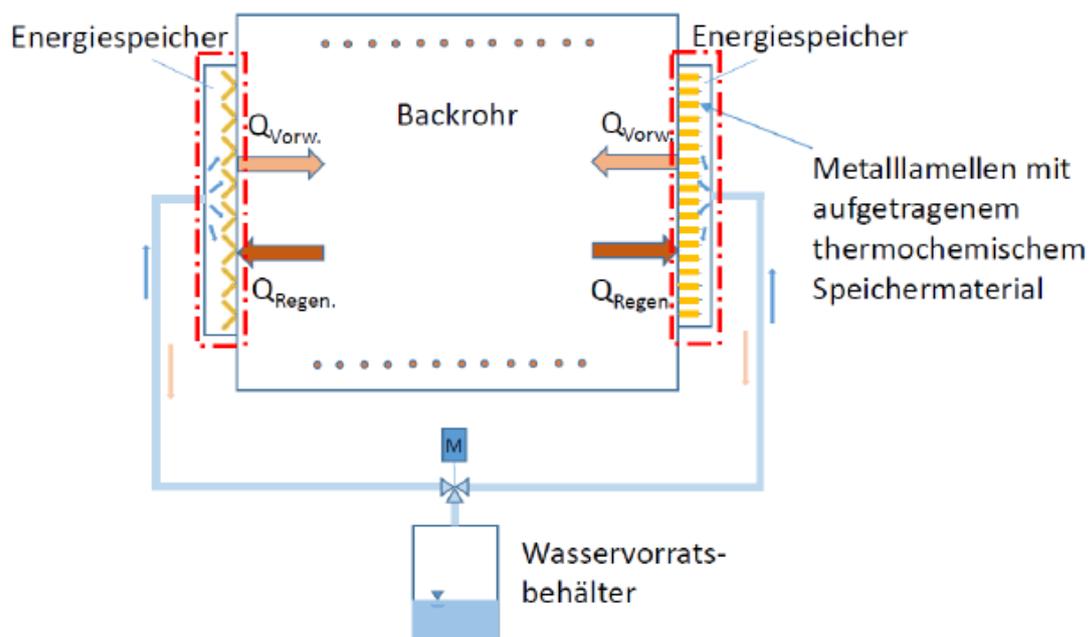


Abbildung 15: Schematische Zeichnung eines Backrohrs mit angeschlossenerm thermochemischem Speicher [27]

Das verwendete Salz ist Kalziumoxalat (CaC_2O_4). Die Wahl fiel auf dieses Salz, da es eine hohe Absorptionsenergie bei einer hohen Dichte besitzt, eine hohe Reaktionsrate und eine gute Zyklen-Stabilität [8]. Aufgrund des Einsatzortes wurde ein geschlossenes System gewählt. Es ist das erklärte Ziel, ein Gesamtprodukt aus Speichersystem und Backofen zu entwickeln und dies ist nur unter diesen Randbedingungen möglich. Damit sind im Gegensatz zu der Form des Speichers diese Randbedingungen nicht veränderlich. Gleiches gilt für die Wahl bzw. die Art des Bettes, ein „fix bed“. Auch wenn die Verwendung einer der beiden anderen Varianten eine bessere Dehydratation und Hydratation des Salzes versprechen, so ist der Bauraum sehr begrenzt, sodass der Einsatz dieser beiden Varianten nicht erfolgversprechend ist.

Somit sind die in der Methodik dargelegten Rahmenbedingungen fixiert. Für die ordentliche theoretische Beschreibung müssen nach dieser Methodik nun die folgenden Eigenschaften des Speichersystems bestimmt werden,

- Die geometrischen Maße, Materialparameter und Energiedichte
- Die thermische Leitfähigkeit und Wärmeströme
- Die Reaktionskinetik

Diese Kenngrößen bzw. Eigenschaften des Systems werden in den nächsten beiden Kapiteln definiert, beschrieben und berechnet. Dabei werden in Kapitel 3 der mathematischen Systembeschreibung die relevanten Gleichungen gezeigt und hergeleitet. In Kapitel 4 der Darstellung der Simulation kommen diese dann zur Anwendung. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert.

3 Mathematische Systembeschreibung

Die mathematische Systembeschreibung erfolgt in zwei Schritten. Der erste Schritt ist eine statische Betrachtung. Sie hat zum Ziel, die allgemeinen thermodynamischen Rahmenbedingungen des TCS-Moduls zu bestimmen. Statisches Modell bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Zeit vernachlässigt und entsprechend nur Zeit unabhängige Größen betrachtet werden. Im zweiten Schritt werden die Ergebnisse aus Teil eins um die Reaktionskinetik zwischen den Partizipanten und den Wärmeverluststrom erweitert, um damit aus dem statischen Model ein zeitabhängiges zu erzeugen. Das grundsätzliche Vorgehen ist in beiden Teilkapiteln ident, es werden zunächst die relevanten Gleichungen beschrieben und anschließend das für die Berechnung benötigte Vorgehen. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist zum einen die Bestimmung der systemrelevanten Größen für die Realisierung des Konzeptes und zum anderen bei einer Änderung des Konzeptes (z. B. der Verwendung eines anderen Sorptivs oder Sorptionsmittel) die benötigten Größen schnell neu bestimmen zu können.

3.1 Beschreibung des statischen Modells

Das statische Modell teilt sich in 4 Teile auf. Dies sind die Folgenden.

- Geometrie des Speichersystems
- Rahmenbedingungen für das Laden bzw. Entladen der Batterie
- Die im Speicher und im Backofen gespeicherte Wärmemenge
- Kosten / Nutzen Analyse

3.1.1 Geometrie des Speichersystems

Die Geometrie des Speichersystems wird vom Backofen, auf den es montiert wird, festgelegt. In Abbildung 16 sind die relevanten Größen grafisch dargestellt. Der betrachtete Backofen besitzt eine Breite von 480 mm, eine Höhe von 380 mm und eine Tiefe von 440 mm. Er ist auf 5 Seiten mit einer Wärmedämmung aus Glaswolle umgeben. Die angegebenen Maße sind Innenmaße, die Wärmedämmung wird extra betrachtet und besitzt eine Dicke über den gesamten Backofen von 20 mm. Die vordere Öffnung wird im Rahmen dieser Arbeit als adiabatisch angenommen und besitzt für die weitere Betrachtung nur eine thermische Masse. Diese Annahme deckt sich mit den Berechnungen von BSH². Im Anhang in Abbildung 79 sind die vollständigen von BSH zur Verfügung gestellten Werte zusammengefasst.

² Alle Information (Abmessungen, gespeicherte Energie und Wärmeverluststrom) wurden freundlicherweise von BSH zur Verfügung gestellt. Sie stellen eine überschlägige Betrachtung dar.

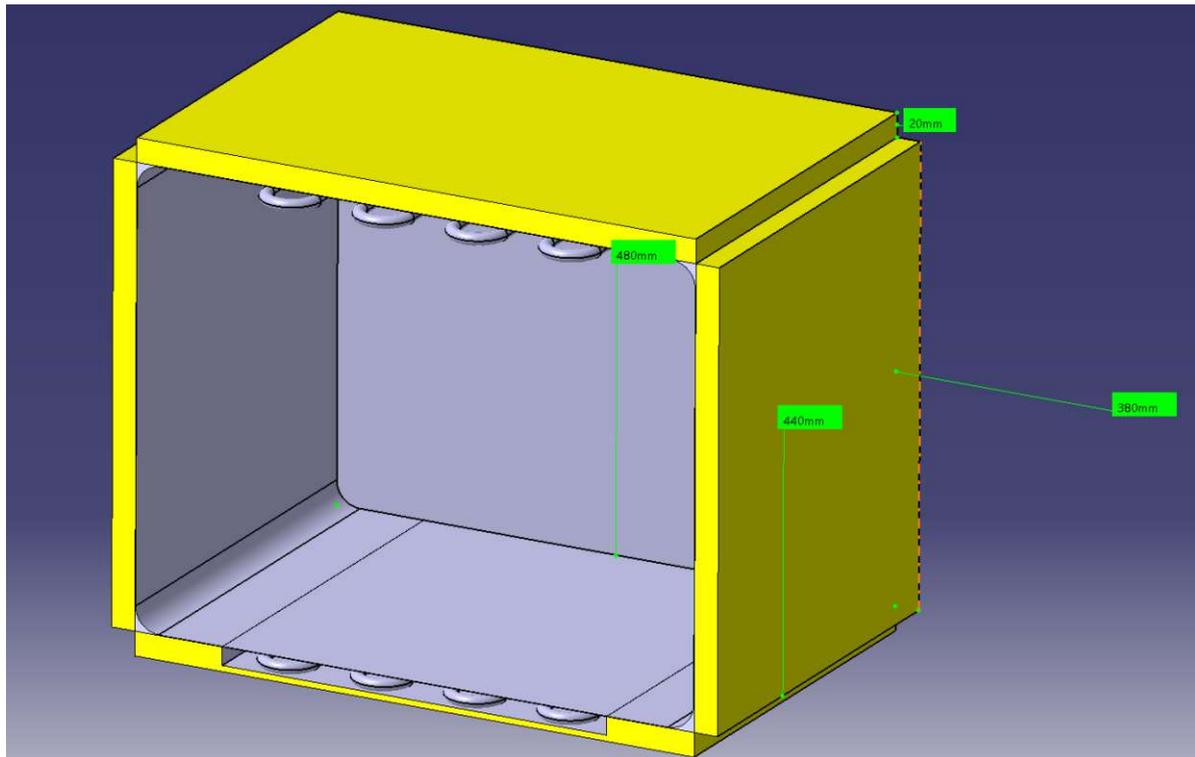


Abbildung 16: Einfache CAD-Abbildung des Backofens (Bosch AV2 EOX 6021) mit räumlichen Abmessungen

Die von BSH zur Verfügung gestellten Werte enthalten neben den Abmessungen des Backofens die thermischen Massen der einzelnen Bauteile und den Verlustwärmestrom des Systems. Wobei der Verlustwärmestrom erst im kommenden Kapitel der dynamischen Betrachtung eine Rolle spielen wird.

Das in Abbildung 16 dargestellte Modell des Backofens wurde mithilfe von Catia V5 erstellt. Es wird deutlich, dass unter diesen Randbedingungen ein mögliches Speichersystem, das an den Seitenwänden angebracht wird, ein Volumen von maximal 440 mm * 380 mm * 20 mm besitzen kann. Neben dieser Randbedingung sind weitere Bedingungen festgelegt worden. Diese Vorgaben sind das Ergebnis von im Vorfeld dieser Arbeit durchgeführten Gesprächen mit den unterschiedlichen Partnern des Projekts.

Diese zusätzlichen Randbedingungen, unter denen die Größe des Speichers bestimmt werden, sind:

- Die Dicke der Speicherhülle (3) ist immer 1 mm
- Das Verhältnis zwischen Salz (1) und Hohlraum (2) ist konstant bei 9:1
- Die Dichte des Salzes wird als Schüttung angenommen 1000 kg / m³
- Die Innenfläche des Speichers ist immer quadratisch bis zu einer Seitenlänge von 300 mm

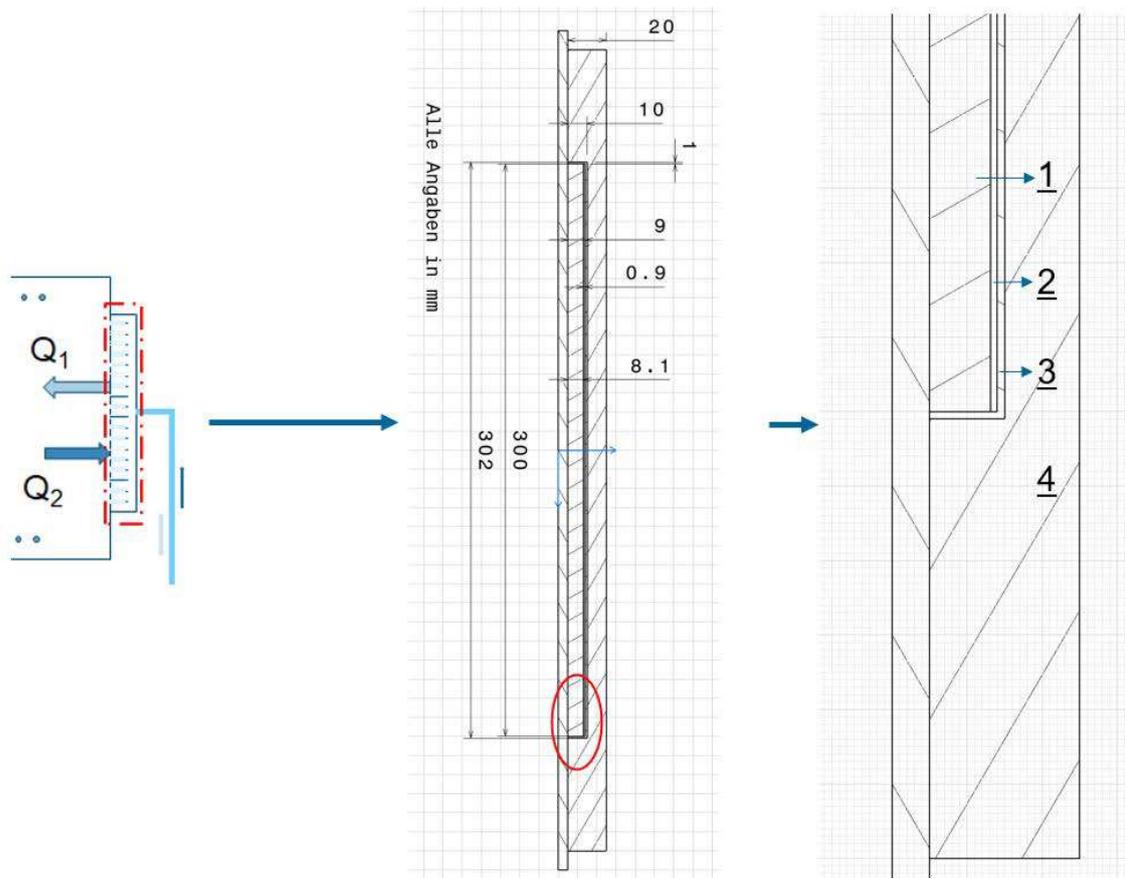


Abbildung 17: Darstellung des TCS-Moduls (rechte Seite)

Die Abmessungen des Speichersystems in Abbildung 17 sind eine mögliche Konfiguration eines TCS-Moduls unter Berücksichtigung der oben genannten Rahmenbedingungen. Die Wahl dieser Bedingungen führt dazu, dass die Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) des Speichersystems die einzigen unabhängigen Variablen sind.

Diese drei unabhängigen Variablen können auf verschiedene Arten festgelegt werden. Es können die Außenmaße, die Innenmaße oder das Gewicht des Salzes versehen mit einer Speicherhöhe als Ausgangspunkt festgelegt werden. Dieser Umstand wurde insofern berücksichtigt, dass für alle der drei Perspektiven eine eigenständige Funktion erstellt worden ist, die unter Berücksichtigung der Anforderungen die abhängigen Variablen des Speichers bestimmt. Da es sich hierbei um einfache Geometrie handelt, sind die einzelnen Funktionen nicht explizit dargestellt. In Kapitel 4 ist die Anwendung dieses System zu finden und im sonstigen Anhang unter „Geometrische Funktionen“ der Programmcode bzw. das Gleichungssystem für die praktische Anwendung der Gleichungen. Die Funktion „fc_volume_container“ basiert auf den Außenmaßen, die Funktion „fc_volume_salt“ auf den Innenmaßen und die Funktion „fc_mass_salt“ auf dem Gewicht des Salzes.

3.1.2 Rahmenbedingungen für das Laden bzw. Entladen der Batterie

Der zweite Schritt im Erstellen des statischen Modells ist die Untersuchung, unter welchen Bedingungen eine Hydratation (Entladen der Batterie) oder Dehydratation (Laden der Batterie) des gewählten Sorbats stattfindet. Die dabei betrachteten Temperaturniveaus gibt das System vor, aus dem Energie gespeichert werden soll. In diesem Fall ein Backofen. Der betrachtete Temperaturbereich liegt zwischen Raumtemperatur (25 °C) und der maximalen Temperatur des gewählten Backvorgangs (ca. 175 °C). Wie in Kapitel 2 erläutert, hängt der Hydrations- bzw. Dehydrationsvorgang direkt mit dem vorhandenen Partialdruck des Sorptionsmittels zusammen. Unter der Annahme, dass es sich bei dem Sorptionsmittel um ein ideales Gas handelt und der Voraussetzung, dass im Gleichgewicht die Änderung der spezifischen Gibbs-Energie Null ist, gilt der folgende Zusammenhang [28, S. 3]. Gleichgewicht in diesem Zusammenhang beschreibt den Wechsel von einem Vorgang (Hydratation) zum jeweils anderen. (Dehydratation). Dieser Zusammenhang unter Berücksichtigung der Randbedingungen ist in (6) zu sehen.

$$\Delta g_r = \Delta g_r^0 + RT_{eq} \ln \left(\frac{p_{eq}}{p^0} \right)^v = v \Delta h_r^0 - v T_{eq} \Delta s_r^0 + RT_{eq} \ln \left(\frac{p_{eq}}{p^0} \right)^v = 0 \quad (6)$$

$$p_{eq} = p^0 e^{-\frac{\Delta h_r^0}{RT_{eq}} + \frac{\Delta s_r^0}{R}} \quad (7)$$

Gleichung (7) ist (6) umgeformt und stellt einen direkten Zusammenhang zwischen der Gleichgewichtstemperatur und dem herrschenden Partialdruck des Sorptionsmittels her. Für die Berechnung von (7) ist die Standardenthalpie (Δh_r^0) und die Standardentropie (Δs_r^0) des betrachteten Salzes nötig. Diese sind in Kapitel 4 zu finden.

Neben der Kenntnis des Partialdrucks (p_i) spielt der Sättigungsdampfdruck des Sorptionsmittels (p_{Sat}) eine große Rolle in Bezug auf die Entwicklung eines TCS. Er bestimmt, ob das gewählte Sorptionsmittel in einem gasförmigen oder einem flüssigen Zustand im TCS-Modul vorliegt. Da ein Laden bzw. Entladen der Batterie nur bei einem im gasförmigen Zustand vorliegenden Sorptionsmittels möglich ist, stellt dieser Druck die obere Grenze in Bezug auf die reguläre Funktionsweise des Speichers dar. Die Bestimmung der Dampfdruckkurve erfolgt nach Gleichung von Wagner und Pruss. (8) [29]. Sie gilt für die Bestimmung der Dampfdruckkurve von Wasser und ist empirischer Natur. Für die Verwendung von anderen Sorptionsmitteln muss ihre Gültigkeit überprüft werden.

$$\ln \left(\frac{p}{p_c} \right) = \frac{T_c}{T} (\alpha_1 \tau + \alpha_2 \tau^{1,5} + \alpha_3 \tau^3 + \alpha_4 \tau^{3,5} + \alpha_5 \tau^4 + \alpha_6 \tau^{7,5}) \quad (8)$$

$$\tau = 1 - \frac{T}{T_c} \quad (9)$$

3.1.3 Rahmenbedingungen für die Wärmespeicherung

Das Hinzufügen eines TCS-Moduls auf den Seitenflächen führt unter statischen Annahmen zu einem Mehrwert (der gespeicherten Energie) und einem Nachteil der zusätzlichen thermischen Masse. Entsprechend muss der Vorteil gegenüber dem Nachteil abgewogen werden. Die Bestimmung der speicherbaren Energiemenge erfolgt über die Kapazität der Batterie (Tabelle 1 bzw. Gleichung 10).

$$C_{th,max} = m_{salz} * \Delta h_{salz}(Wh) \quad (10)$$

Sie setzt sich aus der gesamten Masse des eingebrachten Salzes und der Reaktionsenthalpie des verwendeten Salzes zusammen. Diese Gleichung stellt die unter idealen Bedingungen speicherbare Energiemenge dar.

Die Berechnung der zusätzlichen thermischen Masse erfolgt über die Bestimmung der sensiblen Wärmemenge. Die entsprechende Formel (3) ist in Kapitel 2 zu finden und hier aufgrund der Übersicht erneut aufgeführt. Formel (11) zeigt aus welchen Systemkomponenten sie sich zusammensetzt.

$$Q_i = \int_{T_1}^{T_2} m_i * c_{p_i} * dT$$

$$Q_{Gesamt} = Q_{Backofen} + Q_{Speicher} \quad (11)$$

$Q_{Backofen}$ entspricht der gesamten im Ofen gespeicherten Energiemenge. Die Masse der einzelnen Komponenten ist m_i und die spezifische Wärmekapazität der Bauteile ist c_{p_i} . Der Aufbau des Speichers ist in Abbildung 17 zu sehen. Es wird deutlich, dass der Speicher in Schichten aufgebaut ist. Die erste Schicht (1) besteht aus dem verwendeten Sorbat, in diesem Fall Kalziumoxalat, die zweite Schicht (2) ist ein Hohlraum, in dem das Sorptionsmittel eingebracht wird, die dritte Schicht (3) ist die Speicherhülle, bestehend aus Stahl und die vierte Schicht (4) ist die Wärmedämmung. Die zweite Schicht (der Hohlraum) nimmt eine Sonderstellung ein. Erst wird zunächst als ein Vakuum angenommen, in dem das Sorptionsmittel eingebracht wird. Da dies technische nur schwer zu realisieren ist, wird dies im späteren Verlauf geändert. Dann wird Luft mit einem bestimmten Druck den Hohlraum füllen. $Q_{Backofen}$ setzt sich aus dem Mantel des Ofens aus Stahl, der Tür und der umgebenden Wärmedämmung zusammen. Durch das Einbringen des Speichers verringert sich die Masse der Wärmedämmung und damit die thermische Masse. Dies muss entsprechend berücksichtigt werden. Dazu wird die thermische Masse des Backofens in zwei Teile aufgeteilt. Zum einen in die Wärmedämmung und zum anderen in alle anderen Teile. Diese haben eine konstante thermische Masse von 301,71 Wh. Diese Aufteilung zeigen Gleichung (12) und (13).

$$Q_{gesamt} = Q_{Backofen} + Q_{Speicher} = 301,71 \text{ Wh} + Q_{Isolation} + Q_{Speicher} \quad (12)$$

$$Q_{Speicher} = Q_{Salz} + Q_{Hohlraum} + Q_{H\u00fclle} \quad (13)$$

Die thermische Masse der W\u00e4rmed\u00e4mmung in Abh\u00e4ngigkeit der Abmessungen des Speichersystems zeigt Gleichung (14).

$$Q_{Isolation} = \rho_{Isolation} * (V_{Isolation} - 2 * V_{Speicher}) * c_{p_{Isolation}} * \Delta T \quad (14)$$

$$Q_{Isolation} = \rho_{Isolation} * (V_{Isolation} - 2 * (l_{Sp} * b_{Sp} * t_{Sp})) * c_{p_{Isolation}} * \Delta T \quad (15)$$

Da auf beiden Seiten des Backofens ein Speicher montiert wird, ist das Volumen, um das doppelte Speichervolumen zu verringern.

Der Speicher setzt sich wie in (13) zu sehen aus drei Materialien zusammen. Die f\u00fcr die Berechnung relevante Gr\u00f6\u00dfe ist dabei das Volumen, da die anderen Werte Stoffkonstanten sind. Die entsprechende Berechnung der Volumina zeigen die Gleichungen (16) – (18).

$$\begin{aligned} V_{Salz} &= l_{Salz} * b_{Salz} * t_{Salz} \\ &= (l_{Sp} - 2 \text{ mm}) * (b_{Sp} - 2 \text{ mm}) * (t_{Sp} - 1 \text{ mm}) * 0,9 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_{Hohlraum} &= l_{Hohlraum} * b_{Hohlraum} * t_{Hohlraum} \\ &= (l_{Sp} - 2 \text{ mm}) * (b_{Sp} - 2 \text{ mm}) * (t_{Sp} - 1 \text{ mm}) * 0,1 \end{aligned} \quad (17)$$

$$V_{H\u00fclle} = (l_{Sp} * b_{Sp} * t_{Sp} - ((l_{Sp} - 2 \text{ mm}) * (b_{Sp} - 2 \text{ mm}) * (t_{Sp} - 1 \text{ mm}))) \quad (18)$$

Die Faktoren 0,9 bzw. 0,1 bei (16) und (17) werden verwendet, da das Verh\u00e4ltnis der zwischen Salz und Hohlraum immer konstant mit 9:1 angenommen ist. Durch den Einsatz dieser Konstanten kann schnell das Verh\u00e4ltnis ge\u00e4ndert werden, ohne mit gro\u00dfem Aufwand die Gleichungen zu modifizieren. Die Funktion „fc_volume_container_2“ bildet diese M\u00f6glichkeit ab. F\u00fcr die Bestimmung des Volumens der H\u00fclle wird diese um das Volumen des Innenraums reduziert. Mit diesen beiden Gleichungen ist es m\u00f6glich, die Vor- und Nachteile des Systems in einem statischen Rahmen bestimmen zu k\u00f6nnen.

3.1.4 Bewertung des statischen Systems

Die Bewertung des geometrischen Systems erfolgt durch eine Bildung des Quotienten aus Nutzen zu Kosten (19). Die daf\u00fcr ben\u00f6tigten Gleichungen sind in den vorherigen Teilkapiteln bestimmt worden. Ziel ist es, einen Wert von \u00fcber 1 zu erreichen, da dies bedeutet, dass der Nutzen den Aufwand aus thermodynamischer Sicht \u00fcbersteigt.

$$\frac{\text{Nutzen}}{\text{Kosten}} = f(V_{Speicher}) = \frac{C_{th,max}}{Q_{gesamt} - Q_0} \quad (19)$$

3.2 Berechnung der Wärmeströme

Die Berechnung der Wärmeströme setzt sich aus zwei Aspekten zusammen. Diese sind,

- Der Verlustwärmestrom
- Die Reaktionskinetik bzw. der Wärmestrom der Batterie

Diese zwei Aspekte sind je nach Systemzustand alle stationär oder von der Zeit abhängig. Das Ziel ist, wie bei der statischen Betrachtung, eine Abschätzung zwischen den Vor- und Nachteilen eines TCS. Der Nachteil ist, der durch die dünnere Dämmschicht erhöhte, Wärmeverluststrom. Dem gegenüber als Vorteil steht die Reaktionskinetik, die eine zeitabhängige Speicherung von Energie ermöglicht. Diese beiden Größen werden wie zuvor analysiert und dann gegeneinander abgewogen, um eine optimale Speichergröße bestimmen zu können.

3.2.1 Berechnung des Verlustwärmestroms

Die Berechnung des Verlustwärmestroms erfolgt über Gleichung (20).

$$\dot{Q}_i = \frac{1}{R_i} * \Delta T \quad (20)$$

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i * A_i} \quad (21)$$

R_i (21) ist der thermische Widerstand und setzt sich aus der zuvor bestimmten Geometrie des Speichers und der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bauteile zusammen. R_i ist gleichzeitig der innere Widerstand der Batterie wie in Kapitel zwei in Tabelle 1 gezeigt. \dot{Q}_i stellt den Wärmestrom der Batterie dar und auch hier kann direkt der Vergleich zu einer elektrischen Batterie gezogen werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang der Betrachtungsrahmen. Werden nur die einzelnen Teile der Batterie betrachtet, trifft diese Analogie zu. Mithilfe von den Gleichungen (20) und (21) kann aber nicht nur der TCS analysiert werden, sondern das gesamte System. In diesem Fall wird die Dämmung und ggf. die Innenwand des Backofens in die Betrachtung mit einbezogen. Zusätzlich spielt die Richtung des Wärmestroms eine entscheidende Rolle. In dem betrachteten System steht dieser während des Abkühlvorgangs orthogonal auf den vier Außenwänden und zeigt in Richtung der Umgebung. Diese stellt mit ihrem jeweiligen Temperaturniveau die Wärmesenke dar. Beim Laden des Speichers entsteht eine zweite Wärmesenke im Bereich des Salzes.

Beim Entladen des Speichers dreht sich dieser Sachverhalt in Bezug auf den Speicher um. Der Speicher ist dann eine Wärmequelle und die Umgebung und der Backofen sind die Wärmesenken.

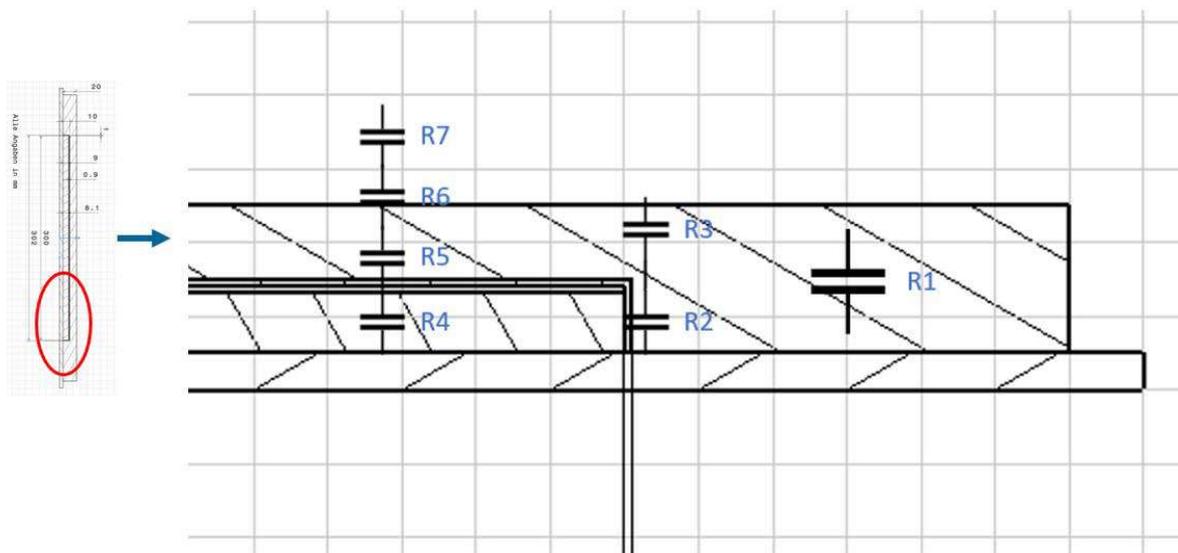


Abbildung 18: Darstellung der thermischen Widerstände eines Speichers

Abbildung 18 zeigt die verschiedenen thermischen Widerstände der Seitenwand des Backofens mit integriertem Speichersystem. Die Berechnungsvorschrift zum Zusammenfassen der einzelnen Widerstände entspricht der von elektrischen Widerständen. Die Vorschriften sind in Gleichung (22) für thermische Widerstände in einer Reihenschaltung und in (23) für eine Parallelschaltung gezeigt.

$$R_{Reihe} = \sum_i R_i \quad (22)$$

$$\frac{1}{R_{Parallel}} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (23)$$

Einen Sonderfall stellt R_5 , der Innenraum des Speichers dar. Sein thermischer Widerstand hängt von in dem Raum befindlichen Gasgemisch ab. Da dies sehr variabel sein kann, wird zunächst Luft unter Standardbedingungen betrachtet. Sobald weitere praktische Untersuchungen durchgeführt worden sind, kann diese Annahme weiter angepasst werden.

3.2.2 Bestimmung der Reaktionskinetik

Die Bestimmung der Reaktionskinetik erfolgt mit dem Ziel herauszufinden, mit welcher Rate das Salz innerhalb des TCS Energie speichert bzw. abgibt. Die Rate ist gleichzusetzen mit der Geschwindigkeit, bei der sich das Sorptionsmittel mit dem Sorptiv verbindet bzw. sie sich voneinander lösen. Dieser Vorgang wird von Gleichung (24) beschrieben. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass es sich bei dem Umsatz w um eine paarspezifische Größe handelt und die Einheit [kg/kg] besitzt. Mit Formel (25) lässt sich der maximale Wert von w in Bezug auf die verwendete Stoffpaarung bestimmen.

$$\frac{dm_{Gas}}{dt} = m_{Salz \circ Gas} * \frac{dw}{dt} \quad (24)$$

$$w_0 = \frac{m_{Gas}}{m_{Salz \circ Gas}} \quad (25)$$

Die Bestimmung der Absorptionsrate erfolgt über einen LDF-Ansatz und ist in [30] zu finden. Für die Berechnung sind aktuell noch unbekannte Stoffeigenschaften nötig (Häufigkeit der Sprünge von Wassermolekülen zwischen Absorptionsplätzen). Daher ist die mathematische Beschreibung dieses Ansatzes nur der Vollständigkeit halber genannt. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Umsatzrate ist über einen Arrhenius ähnlichen Ansatz. Dieser ist in (26) zu sehen.

$$\frac{dx}{dt} = k(T) * F(x) \quad (26)$$

$$k(T) = k_0 e^{-\frac{E}{R \cdot T}} \quad (27)$$

Die Umsatzrate x beschreibt in diesem Fall prozentual den Vorgang der Ab- bzw. Desorption. (27) zeigt den preexponentiellen Faktor und $F(x)$ die Umsatzfunktion. Die Ableitung von (26) ist ausführlich in [31] durchgeführt. (28) stellt das Ergebnis dar. Dabei ist t die Zeit, die benötigt wird, um einen bestimmten prozentualen Umsatz zu erreichen.

$$t = \frac{G(x)}{k(T)} \quad (28)$$

$$G(x) = \int_0^x \frac{dx}{F(x)} \quad (29)$$

Für die Variablen k_0 , E und $G(x)$ sind in der Literatur unterschiedliche Werte zu finden. Diese sind in Tabelle 2 aufgeführt. Dieser Ansatz basiert auf der Annahme, dass die Diffusion durch das Salz im Vergleich zur Diffusion in das Salz vernachlässigbar klein ist [32, S. 71].

Tabelle 2: Variablen zur Bestimmung der Umsatzrate

Quelle	ΔT (°C)	k_0 (sec ⁻¹)	E (kJ/mol)	G(x)
[33]	100 – 227	$1,11667 \cdot 10^{12}$	118,6	$1 - (1 - x)^{1/3}$
[34]	102 - 177	$4,0833 \cdot 10^7$	86	$1 - (1 - x)^{1/2}$
[35]	127 - 200	$1,55 \cdot 10^{11}$	118	$1 - (1 - x)^{1/2,018}$

Die für diese Arbeit verwendeten Werte sind die aus der ersten Zeile von Tabelle 2. Die Entscheidung für diese Variablen basiert auf dem Temperaturbereich, für den diese gelten. Er deckt sich am besten mit den Arbeitspunkten des Backofens. Entsprechend ergibt sich für die Zeit $t(x)$ die Gleichung (30). Umgeformt berechnet sich die Umsatzrate in Abhängigkeit der Zeit $x(t)$ nach (31). R ist dabei die allgemeine Gaskonstante.

$$t = \frac{1 - (1 - x)^{\frac{1}{3}}}{k_0 e^{-\frac{E}{R \cdot T}}} \quad (30)$$

$$x = 1 - \left(1 - t * k_0 e^{-\frac{E}{R \cdot T}}\right)^3 \quad (31)$$

Mit diesen Gleichungen lässt sich die Reaktionskinetik hinreichend genau abbilden. Zusätzlich wird deutlich, dass in Bezug zur Bestimmung der Reaktionskinetik verschiedene Ansätze in der Literatur zu finden sind. In Bezug auf die Entwicklung eines TCS stellen diese Gleichungen nur eine erste Abschätzung dar. Die verwendeten Konstanten müssen im weiteren Verlauf des Projekts durch praktische Versuche verifiziert und validiert werden.

3.2.3 Beschreibung des Gesamtsystems

Die Berechnung des Gesamtsystems erfolgt durch das Zusammenfügen der in den vorherigen Teilkapiteln beschriebenen Einzelteilen. Diese sind,

- Die im System gespeicherte Wärme
- Der Verlustwärmestrom
- Die im Speicher enthaltene Energie

Diese Einzelteile werden über Gleichung (32) miteinander verbunden.

$$\frac{dQ(t, T)}{dt} = \int \dot{Q}_{Verlust}(t, T) dt + \frac{dC_{1,2}(t)}{dt} \quad (32)$$

Gleichung (32) zeigt, dass die im Backofen enthaltene Energiemenge zum Zeitpunkt t gleich dem integrierten Verlustwärmestrom über den betrachteten Zeitraum ist und der über Δt gespeicherten oder abgegebenen Wärme des TCS. Dabei ist zu beachten, dass das Vorzeichen des Wärmestroms der Batterie in Abhängigkeit des betrachteten Vorgangs (Entladen oder Aufladen) steht. In Bezug auf die Energie der Batterie bedeutet dies, dass die Batterie beim Aufladen Energie aufnimmt (-) und beim Entladen Energie an das System abgibt (+). Die Temperatur- und Zeitabhängigkeit von Q und $\dot{Q}_{Verlust}$ macht aus (32) eine lineare Differentialgleichung erster Ordnung und wird numerisch gelöst. Die Berechnung erfolgt in diskretisierten Zeitintervallen (Δt) von einer Sekunde. Am Beispiel des Abkühlvorgangs bedeutet dies, dass ausgehend von der im Backofen herrschenden Temperatur der Wärmeverlust und die chemisch gespeicherte Energie bestimmt werden. Anschließend die daraus resultierende neue Wärmemenge im System und die neue Temperatur in Bezug zur Außentemperatur von 25 °C bestimmt werden. Dann beginnt die Iteration von neuem, bis die Energie im System im Vergleich zur Außentemperatur auf null gesunken ist. Für das Erwärmen des Backofens ist das Vorgehen gleich, nur dass die Batterie Wärme abgibt und dadurch die Temperatur im System steigt. Dieser numerische Algorithmus ist in Form eines Flussdiagramms in Abbildung 19 grafisch dargestellt.

Flussdiagramm der dynamischen Systembeschreibung

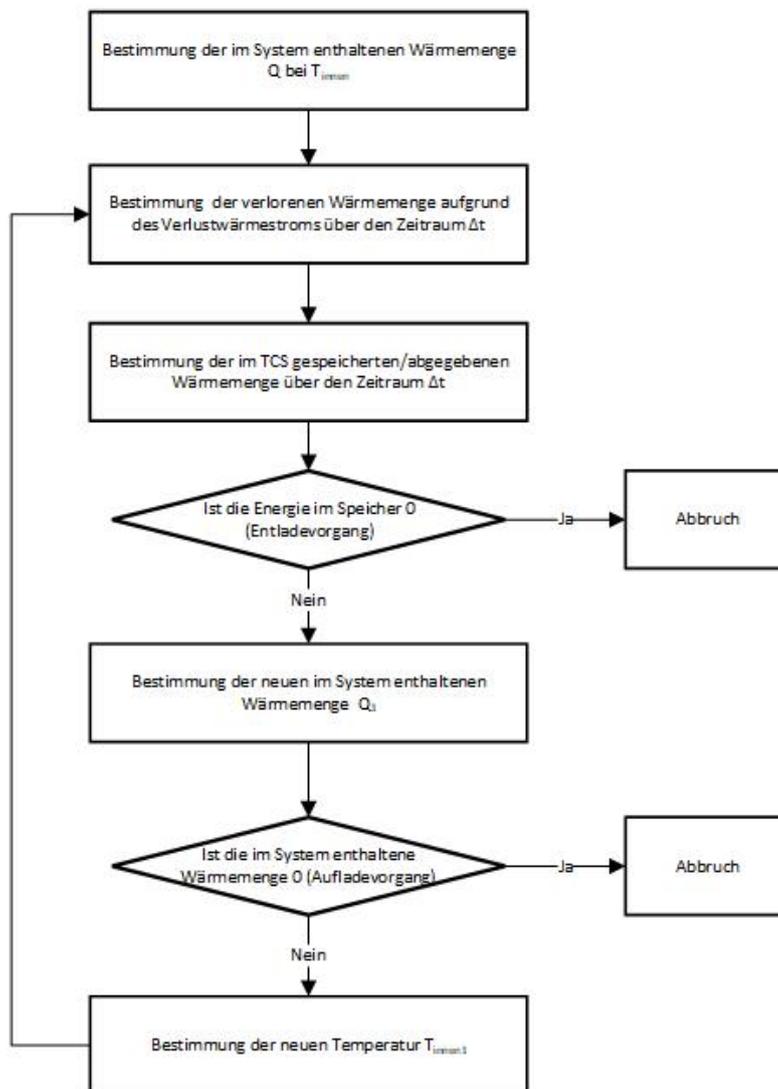


Abbildung 19: Flussdiagramm der dynamischen Systembeschreibung

Die in Form eines Flussdiagramms dargestellte zeitabhängige Systembeschreibung enthält zwei Abbruchkriterien. Diese kommen in Abhängigkeit des betrachteten Vorgangs zur Anwendung. Beim Abkühlvorgang des Backofens bzw. dem Laden der Batterie bricht der Algorithmus ab, sobald die Wärmemenge innerhalb des Systems auf 0 gesunken ist. Das ist der Fall, wenn das System die Umgebungstemperatur angenommen hat. Dem gegenüber steht der Aufwärmvorgang bzw. das Entladen der Batterie. Hier greift die zweite Abbruchbedingung. Sie beendet die Iteration, sobald die im Speicher enthaltene Energie auf 0 sinkt. Die Starttemperatur beider Vorgänge kann dabei frei gewählt werden. Dies stellt das Anschalten und das Ausschalten des Speichers zu bestimmten Temperaturen dar. Damit ist es möglich, den optimalen Betriebspunkt für die jeweiligen Vorgänge zu untersuchen.

4 Darstellung der Simulation

Dieses Kapitel wendet die in Kapitel 3 beschriebenen Gleichungen an und stellt die Ergebnisse der Berechnungen dar. Die Simulation wurde mithilfe von Python 3 in einem Jupyter Notebook erzeugt. Für die Durchführung der Analyse wurde mit „Python-Wörterbüchern“ gearbeitet und sich gegen die Verwendung von Klassen entschieden. Auf Basis der Problemstellung erscheint die Verwendung einer auf Funktionen basierenden Programmierung sinnvoller als die Nutzung von Objekten.

4.1 Darstellung der statischen Simulation

Die statische Simulation erfolgt, wie in Kapitel 3 beschrieben, ohne die Betrachtung der Zeit. Sie hat zum Ziel, die Geometrien, die speicherbare Wärmemenge und das Verhältnis von Kosten und Nutzen eines Speichersystems zu bestimmen. Dabei werden die jeweiligen Ergebnisse immer in Wörterbüchern zusammengefasst. Diese setzen sich aus einem Namen, dem Wert und der entsprechenden Einheit zusammen. Dies erlaubt es, die Ergebnisse schnell zu erfassen und sie verständlich darstellen zu können. In Abbildung 20 ist exemplarisch das Wörterbuch der Wärmedämmung gezeigt. Die weiteren Wörterbücher sind der Backofen, der Container, das Salz und der Hohlraum zwischen Containerwand und Salz. Diese sind in Abbildung 80 bis Abbildung 83 im Anhang zu finden. Sie bilden die Grundlage für die weiteren Berechnungen und damit die Basis der Simulation. Im Gegensatz zu dem Wörterbuch des Backofens sind die Abmessungen des Speichers und der Wärmedämmung unbekannt und werden in einem ersten Schritt im Rahmen der statischen Simulation bestimmt.

```
c_iso = {
    "Material": ["Glass-Wool", "--"],
    "width": [0.48, "m"],
    "height": [0.38, "m"],
    "depth": [0.44, "m"],
    "area_side": [0.1672, "m^2"],
    "area_tb": [0.2112, "m^2"],
    "area_back": [0.1824, "m^2"],
    "thickness": [0.02, "m"],
    "volume": [0.018784, "m^3"],
    "density": [40, "kg/m^3"],
    "mass": [0.75136, "kg"],
    "cp": [840, "J/(kg*K)"],
    "conductivity": [0.0493, "W/(m*K)"] }
```

Abbildung 20: Exemplarische Darstellung des "Wörterbuchs" Wärmedämmung der statischen Berechnung

4.1.1 Darstellung der Geometrieberechnung des Speichers

Die Geometrieberechnung verfolgt das Ziel, alle für die weitere Berechnung nötigen Variablen zu bestimmen und in die entsprechenden Wörterbücher einzutragen. Das Befüllen dieser Wörterbücher erfolgt entsprechend der in Kapitel 3 beschriebenen Randbedingungen. Es können das Gewicht des Salzes, die äußeren oder die inneren Abmessungen des Speichers als Ausgangspunkt für die Berechnungen verwendet werden. Die entsprechenden Funktionen mit zusätzlichen Kommentaren und Erläuterungen sind unter „Geometrische Funktionen“ im sonstigen Anhang zu finden. Es ist zu beachten, dass die Angaben für Länge, Breite und Tiefe in den Funktionen sich immer auf das System Backofen beziehen. Dabei werden immer nur die Werte für einen Speicher berechnet und nicht die des gesamten Systems. Da das System aber aus zwei Speichern (links und rechts) besteht, muss dies bei den folgenden Berechnungen zusätzlich beachtet werden.

```
height = 0.302      #m
depth  = 0.302      #m
width  = 0.01       #m
thickness = 0.001   #m
#mass  = 3          #kg

fc_volume_cont = fc_volume_container (height, depth, width, thickness)

c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]
```

Abbildung 21: Programmcode zur Bestimmung aller abhängigen Variablen in Bezug auf das äußere Volumen eines Speichers

Abbildung 21 zeigt den Programmcode zur Bestimmung aller abhängigen Variablen unter der Voraussetzung, dass die Außenmaße die unabhängigen Größen sind. Die gewählten Größen entsprechen dabei dem in Abbildung 17 gezeigten Beispiel. Der Vorteil der funktionalen Programmierung wird anhand des kurzen und prägnanten Codes gut deutlich. Durch die gewählte Vorgehensweise lässt sich einfach zu lesender Code erzeugen und es lassen sich schnell unterschiedliche Speichergrößen erzeugen, die für die weitere Analyse wichtigen Werte der verschiedenen Abmessungen bestimmt. In Abbildung 22 sind die Ergebnisse in Bezug auf das Salz des Speichers zu sehen. Die Menge an Nachkommastellen können mit einem Rundungsbefehl abgeschnitten werden und entstehen durch die Verwendung von Integers. Die kompletten Ergebnisse dieses Beispiels sind Abbildung 84 im Anhang zu finden.

Name	Value	Unit
Material	CaC204	--
width	0.0081	m
height	0.3	m
depth	0.3	m
area	0.09	m ²
volume	0.00073	m ³
density	1000	kg/m ³
mass	0.73	kg
mass_hy	0.73	kg
mass_dehy	0	kg
cp	1094.85	J/(kg*K)
conductivity	0.415	W/(m*K)
Energy-Density	473446.4823	J/kg
Chemical-Energy (J)	345615.93208	J
Chemical-Energy (Wh)	96.00443	Wh

Abbildung 22: Auszug aus den Ergebnissen der geometrischen Funktionen

4.1.2 Darstellung der Rahmenbedingungen für das Laden und Entladen der Batterie

Um die Rahmenbedingungen für das Laden bzw. Entladen der Batterie bestimmen zu können, sind die Standardreaktionsentropie und die Standardreaktionsenthalpie des verwendeten Salzes nötig. Für Kalziumoxalat sind in der Literatur für diese Größen keine einheitlichen Werte zu finden, sondern je nach Veröffentlichung voneinander abweichende Werte. Da diese Werte experimentell bestimmt worden sind, können die Abweichungen verschiedene Ursachen besitzen. In Tabelle 3, sind die Messergebnisse mit den jeweiligen Quellenangaben zusammengefasst. Aus diesen Werten ist für jede der beiden Größen das arithmetische Mittel gebildet worden. Dieser Wert für die jeweilige Größe wird in der restlichen Arbeit verwendet. Der Druck p_0 stellt den Bezugswert für die Standardentropie und die Standardenthalpie dar und ist in diesem Fall mit 1,013 bar festgelegt. R ist die allgemeine Gaskonstante.

$$p_{eq} = p^0 e^{-\frac{\Delta h_r^0}{RT_{eq}} + \frac{\Delta s_r^0}{R}}$$

Mithilfe dieser Daten ist es möglich, den direkten Zusammenhang zwischen der Gleichgewichtstemperatur und des Gleichgewichtsdrucks zu bestimmen. Da diese Informationen für die statische Betrachtung nicht in den Programmcode mit einfließen, wurden diese Berechnungen mit Excel durchgeführt.

Tabelle 3: Standardenthalpien und Standardentropien von Kalziumoxalat

$\Delta h_r^0 \left(\frac{kJ}{mol} \right)$	$\Delta s_r^0 \left(\frac{J}{mol * K} \right)$	Quelle
$69,8 \pm 3,0$		[36]
$69,5 \pm 0,8$	$134,0 \pm 1,7$	[37]
$65,7 \pm 3,8$		[38]
$66,5 \pm 0,2$	$120,9 \pm 12,6$	[39]
74,4		[40]
69,18	127,45	Arithmetisches Mittel

Die Anwendung der Gleichung über einen Temperaturbereich von 10 °C bis 277 °C ist in tabellarischer Form im Anhang in Abbildung 63 bis Abbildung 68 zu finden. Die grafische Darstellung ist zum einen in Abbildung 69 im Anhang und zum anderen in Abbildung 23 zu sehen. Die beiden Kurven unterscheiden sich in der Skalierung ihrer y-Achsen. Die erste Darstellung besitzt eine lineare Skalierung und die zweite eine logarithmische. Die zweite Darstellung wurde erstellt, um die berechneten Werte der Exponentialfunktion besser darstellen zu können.

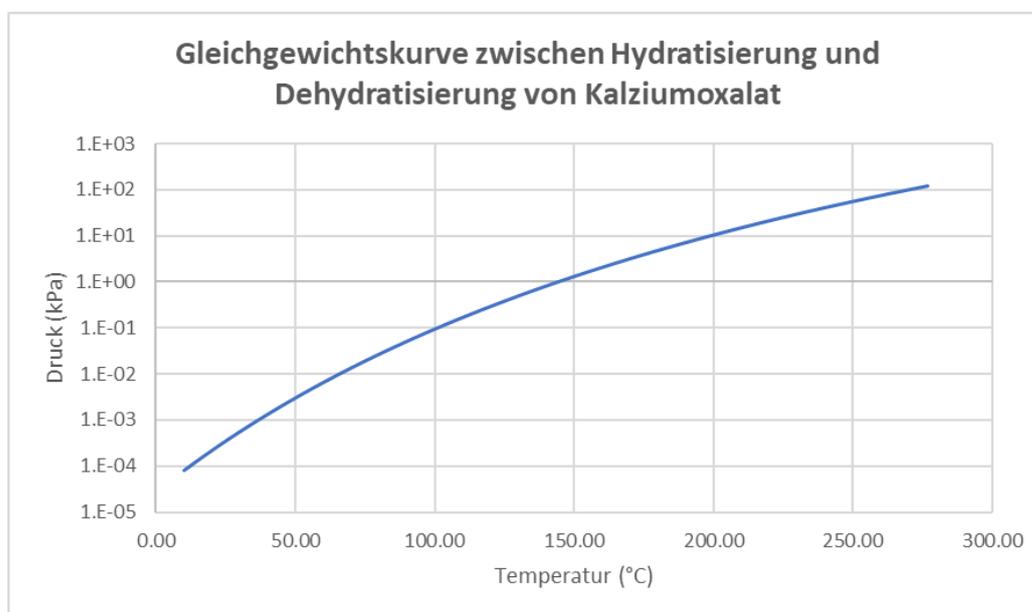


Abbildung 23: Gleichgewichtskurve zwischen Hydratisierung und Dehydratisierung von Kalziumoxalat (logarithmische y-Achsen Skalierung)

Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Temperatur von 25 °C ein Partialdruck des Wassers von $3,49 \cdot 10^{-6}$ bar die Grenze zwischen Dehydration und Hydratation des Salzes darstellt. Im Gegensatz dazu liegt der Partialdruck bei 175 °C bei ca. 0,04 bar. Es wird deutlich, dass die Werte sehr niedrig im Vergleich zum allgemein herrschenden Druck sind. Gleichzeitig zeigt das Salz ein günstiges Verhalten in Bezug auf sein Hydrations- und Dehydrationsverhalten. Es verlangt einen niedrigen Partialdruck im Temperaturfenster der Hydratation und einen um einen Faktor 10^4 höheren Druck bei der Dehydratation.

Im zweiten Schritt wurde die Dampfdruckkurve von Wasser bestimmt. Die zur Berechnung benötigten Konstanten sind in Tabelle 4 zu finden. Der kritische Druck und die kritische Temperatur sind die von Wasser.

Tabelle 4: Konstanten zur Bestimmung der Dampfdruckkurve von Wasser

α_1	-7,85951783
α_2	1,84408259
α_3	-11,7866497
α_4	22,6807411
α_5	-15,9618719
α_6	1,80122502
T_c	647,096 K
p_c	$22,064 \cdot 10^6$ Pa

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abbildung 71 bis Abbildung 76 im Anhang zu finden. Abbildung 77 stellt die Ergebnisse grafisch auf einer linearen y-Achse dar und Abbildung 78 anhand einer logarithmischen y-Achsen Einteilung. Bei einer Temperatur von 25 °C liegt der Sättigungsdampfdruck bei ca. 0,03 bar und bei 175 °C bei ca. 8,9 bar. Diese Werte sind signifikant höher als die Gleichgewichtsdrücke für Kalziumoxalat. Dies stellt ein erfolgversprechendes Ergebnis in Bezug auf die Umsetzung eines TCS-Moduls bei dieser Sorptiv-Sorptionsmittel Konfiguration dar.

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \frac{T_c}{T} (\alpha_1 \tau + \alpha_2 \tau^{1,5} + \alpha_3 \tau^3 + \alpha_4 \tau^{3,5} + \alpha_5 \tau^4 + \alpha_6 \tau^{7,5})$$

$$\tau = 1 - \frac{T}{T_c}$$

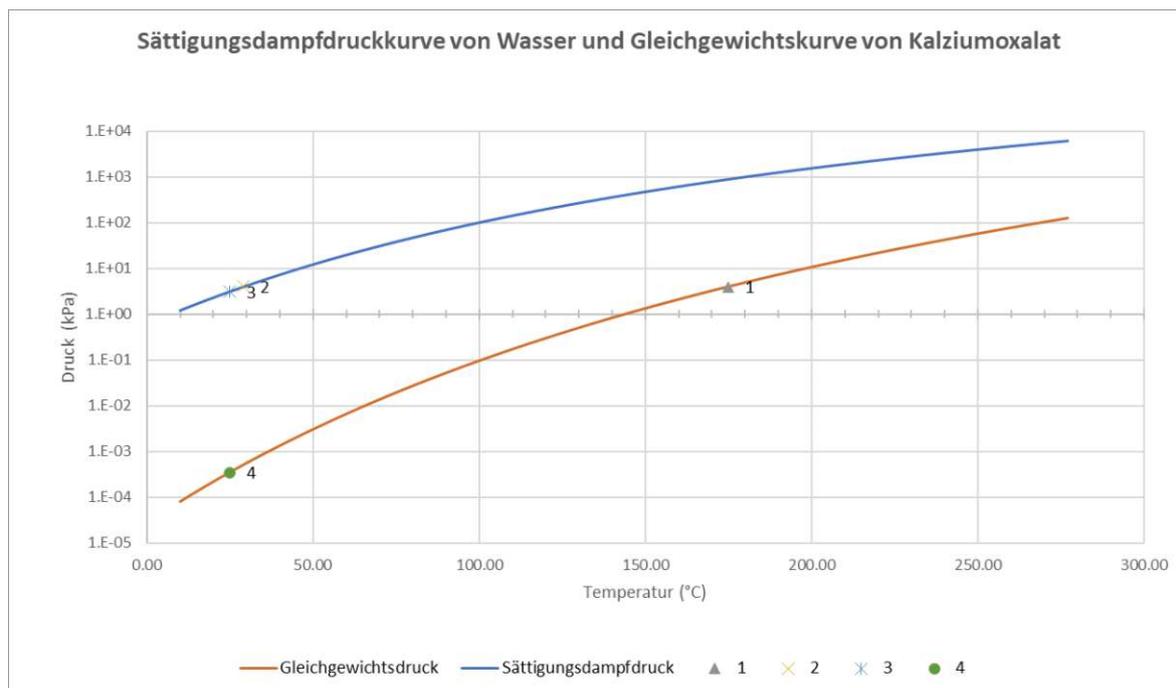


Abbildung 24: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser, Gleichgewichtskurve von Kalziumoxalat und die idealisierten Zustände

Die zuvor beschriebenen Ergebnisse sind in Abbildung 24 in einer Abbildung zusammengefasst. Zusätzlich wurden die für den idealen Prozess relevanten Punkte (1 – 4) eingetragen. Die vier Punkte stellen den idealisierten Kreisprozess eines TCS-Moduls dar. Unter den genannten Annahmen findet bei (1) die Dehydratisierung des Speichers statt, der dabei ausgetretene Wasserdampf wird isobar im Auffangbehälter auf die Sättigungstemperatur abgekühlt (2), isochor auf Raumtemperatur weiter heruntergekühlt (3), anschließend wird der Speicherhydratisiert (4) und die dabei abgegebene Wärmemenge führt zu (1). Dabei ist wichtig zu beachten, dass es sich hierbei um einen stark vereinfachten Vorgang handelt und Zustandsänderung des Systems während des Ladens und Entladens der Batterie simultan ablaufen. Das bedeutet am Beispiel des Ladens der Batterie, dass Punkt 1 den maximal erreichbaren Druck darstellt. Um den Prozess fortzuführen, muss der Wasserdampf abgeführt werden und kühlt dabei entsprechend ab. Hinzu kommt, dass während des Prozesses die im System enthaltene Menge an Wasserdampf sich stetig ändert. Gleiches gilt für den umgekehrten Fall. Zusätzlich kühlt bei einem realen Vorgang der Körper, dem Energie entzogen wird ab, was zusätzlich zu einer Änderung des thermodynamischen Zustands führt. Zum Abbilden dieser Vorgänge ist es nötig, die im Backofen enthaltene Energie zu kennen, die Abmessungen des Speichers sowie dessen Kapazität und die dadurch im System enthaltene Menge an Wasserdampf. Diese Größen werden im Folgenden bestimmt.

4.1.3 Bestimmung der thermischen Masse des Systems

Für die Bestimmung der thermischen Massen sind die in Tabelle 5 angeführten Größen nötig. Für die Speicherhülle wird aus fertigungstechnischen Gründen zunächst der gleiche Stahl, aus dem auch der Backofen gefertigt ist, verwendet. Daher sind die Materialkonstanten die gleichen und werden nicht zusätzlich aufgeführt. Zusätzlich sind die Werte für Luft unter Standardbedingungen aufgeführt. Dies geschieht im Hinblick auf die Möglichkeit Luft, statt ein Vakuum im Hohlraum des Speichers betrachten zu können.

Tabelle 5: Materialkonstanten des TCS-Moduls

Name	Material	Spez. Wärmekapazität (J / (kg*K))	Dichte (kg / m ³)
Salz	CaC ₂ O ₄	1094,85	1000
Luft ³	Gasgemisch	1005	1,2041
Speicherhülle	Stahl	500	7900
Isolation	Glass-Wolle	840	40

Diese Bestimmung erfolgt über die Funktion „storedenergy“. Die Funktion verwendet die zuvor bestimmten geometrischen Werte aus den Wörterbüchern (Oven, Isolation, Container, Cavity) sowie die gewählte Temperaturdifferenz und gibt die gesamte thermische Masse des Systems Backofen und des Speichers in Joule und Wattstunden aus. Der entsprechende Code ist in Abbildung 26 zu sehen. Zusätzlich ist im Anhang unter „statische Funktionen“ die Funktion „storedenergy2“ zu finden. Diese Funktion berücksichtigt zusätzlich die Möglichkeit, dass der Hohlraum mit einem Gas (z.B. Luft) gefüllt ist. Abbildung 25 zeigt das Resultat in Bezug auf das Beispielsystem.

```

Thermische Masse (ursprünglich): 317,93 Wh

Thermische Masse (neu): [1497139.83, 'J'] , [415.87218, 'Wh']

Differenz: 97.93218 Wh
-----
Für einen Speicher:

Chemische Energie: 345615.93208 J, 96.00443 Wh
-----
Für das gesamte System:

Chemische Energie: 691231.86416 J, 192.00886 Wh

```

Abbildung 25: Ausgabe der Funktion storedenergy

³ Unter Normbedingungen

```

def storedenergy (oven, isolation, container, salt, t0, t1):
    # Berechnet die gespeicherte Energie im Gesamtsystem
    # Q = m*cp*dT

    # Infos für q_oven
    # 301.71Wh = 317.93 (Gesamte Speichermenge) - 16.22 (Isolation)
    # 101.3 Wh sind die Glasstür - Daten von BSH 301.71Wh * 3600 = 1086156 J
    # heating element haben ein dT = 400 - 25 statt 175 - 25

    q_oven = [oven["Stored-Energy (J)"][0], 'J']
    # BSH verwendet g/m^2 als Einheit der Dichte; wird dann auf 20mm reduziert;

    #v_iso = c_iso['volume'][0] - 2* c_cont["volume"][0]
    #m_iso = v_iso * c_iso["density"][0]

    #Bestimmung der Temperaturänderung aus Excel von BSH
    q_isolation = [round(isolation['mass'][0] * isolation["cp"][0] * ((t1 + 60) / 2 - t0),5), 'J']

    q_cont = [round(container['mass'][0] * container["cp"][0] * (t1-t0),5), 'J']

    q_salt = [round(salt['mass'][0] * salt["cp"][0] * (t1-t0),5), 'J']

    #q_cavity = c_cavity['mass'][0] * c_cavity["cp"][0] * (t1-t0)

    # 2x weil pro Seite ein Speicher ist
    stored_J = [round(q_oven[0] + q_isolation[0] + ((q_cont[0] + q_salt[0]) * 2),5), 'J']

    stored_Wh = [round(stored_J[0] / 3600,5), 'Wh']

    return stored_J, stored_Wh, q_oven, q_isolation, q_cont, q_salt

```

Abbildung 26: Darstellung der Funktion "storedenergy"

Es wird deutlich, dass in der gewählten Beispielkonfiguration die speicherbare Wärmemenge die zusätzlich eingebrachten thermischen Massen übersteigt. Ein System in dieser Konfiguration würde entsprechend einen Mehrwert darstellen.

Für die ordentliche Betrachtung dieses Systems ist es erforderlich, alle möglichen Größen unter den beschriebenen Gesichtspunkten zu betrachten. Für die Umsetzung wurde eine quadratische Grundfläche des Speichersystems mit einer Kantenlänge von 10 cm gewählt. Das Vorgehen dabei war zunächst, die Länge und die Breite des Speichers gleichzeitig um jeweils 10 mm zu erhöhen und dann nach Erreichen der maximalen Größe (300 mm * 300 mm) die Höhe des Speichers schrittweise, um einen 1 mm zu erhöhen. Die Ergebnisse wurden anschließend als Funktion $f(V_{\text{Speicher}}) = \text{Nutzen/Kosten}$ grafisch dargestellt. Der entsprechende Code für die Berechnungen ist in sonstige Anhänge, unter Bestimmung des Kosten / Nutzen-Faktors und der verlorenen Energiemenge (statisch) zu finden.

Abbildung 27 stellt die Ergebnisse grafisch dar. Der Unterschied zwischen den beiden Graphen liegt in der gewählten Starthöhe des Systems. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf bei einer Starthöhe von 5 mm und die orange Kurve den bei 10 mm. Der Anstieg der Kurve ist dem Umstand geschuldet, dass das Verhältnis Hüllenmaterial zu Salz sich bei jeder Vergrößerung der Grundfläche in Richtung des Salzes verschiebt. Dadurch strebt das System einen Grenznutzen an. Zusätzlich wird deutlich, dass die Höhe des Speichers einen signifikanten Einfluss auf den Kosten-Nutzen-Faktor besitzt. Beide Kurven streben schnell den genannten Grenznutzen an. Ein erneuter Anstieg erfolgt erst durch eine zusätzliche Vergrößerung des Speichers in die Tiefe (Width). Die kompletten Daten der Berechnung sind im Anhang in Abbildung 85 und Abbildung 86 zu finden.

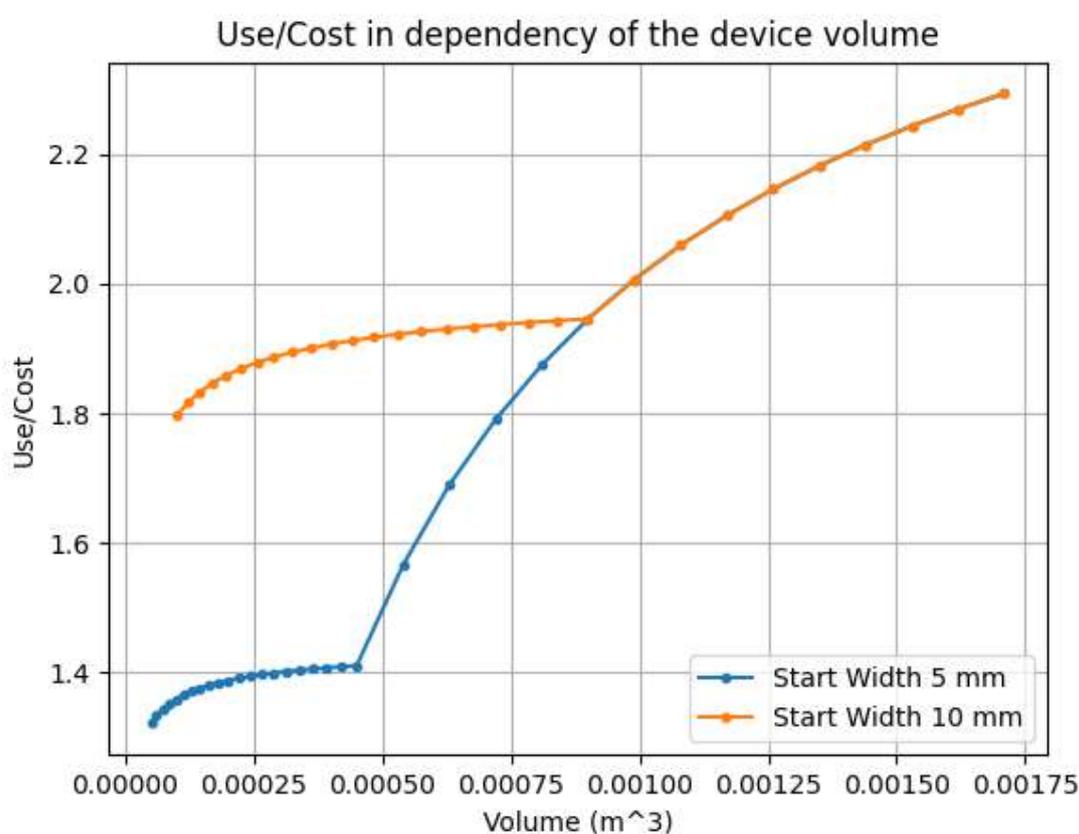


Abbildung 27: Kosten / Nutzen-Funktion über das Volumen des Speichers

Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich überschlägige Kosten-Nutzen Beziehung in Bezug auf unterschiedliche Höhen des Speichers ableiten. Bei einer Speicherhöhe von 5 mm liegt dieser bei ca. 1,41 und bei 10 mm bei ca. 1,94 Diese sind in Tabelle 6 auszugsweise aufgelistet.

Tabelle 6: Kosten / Nutzen-Faktor in Abhängigkeit der Höhe des Speichers (Auszug)

Höhe (mm)	8	10	12	14	16	18	19
Kosten/Nutzen	1,79	1,94	2,06	2,14	2,21	2,27	2,29

Es ist wichtig zu beachten, dass der Kosten-Nutzen-Faktor bei gleichbleibender Speicherhöhe zwar nicht signifikant ansteigt, aber die Kapazität der Batterie. Um diesen Umstand abzubilden, ist eine weitere Größe nötig, die verlorene Wärmemenge Q_{Verloren} . Die Größe wird nach Formel (33) bestimmt.

$$Q_{\text{Verloren}} = Q_{\text{Gesamt}} - C_{th,max} \quad (33)$$

Diese Größe beschreibt die Energiemenge, die nach Abschluss des Backvorgangs ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Bei dem betrachteten Backofen ohne Speichersystem beträgt sie 317,93 Wh. In Abbildung 28 sind die Ergebnisse über das Volumen des Speichers dargestellt.

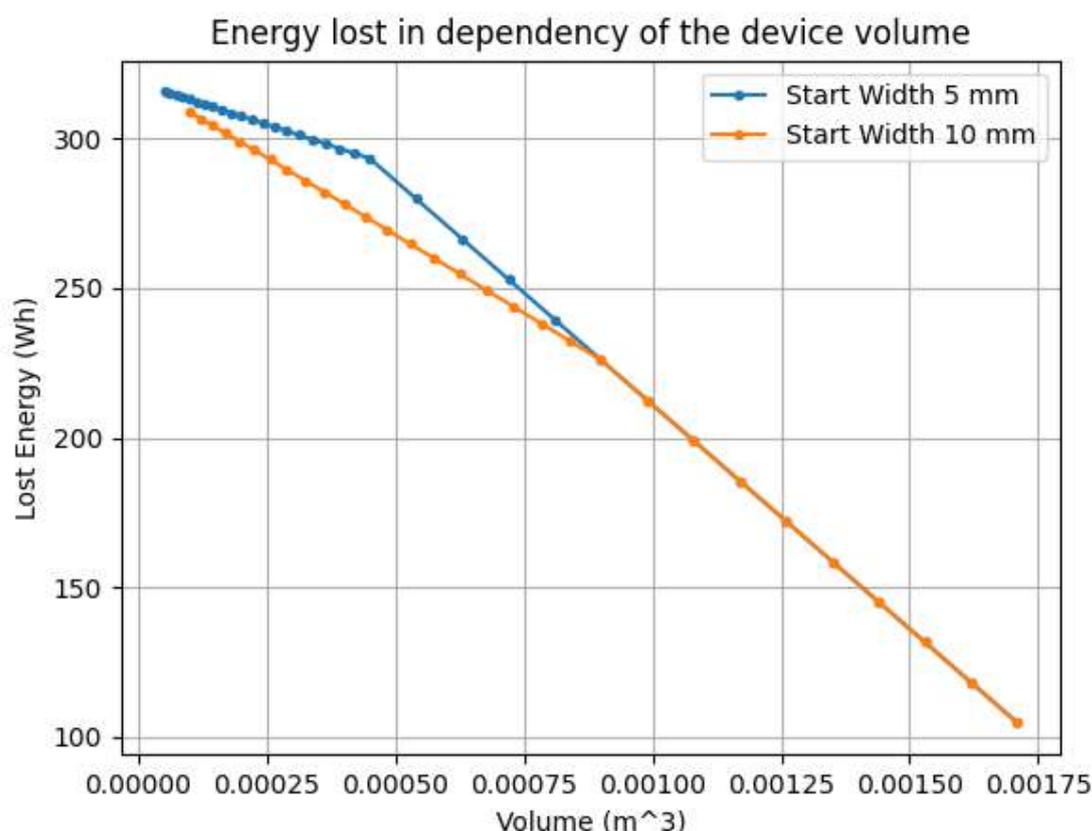


Abbildung 28: Darstellung der verlorenen Energiemenge über das Speichervolumen

Die Ergebnisse decken sich mit den Erwartungen in Bezug auf den KN-Faktor. Bei einer Speicherhöhe von 5 mm und einem KN-Faktor von ca. 1,14 ist die verlorene Energiemenge größer als bei einem System mit 10 mm Höhe. Dieses System besitzt einen KN-Faktor von 1,96. Bei einer Vergrößerung des Speichers sinkt die verlorene Energiemenge konstant. Die Änderung der Steigung der beiden Kurven findet in dem Moment statt, in dem die Höhe des Speichers nach Erreichen der maximalen Fläche weiter erhöht wird. Die Kurve zeigt dabei einen linearen Abwärtstrend. Sie lässt den Schluss zu, dass es theoretisch (rechnerisch) möglich sein sollte die gesamte im Backofen vorhandene Wärme zu speichern.

Um diesen Sachverhalt zu prüfen, wird die Funktionsvorschrift des linearen Teils der Kurve bestimmt. Die zur Bestimmung verwendeten Punkte sind (0,0009 m³ / 225,97153 Wh) und (0,00171 m³ / 104,54661 Wh). Daraus ergibt sich die in (34) dargestellte Gleichung.

$$Q_{\text{Verloren}} = -149907,3086 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^3} * V_{\text{Speicher}} + 360,8881 \text{ Wh} \quad (34)$$

Durch die Bestimmung der Nullstelle dieser Gleichung lässt sich eine Höhe bestimmen, bei der dieses Speichersystem rechnerisch in der Lage ist, die gesamte im Backofen vorhandene Wärme zu speichern. Dies ist der Fall bei einer Speicherhöhe von 2,675 cm. Die Länge einer Seite des quadratischen Speichers ist weiterhin 30 cm. Die für ein solches Speichersystem geltenden thermischen Größen sind in Abbildung 29 zusammengefasst.

```

Thermische Masse (ursprünglich): 317,93 Wh
Thermische Masse (neu): [1948687.22748, 'J'] , [541.30201, 'Wh']
Differenz: 223.37201 Wh
-----
Für einen Speicher:

Chemische Energie: 974368.34227 J, 270.65787 Wh
-----
Für das gesamte System:

Chemische Energie: 1948736.68455 J, 541.31575 Wh

-----
Nutzen/Kosten: 2.42338

-----
Verlorene Energie: -49.45707 J, -0.01374 Wh

```

Abbildung 29: Thermische Größen eines Speichers mit optimaler Höhe

Die Ergebnisse des statischen Modells sind eindeutig. Es ist unter den gesetzten Rahmenbedingungen möglich, ein Speichersystem in den Backofen zu integrieren, das rechnerisch in der Lage ist, die komplette im Backrohr befindliche Energie zu speichern. Dies gilt unter der Annahme von statischen Bedingungen. Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass es notwendig ist die Untersuchung auf zeitabhängige Größen zu erweitern. Zusätzlich ist es mit dem im Rahmen dieser Arbeit erstellten Tool möglich, schnell unterschiedliche Kombinationen aus Sorptionsmittel, Sorbat und Hüllenmaterial auf ihre Verwendung in diesem Anwendungsfall hin zu untersuchen.

4.2 Darstellung der zeitabhängigen Simulation

Die zeitabhängige Simulation erweitert die Analyse um den Faktor Zeit. Damit ist es möglich, zeitabhängige Größen wie den Wärmeverlust oder die Reaktionskinetik zu beschreiben. Das Vorgehen gliedert sich dabei in drei Stufen. Zunächst wird der Einfluss des Speichers hinsichtlich der zusätzlichen Wärmeverluste hin untersucht. Im zweiten Schritt die Reaktionskinetik abgebildet und im dritten Schritt werden beide Aspekte zusammen betrachtet.

4.2.1 Darstellung der Wärmeverluste

Die Berechnung der Wärmeverluste erfolgt, über die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Gleichungen. Die Anwendung dieser Gleichungen ist in Abbildung 30 zu sehen.

```

108 def heatloss(isolation, container, salt, cavity, t0, t1):
109
110     # Szenario I:   diekte 1-dimensionale Berechnung des Wärmeverluststroms über Zusammenschaltung der einzelnen Rs.
111     # Szenario II: Betrachtung einer möglichen Wärmebrücke
112     # (Vernachlässigung von Konvektion und dem Erwärmen des Hohlraums -> statischer Zustand)
113     # Wärmestrom an die Umwelt erfolgt im Bereich des Speichers an der Metalloberfläche; verringert Dämmungsdicke
114     # Wärmewiderstand R = d/(lambda*A)
115     # Q_p = lambda*(A/d)*dT = 1/R*dT
116
117     # Wärmeverlust in den Bereichen ohne Speicher -> Position des Speichers aktuell an den Seiten
118
119     Q_p_loss_top= isolation['conductivity'][0] * isolation["area_tb"][0] / isolation["thickness"][0] * (t1 - t0)
120     Q_p_loss_bottom = isolation['conductivity'][0] * isolation["area_tb"][0] / isolation["thickness"][0] * (t1 - t0)
121     Q_p_loss_back = isolation['conductivity'][0] * isolation["area_back"][0] / isolation["thickness"][0] * (t1 - t0)
122     Q_p_loss_tbb = [Q_p_loss_top + Q_p_loss_bottom + Q_p_loss_back, 'W']
123     #print('Q_loss_tbb',Q_p_loss_tbb)
124
125     # Szenario I
126     # Durchgehende Isolation
127     R_I_1 = [isolation["thickness"][0] / (isolation["conductivity"][0] * (isolation["depth"][0] \
128         * (isolation['height'][0] - container["area"][0]))), 'K/W']
129     try:
130         # Container und Isolation
131         R_I_2 = [(isolation["thickness"][0] - container['width'][0]) / (isolation["conductivity"][0] \
132             * (container['area'][0] - salt['area'][0])) + container['width'][0] / (container["conductivity"][0] \
133             * (container['area'][0] - salt['area'][0])), 'K/W']
134
135         # Salt + Cavity + Steel + Isolation
136         R_I_3 = [salt['width'][0] / (salt['conductivity'][0] * salt['area'][0]) + cavity['width'][0] \
137             / (cavity['conductivity'][0] * cavity['area'][0]) + container['thickness'][0] \
138             / (container['conductivity'][0] * cavity['area'][0]) + (isolation["thickness"][0] - container["width"][0]) \
139             / (isolation["conductivity"][0] * container['area'][0]), 'K/W']
140
141         R_I_ges = [pow(1/R_I_1[0]+1/R_I_2[0]+1/R_I_3[0], -1), 'K/W']
142
143         # Mal zwei wegen beiden Seiten
144         Q_p_loss_I = [(1/R_I_ges[0]) * (t1 - t0) * 2 + Q_p_loss_tbb[0], 'W']
145     except:
146         print('Except-Fall I kein Speicher vorhanden')
147         Q_p_loss_I = [(1/R_I_1[0]) * (t1 - t0) * 2 + Q_p_loss_tbb[0], 'W']
148

```

Abbildung 30: Darstellung der Funktion „heatloss“ zur Bestimmung der Wärmeverluste Teil 1

Für das bessere Verständnis ist am Anfang der Funktion, in Form von Kommentaren, das Vorgehen beschrieben. Es wird deutlich, dass die Untersuchung der Wärmeverluste in zwei Szenarien unterteilt ist. Szenario 1 betrachtet unter Berücksichtigung der verschiedenen Wärmewiderstände, die entsprechend zusammengefasst werden, den orthogonal auf der Backofenwand stehenden Wärmeverluststrom.

Für die Berechnung der Wärmeströme wird die Wärmeleitfähigkeit der beteiligten Materialien benötigt. Sie ist eine materialspezifische Größe und für die beteiligten Stoffe in Tabelle 7 angeführt. Damit stellt diese Tabelle eine Ergänzung der Werte in Tabelle 5 dar.

Tabelle 7: Wärmeleitfähigkeiten des TCS-Moduls

Material	Kalziumoxalat	Luft	Stahl	Wärmedämmung
Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]	0,415	0,0262	40	0,0493

Szenario 2 betrachtet die Möglichkeit einer Wärmebrücke innerhalb des Systems. Diese Analyse wird durchgeführt, da der Speichermantel und die Backofenwand aus dem gleichen Material bestehen und das Salz innerhalb des Speichers durch seine niedrige Wärmeleitfähigkeit als Isolator wirken könnte. Um diesen Umstand in der Betrachtung nicht zu vernachlässigen, wurde zunächst eine Abschätzung in Bezug auf das Eintreten einer solchen Situation durchgeführt. Diese Abschätzung basiert auf der Annahme eines quadratischen Speichers. Die Kantenlänge der Fläche (A_1) des Salzes wird mit a [mm] bezeichnet. Die Fläche der Metallummantelung als A_2 . Die Dicke der Speicherhülle wird wie zuvor mit 1 mm angenommen. Ziel dieser Abschätzung ist es, die Größe der Fläche des Speichers zu bestimmen, bei dem der durch das Salz fließende Wärmestrom gleich dem Wärmestrom ist, der durch die Speicherhülle fließt. Diese Annahme ist in (35) zu sehen.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Salz}} &= \dot{Q}_{\text{Hülle}} \\ \frac{\lambda_{\text{Salz}} * A_1}{d} * \Delta T &= \frac{\lambda_{\text{Hülle}} * A_2}{d} * \Delta T \quad (35) \\ A_1 &= a^2 \\ A_2 &= (a + 2)(a + 2) - a^2 = 4(a + 1) \end{aligned}$$

Wie in Tabelle 7 zu sehen ist, unterscheiden sich die Wärmeleitfähigkeiten von Kalziumoxalat und Stahl ungefähr um den Faktor 100.

$$\begin{aligned} 100 * \lambda_{\text{Salz}} &\approx \lambda_{\text{Hülle}} \\ A_1 &= 100 * A_2 \\ a^2 &= 400(a + 1) \quad (36) \end{aligned}$$

(36) zeigt die zu lösende quadratische Gleichung. Daraus ergibt sich eine Seitenlänge von 400,99 mm. Dies bedeutet, dass ab einer inneren Seitenlänge von ca. 401 mm der Anteil des Wärmestroms durch das Salz dem Wärmestrom durch die Speicherhülle entspricht. Dies entspricht einer Speichergrundfläche (gesamt) von 162409 mm². Die maximal zur Verfügung stehende Seitenfläche des Backofens beträgt 167200 mm².

Diese Berechnung basiert auf der Annahme, dass der Speicher vollständig mit Salz gefüllt ist. Der Effekt wird zusätzlich verstärkt, wenn die isolierende Wirkung der Luft berücksichtigt wird. Gleichung (13) würde dann zu Gleichung (37) werden. In Gleichung (38) wird deutlich, dass unter diesen Umständen eine scheinbare Gesamtwärmeleitfähigkeit von $0,1671 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ vorliegen würde und ein Faktor von 239,42 in Bezug auf $\lambda_{\text{Hülle}}$.

$$\frac{1}{R_{\text{Salz}} + R_{\text{Luft}}} \Delta T = \frac{1}{R_{\text{Hülle}}} \Delta T \quad (37)$$

$$\frac{1}{R_{\text{Salz}} + R_{\text{Luft}}} = \frac{1}{\frac{0,9 * d}{\lambda_{\text{Salz}} * A_1} + \frac{0,1 * d}{\lambda_{\text{Luft}} * A_1}}$$

$$\frac{1}{R_{\text{Salz}} + R_{\text{Luft}}} = \frac{\lambda_{\text{Salz}} \lambda_{\text{Luft}} * A_1}{d * (0,9 * \lambda_{\text{Luft}} + 0,1 * \lambda_{\text{Salz}})} = 0,1671 * \frac{A_1}{d} \quad (38)$$

Dies würde zu einer theoretischen inneren Seitenlänge von 957,924 mm führen. Damit wird deutlich, dass dieser Effekt nicht unberücksichtigt bleiben kann. Die Betrachtung der Wärmeströme mit einem eindimensionalen Modell kann diesen Effekt aber nicht abbilden. Da es nur parallele eindimensionale Wärmeströme beschreibt. Aus diesem Grund und gestützt auf die Ergebnisse der vorangegangenen Abschätzung wird durch Szenario II dieser Effekt abgebildet. Die Funktion von Szenario II ist in Abbildung 31 zu sehen.

```
# Szenario II
# Durchgehende Isolation an den Rändern
R_II_1 = [isolation["thickness"][0] / (isolation["conductivity"][0] * (isolation["depth"][0] * (isolation["height"][0] \
- container["area"][0]))), 'K/W']
try:
    # Container und Isolation
    R_II_2 = [(isolation["thickness"][0] - container["width"][0]) / (isolation["conductivity"][0] * (container["area"][0] \
- salt["area"][0])) + container["width"][0] / (container["conductivity"][0] * (container["area"][0] \
- salt["area"][0])), 'K/W']
    # Steel (Brücke) + Isolation
    R_II_3 = [(isolation["thickness"][0] - container["width"][0]) / (isolation["conductivity"][0] * container["area"][0]) \
+ container["width"][0] / (container["conductivity"][0] * salt["area"][0]), 'K/W']
    R_II_ges = [pow(1/R_II_1[0]+1/R_II_2[0]+1/R_II_3[0],-1), 'K/W']
    Q_p_loss_II = [(1/R_II_ges[0])*(t1-t0) * 2 + Q_p_loss_tbb[0], 'W']
except:
    print('Except-Fall II kein Speicher vorhanden')
    Q_p_loss_II = [(1/R_II_1[0])*(t1-t0) * 2 + Q_p_loss_tbb[0], 'W']

return Q_p_loss_I, Q_p_loss_II
```

Abbildung 31: Darstellung der Funktion „heatloss“ zur Bestimmung der Wärmeverluste Teil 2

Es wird deutlich, dass Szenario II den Einfluss einer Wärmebrücke mit 100 % annimmt. Dazu wird angenommen, dass das Innere des Speichers eine Wärmeleitung von Stahl besitzt. In der Realität wird der Effekt mit hoher Wahrscheinlichkeit niedriger sein, für eine erste Abschätzung des Problems ist dies hinreichend genau. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt.

Das Vorgehen ist dasselbe wie bei der statischen Analyse. Es wird zunächst die Fläche des Speichers bei einer Speicherhöhe von 5 mm konstant um 1 cm erweitert und anschließend die Speicherhöhe um jeweils 1 mm erhöht. Der vollständige Programmcode ist im Anhang unter „Bestimmung der Kosten/Nutzen Funktion und der verlorenen Wärme (zeitabhängig)“ zu finden. Abbildung 32 zeigt das Ergebnis der Analyse. In Abbildung 87 im Anhang sind die dieser Grafik zugrunde liegenden Daten in Form einer Tabelle zu finden.

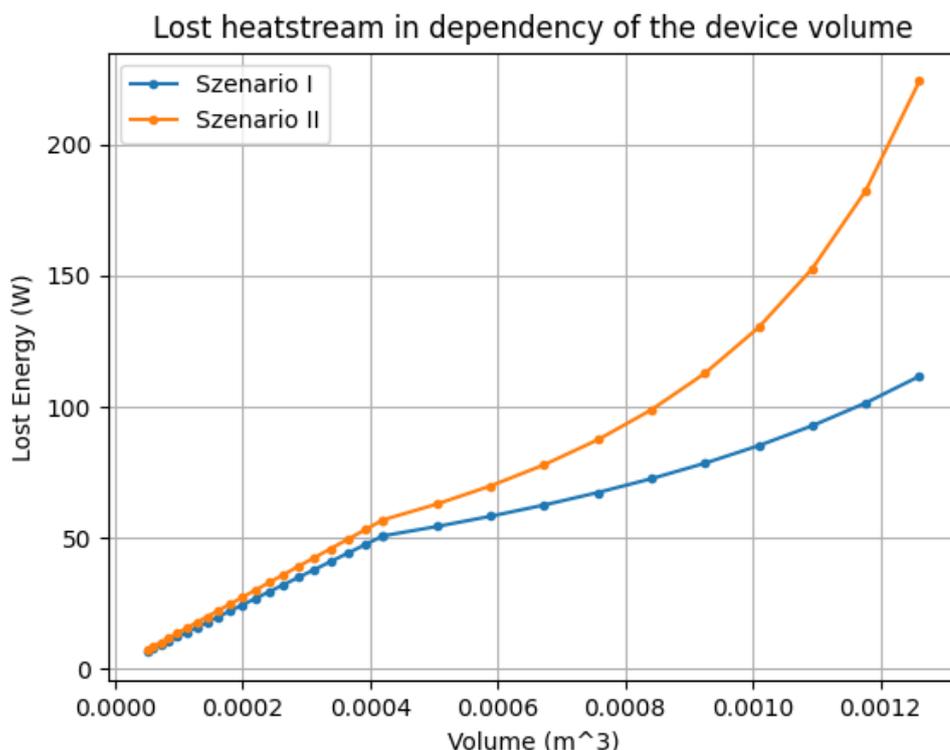


Abbildung 32: Darstellung der Wärmeverluste über das Speichervolumen

Es wird deutlich, dass die Steigerung der Wärmeverluste bei einer Flächenvergrößerung annähernd linear verläuft. Zusätzlich ist in diesem Bereich der Einfluss der Wärmebrücke nur marginal. Dies ändert sich in dem Moment, in dem die Höhe des Speichers vergrößert wird. Durch das exponentielle Wachstum der Wärmeverluste steigt der Einfluss einer Wärmebrücke signifikant an. Das führt bei einer Speicherhöhe von 15 mm zu einem mehr als doppelt so hohen Verlustwärmestrom. Damit ist der signifikante Einfluss einer möglichen Wärmebrücke in Bezug auf die Höhe des Speichers beschrieben. Die Höhe des Systems ist entsprechend der wichtigste Parameter in Bezug auf die thermische Masse, der Menge an speicherbarer Energie und dem erhöhten Wärmeverluste des Systems.

Die Bestimmung des Kosten-Nutzen-Faktors wird nach dem gleichen Prinzip wie in der statischen Analyse durchgeführt (Gleichung 19 bzw. 39). Der Nutzen ist die chemisch gespeicherte Energie und die Kosten sind die zusätzlichen Wärmeverluste. In diesem Fall ergibt diese Betrachtung keinen dimensionslosen Faktor, sondern eine Zeit (t). Dies ist dem Umstand geschuldet, dass eine Leistung mit einer Energie verglichen wird. Die Ergebnisse stellen einen Zeitraum dar, in dem der Nutzen durch die zusätzlichen Wärmeverluste aufgebraucht wird.

$$\frac{\text{Nutzen}}{\text{Kosten}} = f(V_{\text{Speicher}}) = \frac{C_{th,max}}{\dot{Q}_{gesamt} - \dot{Q}_0} \quad (39)$$

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse. Diese decken sich mit den Erwartungen. Die Kurve von Szenario II zeigt deutlich die reduzierte Zeit bis zum Aufbrauchen des Nutzens. Anhand dieser Grafik lassen sich gut die optimalen Speichergrößen ablesen. Für Szenario I wäre dies eine Speicherhöhe von 13 mm und für Szenario II eine Höhe von 9 mm. Es ist zu erkennen, dass nach dem Erreichen des Optimums die Kurven wieder abfallen und eine weitere Vergrößerung des Speichers aus Sicht der damit einhergehenden Wärmeverluste nicht sinnvoll ist. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der statischen Analyse erscheint ein Speichersystem mit einer Höhe zwischen 9 mm – 13 mm als optimal.

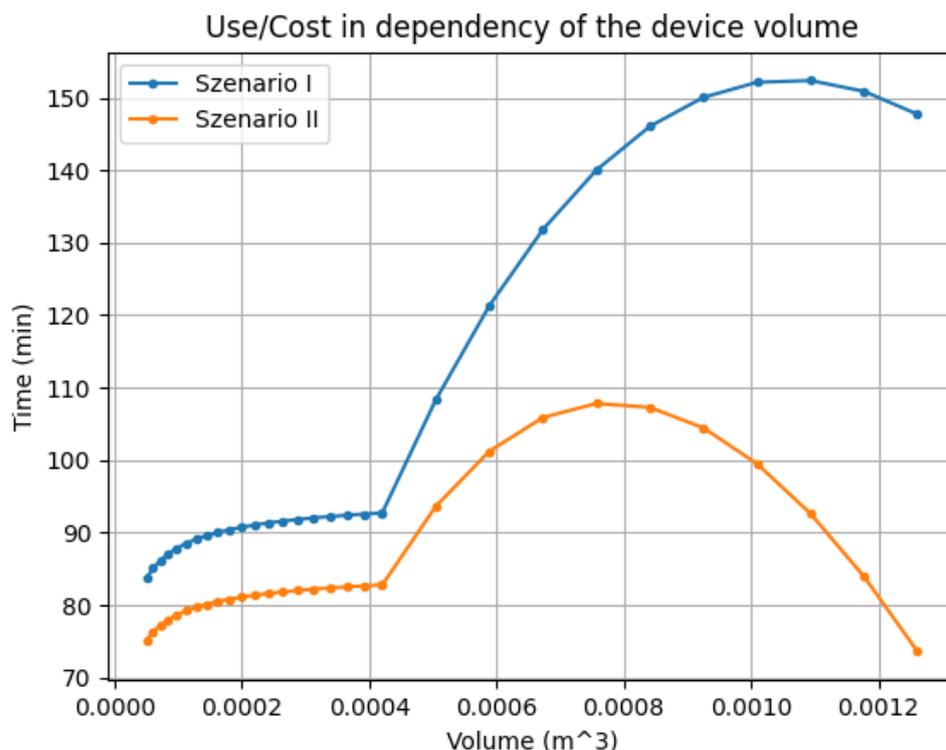


Abbildung 33: Kosten / Nutzen-Funktion in Bezug auf den Wärmeverluststrom über das Volumen des Speichers

Die entsprechenden Daten sind im Anhand in Abbildung 87 zu finden.

4.2.2 Darstellung der Reaktionskinetik

Die Berechnung der Reaktionskinetik über der Zeit basiert auf den Gleichungen aus Kapitel 3.2.2. Abbildung 34 zeigt die in Python programmierten Funktionen. Der Unterschied zwischen den beiden Funktionen liegt im Input bzw. Output. Die Funktion ‚kinetics_t‘ berechnet auf Grundlage des prozentualen Umsatzes und der herrschenden Temperatur die benötigte Zeit. Die Funktion ‚kinetics_x‘ bestimmt auf Basis der Zeit und der Temperatur den prozentualen Umsatz. Die if-Kondition in ‚kinetics_x‘ wird benötigt, um den Input zu beschränken. Im Gegensatz zum Umsatz, der nicht über 1 (100 %) steigen kann, ist die Zeit unbeschränkt. Dieses Problem wird mithilfe dieser Kondition gelöst.

```
def kinetics_t(x,T):
    T = T+273.15 # K
    R = 8.314 # J/(mol*K)
    E = 118.6 * pow(10,3) # J/mol
    k_0 = 1.11667* pow(10,12) # 1/sec

    time = (1-pow((1-x),1/3))/(k_0*np.exp(-E/(R*T)))

    return time

def kinetics_x(time,T):
    T = T+273.15 # K
    R = 8.314 # J/(mol*K)
    E = 118.6 * pow(10,3) # J/mol
    k_0 = 1.11667* pow(10,12) # 1/sec

    c = time*k_0*np.exp(-E/(R*T))
    if c >= 1:
        c=1
    else:
        c=c

    x = 1- pow((1-c),3)

    return x
```

Abbildung 34: Darstellung der Funktionen kinetics_t und kinetics_x für die Bestimmung des Reaktionsverlaufs

Beide Funktionen benötigen eine Temperatur, bei der die Reaktion abläuft. Diese ist über den Berechnungsvorgang konstant. Um einen guten Überblick über die verschiedenen Reaktionszeiten in Abhängigkeit verschiedener Temperaturen zu erhalten, wurde das betrachtete Temperaturintervall in vier diskrete Werte unterteilt. Diese sind 25 °C, 75 °C, 125 °C und 175 °C. Dieses diskrete Intervall wurde mit beiden Funktionen untersucht. Der Programmcode befindet sich im Anhang unter „Zeitabhängige Funktionen“. Die vollständige grafische Darstellung der Ergebnisse ist in Abbildung 88 bis Abbildung 93 im Anhang zu finden.

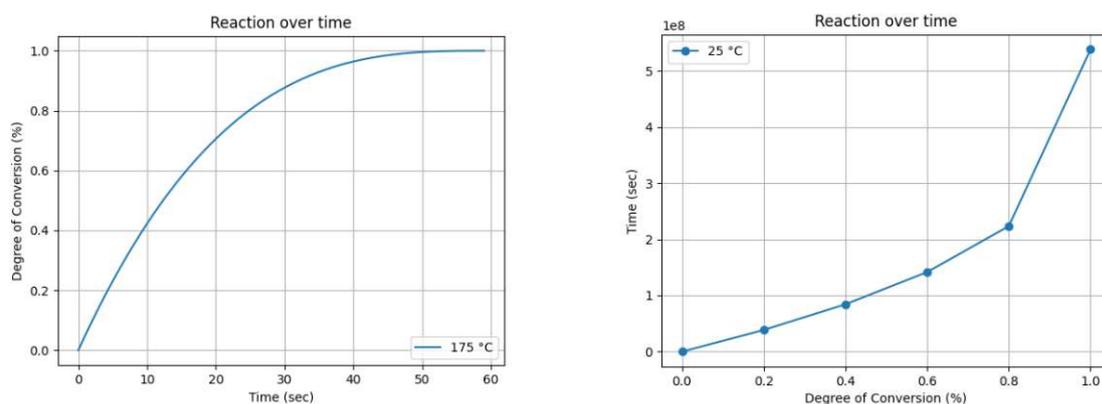


Abbildung 35: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Umsatzrate (Grafik 175 °C)

Abbildung 36: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Zeit (Grafik 25 °C)

Abbildung 35 zeigt das Ergebnis der Untersuchung bei einer Temperatur von 175 °C in Bezug auf die Umsatzrate. Es wird deutlich, dass bei dieser Temperatur eine vollständige Reaktion des Salzes nach ca. 50 Sekunden vorliegt. Dem gegenüber steht Abbildung 36. Sie zeigt die Reaktionsrate in Abhängigkeit der Zeit bei 25 °C. Dabei ist zum einen die geänderte Darstellung der Reaktionskinetik in Abhängigkeit der genutzten Funktion zu erkennen und der starke Einfluss der Temperatur auf die Reaktion. Bei einer Reaktionstemperatur von 25 °C werden über $5 \cdot 10^8$ Sekunden für einen vollständigen Umsatz benötigt. Beide Grafiken zeigen, dass für 80 % des Umsatzes ungefähr die Hälfte der gesamten Reaktionszeit benötigt wird. Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei Rahmenbedingungen für das Speichersystem ableiten. Zum einen sollte es das Ziel sein, die Hydratation und die Dehydratation auf einem möglichst hohen Temperaturniveau stattfinden zulassen. Ein optimales Einsatzszenario wäre eine „Booster-Funktion“ bei der Erwärmung des Backofens. Dies würde eine optimale Entladezeit ermöglichen. Zum zweiten wird deutlich, dass im praktischen Anwendungsfall eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, dass der Speicher im Bereich von 80 % – 90 % der maximalen Speichermenge seine Lade- und Entladevorgänge durchführen wird. Dies muss bei der weiteren Auslegung berücksichtigt werden und deckt sich mit den bekannten Anwendungsfällen elektrischer Batterien. Der entsprechende Programmcode ist im Anhang unter „Bestimmung der Reaktionszeit“ zu finden.

4.2.3 Darstellung des gesamten Systems

Die Simulation des zeitabhängigen Systems basiert auf dem in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Flussdiagramm. Die Umsetzung in Python zeigt Abbildung 37.

```
#Geometrie:
height = 0.300      # m
depth = 0.300      # m
width = 0.013      # m
thickness = 0.001  # m

#Berechnung der unbekanntem Geometrie:
fc_volume_cont = fc_volume_container (height, depth, width, thickness)

#Aussetemperatur (t0) und Starttemperatur (t1):
t0 = 25            # °C
t1 = 100           # °C

#Startzeit:
time = 0           # Sec

while t1 >= 35:
    time_list.append(time)
    T_list.append(t1)

    stored = storedenergy3 (c_oven, c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
    Q_stored_list.append(stored[0][0])

    heat = heatloss (c_oven, c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
    Q_list.append(heat[0][0])
    Q_sum_list.append(heat[0][0]/3600 + Q_sum_list[len(Q_list)-1])

    x = kinetics_x(1,t1)
    Q_chem= kinetics_to_Q (c_salt, x)
    C_list.append(Q_chem[0][0])
    C_sum_list.append(Q_chem[0][0]/3600 + C_sum_list[len(C_list)-1])

    Q_neu = stored[0][0] - heat[0][0] - Q_chem[0][0]

    T_neu = Q_to_Temp(c_oven, c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity,Q_neu, t0)

    time+=1

    t1=T_neu
```

Abbildung 37: Programmcode der zeitabhängigen Simulation

Es werden zunächst die Abmessungen des Speichersystems festgelegt. Auf Basis dieser Werte werden, die für die weitere Berechnung benötigten Größen bestimmt. Diese sind in Kapitel 3.1.1 ausführlich beschrieben. In diesem Beispiel werden diese Größen in Anhängigkeit der äußeren Abmessungen des Systems berechnet. Es ist aber auch möglich wie zuvor beschrieben, dies auf Basis der inneren Abmessungen oder des Gewichts des Salzes zu tun. Im nächsten Schritt muss die äußere Temperatur, die Starttemperatur und die Startzeit in Form von Randbedingungen festgelegt werden. Nach festlegen des Startzeitpunkts beginnt der Iterationszyklus. Die „while-Schleife“ bestimmt das Abbruchkriterium. In diesem Fall bricht der Algorithmus ab, sobald eine Temperatur von 35 °C erreicht wurde. Diese Abbruchtemperatur wurde gewählt, da während des Testens des Algorithmus deutlich wurde, dass der Abkühlvorgang unterhalb dieser Temperatur sehr langsam abläuft und keinen weiteren Erkenntnisgewinn erzeugt. Es kann aber auch eine gespeicherte Energiemenge im Speicher, ein Δt oder ein ΔQ als Abbruchkriterium festgelegt werden. Anschließend wird über die Funktion „storedenergy3“ die im System befindliche Energiemenge bestimmt.

Diese Funktion nimmt an, dass die Heizelemente des Backofens die Temperatur des Systems besitzen. Zuvor wurde von BSH eine Temperatur von 400 °C angenommen (Aufheizvorgang). Die vollständige Funktion ist im Anhang unter statische Funktionen zu finden.

Im nächsten Schritt wird der Wärmeverlust bestimmt („heatloss“) und danach die Umsatzrate des Salzes („kinetics_x“). Die beiden nächsten Funktionen mussten für das zeitabhängige Modell neu geschrieben werden. Es ist die Funktion „kinetics_to_Q“ und die Funktion „Q_to_Temp“. Beide Funktionen sind in zu Abbildung 38 sehen.

```
#Funktion für Gesamtsystem
def kinetics_to_Q (salt, x_1):
    c_salt['mass_dehy'][0] = c_salt['mass_hy'][0]*x_1
    c_salt['mass_hy'][0] = c_salt['mass_hy'][0]-c_salt['mass_dehy'][0]

    Q_J = 2*c_salt['mass_dehy'][0] * c_salt["Energy-Density"][0] #J
    Q_Wh = Q_J/3600

    return [Q_J, 'J'], [Q_Wh, 'Wh']

def Q_to_Temp (oven, isolation, container, salt, cavity, Q, t_0):
    # Berechnung der Temperatur des Systems auf Basis der enthaltenen Wärmemenge Q
    # Q = sum(m_i*cp_i)*(T_1-T_0)
    # T_1 = Q/sum(m_i*cp_i)+T_0

    # Berechnung der Einzelteile des Backofens:
    # Zahlenwerte am Ende der Funktion sind erklärt in storedenergy3 und entnommen der BSH-Excel
    t0_k = t0+273.15
    t30 = (60+273.15)/2

    m_cp = 8.046*490 + 2.929*830 + 0.708*490 + (c_cont['mass'][0] * c_cont['cp'][0] + c_salt['mass'][0] * c_salt['cp'][0])*2
    m_cpis = c_iso['mass'][0] * c_iso['cp'][0]

    T_K = (Q+(m_cp+m_cpis)*t0_k - m_cpis*t30) / (m_cp+(m_cpis/2))
    T = T_K-273.15

    return T
```

Abbildung 38: Darstellung der Funktion „kinetics_to_Q“ und „Q_to_Temp“

Die Funktion „kinetics_to_Q“ berechnet die gespeicherte oder abgegebene Wärmemenge in Abhängigkeit der Umsatzrate des Salzes. Die Funktion „Q_to_Temp“ bestimmt die neue Systemtemperatur in Bezug zu der aktuell im Backofen befindlichen Wärmemenge. Mithilfe dieser beiden Funktionen ist die Iteration abgeschlossen und es kann von vorne begonnen werden. An diesem Punkt zeigt sich der Vorteil der genutzten Herangehensweise. Durch die Verwendung von einzelnen Funktionen ist der Programmcode kurz und prägnant. Im Folgenden werden einzelne Ergebnisse der berechneten Lade- und Entladevorgänge beschrieben.

4.2.3.1 Darstellung des zeitabhängigen Ladevorgangs

Für die Darstellung des zeitabhängigen Ladevorgangs der Batterie wurde eine Ofentemperatur von 200 °C gewählt. Die Abmessungen des Speichers sind quadratisch mit einer Seitenlänge von 300 mm und einer Höhe von 13 mm. Die Dicke der Ummantlung ist 1 mm. Abbildung 39 zeigt das Ergebnis der Simulation. Die rote horizontale Linie entspricht der maximal speicherbaren Energie. Es wird deutlich, dass das Speichersystem in dieser Konfiguration nicht in der Lage ist, sein Potenzial zu nutzen. Durch die starke Abhängigkeit des Sorptionsprozesses von der Temperatur können bis zu 200 Wh an Energie gespeichert werden. Damit ist in diesem Anwendungsfall nicht die Größe des Speichers ausschlaggebend für die Menge an gespeicherter Energie, sondern das Temperaturfenster, in dem er eingesetzt wird. Außerdem wird deutlich, dass die Fähigkeit des Systems, Energie zu speichern, sehr schnell sinkt. Bei einer Temperatur von unter 100 °C kommt sie annähernd zum Erliegen. Damit wird deutlich, dass ein solches System zwangsläufig bei einer Temperatur von über 100 °C betrieben werden muss. Diese Erkenntnis ist bei der Betrachtung des Entladevorgangs von großer Bedeutung. Abbildung 39 zeigt auch, warum der Abbruch der Simulation vor dem Erreichen der Außentemperatur erfolgt. Die Annahme eines idealen Systems führt so einem stark abfallenden Temperaturgradienten. Dies ist in der Realität nicht so ausgeprägt der Fall. Durch zusätzliche Wärmeverluste z. B. durch den Wrasenabzug sollte die Abkühlung schneller voranschreiten. Da der relevante Zeitbereich die ersten 30 min betrifft, stellt dies aber kein Problem dar.

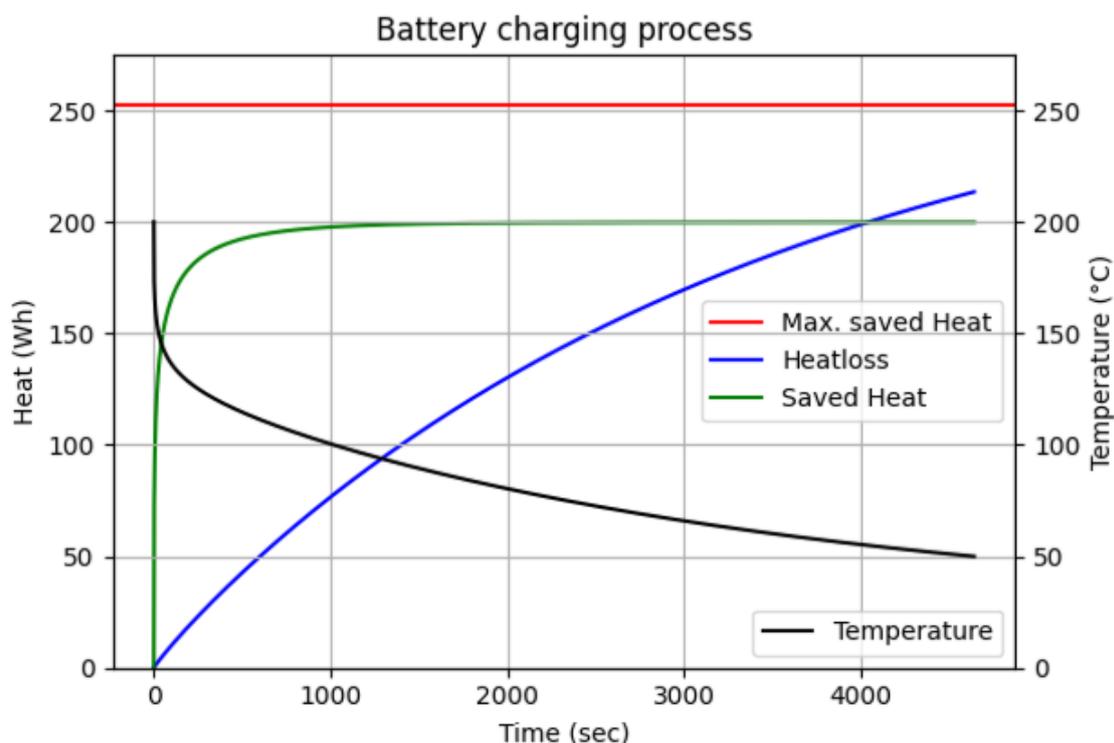


Abbildung 39: Darstellung des zeitabhängigen Ladevorgangs

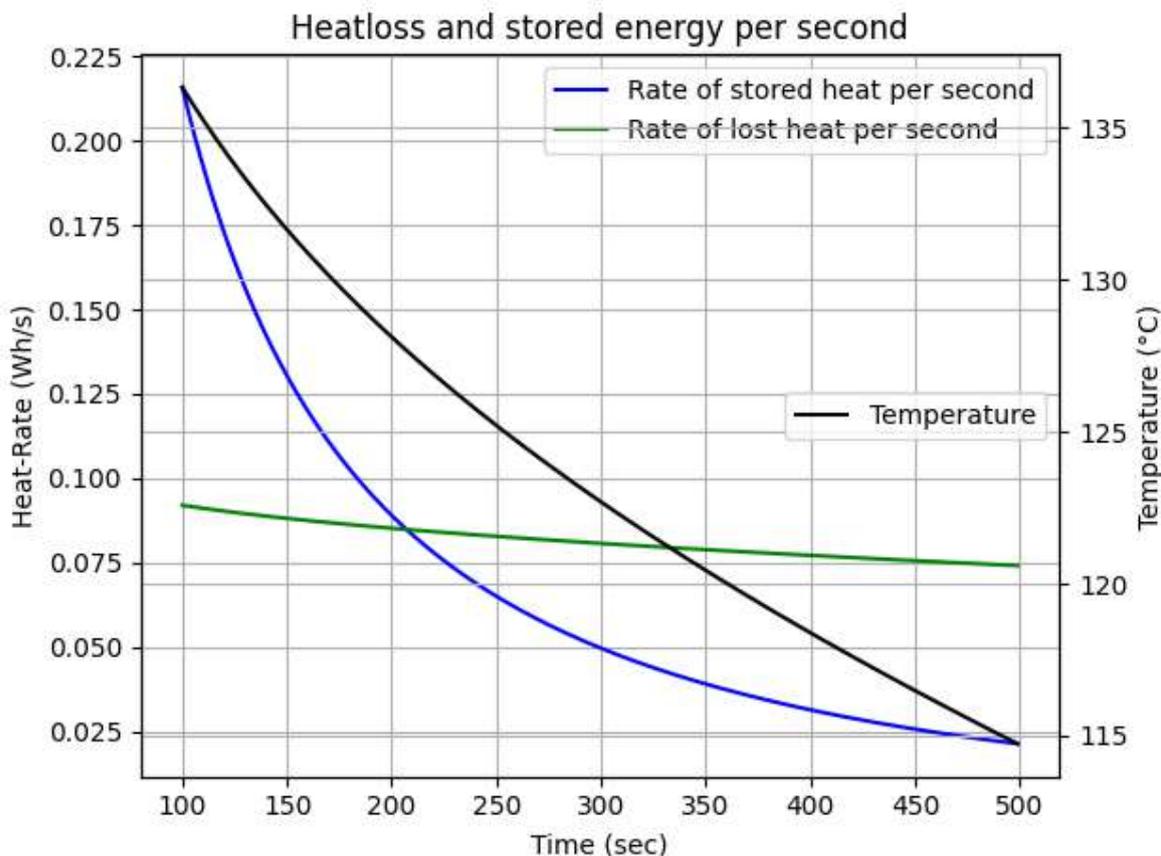


Abbildung 40: Darstellung der Wärmeverlustrate und der Speicherrate

Das schnelle Abklingen der Reaktion stellt eine zentrale Erkenntnis der zeitabhängigen Simulation dar. In Abbildung 40 ist aus diesem Grund der Temperaturbereich, in dem die Sorptionsrate, die des Wärmeverlustes unterschreitet, gezeigt. Es wird deutlich, dass dies im Bereich zwischen 125 °C und 120 °C stattfindet. Das Wissen um diesen Wechsel ist wichtig für die Berechnung des Entladevorgangs der Batterie. Da in dieser Simulation der TCS die einzige Wärmequelle darstellt, muss die Rate der Erwärmung größer als die Rate der Abkühlung sein, um eine Temperaturerhöhung herbeiführen zu können.

Die Simulation zeigt, dass ein TCS in diesem Anwendungsfall unter den getroffenen Annahmen einsetzbar ist. Es hat sich gezeigt, dass der Temperaturbereich und der Wärmeverluststrom bestimmt, welche Menge an Wärme gespeichert werden kann. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass ein TCS auf Basis von Kalziumoxalat bei einer Temperatur von über 100 °C geladen werden muss, um in einem sinnvollen Zeitraum Wärme speichern zu können. Gleiches gilt für das Entladen der Batterie.

4.2.3.2 Darstellung des zeitabhängigen Entladevorgangs

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus dem vorherigen Teilkapitel, muss für den Entladevorgang eine weitere Funktion geschrieben werden. Diese Funktion hat die Aufgabe, die Temperatur zu bestimmen, bei der der vom TCS erzeugte Wärmestrom die Wärmeverlustrate übersteigt. Die Bedingung zeigt Gleichung 40. Der Programmcode dieser Funktion ist im Anhang unter „Bestimmung der Gleichgewichtstemperatur“ zu finden. Sie bestimmt die Temperatur, bei der die von Speicher abgegebene Wärmemenge, den Verlustwärmestrom übersteigt. Dies ist nötig, da zum jetzigen Zeitpunkt keine weitere Wärmequelle den Backofen aufheizt.

$$\dot{Q}_{\text{Verlust}} < \dot{Q}_{\text{chem}} \quad (40)$$

Bei einem Speichersystem mit einer quadratischen Grundfläche von 30 cm und einer Höhe von 15 mm liegt die Gleichgewichtstemperatur bei 113 °C. Abbildung 41 zeigt das Verhalten des Systems, wenn eine Starttemperatur (111 °C) gewählt wird, die unter der Gleichgewichtstemperatur liegt. Es wird deutlich, dass in diesem Fall die Batterie nicht in der Lage ist den Backofen zu erhitzen. Entsprechend fällt die Temperatur über die Zeit ab. Zusätzlich sinkt durch die fallende Temperatur auch die Reaktionsrate der Batterie ab, was den Effekt zusätzlich verstärkt.

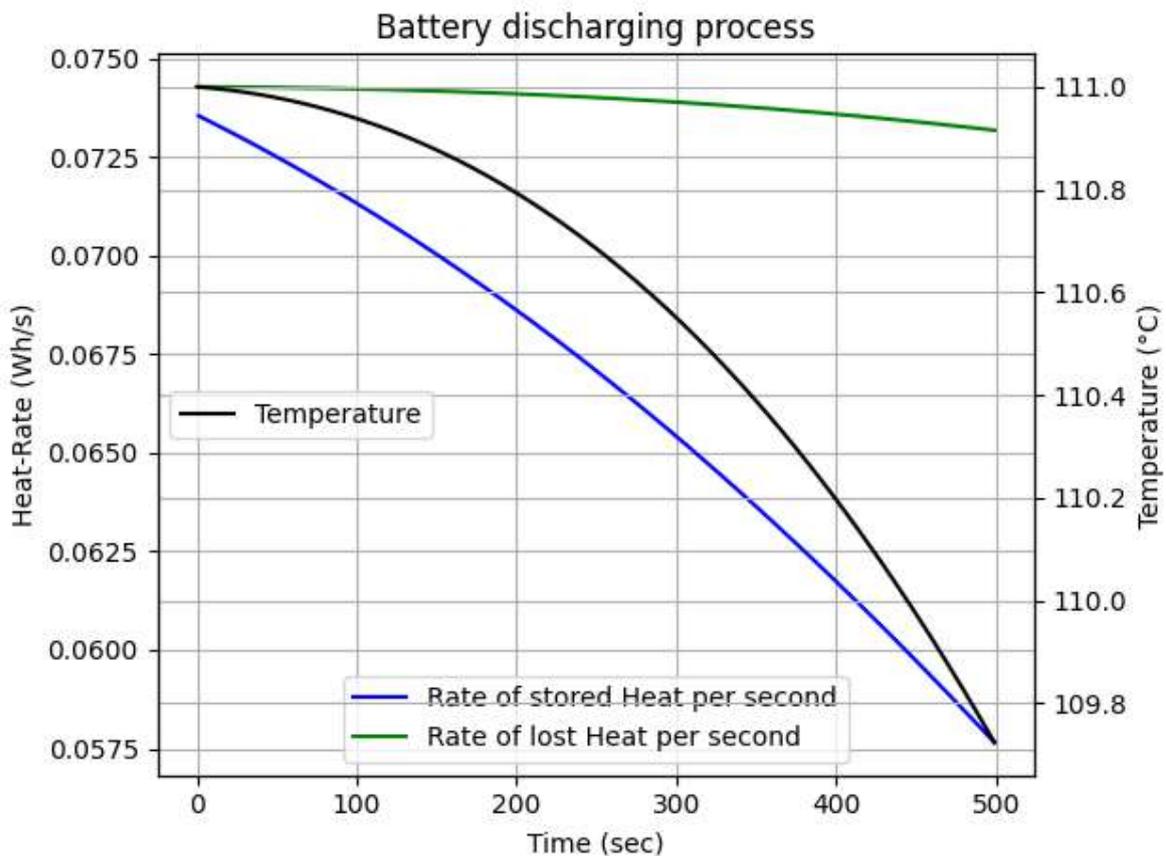


Abbildung 41: Bestimmung der Gleichgewichtstemperatur

Abbildung 42 zeigt den simulierten Entladevorgang der Batterie.

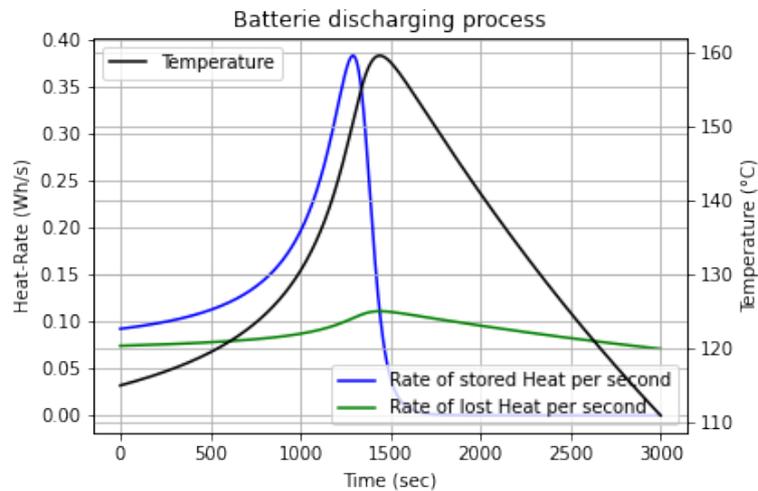


Abbildung 42: Entladevorgang der Batterie (Rate der abgegebenen Wärme)

Die Darstellung zeigt die Rate, mit der Wärme von der Batterie an das System abgegeben wird. Durch die vorherige Bestimmung der Gleichgewichtstemperatur wurde der Entladevorgang bei 115 °C begonnen. Es ist zu erkennen, dass bei dieser Temperatur die Erhitzung die Abkühlung übersteigt. Danach findet ein exponentielles Steigen des Wärmestroms statt, bis zu dem Punkt, an dem die Batterie entladen ist. Es wird deutlich, dass das Batteriesystem unter diesen Randbedingungen in der Lage ist, den Backofen auf 160 °C zu erhitzen. Abbildung 43 zeigt das Ergebnis unter denselben Randbedingungen nur in Form von absoluten Werten.

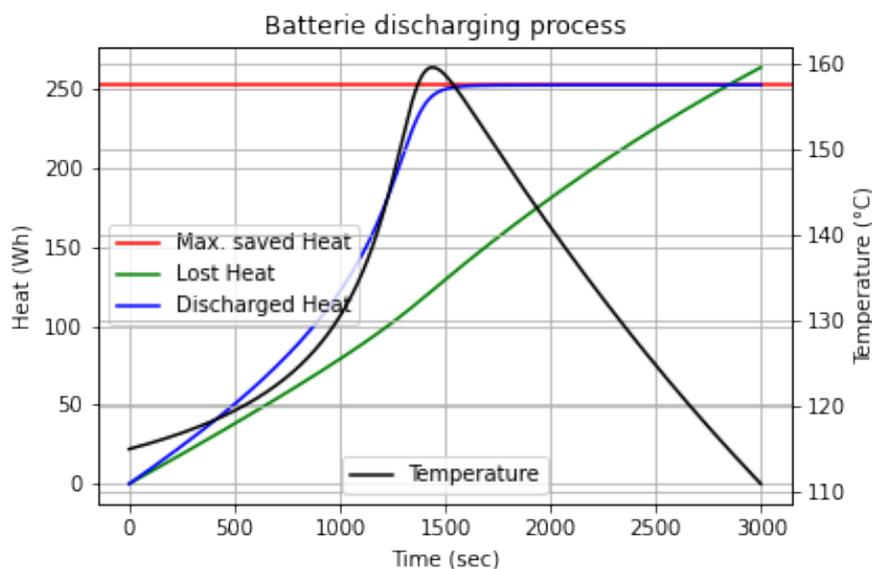


Abbildung 43: Entladevorgang der Batterie (aufsummierte Werte)

5 Aufbau des Versuchstandes und Vorversuche

Dieses Kapitel beschreibt den aktuellen Aufbau des Versuchstandes und die zur Inbetriebnahme durchgeführten experimentellen Voruntersuchungen. Diese Vorversuche wurden zum einen mit dem Ziel durchgeführt, die vom Institut für Angewandte Synthesechemie, (IAS) unter Laborbedingung erzeugten Stoffe auf ihre Praxistauglichkeit hin zu untersuchen und zum anderen um mit den erzeugten Werten die Ergebnisse der Simulation zu validieren. Dabei wird nach einem klassischen Scale-Up Verfahren vorgegangen. Dieses erfolgt in zwei Stufen. Im ersten Schritt wird die Stoffmenge aus dem Milligramm Bereich (Laboruntersuchung) in den Grammbereich angehoben und untersucht, anschließend in einem zweiten Schritt auf eine Menge im Kilogrammbereich erhöht und im eigentlichen Versuchsträger analysiert. Bei den Voruntersuchungen liegt der Fokus auf der einfachen Umsetzung und Gestaltung der Versuchsanordnung. Im Zentrum steht dabei die Analyse der am eigentlichen Versuchsstand verwendeten Geräte.

5.1 Experimentelle Voruntersuchungen

Die experimentellen Voruntersuchungen bestehen aus insgesamt drei Versuchen.

- Untersuchung des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit der Luft bei der Evakuierung des Versuchstandes auf das Kalziumoxalat
- Untersuchung des Verdampfens von Wasser bei Unterdruck
- Untersuchung der Dehydration von Kalziumoxalat bei Unterdruck

Die Beschreibung dieser drei Versuche erfolgt nach jeweils dem gleichen Schema. Es wird zunächst das Ziel des Versuches beschrieben. Danach der Aufbau und die Umsetzung und anschließend die Ergebnisse.

5.1.1 Untersuchung des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit der Luft bei der Evakuierung des Versuchstandes auf das Kalziumoxalat

Im Rahmen der ersten Inbetriebnahme des Versuchstandes sind verschiedene Probleme aufgetreten. Eines dieser Probleme war, dass Oxalat in die Rohre und damit in die Vakuumpumpe gelangt ist. Eine mögliche Erklärung ist, dass durch die Evakuierung der Versuchsanlage und der daraus entstandenen Strömungsgeschwindigkeit der Luft, Oxalat in Bewegung versetzt worden ist. Das Ziel dieses Versuches ist es, diese mögliche Ursache der ungewollten Verunreinigung zu untersuchen.

Der gewählte Versuchsaufbau ist in Abbildung 44 zu sehen.

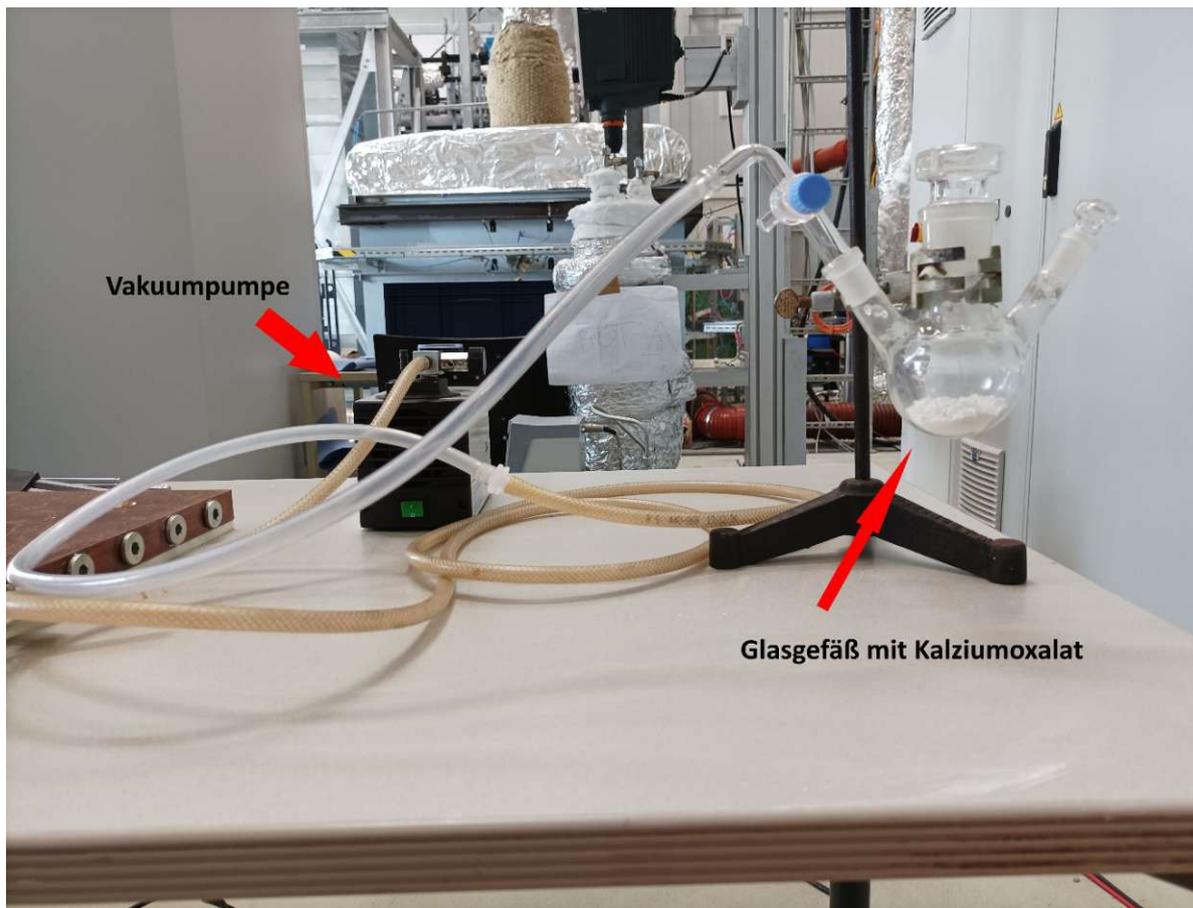


Abbildung 44: Aufbau Versuch 1 (Einfluss Evakuierung auf Kalziumoxalat)

Dieser Aufbau soll mithilfe einer Vakuumpumpe evakuiert werden, um mögliche Bewegungen des Kalziumoxalats beobachten zu können. Der Versuchsaufbau wurde auf 0,8 bar, 0,6 bar und 0,4 bar Unterdruck evakuiert. Anschließend wurde das System durch Herausnahme des Stützens auf der rechten Seite des Gefäßes geöffnet. Dadurch war es möglich, einen Durchfluss zu erzeugen und mögliche Strömungsauswirkungen zu untersuchen. Während der Evakuierung und auch während der Herstellung von Umgebungsdruck konnte keinerlei Bewegung des Kalziumoxalats beobachtet werden. Es kann auf Basis dieses Versuches zum jetzigen Zeitpunkt davon ausgegangen werden, dass die Verunreinigungen des Prototyps eine andere Ursache haben muss.

5.1.2 Untersuchung des Verdampfens von Wasser bei Unterdruck

Ziel dieser Untersuchung ist es, die Dichtheit der erweiterten Versuchsanordnung zu analysieren. Dies soll durch die Untersuchung des Siedeverhaltens von Wasser bei Unterdruck durchgeführt werden. Dabei ist neben der Dichtheit der Versuchsanlage die korrekte Arbeitsweise der Sensorik zu ermitteln, die Leistungsfähigkeit der Vakuumpumpe sowie sonstiger Bestandteile des Versuchsaufbaus.

Die Versuchsdurchführung erfolgt in zwei Schritten, zunächst wurde die Anordnung aus Versuch 1 um die Möglichkeit der Temperaturmessung erweitert und mithilfe eines Wasserbades auf einer Herdplatte um die Möglichkeit der Temperierung. Abbildung 45 zeigt den Versuchsaufbau aus der Vogelperspektive. Neben den Positionen der Temperatursensoren wird die Verwendung von zwei unterschiedlichen Schlauchvariationen deutlich (brauner und durchsichtiger Schlauch). Dies geschah mit dem Ziel, die Einsatzmöglichkeit der verschiedenen Schläuche unter Temperatur- und Dampfeinfluss zu untersuchen. Der braune Schlauch ist dicker und entsprechend widerstandsfähiger, wobei der Einsatz des durchsichtigen Schlauches wünschenswert wäre wegen der besseren visuellen Bestätigung von möglichen Massenströmen innerhalb des Versuchsaufbaus.

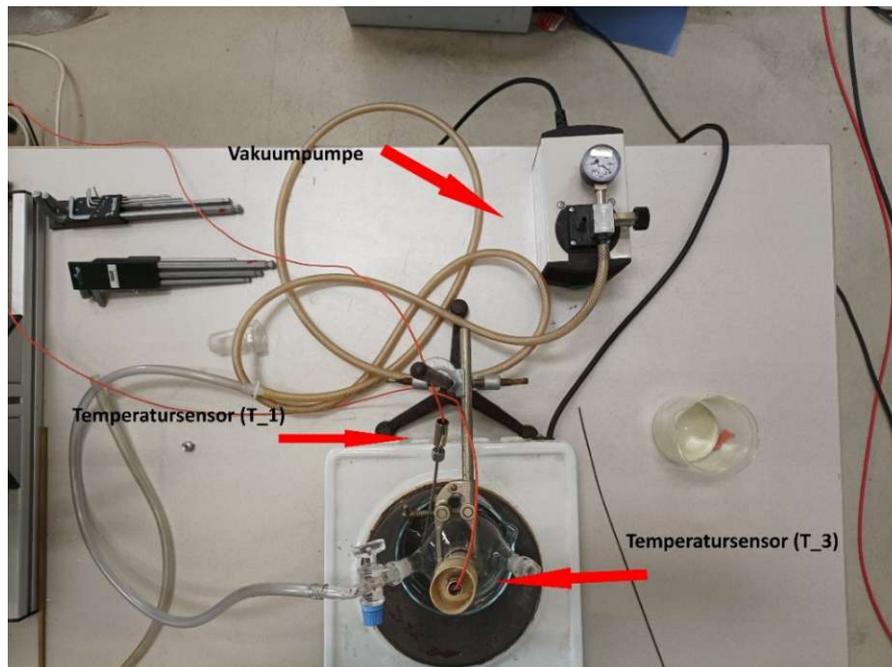


Abbildung 45: Versuchsaufbau Versuch 2 Siedetemperatur von Wasser bei Unterdruck

Während des Versuchsaufbaus und der Inbetriebnahme des Systems wurde festgestellt, dass der Temperatursensor im Gummistopfen das System nicht ausreichend abdichtet. Um das System den geforderten Zielen entsprechend abzudichten, wurde auf handelsübliches Silikon aus dem Baumarkt zurückgegriffen. Diese Maßnahme erbrachte den gewünschten Erfolg und schloss das System ab. Abbildung 94 im Anhang zeigt in Nahaufnahme die Silikonpaste.

Mit Hilfe des beschriebenen Versuchstandes sollten drei Druckniveaus und die entsprechenden Siedepunkte des Wassers gemessen werden. Die Siedezeitpunkte wurden visuell bestätigt. Tabelle 8 zeigt die der Wasserdampf tabel (WDT) entnommenen Werte⁴. Die untersuchte Wassermenge belief sich auf 151,08 g.

Tabelle 8: Siedetemperatur von Wasser bei verschiedenen Druckniveaus lt. (WDT)

Druck (bar)	Siedepunkt wasser (°C)
0,8	93,48
0,6	85,926
0,4	75,85

Die beobachteten Temperaturen, bei denen es zum Sieden kam, sind mit den entsprechenden Drücken in Tabelle 9 zu sehen.

Tabelle 9: Beobachtete Temperaturen beim Sieden

Druck (bar)	Siedepunkt wasser (°C)
0,8	--
0,6	82,9
0,4	75,1

Bei dieser ersten Versuchsdurchführung kam es zu verschiedenen Problemen. Es stellt sich heraus, dass bei der gewählten Wassermenge (Höhe des Wasser im Gefäß) in Kombination mit der Tiefe des Topfs kein komplettes Eintauchen möglich war. Dadurch war es nicht möglich, das Wasser über 88 °C zu erhitzen. Entsprechend konnte kein Sieden bei 0,8 bar beobachtet werden. Der Temperaturverlauf des Versuches über die Zeit ist in Abbildung 95 zu sehen. Zusätzlich wurde deutlich, dass ein längeres Halten des jeweiligen Druckniveaus sinnvoll ist. Dadurch kann der entsprechende Siedepunkt anhand der Daten besser bestimmt werden. Zusätzlich zeigten sich Hinweise darauf, dass die durchsichtige Schlauchverbindung dem Unterdruck in Kombination mit dem Temperaturniveau und der Feuchtigkeit nicht standhält, zu sehen in Abbildung 96. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde die Wassermenge auf 51,69 g reduziert und die Datenerfassung auf einen Siedepunkt (bei 0,8 bar) reduziert.

⁴ http://www.peacesoftware.de/einige_werte/wasser_dampf.html

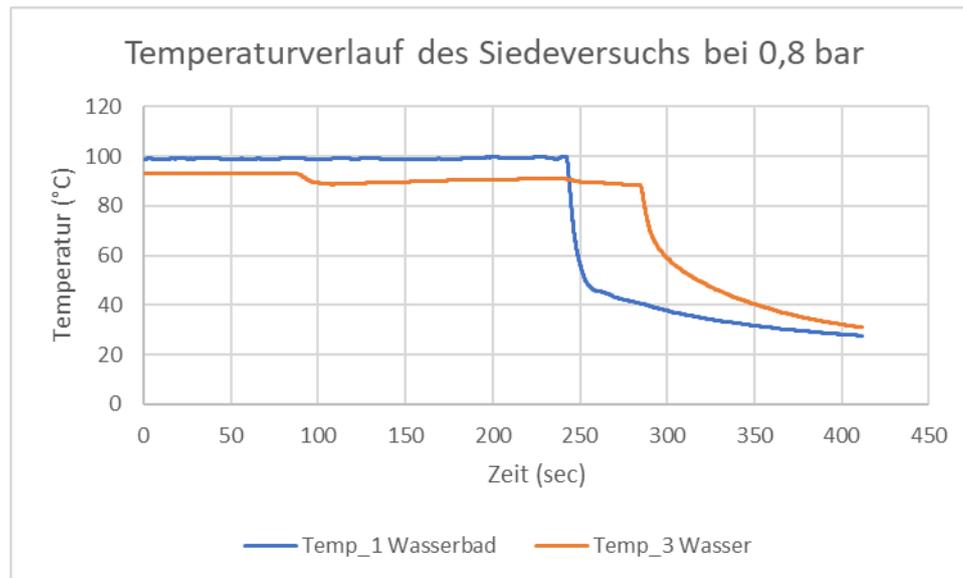


Abbildung 46: Siedepunkt des Wassers bei 0,8 bar (93 °C)

Abbildung 46 zeigt den entsprechenden Temperaturverlauf. Es wird deutlich, dass die Maßnahmen erfolgreich waren. Es war möglich, das Wasser auf über 88 °C zu erhitzen und durch die längere Messung eines Siedepunktes eine nahezu konstante Temperatur einzustellen. Das Absinken der Kurve geht auf den Abbruch des Versuches nach ca. 90 Sekunden Aufzeichnung zurück. Auch bei diesem zweiten Durchgang hielt der durchsichtige Schlauch nicht den Belastungen stand und verformte sich. Da die Probleme mit dem Schlauch in dieser Konstellation nicht zu beheben waren und es keine Möglichkeit der kontrollierten Kondensation gab, wurden weitere Modifikationen am Versuchsaufbau durchgeführt.

Der modifizierte Versuchsaufbau ist Abbildung 47 zu sehen. Das Eisbad hat die Aufgabe, den bei der Verdampfung des Wassers entstehen Wasserdampf abkühlen und somit wieder kondensieren. Das verwendete Glasgefäß hat eine Masse von 95,4 g. Durch das direkte Abführen des Wasserdampfes soll eine Verformung der Schläuche verhindert werden. Um Kondensatbildung am Ausgang des Kondensatgefäßes beobachten zu können, wurden erneut durchsichtige Schläuche verwendet.

Die Durchführung der Versuche mit dem neuen System erfolgt nach dem vorherigen Prinzip. Es wurden 57,79 g Wasser bei 0,4 bar auf Siedetemperatur erhitzt. Der Versuch wurde insgesamt dreimal wiederholt. Dies geschah, um eine gewisse Vergleichbarkeit zu erzeugen und den Einfluss äußerer Faktoren zu minimieren.

Die Resultate entsprechen den Erwartungen. Die Verdampfung lief wie gewünscht ab und der dabei entstandene Dampf bewegt sich eigenständig in den kälteren Bereich der Versuchsanordnung. Dabei wurde auch der vorteilhafte Effekt eines durchsichtigen Schlauchs deutlich. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass sich nur am Eingang des

Kondensatgefäßes Wasser sammelte und nicht am Ausgang. Dies spricht für die korrekte Funktionsweise der Apparatur.

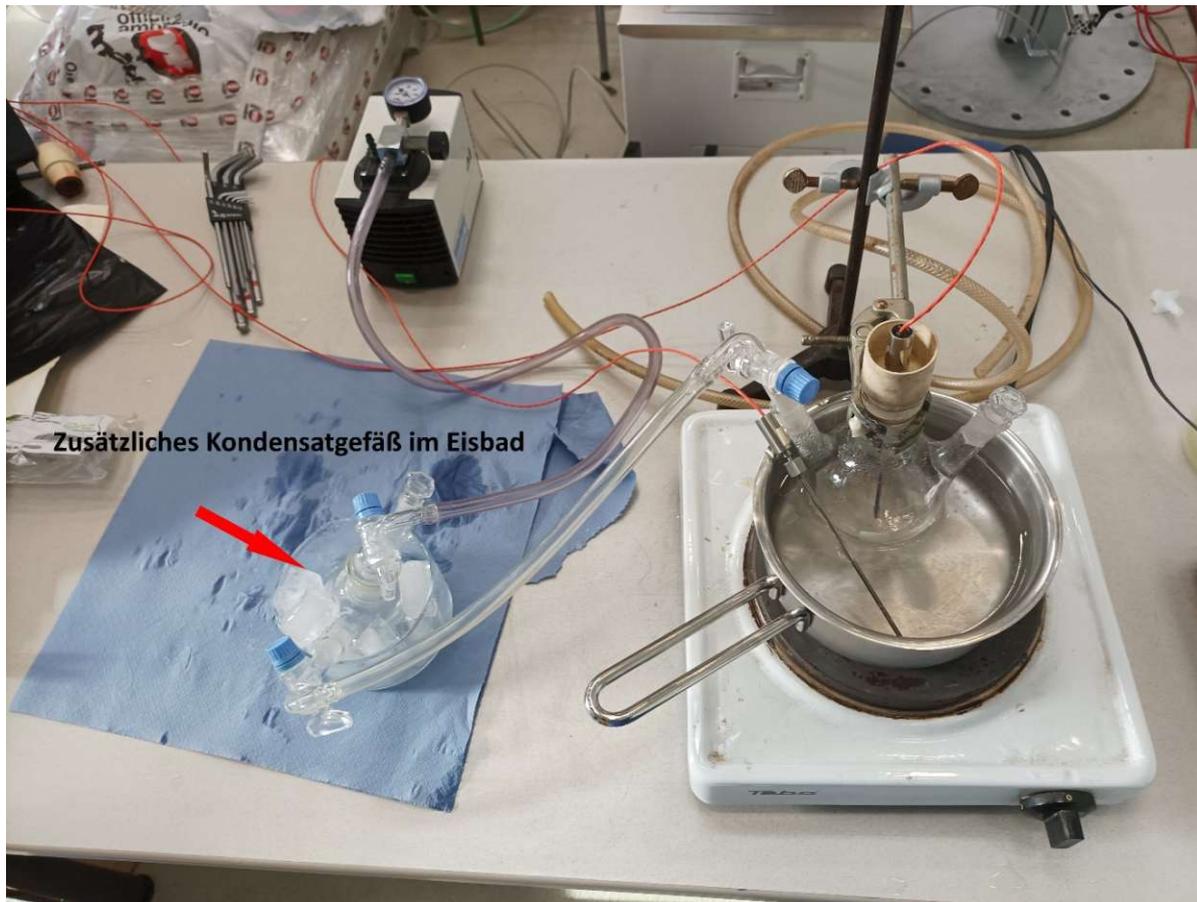


Abbildung 47: Versuchsaufbau erweitert um ein Kondensatgefäß im Eisbad

Die aufgezeichneten Temperaturverläufe sind in Abbildung 48 zu sehen. Dabei handelt es sich um den dritten der durchgeführten Versuche. Gut sind die Erwärmung des Wasserbades und des Wassers im Kolben zu erkennen. Gleichzeitig ist aber auch das Problem mit dem verwendeten durchsichtigen Schlauch zu sehen. Deutlich wird dies an den Erhebungen bei ca. 450 sec, 600 sec und 850 sec. Da der Temperaturverlauf an diesen Punkten die Siedetemperatur von 75,85 °C übersteigt, muss sich zu diesen Zeitpunkten auch der Druck innerhalb des Kolbens erhöht haben. Dies konnte auf einen Verschluss des Systems durch den verformten Schlauch zurückgeführt werden. Das Absenken der Temperatur konnte durch eine Erhöhung des Systemdrucks auf 1 bar und erneutes Evakuieren auf den Zieldruck erreicht werden. Es stellt sich durch diese Maßnahme ein kurzfristiges Absenken der Temperatur ein. Trotzdem war diese Maßnahme, wie zu sehen ist, nur von sehr kurzer Dauer.

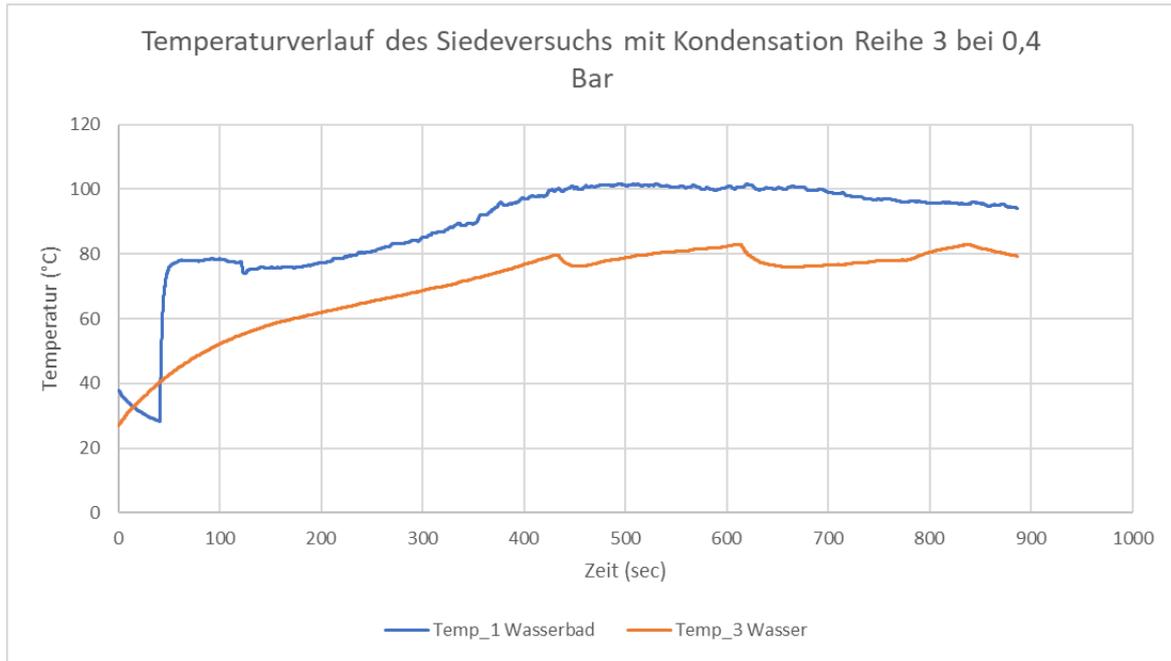


Abbildung 48: Temperaturverlauf des Siedeversuchs mit Kondensation bei 0,4 bar

Im Anschluss wurde die Masse des Kondensats ermittelt. Es wurden insgesamt 7 g Wasser im Kondensator gesammelt. Zur Kontrolle wurde zusätzlich die gesamte Wassermenge im System bestimmt. Sie betrug insgesamt 57,0 g. Somit sind ca. 0,79 g Wasser durch die Vakuumpumpe und sonstige Öffnungen entwichen.

Insgesamt sind die Versuche als Erfolg zu bewerten. Es konnte Unterdruck in einem entsprechenden Maß hergestellt werden, Kondensat mit geringen Verlusten aufgefangen und die Untauglichkeit der ursprünglichen Schlauchverbindung dokumentiert werden.

5.1.3 Untersuchung der Dehydratation von Kalziumoxalat bei Unterdruck

Ziel dieses Versuches ist eine erste Untersuchung von Kalziumoxalat unter nicht Laborbedingungen. Der Versuchsaufbau gleicht dem in Abbildung 47 nur, dass im Gegensatz zu Versuch 2 statt Wasser Kalziumoxalat in den Rundkolben eingefüllt worden ist (Abbildung 98 und Abbildung 99). Zusätzlich wurde die Versuchsanordnung um eine zusätzliche Temperaturmessung (T_2) im Kondensatgefäß erweitert. Auf Basis der Ergebnisse des ersten und zweiten Versuches wurde ein widerstandsfähigerer Schlauch für die Verbindung zwischen Kondensat- und Dehydrationsgefäß verwendet.

Die Versuchsdurchführung wurde im Vergleich zu den vorherigen Versuchen nicht verändert. Es wurden 52,8 g Oxalat bei 0,4 bar auf 100 °C erhitzt. Dabei wurde beobachtet, ob Wasser aus dem Salz ausgetrieben werden konnte.

Abbildung 49 zeigt den Temperaturverlauf über der Zeit. Zu beachten ist dabei die Länge des Versuches von knapp 50 min. Das Abfallen der Temperatur T_1 ist durch Nachfüllen des Wasserbades mit Wasser bei Raumtemperatur zu erklären. Es wird deutlich, dass es mit dieser Versuchsanordnung nicht möglich war, das Oxalat auf über 84 °C zu erhitzen. Dies kann entweder an der Versuchsanordnung liegen oder am niedrigen Wärmeleitungskoeffizient von Kalziumoxalat.

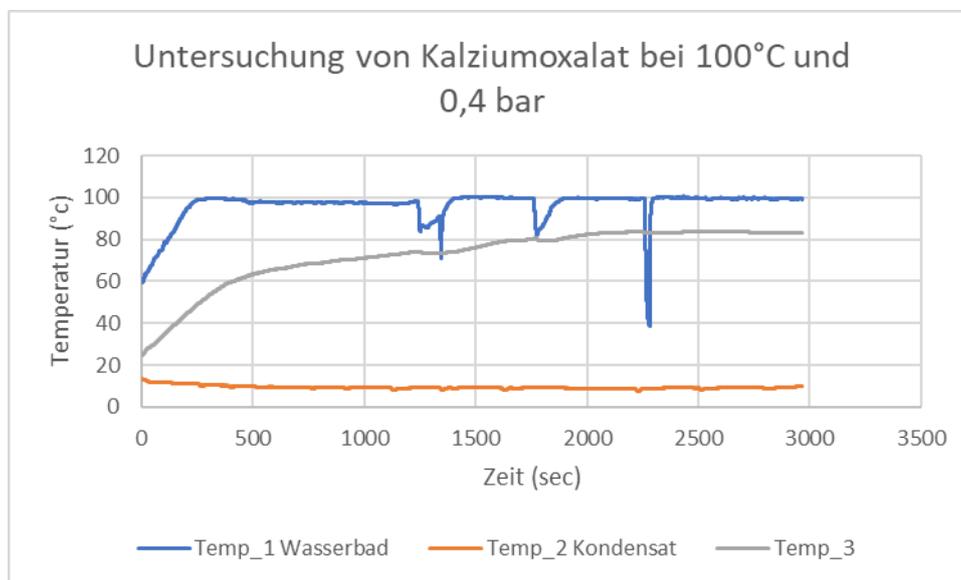


Abbildung 49: Temperaturverlauf von Kalziumoxalat bei 100 °C und 0,4 bar

Grundsätzlich konnte eine Kondensatbildung am Ausgang der Dehydrationskolben beobachtet werden (Abbildung 97 im Anhang). Die Herkunft der Flüssigkeit konnte aber nicht hinreichend geklärt werden. Es könnte sich um Wasserbeladung der Luft handeln oder Wasser, das durch Undichtigkeiten in das System gelangt ist. Dabei scheint die zweite Möglichkeit die wahrscheinlichste, da sich der Kolben konstant in einer Wolke aus Wasserdampf befand. Hinzukommt, dass sich im Kondensatbehälter kein Wasser befunden hat und das Oxalat nach dem Versuch mit 52,61 g nahezu sein ursprüngliches Gewicht besaß.

Da mithilfe des ursprünglichen Versuchsaufbaus die gewünschte Zieltemperatur von 200 °C nicht erreicht werden konnte, wurde der Versuchsaufbau erneut angepasst. In diesem Fall wurde das Wasserbad durch ein Thermoölbad ersetzt und die Eintauchtiefe erhöht. Zu sehen in Abbildung 50. Diese Maßnahmen erbrachten den gewünschten Effekt. Es war dadurch möglich, die gewünschte Temperatur von 200 °C zu erreichen.



Abbildung 50: Modifizierter Versuchsaufbau (Oxalat in Thermoölbad)

Wie zuvor wurden 52,8 g Oxalat bei 0,4 bar erhitzt. Dabei wurde beobachtet, ob Wasser aus dem Salz ausgetrieben werden konnte.

Durch die erhöhte Temperatur und den dadurch höheren maximalen Partialdruck vom Wasser bei der Dehydratisierung konnte eine Dehydratation des Salzes beobachtet werden. Dies konnte auch durch eine Gewichtsreduktion des Oxalats bestätigt werden. Nach Abschluss des Versuches wog das Salz noch 51,5 g. Leider konnte kein Kondensat im entsprechenden Behältnis aufgefangen werden, da jeglicher Wasserdampf schon innerhalb des Schlauches kondensierte. Auf diese Situation muss bei der Inbetriebnahme des eigentlichen Betriebsstandes besonderer Fokus gelegt werden.

5.2 Inbetriebnahme des Versuchstands

Dieses Teilkapitel beschäftigt sich mit der ersten Inbetriebnahme des Versuchstandes. Es beschreibt den Aufbau und die im Zuge dieses Prozesses entstandenen Probleme. Dies erfolgt mit dem Ziel, Handlungsempfehlungen für die Optimierung des Versuchstandes definieren zu können, um damit einen iterativen Verbesserungsprozess einzuleiten.

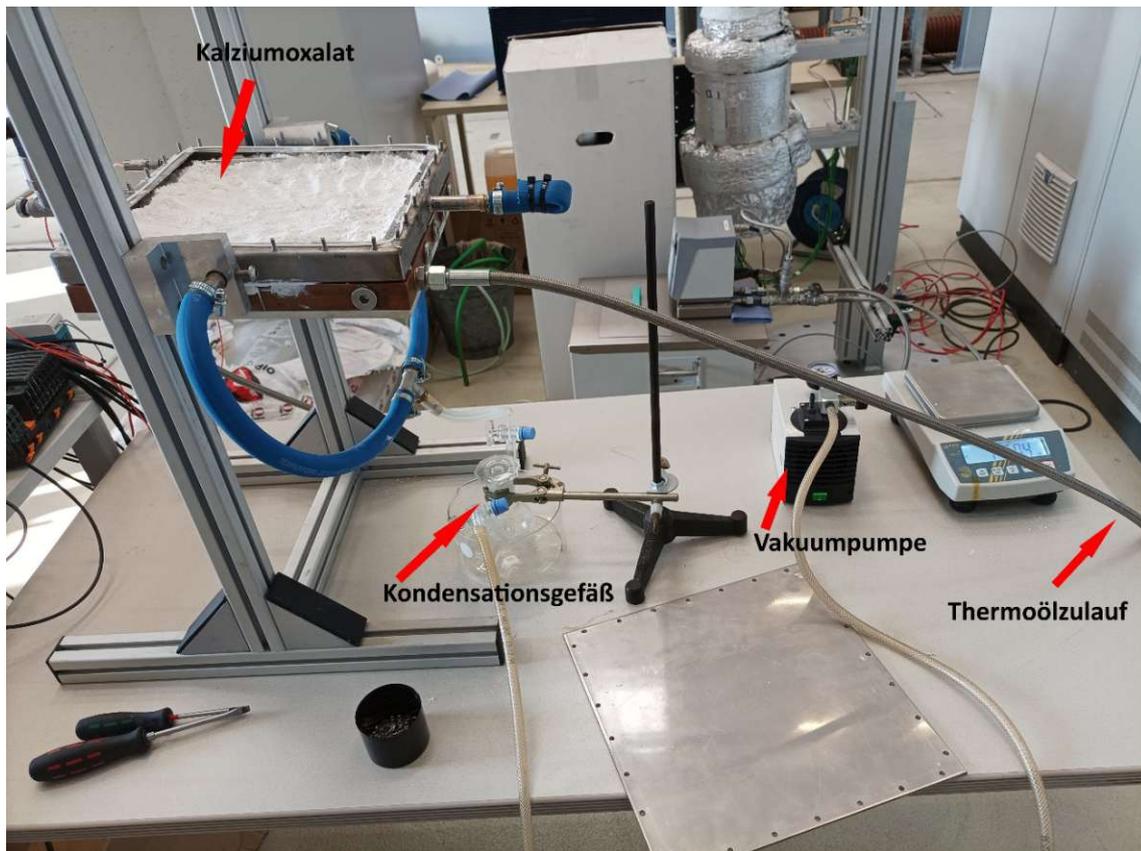


Abbildung 51: Versuchstand (offen)

Abbildung 51 zeigt den Versuchsaufbau. Auf Basis der in den Vorversuchen erzielten Ergebnisse ist an den Versuchsträger ein Kondensationsgefäß angeschlossen und die zuvor verwendete Vakuumpumpe. Im Versuchsträger befinden sich 691,89 g Kalziumoxalat als Schüttung. Die Dichte der Schüttung liegt bei 1000 kg/m^3 und wurde mithilfe eines Messbechers (Volumen) und der links im Bild zu sehende Waage bestimmt. Abbildung 52 zeigt die am Versuchsaufbau angebrachten Messeinrichtungen. Diese bestehen aus einer Druckmessung und drei Thermoelementen zur Bestimmung der Temperatur. Die Einschubtiefe der Temperaturfühler kann variiert werden. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, wird dieser Parameter aber nicht variiert. Im Anhang in Abbildung 100 ist die Position der Fühler zu sehen. Bei der ersten Nutzung des Versuchsaufbaus konnte kein Unterdruck erzeugt werden. Dieses Problem konnte mit einer zusätzlichen Silikonabdichtung behoben werden. Zu sehen in Abbildung 51 am Rand des offenen Versuchsaufbaus.

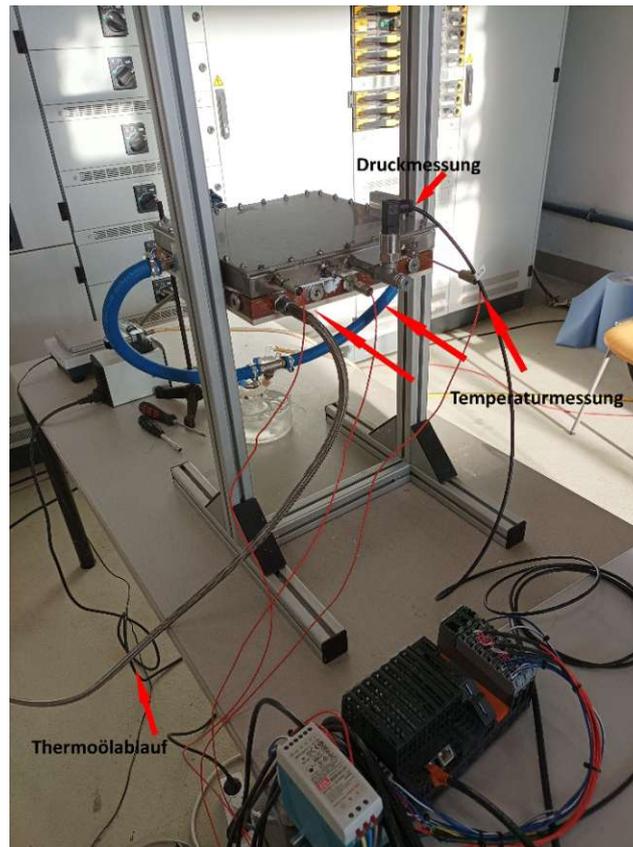


Abbildung 52: Messeinrichtungen des Versuchstandes

Ein weiteres Problem, das im Rahmen der ersten Inbetriebnahme aufgetreten ist, war eine unterschiedliche Druckmessung der Vakuumpumpe und der Messeinrichtung des Versuchstandes. Da es nicht möglich war zu evaluieren, welche der beiden Druckmessungen fehlerhafte Ergebnisse liefert, wurde auf eine klassische hydrostatische Druckmessung als drittes Messinstrument zurückgegriffen. Eine Abbildung dieses Messinstruments ist Abbildung 101 im Anhang zu finden. Durch diese zusätzliche Druckmessung konnte der Fehler auf eine fehlerhafte Softwareeinstellung eingegrenzt werden. Der verwendete Drucksensor arbeitet mit einem Messsignal von 4 mA bis 20 mA und einer 16 Bit-Auflösung. Die Umrechnung von Messsignal auf Auflösung war fehlerhaft und wurde korrigiert.

Bei der Erwärmung des Versuchstandes stellte sich heraus, dass in der aktuellen Konfiguration keine Temperatur über 146,5 °C erreicht werden konnte. Die Versuchsdauer betrug 2 Stunden und die Thermoöltemperatur betrug 200 °C.

Da die gewünschte Zieltemperatur für den Dehydrationsversuch bei 200 °C liegen, waren weitere Modifikationen der Anlage nötig.

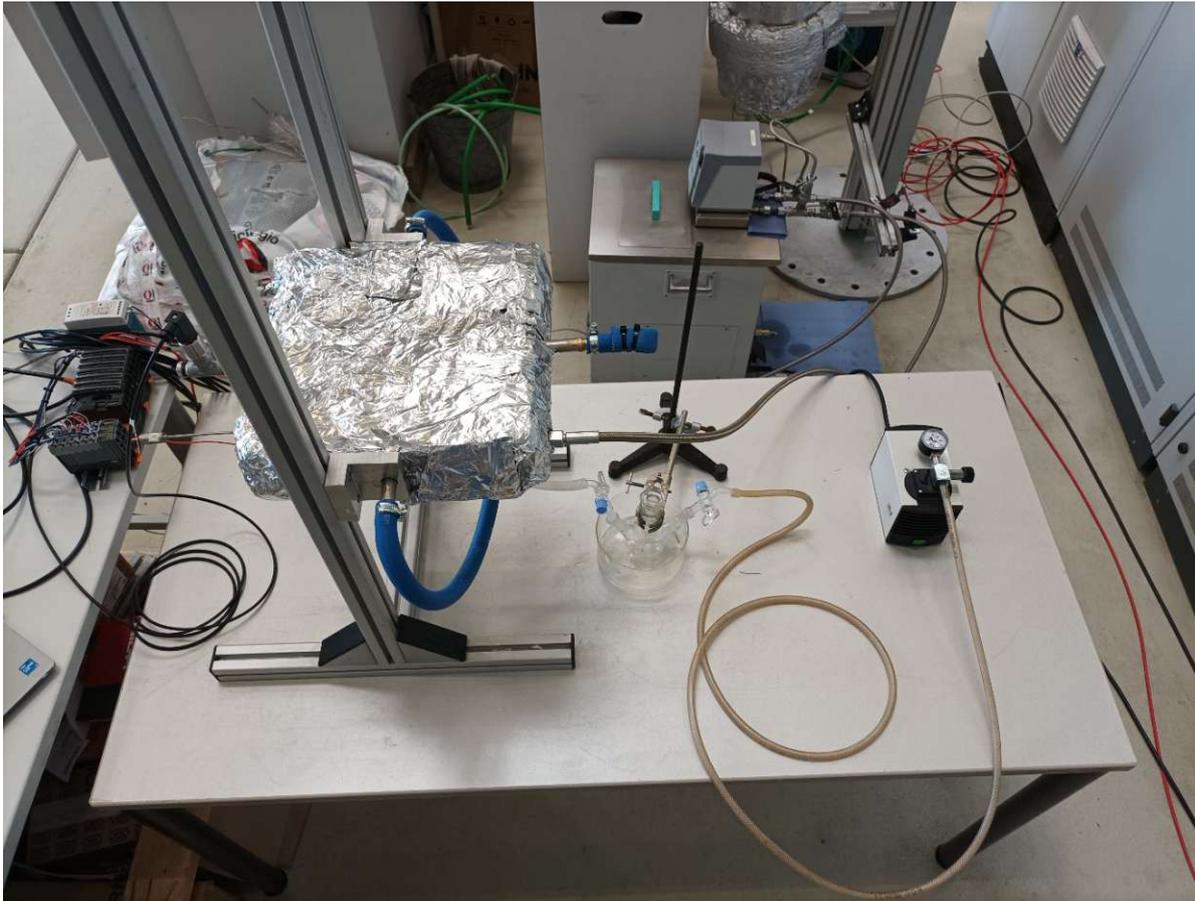


Abbildung 53: Versuchstand zur besseren Wärmedämmung mit Steinwolle ummantelt

Die gewählte Modifikation war eine zusätzliche Wärmedämmung aus Steinwolle mit einer zusätzlichen Schicht aus Aluminium zur Stabilisation (Abbildung 53). Die Glaswolle ohne Aluminium ist in Abbildung 102 zu sehen. Zusätzlich wurden die Schläuche für die Zu- und Abfuhr des Thermoöls durch isolierte Schläuche ersetzt. Beide Maßnahmen führten zu einer maximalen Temperatur von $162,5\text{ °C}$ innerhalb des Versuchsträgers. Gleichzeitig konnten 2 ml Wasser im Kondensationsgefäß gesammelt werden.

Insgesamt lässt sich sagen, dass der Versuchsstand in der jetzigen Konfiguration den gewünschten Anforderungen nicht gerecht wird. Es lässt sich nicht das gewünschte Temperaturniveau von 200 °C erreichen, noch lässt sich in ausreichendem Maße eine Dehydratation des Kalziumoxalats durchführen. Die aus den Ergebnissen abgeleiteten Umbaumaßnahmen des Versuchstandes sind im nächsten Kapitel beschrieben.

6 Ergebnisse

Die dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungsfrage, ob ein Speichersystem auf Basis einer thermochemischen Wärmespeicherung einen Mehrwert für den Einsatz in einem Backofen besitzt, kann mit Ja unter bestimmten Voraussetzungen beantwortet werden. Es konnte gezeigt werden, dass die Höhe der Box den Mehrwert unter statischen Gesichtspunkten signifikant beeinflusst. Abbildung 54 zeigt dies an einem Speichersystem mit einer quadratischen Grundfläche mit einer Kantenlänge von 15 cm. Der variierte Parameter ist die Höhe des Systems von 5 mm auf 19 mm. Es zeigt sich, dass selbst bei einer Speicherhöhe von 5 mm die speicherbare Wärme die zusätzlich eingebrachte thermische Masse übersteigt.

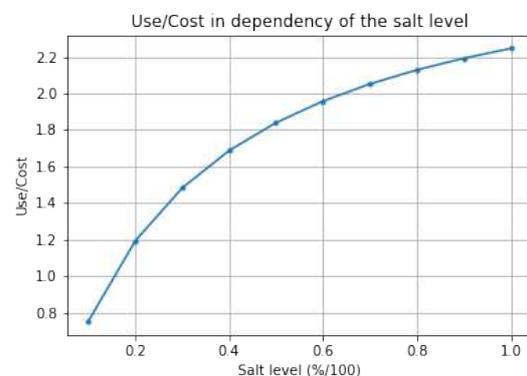
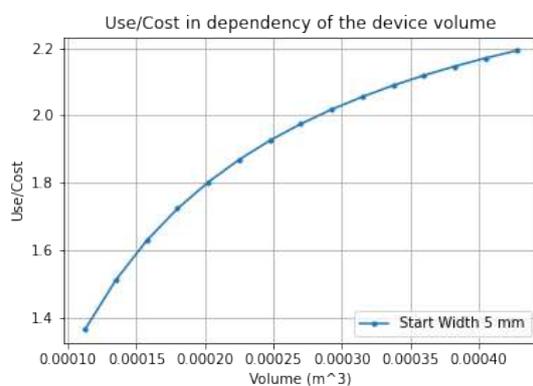


Abbildung 54: Nutzen eines TCS in Bezug auf Abbildung 55: Darstellung des Kosten-Nutzen-
sein Volumen über die Variation der Faktoren über den Füllstand des Speichers
Speicherhöhe

Die Charakterisierung der Höhe des Systems als kritischen Faktor hilft bei der weiteren Analyse. Es können unterschiedliche Geometrien untersucht und schnell eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden. Die gilt auch in Bezug auf die Variation des Füllstands des TCS-Materials in der Box. Dadurch wird deutlich, dass die Menge an Salz innerhalb des Systems der kritische Faktor ist. Abbildung 55 zeigt die entsprechende Variation des Füllstandes des Speichers. Der Verlauf der Kurven ist qualitativ der gleiche, was die zuvor getroffene Aussage stützt.

Die zeitabhängige Betrachtung des Systems gliederte sich in zwei Teile. Zunächst wurden die zusätzlichen Wärmeverluste sowie das Entstehen einer Wärmebrücke durch das Hinzufügen eines Speichersystems untersucht und anschließend der Lade- und Entladevorgang der Batterie. Abbildung 56 und Abbildung 57 fassen die Ergebnisse zusammen. Dabei wurde ein quadratisches Speichersystem mit einer Seitenlänge von 15 cm betrachtet. Abbildung 56 zeigt den Einfluss der Speicherbrücke über die Variation der Höhe des Speichers. Es ist deutlich der negative Einfluss dieses Effekts zu beobachten. Er äußert sich in der reduzierten Zeit, bis zu der der Nutzen des Speichers durch die zusätzlichen Wärmeverluste aufgebraucht ist.

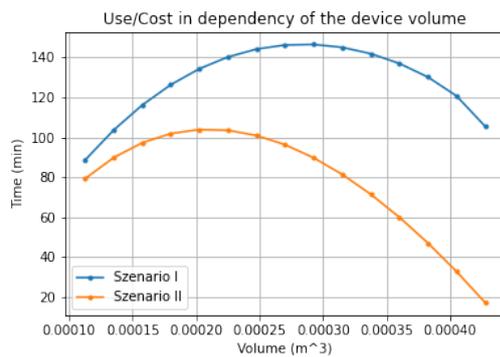


Abbildung 56: Darstellung des Einflusses einer Wärmebrücke über der Variation der Speicherhöhe

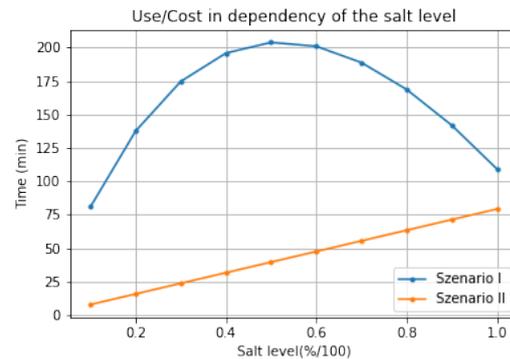


Abbildung 57: Darstellung des Einflusses einer Wärmebrücke über den Füllstand des Speichers

Abbildung 57 zeigt den negativen Effekt einer Wärmebrücke anhand der Variation des Füllstandes. Die Höhe des Systems liegt bei 15 mm. Anhand dieser Abbildung ist gut der dämmende Einfluss der Luft innerhalb des Systems zu erkennen. Das optimale Verhältnis zwischen Luft und Salz liegt unter diesen geometrischen Bedingungen bei 50 %. Unter diesen Umständen besitzt der TCS bis über 3 h und 20 min einen positiven Effekt. Aus diesen Ergebnissen lassen sich zwei wichtige Erkenntnisse ableiten. Ein TCS besitzt auch unter Betrachtung der Wärmeverluste über einen längeren Zeitraum hinweg einen positiven Effekt. Die andere Erkenntnis ist, dass der negative Einfluss einer Wärmebrücke nicht zu vernachlässigen ist. Für die weitere Entwicklungsarbeit bedeuten diese Ergebnisse, dass unter dem Einfluss der Wärmeverluste eine optimale Befüllung bei 50 % liegt. Diese Eigenschaft hat den positiven Effekt, dass mehr Raum für den Gasaustausch vorhanden ist. Des Weiteren müssen innerhalb der zukünftigen Entwicklungen konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung des Einflusses der Wärmebrücke in das System integriert werden. Diese könnten in Form einer zusätzlichen Wärmedämmung zwischen Speicherwand und Backofen realisiert werden. Eine andere Möglichkeit wäre die Fertigung des Speichermantels aus einem weniger gut wärmeleitenden Material.

Der zweite Teil der zeitabhängigen Simulation beschäftigte sich mit der Analyse des Lade- und Entladevorgangs des Speichers. Die Ergebnisse zeigen, dass das optimale Temperaturfenster für diese Vorgänge oberhalb von 150 °C liegt. Oberhalb dieser Temperatur läuft die Reaktion zwischen Kalziumoxalat und Wasser in einer Geschwindigkeit ab, die das System sinnvoll für den Einsatz in einem Backofen macht. Dabei wird auch deutlich, dass nicht die Speicherkapazität des Systems die maximal speicherbare Energiemenge festlegt, sondern die Abkühlgeschwindigkeit des Backofens. Das führt zu der Erkenntnis, dass im Idealfall der Backofen und das System besser gedämmt werden müssen, um die an die Umwelt abgegebene Wärme zu reduzieren, um damit die Zeit innerhalb des relevanten Temperaturfensters zu erhöhen.

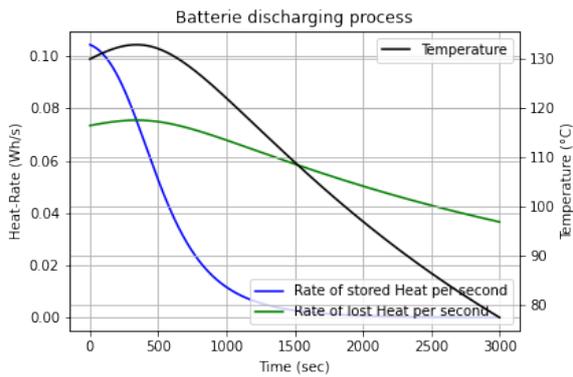


Abbildung 58: Entladen des Speichers bei 130 °C (Rate der Entladung)

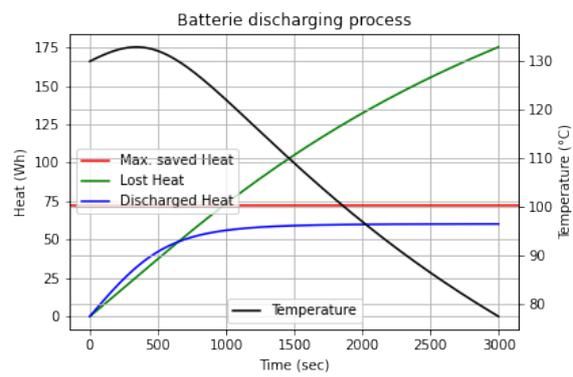


Abbildung 59: Entladen des Speichers bei 130 °C (aufsummierte Werte)

Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen die Entladekurve eines Speichersystems mit den Abmessungen 15 cm x 15 cm und einer Höhe von 15 mm. In diesen Graphen wird der zuvor am Beispiel des Ladens beschriebene Effekt auch beim Entladen deutlich. Bei einer Temperatur unterhalb von 150 °C ist die Rate der Speicherentladung zu niedrig, um den Backofen signifikant zu erwärmen. Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen den Entladevorgang desselben Systems bei 150 °C. Es ist zu erkennen wie der Backofen in kurzer Zeit auf über 175 °C erwärmt wird und nach Abgabe der gesamten im Speicher vorhandenen Energie sich langsam wieder abkühlt. Dies führt zu dem Schluss, dass der optimale Einsatzbereich eines solchen Speichersystem oberhalb von 150 °C liegt. Er erfüllt damit eine Booster-Funktion. Das System kann dazu eingesetzt werden, um schnell die maximale Backtemperatur zu erreichen oder Wärmeverluste während des Betriebs auszugleichen.

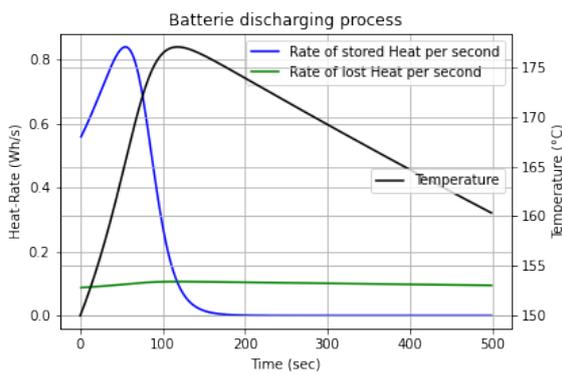


Abbildung 60: Entladen des Speichers bei 150 °C (Rate der Entladung)

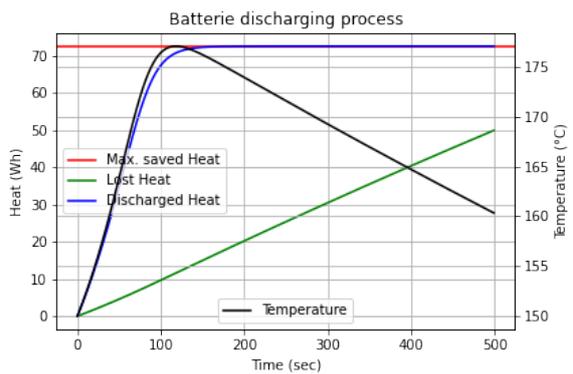


Abbildung 61: Entladen des Speichers bei 150 °C (aufsummierte Werte)

Damit hat die Analyse des Lade- und Entladevorgangs wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung geliefert.

Die praktischen Vorversuche zeigen das man sich auf dem richtigen Weg befindet. Es müssen aber noch einige Hürden im Rahmen der weiteren Entwicklung des Systems genommen werden. Zu diesen Optimierungen gehört die Integration eines leistungsfähigeren Erwärmungssystems. Es konnte gezeigt werden, dass die aktuelle Konfiguration den aktuellen Anforderungen nicht gerecht wird. Die wichtigste Erkenntnis liegt aber im Bereich der verwendeten Sensortechnik. Es ist zwingend erforderlich für zukünftige Experimente die Möglichkeit der Messung der Luftfeuchtigkeit in das System zu integrieren. Nur so wird es möglich sein optimale Versuchsbedingungen zu schaffen, um ein leistungsfähiges Speichersystem zu entwickeln.

Anhang

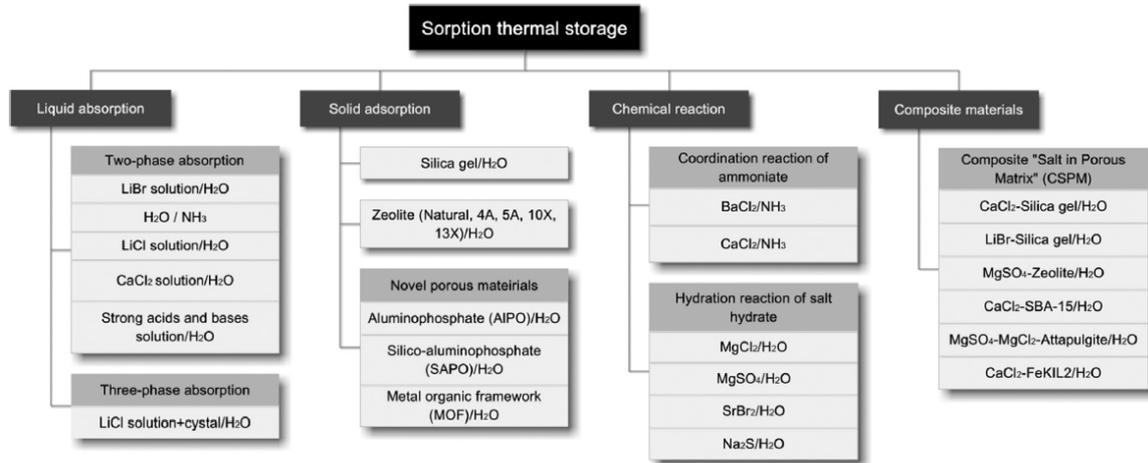


Abbildung 62: Überblick über die verschiedenen Prozesse von Energiespeicherung mit Hilfe von Sorption [21, S. 492]

Temp. (K)	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)
283.15	10	7.96077E-07	7.96077E-05
284.15	11	8.8281E-07	8.8281E-05
285.15	12	9.78282E-07	9.78282E-05
286.15	13	1.0833E-06	0.00010833
287.15	14	1.19874E-06	0.000119874
288.15	15	1.32556E-06	0.000132556
289.15	16	1.46477E-06	0.000146477
290.15	17	1.61748E-06	0.000161748
291.15	18	1.7849E-06	0.00017849
292.15	19	1.96832E-06	0.000196832
293.15	20	2.16914E-06	0.000216914
294.15	21	2.38888E-06	0.000238888
295.15	22	2.62915E-06	0.000262915
296.15	23	2.89171E-06	0.000289171
297.15	24	3.17846E-06	0.000317846
298.15	25	3.49143E-06	0.000349143
299.15	26	3.83281E-06	0.000383281
300.15	27	4.20496E-06	0.000420496
301.15	28	4.6104E-06	0.00046104
302.15	29	5.05185E-06	0.000505185
303.15	30	5.53223E-06	0.000553223
304.15	31	6.05468E-06	0.000605468
305.15	32	6.62255E-06	0.000662255
306.15	33	7.23943E-06	0.000723943
307.15	34	7.90919E-06	0.000790919
308.15	35	8.63596E-06	0.000863596
309.15	36	9.42414E-06	0.000942414
310.15	37	1.02785E-05	0.001027846
311.15	38	1.1204E-05	0.001120399
312.15	39	1.22061E-05	0.00122061
313.15	40	1.32906E-05	0.001329058
314.15	41	1.44636E-05	0.001446357
315.15	42	1.57316E-05	0.001573163
316.15	43	1.71018E-05	0.001710178
317.15	44	1.85815E-05	0.001858147
318.15	45	2.01787E-05	0.002017866
319.15	46	2.19018E-05	0.002190182
320.15	47	2.376E-05	0.002375996
321.15	48	2.57627E-05	0.002576268
322.15	49	2.79202E-05	0.002792017
323.15	50	3.02433E-05	0.003024329
324.15	51	3.27435E-05	0.003274355
325.15	52	3.54332E-05	0.003543319
326.15	53	3.83252E-05	0.003832521
327.15	54	4.14334E-05	0.00414334
328.15	55	4.47724E-05	0.004477238
329.15	56	4.83577E-05	0.004835765
330.15	57	5.22057E-05	0.005220566
331.15	58	5.63338E-05	0.005633382

$$p_{eq} = p^0 e^{-\frac{\Delta h_T^0}{RT_{eq}} + \frac{\Delta s_T^0}{R}}$$

R (J/K*Mol)
8.31451
p_0 (Bar)
1.013
h (J/Mol)
69180
s (J/Mol*K)
127.45

Abbildung 63: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (1)

Temp. (K)	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)
332.15	59	6.07606E-05	0.006076056
333.15	60	6.55054E-05	0.00655054
334.15	61	7.0589E-05	0.007058899
335.15	62	7.60332E-05	0.007603318
336.15	63	8.18611E-05	0.008186106
337.15	64	8.8097E-05	0.008809703
338.15	65	9.47669E-05	0.009476689
339.15	66	0.000101898	0.010189787
340.15	67	0.000109519	0.01095187
341.15	68	0.00011766	0.011765973
342.15	69	0.000126353	0.012635294
343.15	70	0.000135632	0.013563209
344.15	71	0.000145533	0.014553274
345.15	72	0.000156092	0.015609235
346.15	73	0.00016735	0.016735042
347.15	74	0.000179348	0.017934849
348.15	75	0.00019213	0.019213031
349.15	76	0.000205742	0.020574193
350.15	77	0.000220232	0.022023174
351.15	78	0.000235651	0.023565067
352.15	79	0.000252052	0.025205223
353.15	80	0.000269493	0.026949264
354.15	81	0.000288031	0.028803097
355.15	82	0.000307729	0.030772923
356.15	83	0.000328653	0.032865254
357.15	84	0.000350869	0.03508692
358.15	85	0.000374451	0.037445089
359.15	86	0.000399473	0.039947277
360.15	87	0.000426014	0.042601361
361.15	88	0.000454156	0.045415602
362.15	89	0.000483986	0.048398649
363.15	90	0.000515596	0.051559566
364.15	91	0.000549078	0.05490784
365.15	92	0.000584534	0.058453403
366.15	93	0.000622066	0.062206648
367.15	94	0.000661784	0.066178448
368.15	95	0.000703802	0.070380172
369.15	96	0.000748237	0.074823709
370.15	97	0.000795215	0.079521484
371.15	98	0.000844865	0.08448648
372.15	99	0.000897323	0.089732259
373.15	100	0.00095273	0.095272984
374.15	101	0.001011234	0.101123441
375.15	102	0.001072991	0.107299062
376.15	103	0.00113816	0.113815951
377.15	104	0.001206909	0.120690905
378.15	105	0.001279414	0.127941442
379.15	106	0.001355858	0.135585825
380.15	107	0.001436431	0.14364309

Abbildung 64: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (2)

Temp. (K)	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)
381.15	108	0.001521331	0.152133073
382.15	109	0.001610764	0.161076439
383.15	110	0.001704947	0.170494708
384.15	111	0.001804103	0.180410289
385.15	112	0.001908465	0.190846507
386.15	113	0.002018276	0.201827636
387.15	114	0.002133789	0.213378933
388.15	115	0.002255267	0.225526666
389.15	116	0.002382982	0.238298153
390.15	117	0.002517218	0.251721794
391.15	118	0.002658271	0.265827109
392.15	119	0.002806448	0.280644772
393.15	120	0.002962066	0.296206649
394.15	121	0.003125458	0.312545839
395.15	122	0.003296967	0.32969671
396.15	123	0.003476949	0.347694943
397.15	124	0.003665776	0.36657757
398.15	125	0.00386383	0.386383018
399.15	126	0.004071512	0.407151152
400.15	127	0.004289233	0.428923322
401.15	128	0.004517424	0.451742404
402.15	129	0.004756528	0.475652848
403.15	130	0.005007007	0.500700728
404.15	131	0.005269338	0.526933789
405.15	132	0.005544015	0.554401497
406.15	133	0.005831551	0.583155088
407.15	134	0.006132476	0.613247624
408.15	135	0.00644734	0.644734042
409.15	136	0.006776712	0.677671212
410.15	137	0.00712118	0.71211799
411.15	138	0.007481353	0.748135276
412.15	139	0.007857861	0.785786071
413.15	140	0.008251355	0.825135538
414.15	141	0.008662511	0.866251059
415.15	142	0.009092023	0.9092023
416.15	143	0.009540613	0.954061273
417.15	144	0.010009024	1.000902398
418.15	145	0.010498026	1.049802572
419.15	146	0.011008412	1.100841232
420.15	147	0.011541004	1.154100427
421.15	148	0.012096649	1.209664884
422.15	149	0.012676221	1.267622079
423.15	150	0.013280623	1.328062314
424.15	151	0.013910788	1.391078782
425.15	152	0.014567676	1.45676765
426.15	153	0.015252281	1.525228129
427.15	154	0.015965626	1.596562555
428.15	155	0.016708765	1.670876469
429.15	156	0.017482787	1.748278693

Abbildung 65: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (3)

Temp. (K)	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)
430.15	157	0.018288814	1.828881418
431.15	158	0.019128003	1.91280028
432.15	159	0.020001545	2.000154453
433.15	160	0.020910667	2.091066728
434.15	161	0.021856636	2.185663606
435.15	162	0.022840754	2.284075385
436.15	163	0.023864362	2.386436249
437.15	164	0.024928844	2.492884367
438.15	165	0.02603562	2.603561977
439.15	166	0.027186155	2.71861549
440.15	167	0.028381956	2.838195583
441.15	168	0.029624573	2.962457298
442.15	169	0.030915601	3.091560142
443.15	170	0.032256682	3.22566819
444.15	171	0.033649502	3.364950185
445.15	172	0.035095796	3.509579648
446.15	173	0.03659735	3.659734977
447.15	174	0.038155996	3.815599565
448.15	175	0.039773619	3.977361901
449.15	176	0.041452157	4.145215683
450.15	177	0.043193599	4.319359937
451.15	178	0.044999991	4.499999123
452.15	179	0.046873433	4.687343257
453.15	180	0.04881608	4.881608028
454.15	181	0.050830149	5.083014915
455.15	182	0.052917913	5.291791312
456.15	183	0.055081706	5.508170647
457.15	184	0.057323925	5.73239251
458.15	185	0.059647028	5.964702777
459.15	186	0.062053537	6.205353739
460.15	187	0.064546042	6.454604233
461.15	188	0.067127198	6.71271977
462.15	189	0.069799727	6.979972671
463.15	190	0.072566422	7.2566422
464.15	191	0.075430147	7.543014703
465.15	192	0.078393837	7.839383742
466.15	193	0.081460502	8.146050239
467.15	194	0.084633226	8.463322617
468.15	195	0.087915169	8.791516941
469.15	196	0.091309571	9.130957065
470.15	197	0.094819748	9.481974779
471.15	198	0.0984491	9.844909957
472.15	199	0.102201107	10.22011071
473.15	200	0.106079335	10.60793352
474.15	201	0.110087434	11.00874344
475.15	202	0.114229142	11.42291419
476.15	203	0.118508284	11.85082835
477.15	204	0.122928775	12.29287752
478.15	205	0.127494625	12.74946247

Abbildung 66: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (4)

Temp. (K)	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)
479.15	206	0.132209933	13.2209933
480.15	207	0.137078896	13.70788961
481.15	208	0.142105807	14.21058066
482.15	209	0.147295056	14.72950556
483.15	210	0.152651134	15.26511341
484.15	211	0.158178635	15.81786347
485.15	212	0.163882254	16.38822537
486.15	213	0.169766792	16.97667925
487.15	214	0.175837159	17.58371593
488.15	215	0.182098371	18.20983713
489.15	216	0.188555556	18.85555561
490.15	217	0.195213954	19.52139537
491.15	218	0.202078918	20.20789181
492.15	219	0.20915592	20.91559195
493.15	220	0.216450546	21.64505461
494.15	221	0.223968505	22.39685054
495.15	222	0.231715627	23.17156271
496.15	223	0.239697864	23.96978641
497.15	224	0.247921295	24.7921295
498.15	225	0.256392126	25.63921257
499.15	226	0.265116692	26.51166916
500.15	227	0.274101459	27.41014594
501.15	228	0.283353029	28.33530293
502.15	229	0.292878137	29.28781367
503.15	230	0.302683655	30.26836547
504.15	231	0.312776596	31.27765955
505.15	232	0.323164113	32.31641131
506.15	233	0.333853505	33.38535049
507.15	234	0.344852214	34.4852214
508.15	235	0.356167831	35.61678315
509.15	236	0.367808098	36.7808098
510.15	237	0.379780906	37.97809064
511.15	238	0.392094304	39.20943037
512.15	239	0.404756493	40.47564934
513.15	240	0.417775837	41.77758372
514.15	241	0.431160858	43.11608578
515.15	242	0.444920241	44.49202407
516.15	243	0.459062837	45.90628365
517.15	244	0.473597663	47.35976634
518.15	245	0.488533909	48.85339089
519.15	246	0.503880933	50.38809328
520.15	247	0.519648269	51.96482687
521.15	248	0.535845627	53.5845627
522.15	249	0.552482897	55.24828967
523.15	250	0.569570148	56.95701478
524.15	251	0.587117634	58.71176341
525.15	252	0.605135795	60.51357947
526.15	253	0.623635257	62.36352574
527.15	254	0.64262684	64.262684

Abbildung 67: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (5)

Temp. (K)	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)
528.15	255	0.662121553	66.21215535
529.15	256	0.682130604	68.21306041
530.15	257	0.702665396	70.26653957
531.15	258	0.723737532	72.37375324
532.15	259	0.745358821	74.53588209
533.15	260	0.767541273	76.75412727
534.15	261	0.790297107	79.02971071
535.15	262	0.813638753	81.36387529
536.15	263	0.837578852	83.75788517
537.15	264	0.86213026	86.213026
538.15	265	0.887306051	88.73060513
539.15	266	0.91311952	91.31195196
540.15	267	0.939584181	93.95841809
541.15	268	0.966713776	96.67137764
542.15	269	0.994522275	99.45222748
543.15	270	1.023023875	102.3023875
544.15	271	1.052233008	105.2233008
545.15	272	1.08216434	108.216434
546.15	273	1.112832777	111.2832777
547.15	274	1.144253463	114.4253463
548.15	275	1.176441785	117.6441785
549.15	276	1.209413377	120.9413377
550.15	277	1.243184121	124.3184121

Abbildung 68: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (6)

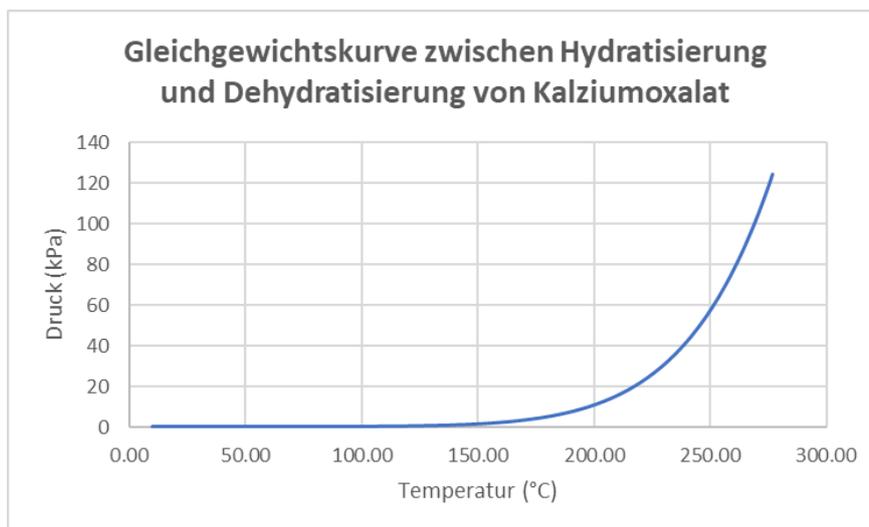


Abbildung 69: Gleichgewichtskurve zwischen Hydratisierung und Dehydratisierung von Kalziumoxalat

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \frac{T_c}{T} (\alpha_1 \tau + \alpha_2 \tau^{1.5} + \alpha_3 \tau^3 + \alpha_4 \tau^{3.5} + \alpha_5 \tau^4 + \alpha_6 \tau^{7.5})$$

$$\tau = 1 - \frac{T}{T_c}$$

α_1	-7.8595178
α_2	1.8440826
α_3	-11.7866497
α_4	22.6807411
α_5	-15.9618719
α_6	1.8012250

T_c (K)
647.096

P_c (Pa)
22064000

Abbildung 70: Randbedingungen zur Bestimmung des Sättigungsdampfcurve von Wasser

Temp. (K)	τ	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)	P (Pa)
283.15	0.56242969	10.00	0.01228112	1.22811215	1228.11
284.15	0.56088432	11.00	0.01312875	1.31287529	1312.88
285.15	0.55933895	12.00	0.01402748	1.40274776	1402.75
286.15	0.55779359	13.00	0.0149799	1.49798982	1497.99
287.15	0.55624822	14.00	0.01598872	1.59887233	1598.87
288.15	0.55470286	15.00	0.01705677	1.705677	1705.68
289.15	0.55315749	16.00	0.01818697	1.81869675	1818.70
290.15	0.55161213	17.00	0.01938236	1.93823599	1938.24
291.15	0.55006676	18.00	0.02064611	2.06461094	2064.61
292.15	0.54852139	19.00	0.0219815	2.19814992	2198.15
293.15	0.54697603	20.00	0.02339194	2.33919374	2339.19
294.15	0.54543066	21.00	0.02488096	2.48809592	2488.10
295.15	0.5438853	22.00	0.02645223	2.64522313	2645.22
296.15	0.54233993	23.00	0.02810955	2.8109554	2810.96
297.15	0.54079457	24.00	0.02985687	2.98568656	2985.69
298.15	0.5392492	25.00	0.03169824	3.16982449	3169.82
299.15	0.53770383	26.00	0.03363791	3.36379149	3363.79
300.15	0.53615847	27.00	0.03568025	3.56802463	3568.02
301.15	0.5346131	28.00	0.03782976	3.78297606	3782.98
302.15	0.53306774	29.00	0.04009113	4.00911337	4009.11
303.15	0.53152237	30.00	0.0424692	4.24691993	4246.92
304.15	0.529977	31.00	0.04496895	4.49689523	4496.90
305.15	0.52843164	32.00	0.04759555	4.75955523	4759.56
306.15	0.52688627	33.00	0.05035433	5.03543272	5035.43
307.15	0.52534091	34.00	0.05325078	5.32507762	5325.08
308.15	0.52379554	35.00	0.05629057	5.6290574	5629.06
309.15	0.52225018	36.00	0.05947957	5.94795738	5947.96
310.15	0.52070481	37.00	0.06282381	6.28238108	6282.38
311.15	0.51915944	38.00	0.06632951	6.63295061	6632.95
312.15	0.51761408	39.00	0.07000307	7.00030698	7000.31
313.15	0.51606871	40.00	0.0738511	7.38511047	7385.11
314.15	0.51452335	41.00	0.07788041	7.788041	7788.04
315.15	0.51297798	42.00	0.08209798	8.20979844	8209.80
316.15	0.51143262	43.00	0.08651103	8.65110297	8651.10
317.15	0.50988725	44.00	0.09112695	9.11269547	9112.70
318.15	0.50834188	45.00	0.09595338	9.59533783	9595.34
319.15	0.50679652	46.00	0.10099813	10.0998133	10099.81
320.15	0.50525115	47.00	0.10626927	10.6269269	10626.93
321.15	0.50370579	48.00	0.11177506	11.1775056	11177.51
322.15	0.50216042	49.00	0.11752399	11.7523988	11752.40
323.15	0.50061506	50.00	0.12352479	12.3524789	12352.48
324.15	0.49906969	51.00	0.12978641	12.978641	12978.64
325.15	0.49752432	52.00	0.13631804	13.6318039	13631.80
326.15	0.49597896	53.00	0.1431291	14.3129101	14312.91
327.15	0.49443359	54.00	0.15022926	15.0229263	15022.93
328.15	0.49288823	55.00	0.15762843	15.7628434	15762.84
329.15	0.49134286	56.00	0.16533677	16.5336773	16533.68
330.15	0.4897975	57.00	0.17336469	17.3364688	17336.47
331.15	0.48825213	58.00	0.18172285	18.1722845	18172.28

Abbildung 71: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 1

Temp. (K)	τ	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)	P (Pa)
332.15	0.48670676	59	0.19042216	19.0422163	19042.22
333.15	0.4851614	60	0.19947383	19.9473825	19947.38
334.15	0.48361603	61	0.20888928	20.8889276	20888.93
335.15	0.48207067	62	0.21868023	21.8680229	21868.02
336.15	0.4805253	63	0.22885867	22.8858666	22885.87
337.15	0.47897993	64	0.23943684	23.9436844	23943.68
338.15	0.47743457	65	0.2504273	25.0427295	25042.73
339.15	0.4758892	66	0.26184283	26.1842831	26184.28
340.15	0.47434384	67	0.27369654	27.3696544	27369.65
341.15	0.47279847	68	0.28600182	28.6001815	28600.18
342.15	0.47125311	69	0.29877231	29.8772309	29877.23
343.15	0.46970774	70	0.31202199	31.2021985	31202.20
344.15	0.46816237	71	0.32576509	32.5765094	32576.51
345.15	0.46661701	72	0.34001618	34.0016183	34001.62
346.15	0.46507164	73	0.3547901	35.47901	35479.01
347.15	0.46352628	74	0.37010199	37.0101992	37010.20
348.15	0.46198091	75	0.38596731	38.5967314	38596.73
349.15	0.46043555	76	0.40240182	40.2401825	40240.18
350.15	0.45889018	77	0.41942159	41.9421594	41942.16
351.15	0.45734481	78	0.437043	43.7043004	43704.30
352.15	0.45579945	79	0.45528275	45.5282749	45528.27
353.15	0.45425408	80	0.47415784	47.4157843	47415.78
354.15	0.45270872	81	0.49368562	49.3685617	49368.56
355.15	0.45116335	82	0.51388373	51.3883725	51388.37
356.15	0.44961799	83	0.53477014	53.4770144	53477.01
357.15	0.44807262	84	0.55636318	55.6363176	55636.32
358.15	0.44652725	85	0.57868145	57.8681451	57868.15
359.15	0.44498189	86	0.60174393	60.1743932	60174.39
360.15	0.44343652	87	0.62556991	62.556991	62556.99
361.15	0.44189116	88	0.65017901	65.0179011	65017.90
362.15	0.44034579	89	0.6755912	67.55912	67559.12
363.15	0.43880043	90	0.70182678	70.1826776	70182.68
364.15	0.43725506	91	0.72890638	72.8906379	72890.64
365.15	0.43570969	92	0.75685099	75.6850991	75685.10
366.15	0.43416433	93	0.78568194	78.5681937	78568.19
367.15	0.43261896	94	0.81542088	81.5420885	81542.09
368.15	0.4310736	95	0.84608985	84.6089852	84608.99
369.15	0.42952823	96	0.8777112	87.77112	87771.12
370.15	0.42798286	97	0.91030764	91.0307643	91030.76
371.15	0.4264375	98	0.94390224	94.3902244	94390.22
372.15	0.42489213	99	0.97851842	97.851842	97851.84
373.15	0.42334677	100	1.01417994	101.417994	101417.99
374.15	0.4218014	101	1.05091092	105.091092	105091.09
375.15	0.42025604	102	1.08873586	108.873586	108873.59
376.15	0.41871067	103	1.12767958	112.767958	112767.96
377.15	0.4171653	104	1.16776727	116.776727	116776.73
378.15	0.41561994	105	1.20902451	120.902451	120902.45
379.15	0.41407457	106	1.25147719	125.147719	125147.72
380.15	0.41252921	107	1.2951516	129.51516	129515.16

Abbildung 72: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 2

Temp. (K)	τ	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)	P (Pa)
381.15	0.41098384	108	1.34007437	134.007437	134007.44
382.15	0.40943848	109	1.38627251	138.627251	138627.25
383.15	0.40789311	110	1.43377338	143.377338	143377.34
384.15	0.40634774	111	1.48260472	148.260472	148260.47
385.15	0.40480238	112	1.53279461	153.279461	153279.46
386.15	0.40325701	113	1.58437151	158.437151	158437.15
387.15	0.40171165	114	1.63736427	163.736427	163736.43
388.15	0.40016628	115	1.69180207	169.180207	169180.21
389.15	0.39862092	116	1.74771447	174.771447	174771.45
390.15	0.39707555	117	1.8051314	180.51314	180513.14
391.15	0.39553018	118	1.86408317	186.408317	186408.32
392.15	0.39398482	119	1.92460044	192.460044	192460.04
393.15	0.39243945	120	1.98671425	198.671425	198671.42
394.15	0.39089409	121	2.050456	205.0456	205045.60
395.15	0.38934872	122	2.11585747	211.585747	211585.75
396.15	0.38780336	123	2.18295081	218.295081	218295.08
397.15	0.38625799	124	2.25176854	225.176854	225176.85
398.15	0.38471262	125	2.32234353	232.234353	232234.35
399.15	0.38316726	126	2.39470904	239.470904	239470.90
400.15	0.38162189	127	2.46889871	246.889871	246889.87
401.15	0.38007653	128	2.54494652	254.494652	254494.65
402.15	0.37853116	129	2.62288685	262.288685	262288.68
403.15	0.37698579	130	2.70275442	270.275442	270275.44
404.15	0.37544043	131	2.78458435	278.458435	278458.44
405.15	0.37389506	132	2.86841212	286.841212	286841.21
406.15	0.3723497	133	2.95427356	295.427356	295427.36
407.15	0.37080433	134	3.04220489	304.220489	304220.49
408.15	0.36925897	135	3.13224269	313.224269	313224.27
409.15	0.3677136	136	3.22442392	322.442392	322442.39
410.15	0.36616823	137	3.31878589	331.878589	331878.59
411.15	0.36462287	138	3.4153663	341.53663	341536.63
412.15	0.3630775	139	3.51420319	351.420319	351420.32
413.15	0.36153214	140	3.615335	361.5335	361533.50
414.15	0.35998677	141	3.7188005	371.88005	371880.05
415.15	0.35844141	142	3.82463886	382.463886	382463.89
416.15	0.35689604	143	3.93288959	393.288959	393288.96
417.15	0.35535067	144	4.04359257	404.359257	404359.26
418.15	0.35380531	145	4.15678806	415.678806	415678.81
419.15	0.35225994	146	4.27251667	427.251667	427251.67
420.15	0.35071458	147	4.39081938	439.081938	439081.94
421.15	0.34916921	148	4.51173751	451.173751	451173.75
422.15	0.34762385	149	4.63531278	463.531278	463531.28
423.15	0.34607848	150	4.76158724	476.158724	476158.72
424.15	0.34453311	151	4.89060332	489.060332	489060.33
425.15	0.34298775	152	5.02240378	502.240378	502240.38
426.15	0.34144238	153	5.15703178	515.703178	515703.18
427.15	0.33989702	154	5.29453081	529.453081	529453.08
428.15	0.33835165	155	5.43494473	543.494473	543494.47
429.15	0.33680629	156	5.57831774	557.831774	557831.77

Abbildung 73: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 3

Temp. (K)	τ	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)	P (Pa)
430.15	0.33526092	157	5.72469441	572.469441	572469.44
431.15	0.33371555	158	5.87411966	587.411966	587411.97
432.15	0.33217019	159	6.02663877	602.663877	602663.88
433.15	0.33062482	160	6.18229736	618.229736	618229.74
434.15	0.32907946	161	6.34114142	634.114142	634114.14
435.15	0.32753409	162	6.50321727	650.321727	650321.73
436.15	0.32598873	163	6.6685716	666.85716	666857.16
437.15	0.32444336	164	6.83725143	683.725143	683725.14
438.15	0.32289799	165	7.00930415	700.930415	700930.42
439.15	0.32135263	166	7.18477749	718.477749	718477.75
440.15	0.31980726	167	7.3637195	736.37195	736371.95
441.15	0.3182619	168	7.54617862	754.617862	754617.86
442.15	0.31671653	169	7.73220361	773.220361	773220.36
443.15	0.31517116	170	7.92184358	792.184358	792184.36
444.15	0.3136258	171	8.11514797	811.514797	811514.80
445.15	0.31208043	172	8.31216657	831.216657	831216.66
446.15	0.31053507	173	8.51294953	851.294953	851294.95
447.15	0.3089897	174	8.71754732	871.754732	871754.73
448.15	0.30744434	175	8.92601074	892.601074	892601.07
449.15	0.30589897	176	9.13839095	913.839095	913839.09
450.15	0.3043536	177	9.35473943	935.473943	935473.94
451.15	0.30280824	178	9.57510802	957.510802	957510.80
452.15	0.30126287	179	9.79954886	979.954886	979954.89
453.15	0.29971751	180	10.0281145	1002.81145	1002811.45
454.15	0.29817214	181	10.2608576	1026.08576	1026085.76
455.15	0.29662678	182	10.4978316	1049.78316	1049783.16
456.15	0.29508141	183	10.7390897	1073.90897	1073908.97
457.15	0.29353604	184	10.984686	1098.4686	1098468.60
458.15	0.29199068	185	11.2346744	1123.46744	1123467.44
459.15	0.29044531	186	11.4891095	1148.91095	1148910.95
460.15	0.28889995	187	11.7480462	1174.80462	1174804.62
461.15	0.28735458	188	12.0115395	1201.15395	1201153.95
462.15	0.28580922	189	12.2796449	1227.96449	1227964.49
463.15	0.28426385	190	12.5524182	1255.24182	1255241.82
464.15	0.28271848	191	12.8299155	1282.99155	1282991.55
465.15	0.28117312	192	13.1121933	1311.21933	1311219.33
466.15	0.27962775	193	13.3993083	1339.93083	1339930.83
467.15	0.27808239	194	13.6913177	1369.13177	1369131.77
468.15	0.27653702	195	13.9882788	1398.82788	1398827.88
469.15	0.27499166	196	14.2902494	1429.02494	1429024.94
470.15	0.27344629	197	14.5972874	1459.72874	1459728.74
471.15	0.27190092	198	14.9094514	1490.94514	1490945.14
472.15	0.27035556	199	15.2268	1522.68	1522680.00
473.15	0.26881019	200	15.5493922	1554.93922	1554939.22
474.15	0.26726483	201	15.8772874	1587.72874	1587728.74
475.15	0.26571946	202	16.2105451	1621.05451	1621054.51
476.15	0.26417409	203	16.5492255	1654.92255	1654922.55
477.15	0.26262873	204	16.8933887	1689.33887	1689338.87
478.15	0.26108336	205	17.2430953	1724.30953	1724309.53

Abbildung 74: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 4

Temp. (K)	τ	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)	P (Pa)
479.15	0.259538	206	17.5984064	1759.84064	1759840.64
480.15	0.25799263	207	17.9593831	1795.93831	1795938.31
481.15	0.25644727	208	18.326087	1832.6087	1832608.70
482.15	0.2549019	209	18.69858	1869.858	1869858.00
483.15	0.25335653	210	19.0769243	1907.69243	1907692.43
484.15	0.25181117	211	19.4611823	1946.11823	1946118.23
485.15	0.2502658	212	19.851417	1985.1417	1985141.70
486.15	0.24872044	213	20.2476914	2024.76914	2024769.14
487.15	0.24717507	214	20.6500689	2065.00689	2065006.89
488.15	0.24562971	215	21.0586135	2105.86135	2105861.35
489.15	0.24408434	216	21.4733891	2147.33891	2147338.91
490.15	0.24253897	217	21.8944602	2189.44602	2189446.02
491.15	0.24099361	218	22.3218915	2232.18915	2232189.15
492.15	0.23944824	219	22.755748	2275.5748	2275574.80
493.15	0.23790288	220	23.1960951	2319.60951	2319609.51
494.15	0.23635751	221	23.6429985	2364.29985	2364299.85
495.15	0.23481215	222	24.0965241	2409.65241	2409652.41
496.15	0.23326678	223	24.5567384	2455.67384	2455673.84
497.15	0.23172141	224	25.0237078	2502.37078	2502370.78
498.15	0.23017605	225	25.4974994	2549.74994	2549749.94
499.15	0.22863068	226	25.9781805	2597.81805	2597818.05
500.15	0.22708532	227	26.4658186	2646.58186	2646581.86
501.15	0.22553995	228	26.9604817	2696.04817	2696048.17
502.15	0.22399459	229	27.4622381	2746.22381	2746223.81
503.15	0.22244922	230	27.9711562	2797.11562	2797115.62
504.15	0.22090385	231	28.487305	2848.7305	2848730.50
505.15	0.21935849	232	29.0107537	2901.07537	2901075.37
506.15	0.21781312	233	29.5415719	2954.15719	2954157.19
507.15	0.21626776	234	30.0798295	3007.98295	3007982.95
508.15	0.21472239	235	30.6255966	3062.55966	3062559.66
509.15	0.21317702	236	31.1789439	3117.89439	3117894.39
510.15	0.21163166	237	31.7399422	3173.99422	3173994.22
511.15	0.21008629	238	32.3086628	3230.86628	3230866.28
512.15	0.20854093	239	32.8851772	3288.51772	3288517.72
513.15	0.20699556	240	33.4695573	3346.95573	3346955.73
514.15	0.2054502	241	34.0618755	3406.18755	3406187.55
515.15	0.20390483	242	34.6622042	3466.22042	3466220.42
516.15	0.20235946	243	35.2706164	3527.06164	3527061.64
517.15	0.2008141	244	35.8871855	3588.71855	3588718.55
518.15	0.19926873	245	36.511985	3651.1985	3651198.50
519.15	0.19772337	246	37.1450891	3714.50891	3714508.91
520.15	0.196178	247	37.786572	3778.6572	3778657.20
521.15	0.19463264	248	38.4365086	3843.65086	3843650.86
522.15	0.19308727	249	39.0949738	3909.49738	3909497.38
523.15	0.1915419	250	39.7620432	3976.20432	3976204.32
524.15	0.18999654	251	40.4377927	4043.77927	4043779.27
525.15	0.18845117	252	41.1222983	4112.22983	4112229.83
526.15	0.18690581	253	41.8156368	4181.56368	4181563.68
527.15	0.18536044	254	42.5178852	4251.78852	4251788.52

Abbildung 75: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 5

Temp. (K)	τ	Temp. (°C)	P (Bar)	P (kPa)	P (Pa)
528.15	0.18381508	255	43.2291207	4322.91207	4322912.07
529.15	0.18226971	256	43.9494213	4394.94213	4394942.13
530.15	0.18072434	257	44.6788649	4467.88649	4467886.49
531.15	0.17917898	258	45.4175303	4541.75303	4541753.03
532.15	0.17763361	259	46.1654964	4616.54964	4616549.64
533.15	0.17608825	260	46.9228425	4692.28425	4692284.25
534.15	0.17454288	261	47.6896486	4768.96486	4768964.86
535.15	0.17299752	262	48.4659948	4846.59948	4846599.48
536.15	0.17145215	263	49.2519618	4925.19618	4925196.18
537.15	0.16990678	264	50.0476308	5004.76308	5004763.08
538.15	0.16836142	265	50.8530832	5085.30832	5085308.32
539.15	0.16681605	266	51.668401	5166.8401	5166840.10
540.15	0.16527069	267	52.4936668	5249.36668	5249366.68
541.15	0.16372532	268	53.3289634	5332.89634	5332896.34
542.15	0.16217995	269	54.1743743	5417.43743	5417437.43
543.15	0.16063459	270	55.0299832	5502.99832	5502998.32
544.15	0.15908922	271	55.8958746	5589.58746	5589587.46
545.15	0.15754386	272	56.7721333	5677.21333	5677213.33
546.15	0.15599849	273	57.6588446	5765.88446	5765884.46
547.15	0.15445313	274	58.5560945	5855.60945	5855609.45
548.15	0.15290776	275	59.4639692	5946.39692	5946396.92
549.15	0.15136239	276	60.3825558	6038.25558	6038255.58
550.15	0.14981703	277	61.3119418	6131.19418	6131194.18

Abbildung 76: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 6

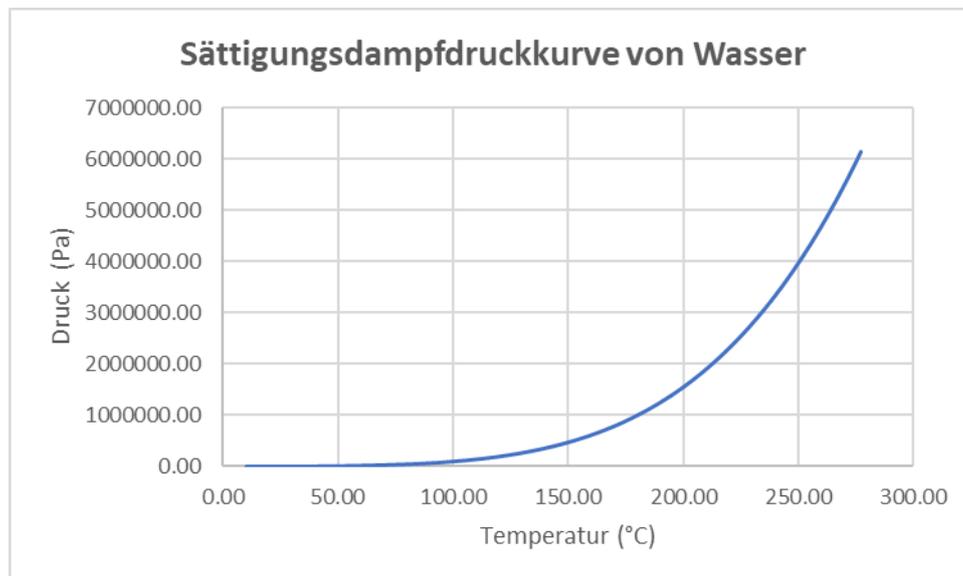


Abbildung 77: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser (lineare y-Achse)

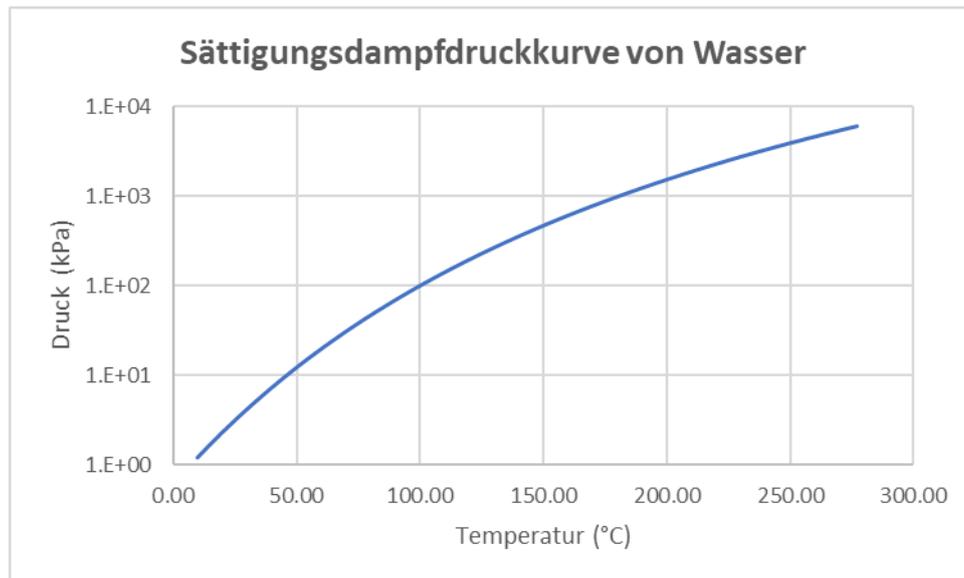


Abbildung 78: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser (logarithmische y-Asche)

Heat loss calculation					
Basis EEI Project					
Example Bosch AV2 EOX 6021					
Thermal Capacity	Weight [g]	Material	Capacity [J/kg/K]	Stored Energy [Wh]	Share
Cavity	4925	Steel	490	100.56	32%
Hot Air Guide	832	Steel	490	16.99	5%
Side rail	694	Steel	490	14.17	4%
Telescope rail	590	Steel	490	12.04	4%
Grid	833	Steel	490	17.01	5%
Fan	172	Steel	490	3.50	1%
Heating elements	708	Steel	490	36.15	11%
Insulation	751.36	Glass-wool	840	16.22	5%
Door Glasses		Soda lime	830	101.30	32%
Temperature		25	175 °C		
Resulting stored energy				317.93 Wh	
Caution, only "hot" and large components (>100°C) are roughly taken into consideration					
Insulation area losses					Comment
Base Kubus Cavity	Non Pyro	Pyro			rough Kubus for comparison
Width	480	480	mm		
Height	380	380	mm		
Depth	440	440	mm		
Door frontal area		0			
Width	470	470	mm		
Height	350	350	mm		
Thickness insulation	20	25	mm		
Density	800	2000	g/m ²		
Insulation value λ	0.0493	0.0468	W/mK		at 150°C mid temperature
Areas					
Top	0.2112	0.2112	m ²		
Bottom	0.2112	0.2112	m ²		
Backside	0.1824	0.1824	m ²		
Side	0.3344	0.3344	m ²		
Door	0.1645	0.1645	m ²		
Resulting insulation loss (Perfect insulation)					
P _{V, insul}	347	264	W		

Abbildung 79: Von BSH zur Verfügung gestellt Informationen in Bezug auf Abmessungen, thermische Masse und Verlustwärmestrom eines Backofens

```
c_oven = {
    "Material": ["Steel", "--"],
    "width": [0.48, "m"],
    "height": [0.38, "m"],
    "depth": [0.44, "m"],
    "mass": [8.754, "kg"],
    "capacity": [490, "J/(kg*K)"],
    "Stored-Energy (J)": [1086156, "J"],
    "Stored-Energy (Wh)": [301,71, "Wh"] }

```

Abbildung 80: Darstellung des "Wörterbuchs" Backofen der statischen Berechnung

```
c_cont = {
    "Material": ["Steel", "--"],
    "width": [0, "m"],
    "height": [0, "m"],
    "depth": [0, "m"],
    "thickness": [0, "m"],
    "area" : [0, "m^2"],
    "volume": [0, "m^3"],
    "density": [0, "kg/m^3"],
    "mass": [0, "kg"],
    "cp": [0, "J/(kg*K)"],
    "conductivity": [0, "W/(m*K)"] }
```

Abbildung 81: Darstellung des "Wörterbuchs" Container der statischen Berechnung

```
c_salt = {
    "Material": ["CaC2O4", "--"],
    "width": [0, "m"],
    "height": [0, "m"],
    "depth": [0, "m"],
    "area" : [0, "m^2"],
    "volume": [0, "m^3"] ,
    "density": [0, "kg/m^3"],
    "mass": [0, "kg"],
    "cp": [0, "J/(kg*K)"],
    "conductivity": [0, "W/(m*K)"],
    "Energy-Density": [0, "J/kg"],
    "Chemical-Energy (J)": [0, "J"],
    "Chemical-Energy (Wh)": [0, "Wh"]} }
```

Abbildung 82: Darstellung des "Wörterbuchs" Salz der statischen Berechnung

```

c_cavity = {
    "Material": ["Air", "--"],
    "width": [0, "m"],
    "height": [0, "m"],
    "depth": [0, "m"],
    "area" : [0, "m^2"],
    "volume": [0, "m^3"],
    "density": [0, "kg/m^3"],
    "mass": [0, "kg"],
    "cp": [0, "J/(kg*K)"],
    "conductivity": [0, "W/(m*K)"], }

```

Abbildung 83: Darstellung des "Wörterbuchs" Hohlraum der statischen Berechnung

Name	Value	Unit
Material	CaC204	--
width	0.008100000000000001	m
height	0.3	m
depth	0.3	m
area	0.09	m^2
volume	0.000729	m^3
density	1000	kg/m^3
mass	0.7290000000000001	kg
cp	1094.85	J/(kg*K)
conductivity	0.415	W/(m*K)
Energy-Density	473446.4823	J/kg
Chemical-Energy (J)	345142.48559670005	J
Chemical-Energy (Wh)	95.87291266575001	Wh

Name	Value	Unit
Material	Steel	--
width	0.01	m
height	0.302	m
depth	0.302	m
thickness	0.001	m
area	0.091204	m^2
volume	0.0009120399999999999	m^3
density	7900	kg/m^3
mass	0.8061159999999988	kg
cp	500	J/(kg*K)
conductivity	40	W/(m*K)

Name	Value	Unit
Material	Air	--
width	0.0009000000000000002	m
height	0.3	m
depth	0.3	m
area	0.09	m^2
volume	8.100000000000002e-05	m^3
density	1.2041	kg/m^3
mass	9.753210000000002e-05	kg
cp	1005	J/(kg*K)
conductivity	0.0262	W/(m*K)

Abbildung 84: Ausgabe der abhängigen Variablen am Beispiel Volumen Ofen (302 x 302 x 10) in mm

H (m)	D (m)	W (m)	A (m ²)	V (m ³)	tM (J)	tM (Wh)	Diff (J)	Diff (Wh)	chem (J)	chem (Wh)	Use-Cost	Loss
Height	Depth	Width	Area	Volume	Ther. Masse	Ther. Mass	Costs	Costs	chem. Energy	chem. Energy	--	Wh
0.10000	0.10000	0.00500	0.01000	0.00005	1169309.04656	324.80807	24761.04656	6.87807	32738.25612	9.09396	1.32217	315.71411
0.11000	0.11000	0.00500	0.01210	0.00006	1174357.70084	326.21047	29809.70084	8.28047	39760.41434	11.04456	1.33381	315.16591
0.12000	0.12000	0.00500	0.01440	0.00007	1179873.62672	327.74267	35325.62672	9.81267	47464.33550	13.18454	1.34362	314.55813
0.13000	0.13000	0.00500	0.01690	0.00008	1185856.82420	329.40467	41308.82420	11.47467	55850.01960	15.51389	1.35201	313.89078
0.14000	0.14000	0.00500	0.01960	0.00010	1192307.29328	331.19647	47759.29328	13.26647	64917.46662	18.03263	1.35926	313.16384
0.15000	0.15000	0.00500	0.02250	0.00011	1199225.03396	333.11806	54677.03396	15.18806	74666.67659	20.74074	1.36560	312.37732
0.16000	0.16000	0.00500	0.02560	0.00013	1206610.04624	335.16946	62062.04624	17.23946	85097.64949	23.63824	1.37117	311.53122
0.17000	0.17000	0.00500	0.02890	0.00014	1214462.33012	337.35065	69914.33012	19.42065	96210.38532	26.72511	1.37612	310.62554
0.18000	0.18000	0.00500	0.03240	0.00016	1222781.88560	339.66163	78233.88560	21.73163	108004.88409	30.00136	1.38054	309.66027
0.19000	0.19000	0.00500	0.03610	0.00018	1231568.71268	342.10242	87020.71268	24.17242	120481.14579	33.46698	1.38451	308.63544
0.20000	0.20000	0.00500	0.04000	0.00020	1240822.81136	344.67300	96274.81136	26.74300	133639.17042	37.12199	1.38810	307.55101
0.21000	0.21000	0.00500	0.04410	0.00022	1250544.18164	347.37338	105996.18164	29.44338	147478.95799	40.96638	1.39136	306.40700
0.22000	0.22000	0.00500	0.04840	0.00024	1260732.82352	350.20356	116184.82352	32.27356	162000.50850	45.00014	1.39433	305.20342
0.23000	0.23000	0.00500	0.05290	0.00026	1271388.73700	353.16354	126840.73700	35.23354	177203.82194	49.22328	1.39706	303.94026
0.24000	0.24000	0.00500	0.05760	0.00029	1282511.92208	356.25331	137963.92208	38.32331	193088.89831	53.63581	1.39956	302.61750
0.25000	0.25000	0.00500	0.06250	0.00031	1294102.37876	359.47288	149554.37876	41.54288	209655.73762	58.23770	1.40187	301.23518
0.26000	0.26000	0.00500	0.06760	0.00034	1306160.10704	362.82225	161612.10704	44.89225	226904.33986	63.02898	1.40401	299.79327
0.27000	0.27000	0.00500	0.07290	0.00036	1318685.10692	366.30142	174137.10692	48.37142	244834.70504	68.00964	1.40599	298.29178
0.28000	0.28000	0.00500	0.07840	0.00039	1331677.37840	369.91038	187129.37840	51.98038	263446.83315	73.17968	1.40783	296.73070
0.29000	0.29000	0.00500	0.08410	0.00042	1345136.92148	373.64914	200588.92148	55.71914	282740.72420	78.53909	1.40955	295.11005
0.30000	0.30000	0.00500	0.09000	0.00045	1359063.73616	377.51770	214515.73616	59.58770	302716.37818	84.08788	1.41116	293.42982
0.30000	0.30000	0.00600	0.09000	0.00054	1386172.86220	385.04802	241624.86220	67.11802	378395.47273	105.10985	1.56605	279.93817
0.30000	0.30000	0.00700	0.09000	0.00063	1413281.98822	392.57833	268733.98822	74.64833	454074.56727	126.13182	1.68968	266.44651
0.30000	0.30000	0.00800	0.09000	0.00072	1440391.11426	400.10864	295843.11426	82.17864	529753.66182	147.15379	1.79066	252.95485
0.30000	0.30000	0.00900	0.09000	0.00081	1467500.24030	407.63896	322952.24030	89.70896	605432.75636	168.17577	1.87468	239.46319
0.30000	0.30000	0.01000	0.09000	0.00090	1494609.36634	415.16927	350061.36634	97.23927	681111.85091	189.19774	1.94569	225.97153
0.30000	0.30000	0.01100	0.09000	0.00099	1521718.49238	422.69958	377170.49238	104.76958	756790.94546	210.21971	2.00650	212.47987
0.30000	0.30000	0.01200	0.09000	0.00108	1548827.61842	430.22989	404279.61842	112.29989	832470.04000	231.24168	2.05914	198.98821
0.30000	0.30000	0.01300	0.09000	0.00117	1575936.74446	437.76021	431388.74446	119.83021	908149.13455	252.26365	2.10518	185.49656
0.30000	0.30000	0.01400	0.09000	0.00126	1603045.87050	445.29052	458497.87050	127.36052	983828.22909	273.28562	2.14576	172.00490
0.30000	0.30000	0.01500	0.09000	0.00135	1630154.99654	452.82083	485606.99654	134.89083	1059507.32364	294.30759	2.18182	158.51324
0.30000	0.30000	0.01600	0.09000	0.00144	1657264.12258	460.35115	512716.12258	142.42115	1135186.41818	315.32956	2.21406	145.02159
0.30000	0.30000	0.01700	0.09000	0.00153	1684373.24860	467.88146	539825.24860	149.95146	1210865.51273	336.35153	2.24307	131.52993
0.30000	0.30000	0.01800	0.09000	0.00162	1711482.37464	475.41177	566934.37464	157.48177	1286544.60727	357.37350	2.26930	118.03827
0.30000	0.30000	0.01900	0.09000	0.00171	1738591.50068	482.94208	594043.50068	165.01208	1362223.70182	378.39547	2.29314	104.54661

Abbildung 85: Ergebnisse der Kosten/Nutzen Analyse (statisch); Starthöhe 5 mm

H (m)	D (m)	W (m)	A (m ²)	V (m ³)	tM (J)	tM (Wh)	Diff (J)	Diff (Wh)	chem (J)	chem (Wh)	Use-Cost	Loss
Height	Depth	Width	Area	Volume	Ther. Masse	Ther. Masse	Costs	Costs	chem. Energy	chem. Energy	--	Wh
0.10000	0.10000	0.01000	0.01000	0.00010	1185539.71474	329.31659	40991.71474	11.38659	73661.07626	20.46141	1.79697	308.85518
0.11000	0.11000	0.01000	0.01210	0.00012	1193804.87888	331.61247	49256.87888	13.68247	89460.93227	24.85026	1.81621	306.76221
0.12000	0.12000	0.01000	0.01440	0.00014	1202826.70810	334.11853	58278.70810	16.18853	106794.75488	29.66521	1.83248	304.45332
0.13000	0.13000	0.01000	0.01690	0.00017	1212605.20244	336.83478	68057.20244	18.90478	125662.54409	34.90626	1.84643	301.92852
0.14000	0.14000	0.01000	0.01960	0.00020	1223140.36186	339.76121	78592.36186	21.83121	146064.29990	40.57342	1.85851	299.18779
0.15000	0.15000	0.01000	0.02250	0.00023	1234432.18640	342.89783	89884.18640	24.96783	168000.02232	46.66667	1.86907	296.23116
0.16000	0.16000	0.01000	0.02560	0.00026	1246480.67602	346.24463	101932.67602	28.31463	191469.71134	53.18603	1.87839	293.05860
0.17000	0.17000	0.01000	0.02890	0.00029	1259285.83076	349.80162	114737.83076	31.87162	216473.36697	60.13149	1.88668	289.67013
0.18000	0.18000	0.01000	0.03240	0.00032	1272847.65058	353.56879	128299.65058	35.63879	243010.98919	67.50305	1.89409	286.06574
0.19000	0.19000	0.01000	0.03610	0.00036	1287166.13552	357.54615	142618.13552	39.61615	271082.57802	75.30072	1.90076	282.24543
0.20000	0.20000	0.01000	0.04000	0.00040	1302241.28554	361.73369	157693.28554	43.80369	300688.13345	83.52448	1.90679	278.20921
0.21000	0.21000	0.01000	0.04410	0.00044	1318073.10068	366.13142	173525.10068	48.20142	331827.65549	92.17435	1.91227	273.95707
0.22000	0.22000	0.01000	0.04840	0.00048	1334661.58090	370.73933	190113.58090	52.80933	364501.14412	101.25032	1.91728	269.48901
0.23000	0.23000	0.01000	0.05290	0.00053	1352006.72624	375.55742	207458.72624	57.62742	398708.59936	110.75239	1.92187	264.80503
0.24000	0.24000	0.01000	0.05760	0.00058	1370108.53666	380.58570	225560.53666	62.65570	434450.02120	120.68056	1.92609	259.90514
0.25000	0.25000	0.01000	0.06250	0.00063	1388967.01220	385.82417	244419.01220	67.89417	471725.40965	131.03484	1.92999	254.78933
0.26000	0.26000	0.01000	0.06760	0.00068	1408582.15282	391.27282	264034.15282	73.34282	510534.76469	141.81521	1.93359	249.45761
0.27000	0.27000	0.01000	0.07290	0.00073	1428953.95856	396.93166	284405.95856	79.00166	550878.08634	153.02169	1.93694	243.90997
0.28000	0.28000	0.01000	0.07840	0.00078	1450082.42938	402.80067	305534.42938	84.87067	592755.37460	164.65427	1.94006	238.14640
0.29000	0.29000	0.01000	0.08410	0.00084	1471967.56532	408.87988	327419.56532	90.94988	636166.62945	176.71295	1.94297	232.16693
0.30000	0.30000	0.01000	0.09000	0.00090	1494609.36634	415.16927	350061.36634	97.23927	681111.85091	189.19774	1.94569	225.97153
0.30000	0.30000	0.01100	0.09000	0.00099	1521718.49238	422.69958	377170.49238	104.76958	756790.94546	210.21971	2.00650	212.47987
0.30000	0.30000	0.01200	0.09000	0.00108	1548827.61842	430.22989	404279.61842	112.29989	832470.04000	231.24168	2.05914	198.98821
0.30000	0.30000	0.01300	0.09000	0.00117	1575936.74446	437.76021	431388.74446	119.83021	908149.13455	252.26365	2.10518	185.49656
0.30000	0.30000	0.01400	0.09000	0.00126	1603045.87050	445.29052	458497.87050	127.36052	983828.22909	273.28562	2.14576	172.00490
0.30000	0.30000	0.01500	0.09000	0.00135	1630154.99654	452.82083	485606.99654	134.89083	1059507.32364	294.30759	2.18182	158.51324
0.30000	0.30000	0.01600	0.09000	0.00144	1657264.12258	460.35115	512716.12258	142.42115	1135186.41818	315.32956	2.21406	145.02159
0.30000	0.30000	0.01700	0.09000	0.00153	1684373.24860	467.88146	539825.24860	149.95146	1210865.51273	336.35153	2.24307	131.52993
0.30000	0.30000	0.01800	0.09000	0.00162	1711482.37464	475.41177	566934.37464	157.48177	1286544.60727	357.37350	2.26930	118.03827
0.30000	0.30000	0.01900	0.09000	0.00171	1738591.50068	482.94208	594043.50068	165.01208	1362223.70182	378.39547	2.29314	104.54661

Abbildung 86: Ergebnisse der Kosten/Nutzen Analyse (statisch); Starthöhe 10 mm

H (m)	D (m)	W (m)	A (m^2)	V (m^3)	tM (J)	tM (Wh)	Diff (J)	Diff (Wh)	chem (J)	chem (Wh)	Use-Cost	Loss	Use-Cost; Sz-1	Use-Cost; Sz-2
Height	Depth	Width	Area	Volume	Ther. Masse	Ther. Masse	Costs	Costs	chem. Energy	chem. Energy	--	Wh	--	--
0.10000	0.10000	0.00500	0.01000	0.00005	1169309.04656	324.80807	24761.04656	6.87807	32738.25612	9.09396	1.32217	315.71411	83.70871	75.14138
0.11000	0.11000	0.00500	0.01210	0.00006	1174357.70084	326.21047	29809.70084	8.28047	39760.41434	11.04456	1.33381	315.16591	85.05462	76.28039
0.12000	0.12000	0.00500	0.01440	0.00007	1179873.62672	327.74267	35325.62672	9.81267	47464.33550	13.18454	1.34362	314.55813	86.15710	77.21363
0.13000	0.13000	0.00500	0.01690	0.00008	1185856.82420	329.40467	41308.82420	11.47467	55850.01960	15.51389	1.35201	313.89078	87.07474	77.99071
0.14000	0.14000	0.00500	0.01960	0.00010	1192307.29328	331.19647	47759.29328	13.26647	64917.46662	18.03263	1.35926	313.16384	87.84912	78.64680
0.15000	0.15000	0.00500	0.02250	0.00011	1199225.03396	333.11806	54677.03396	15.18806	74666.67659	20.74074	1.36560	312.37732	88.51050	79.20745
0.16000	0.16000	0.00500	0.02560	0.00013	1206610.04624	335.16946	62062.04624	17.23946	85097.64949	23.63824	1.37117	311.53122	89.08134	79.69162
0.17000	0.17000	0.00500	0.02890	0.00014	1214462.33012	337.35065	69914.33012	19.42065	96210.38532	26.72511	1.37612	310.62554	89.57861	80.11364
0.18000	0.18000	0.00500	0.03240	0.00016	1222781.88560	339.66163	78233.88560	21.73163	108004.88409	30.00136	1.38054	309.66027	90.01539	80.48453
0.19000	0.19000	0.00500	0.03610	0.00018	1231568.71268	342.10242	87020.71268	24.17242	120481.14579	33.46698	1.38451	308.63544	90.40186	80.81288
0.20000	0.20000	0.00500	0.04000	0.00020	1240822.81136	344.67300	96274.81136	26.74300	133639.17042	37.12199	1.38810	307.55101	90.74607	81.10549
0.21000	0.21000	0.00500	0.04410	0.00022	1250544.18164	347.37338	105996.18164	29.44338	147478.95799	40.96638	1.39136	306.40700	91.05448	81.36780
0.22000	0.22000	0.00500	0.04840	0.00024	1260732.82352	350.20356	116184.82352	32.27356	162000.50850	45.00014	1.39433	305.20342	91.33230	81.60421
0.23000	0.23000	0.00500	0.05290	0.00026	1271388.73700	353.16354	126840.73700	35.23354	177203.82194	49.22328	1.39706	303.94026	91.58380	81.81834
0.24000	0.24000	0.00500	0.05760	0.00029	1282511.92208	356.25331	137963.92208	38.32331	193088.89831	53.63581	1.39956	302.61750	91.81249	82.01314
0.25000	0.25000	0.00500	0.06250	0.00031	1294102.37876	359.47288	149554.37876	41.54288	209655.73762	58.23770	1.40187	301.23518	92.02131	82.19108
0.26000	0.26000	0.00500	0.06760	0.00034	1306160.10704	362.82225	161612.10704	44.89225	226904.33986	63.02898	1.40401	299.79327	92.21269	82.35424
0.27000	0.27000	0.00500	0.07290	0.00036	1318685.10692	366.30142	174137.10692	48.37142	244834.70504	68.00964	1.40599	298.29178	92.38870	82.50437
0.28000	0.28000	0.00500	0.07840	0.00039	1331677.37840	369.91038	187129.37840	51.98038	263446.83315	73.17968	1.40783	296.73070	92.55111	82.64294
0.29000	0.29000	0.00500	0.08410	0.00042	1345136.92148	373.64914	200588.92148	55.71914	282740.72420	78.53909	1.40955	295.11005	92.70141	82.77124
0.29000	0.29000	0.00500	0.08410	0.00042	1345136.92148	373.64914	200588.92148	55.71914	282740.72420	78.53909	1.40955	295.11005	92.70141	82.77124
0.29000	0.29000	0.00600	0.08410	0.00050	1370503.05024	380.69529	225955.05024	62.76529	353425.90525	98.17386	1.56414	282.52143	108.30519	93.61272
0.29000	0.29000	0.00700	0.08410	0.00059	1395869.17900	387.74144	251321.17900	69.81144	424111.08630	117.80864	1.68753	269.93280	121.28026	101.21796
0.29000	0.29000	0.00800	0.08410	0.00067	1421235.30778	394.78759	276687.30778	76.85759	494796.26735	137.44341	1.78829	257.34418	131.79539	105.86779
0.29000	0.29000	0.00900	0.08410	0.00076	1446601.43654	401.83373	302053.43654	83.90373	565481.44840	157.07818	1.87212	244.75555	140.00425	107.81148
0.29000	0.29000	0.01000	0.08410	0.00084	1471967.56532	408.87988	327419.56532	90.94988	636166.62945	176.71295	1.94297	232.16693	146.04655	107.27103
0.29000	0.29000	0.01100	0.08410	0.00093	1497333.69408	415.92603	352785.69408	97.99603	706851.81050	196.34773	2.00363	219.57830	150.04890	104.44478
0.29000	0.29000	0.01200	0.08410	0.00101	1522699.82284	422.97217	378151.82284	105.04217	777536.99155	215.98250	2.05615	206.98967	152.12498	99.51053
0.29000	0.29000	0.01300	0.08410	0.00109	1548065.95162	430.01832	403517.95162	112.08832	848222.17260	235.61727	2.10207	194.40105	152.37497	92.62809
0.29000	0.29000	0.01400	0.08410	0.00118	1573432.08038	437.06447	428884.08038	119.13447	918907.35365	255.25204	2.14255	181.81243	150.88304	83.94153
0.29000	0.29000	0.01500	0.08410	0.00126	1598798.20916	444.11061	454250.20916	126.18061	989592.53470	274.88682	2.17852	169.22379	147.71098	73.58105

Abbildung 87: Ergebnisse der zeitabhängigen Analyse der Wärmebrücke und des Kosten / Nutzen Faktors; Starthöhe 5 mm

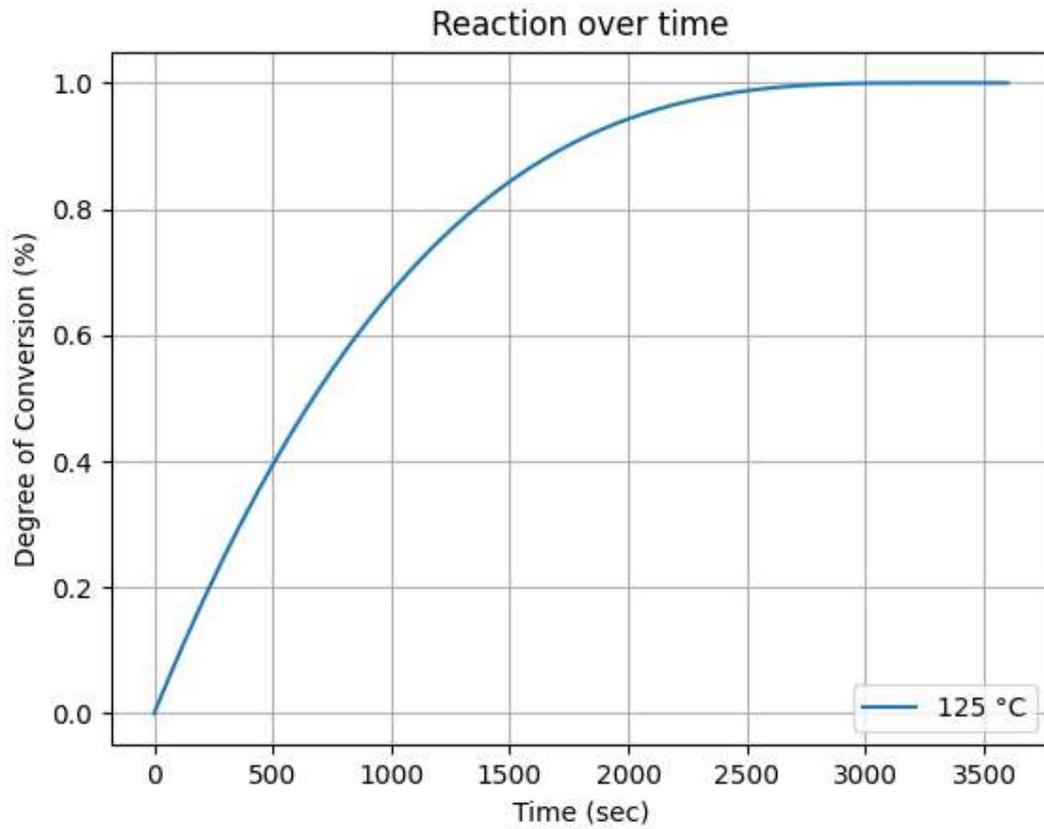


Abbildung 88: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Umsatzrate (Grafik 125 °C)

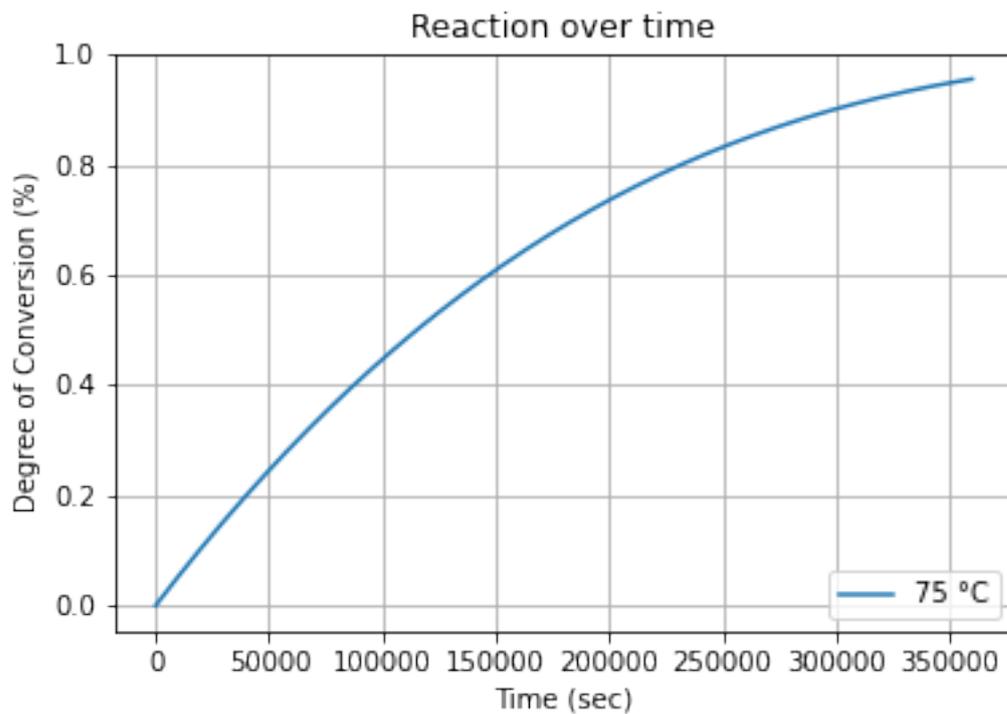


Abbildung 89: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Umsatzrate (Grafik 75 °C)

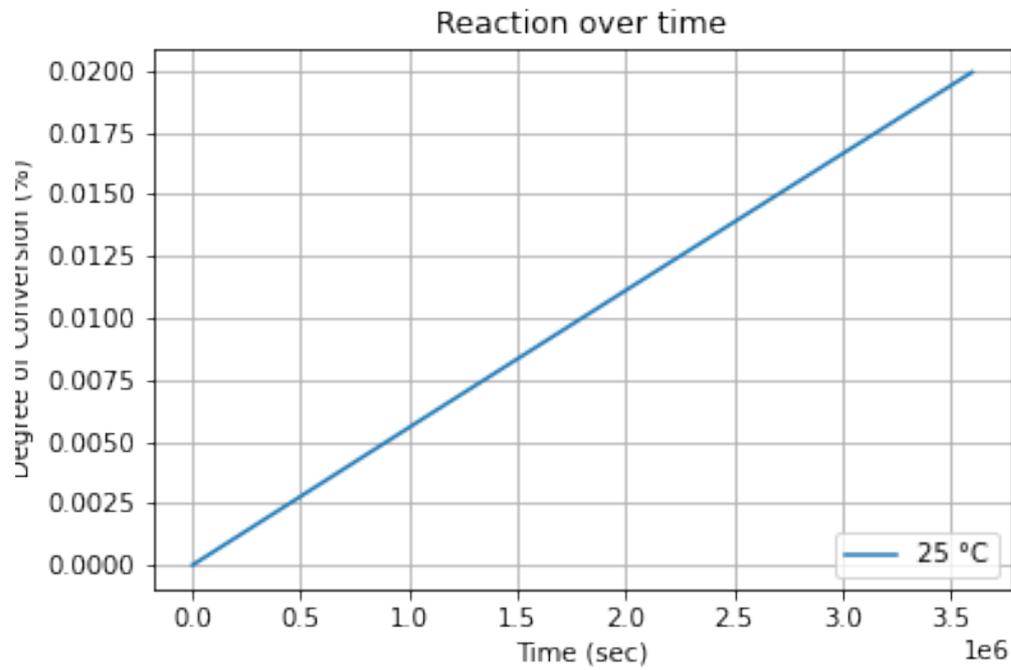


Abbildung 90: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Umsatzrate (Grafik 25 °C)

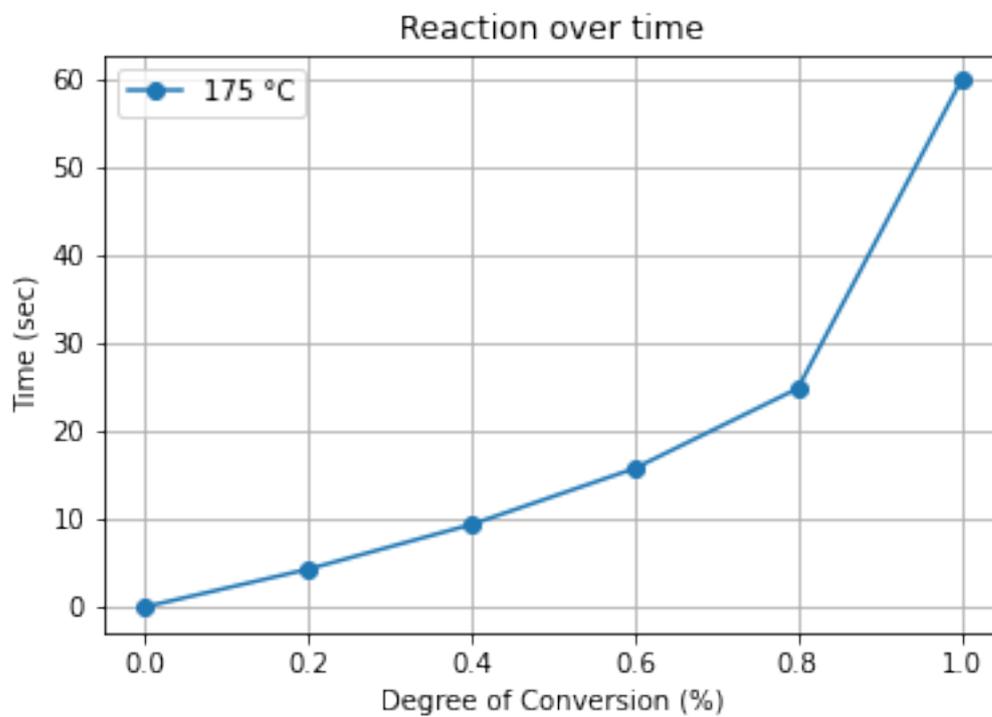


Abbildung 91: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der benötigten Zeit (Grafik 175 °C)

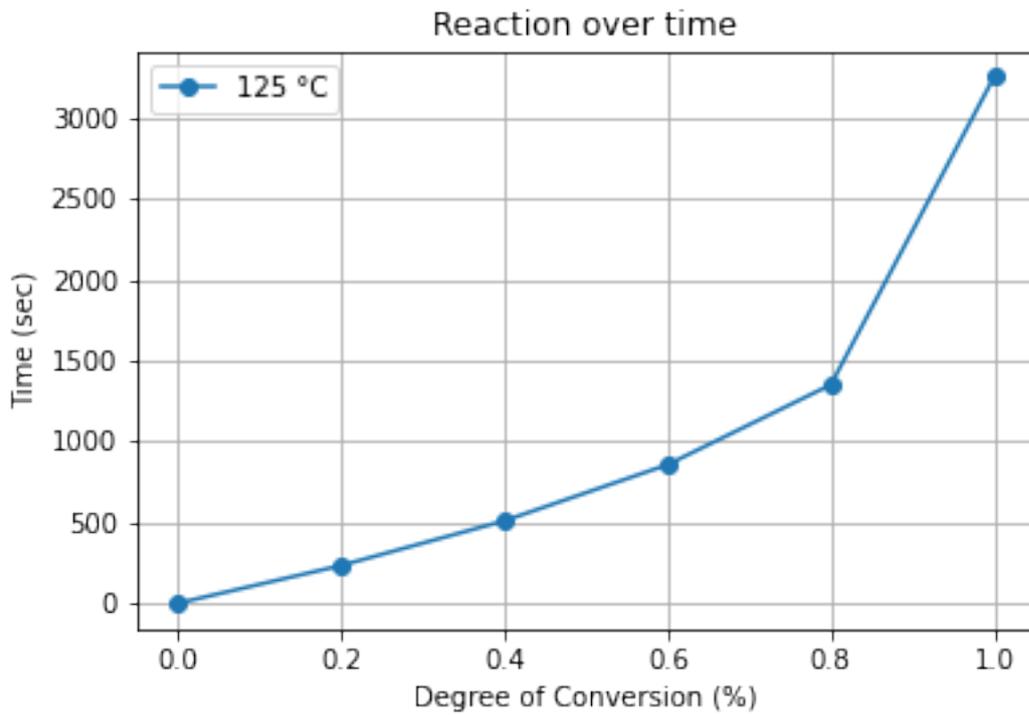


Abbildung 92: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der benötigten Zeit (Grafik 125 °C)

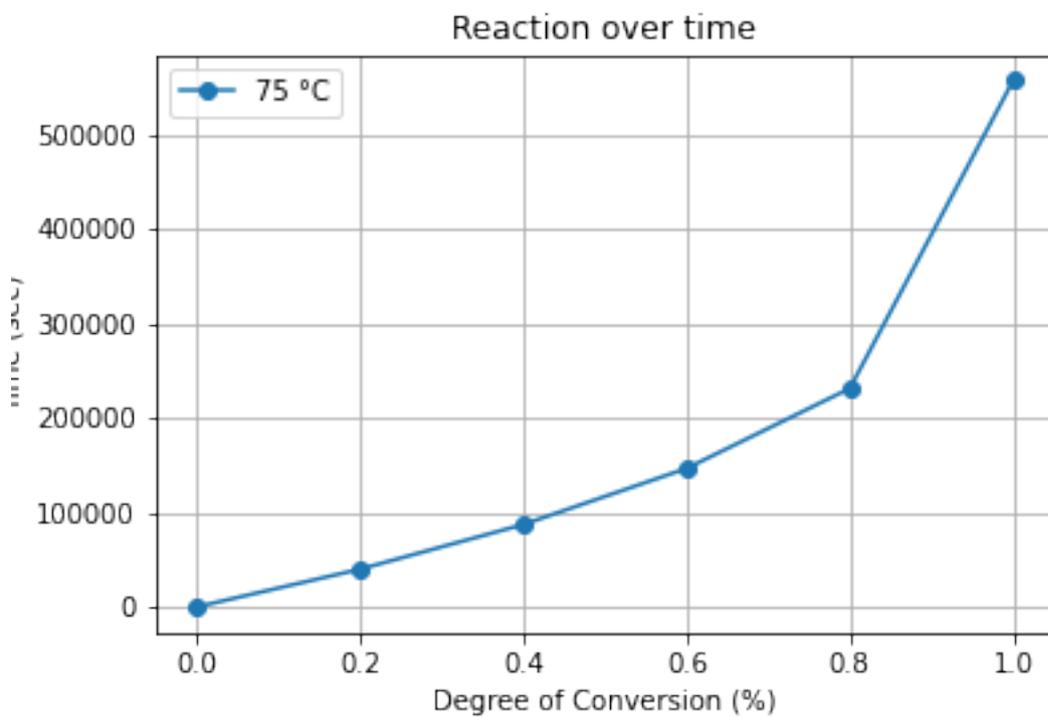


Abbildung 93: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der benötigten Zeit (Grafik 75 °C)

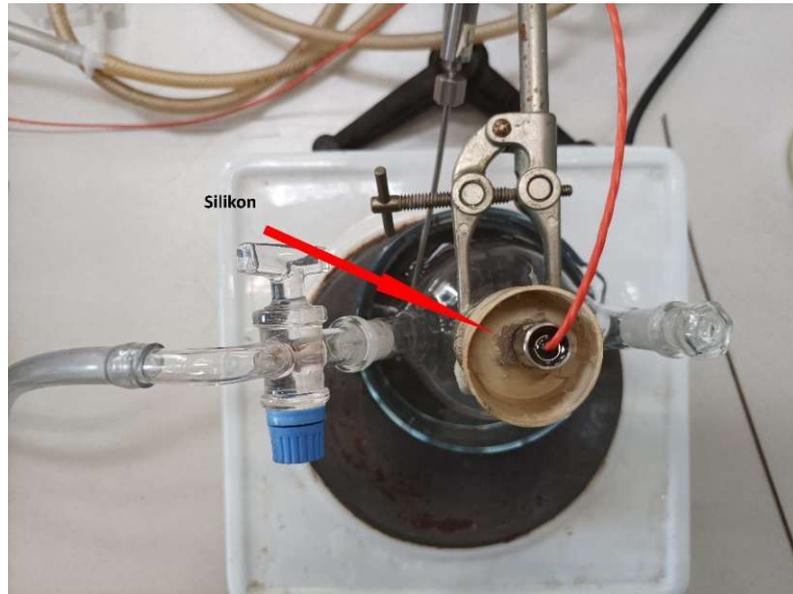


Abbildung 94: Nahaufnahme der Dichtung des Temperatursensors T_3

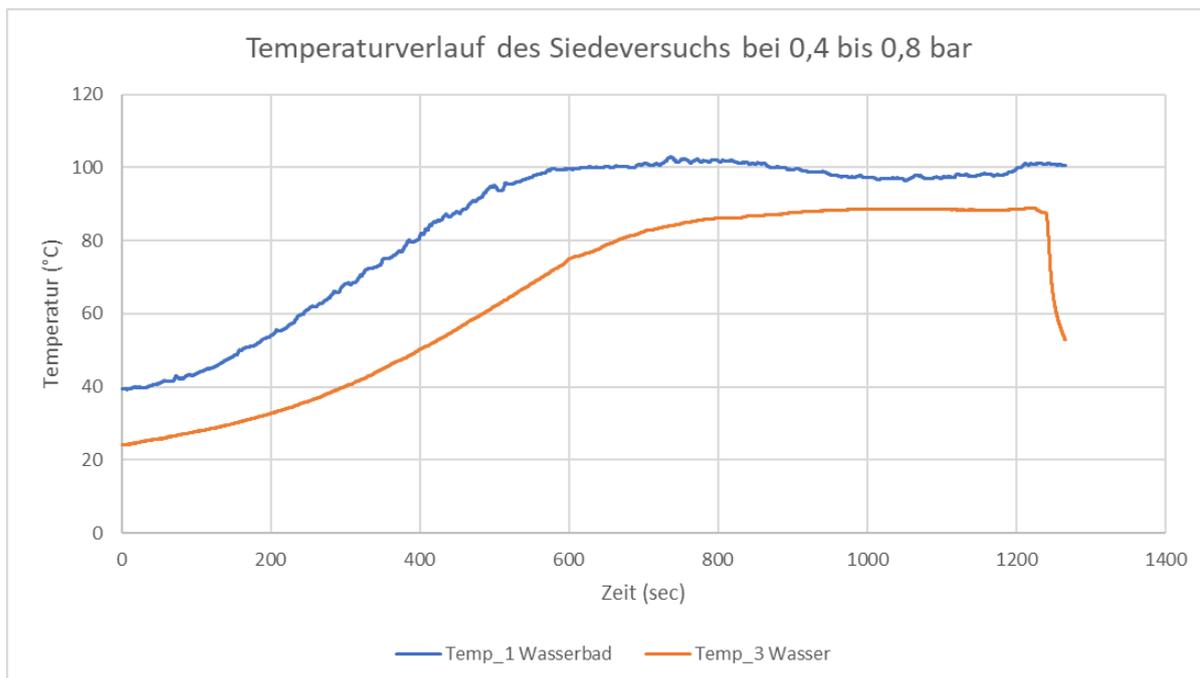


Abbildung 95: Temperaturverlauf aufgetragen über die Zeit, erster Durchlauf

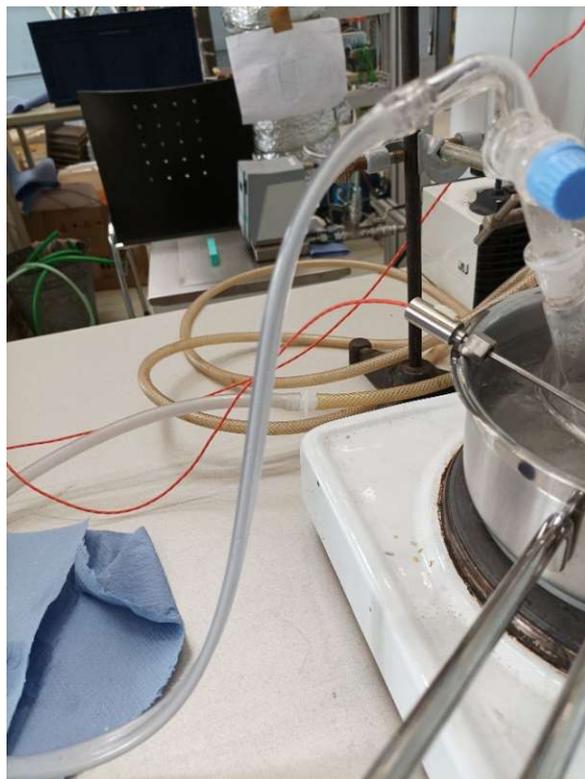


Abbildung 96: Durch die Belastung verformter Schlauch



Abbildung 97: Kondensatbildung am Ausgang des Dehydrationskolben

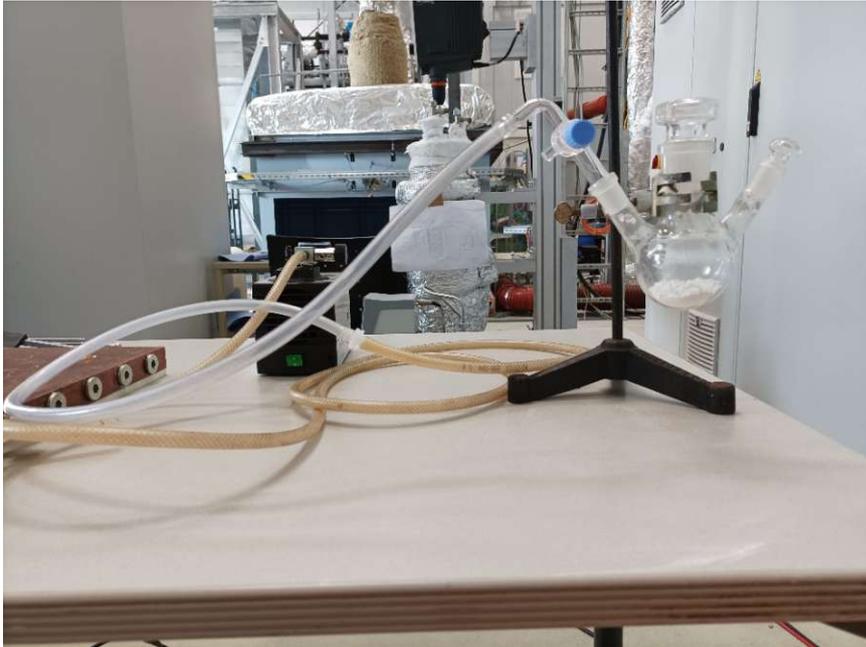


Abbildung 98: Kalziumoxalat in Rundkolben (Versuch 3)



Abbildung 99: Kalziumoxalat in Rundkolben und Wasserbad (Versuch 3)



Abbildung 100: Position der Temperaturfühler der Temperaturmessung des Versuchstandes

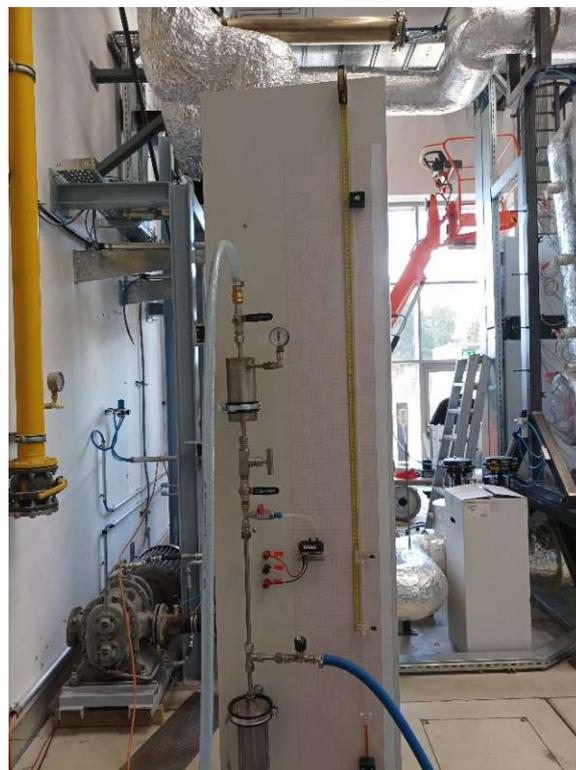


Abbildung 101: Zusätzliche Druckmessung mit Hilfe des hydrostatischen Druckes

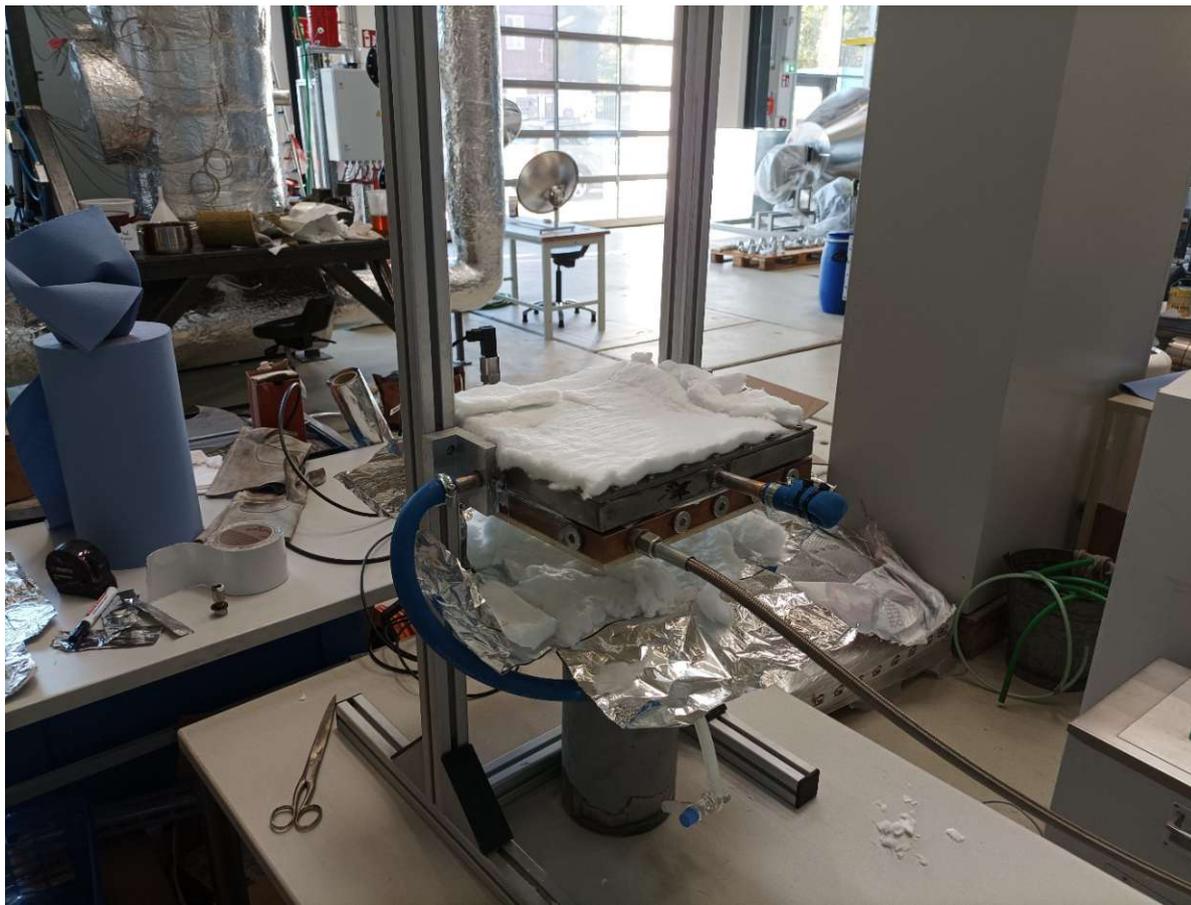


Abbildung 102: Zusätzliche Schicht Glaswolle zur Isolation

Nomenklatur

Mathematische Symbole - Latein

Symbol	Einheit	Definition
\dot{Q}	J/s	Wärmestrom
V_l	l	Volumen des Garraums des Haushaltsbackofens in Litern (l), auf die nächste ganze Zahl gerundet
A	m ²	Fläche
b	m	Breite
c	J/kgK	Spezifische Wärmekapazität
d	m	Distanz
E	J/mol	Spezifische Energie
g^0	J/mol	Standard Gibbs-Energie
h^0	J/mol	Standardenthalpie
I	A	Stromstärke
k_0	1/sec	Preexponentieller Faktor
l	m	Länge
m	kg	Masse
n	-	Anzahl Elektronen
p	Bar	Druck
Q	J	Wärme
r	Ω	Elektrischer Widerstand
s^0	J/molK	Standardentropie
T	°C	Temperatur
t	m	Tiefe
t	s	Zeit
V	V	Spannung
V	m ³	Volumen
x	-	Verhältniszahl
y	-	Verhältniszahl
EEI_{cavity}	%	Energieeffizienzindex jedes Garraums eines Haushaltsbackofens in %, auf die erste Dezimalstelle gerundet
$SEC_{electric\ cavity}$	kwh	Standardenergieverbrauch (Strom), der erforderlich ist, um eine standardisierte Prüfbeladung in einem Garraum eines elektrischen Haushaltsbackofens in einem Zyklus zu erhitzen, auf die zweite Dezimalstelle gerundet

Mathematische Symbole - Griechisch

Symbol	Einheit	Definition
α		Empirische Konstante
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
τ	-	Quotient
η	-	Wirkungsgrad
ρ	kg/m ³	Dichte
Δ	-	Differenz
ν	-	Stöchiometrischer Koeffizient

Mathematische Symbole - Indizes

Symbol	Einheit	Definition
0		Standardbedingungen
1,2		Zustände
c		Kritischer Punkt
chem		chemisch
e		elektrisch
eq		Equilibrium
g		Gas
i		Allgemeiner Indize
ion		Ionen
l		Liquid
m		mittel
max		Maximal
p		Bezogen auf den Druck
s		Solid
sp		Speicher
th		thermisch

Physikalische Größen

Symbol	Einheit	Definition
R	J/molK	Allgemeine Gaskonstante
F	C/mol	Faradaykonstante

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Berechnungsvorschriften zur Bestimmung ausgewählter Batteriecharakteristika (Elektrisch / Thermisch).....	11
Tabelle 2: Variablen zur Bestimmung der Umsatzrate	25
Tabelle 3: Standardenthalpien und Standardentropien von Kalziumoxalat.....	31
Tabelle 4: Konstanten zur Bestimmung der Dampfdruckkurve von Wasser	32
Tabelle 5: Materialkonstanten des TCS-Moduls	34
Tabelle 6: Kosten / Nutzen-Faktor in Abhängigkeit der Höhe des Speichers (Auszug)	36
Tabelle 7: Wärmeleitfähigkeiten des TCS-Moduls.....	40
Tabelle 8: Siedetemperatur von Wasser bei verschiedenen Druckniveaus lt. (WDT).....	55
Tabelle 9: Beobachtete Temperaturen beim Sieden	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der verschiedenen Technologiereifegrade [2, S. 10].....	1
Abbildung 2: Schematische Zeichnung eines Backrohrs mit angeschlossenem thermochemischem Speicher [1]	2
Abbildung 3: Energielabel von Haushaltsbacköfen [12, S. 1]	4
Abbildung 4: Effizienzklassen von Haushaltsbacköfen nach Energieeffizienzindex [13, S. 6].....	4
Abbildung 5: Marktentwicklung von Elektroherden / Backöfen nach Energieeffizienz-klasse 2014 bis 2019 (Marktanteile in %) [15, S. 19].....	5
Abbildung 6: Verbrauchte Energie (als CO ₂ -Äquivalent) über die Lebenszeit (19 Jahre) von versch. Backöfen (Konventionell: 0,69 kWh/Backvorgang; HEO1: 0,63 kWh/Backvorgang;.....	6
Abbildung 7: Exemplarische Explosionszeichnung eines Backofens [17, S. 908]	7
Abbildung 8: Darstellung der aktuellen Technologien zur Speicherung von Wärme [18, S. 582].....	8
Abbildung 9: Allgemeiner Sorptionsprozess	9
Abbildung 10: Übersicht über Energiedichten verschiedener Energiespeichertechnologien [20, S. 109]	9
Abbildung 11: Vergleich von einer Batterie zum Speichern von elektrischer Energie mit einer Batterie zum Speichern von Wärme [23, S. 797]	10
Abbildung 12: Methodik zur Entwicklung eines TCS [24, S. 6].....	11
Abbildung 13: Vor- und Nachteile eines offenen bzw. geschlossenen TCS-Systems [24]	12
Abbildung 14: Vor- und Nachteile von verschiedenen Bewegungsarten des Sorptivs [24].....	13
Abbildung 15: Schematische Zeichnung eines Backrohrs mit angeschlossenem thermochemischem Speicher [27]	14
Abbildung 16: Einfache CAD-Abbildung des Backofens (Bosch AV2 EOX 6021) mit räumlichen Abmessungen	17
Abbildung 17: Darstellung des TCS-Moduls (rechte Seite)	18
Abbildung 18: Darstellung der thermischen Widerstände eines Speichers	23

Abbildung 19: Flussdiagramm der dynamischen Systembeschreibung	27
Abbildung 20: Exemplarische Darstellung des "Wörterbuchs" Wärmedämmung der statischen Berechnung	28
Abbildung 21: Programmcode zur Bestimmung aller abhängigen Variablen in Bezug auf das äußere Volumen eines Speichers	29
Abbildung 22: Auszug aus den Ergebnissen der geometrischen Funktionen	30
Abbildung 23: Gleichgewichtskurve zwischen Hydratisierung und Dehydratisierung von Kalziumoxalat (logarithmische y-Achsen Skalierung)	31
Abbildung 24: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser, Gleichgewichtskurve von Kalziumoxalat und die idealisierten Zustände	33
Abbildung 25: Ausgabe der Funktion storedenergy	34
Abbildung 26: Darstellung der Funktion "storedenergy"	35
Abbildung 27: Kosten / Nutzen-Funktion über das Volumen des Speichers	36
Abbildung 28: Darstellung der verlorenen Energiemenge über das Speichervolumen	37
Abbildung 29: Thermische Größen eines Speichers mit optimaler Höhe	38
Abbildung 30: Darstellung der Funktion „heatloss“ zur Bestimmung der Wärmeverluste Teil 1	39
Abbildung 31: Darstellung der Funktion „heatloss“ zur Bestimmung der Wärmeverluste Teil 2	41
Abbildung 32: Darstellung der Wärmeverluste über das Speichervolumen	42
Abbildung 33: Kosten / Nutzen-Funktion in Bezug auf den Wärmeverluststrom über das Volumen des Speichers	43
Abbildung 34: Darstellung der Funktionen kinetics_t und kinetics_x für die Bestimmung des Reaktionsverlaufs.....	44
Abbildung 35: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Umsatzrate (Grafik 175 °C)	45
Abbildung 36: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Zeit (Grafik 25 °C).....	45
Abbildung 37: Programmcode der zeitabhängigen Simulation.....	46
Abbildung 38: Darstellung der Funktion „kinetics_to_Q“ und „Q_to_Temp“	47
Abbildung 39: Darstellung des zeitabhängigen Ladevorgangs.....	48
Abbildung 40: Darstellung der Wärmeverlustrate und der Speicherrate	49
Abbildung 41: Bestimmung der Gleichgewichtstemperatur	50
Abbildung 42: Entladevorgang der Batterie (Rate der abgegebenen Wärme).....	51
Abbildung 43: Entladevorgang der Batterie (aufsummierte Werte)	51
Abbildung 44: Aufbau Versuch 1 (Einfluss Evakuierung auf Kalziumoxalat).....	53
Abbildung 45: Versuchsaufbau Versuch 2 Siedetemperatur von Wasser bei Unterdruck	54
Abbildung 46: Siedepunkt des Wassers bei 0,8 bar (93 °C).....	56
Abbildung 47: Versuchsaufbau erweitert um ein Kondensatgefäß im Eisbad.....	57
Abbildung 48: Temperaturverlauf des Siedeversuchs mit Kondensation bei 0,4 bar	58
Abbildung 49: Temperaturverlauf von Kalziumoxalat bei 100 °C und 0,4 bar	59
Abbildung 50: Modifizierter Versuchsaufbau (Oxalat in Thermoölbad)	60
Abbildung 51: Versuchstand (offen).....	61

Abbildung 52: Messeinrichtungen des Versuchstandes	62
Abbildung 53: Versuchstand zur besseren Wärmedämmung mit Steinwolle ummantelt	63
Abbildung 54: Nutzen eines TCS in Bezug auf sein Volumen über die Variation der Speicherhöhe... 64	64
Abbildung 55: Darstellung des Kosten-Nutzen-Faktors über den Füllstand des Speichers	64
Abbildung 56: Darstellung des Einflusses einer Wärmebrücke über der Variation der Speicherhöhe. 65	65
Abbildung 57: Darstellung des Einflusses einer Wärmebrücke über den Füllstand des Speichers	65
Abbildung 58: Entladen des Speichers bei 130 °C (Rate der Entladung)	66
Abbildung 59: Entladen des Speichers bei 130 °C (aufsummierte Werte)	66
Abbildung 60: Entladen des Speichers bei 150 °C (Rate der Entladung)	66
Abbildung 61: Entladen des Speichers bei 150 °C (aufsummierte Werte)	66
Abbildung 62: Überblick über die verschiedenen Prozesse von Energiespeicherung mit Hilfe von Sorption [21, S. 492]	68
Abbildung 63: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (1)	69
Abbildung 64: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (2)	70
Abbildung 65: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (3)	71
Abbildung 66: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (4)	72
Abbildung 67: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (5)	73
Abbildung 68: Zusammenhang von Temperatur und Druck in Bezug auf den De- bzw. Hydrationsvorgang von Kalziumoxalat (6)	74
Abbildung 69: Gleichgewichtskurve zwischen Hydratisierung und Dehydratisierung von Kalziumoxalat	74
Abbildung 70: Randbedingungen zur Bestimmung des Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser	75
Abbildung 71: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 1	76
Abbildung 72: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 2	77
Abbildung 73: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 3	78
Abbildung 74: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 4	79
Abbildung 75: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 5	80
Abbildung 76: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser 6	81
Abbildung 77: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser (lineare y-Asche)	81
Abbildung 78: Sättigungsdampfdruckkurve von Wasser (logarithmische y-Asche)	82
Abbildung 79: Von BSH zur Verfügung gestellt Informationen in Bezug auf Abmessungen, thermische Masse und Verlustwärmestrom eines Backofens	83
Abbildung 80: Darstellung des "Wörterbuchs" Backofen der statischen Berechnung	83
Abbildung 81: Darstellung des "Wörterbuchs" Container der statischen Berechnung	84

Abbildung 82: Darstellung des "Wörterbuchs" Salz der statischen Berechnung	84
Abbildung 83: Darstellung des "Wörterbuchs" Hohlraum der statischen Berechnung	85
Abbildung 84: Ausgabe der abhängigen Variablen am Beispiel Volumen Ofen (302 x 302 x 10) in mm	85
Abbildung 85: Ergebnisse der Kosten/Nutzen Analyse (statisch); Starthöhe 5 mm	86
Abbildung 86: Ergebnisse der Kosten/Nutzen Analyse (statisch); Starthöhe 10 mm	87
Abbildung 87: Ergebnisse der zeitabhängigen Analyse der Wärmebrücke und des Kosten / Nutzen Faktors; Starthöhe 5 mm.....	88
Abbildung 88: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Umsatzrate (Grafik 125 °C)	89
Abbildung 89: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Umsatzrate (Grafik 75 °C)	89
Abbildung 90: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der Umsatzrate (Grafik 25 °C)	90
Abbildung 91: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der benötigten Zeit (Grafik 175 °C).....	90
Abbildung 92: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der benötigten Zeit (Grafik 125 °C).....	91
Abbildung 93: Parametervariation der Reaktionskinetik nach der benötigten Zeit (Grafik 75 °C).....	91
Abbildung 94: Nahaufnahme der Dichtung des Temperatursensors T_3	92
Abbildung 95: Temperaturverlauf aufgetragen über die Zeit, erster Durchlauf	92
Abbildung 96: Durch die Belastung verformter Schlauch	93
Abbildung 97: Kondensatbildung am Ausgang des Dehydrationskolben	93
Abbildung 98: Kalziumoxalat in Rundkolben (Versuch 3).....	94
Abbildung 99: Kalziumoxalat in Rundkolben und Wasserbad (Versuch 3)	94
Abbildung 100: Position der Temperaturfühler der Temperaturmessung des Versuchstandes	95
Abbildung 101: Zusätzliche Druckmessung mit Hilfe des hydrostatischen Druckes	95
Abbildung 102: Zusätzliche Schicht Glaswolle zur Isolation.....	96

Sonstige Anhänge (Programmcode)

Wörterbücher

```

c_oven = {
    "Material": ["Steel", "--"],
    "width": [0.48, "m"],
    "height": [0.38, "m"],
    "depth": [0.44, "m"],
    "Stored-Energy (J)": [1086156, "J"],
    "Stored-Energy (Wh)": [301,71, "Wh" ] }

c_iso = {
    "Material": ["Glass-Wool", "--"],
    "width": [0.48, "m"],
    "height": [0.38, "m"],
    "depth": [0.44, "m"],
    "area_side": [0.1672, "m^2"],
    "area_tb": [0.2112, "m^2"],
    "area_back": [0.1824, "m^2"],
    "thickness": [0.02, "m"],
    "volume_0": [0.018784, "m^3"],
    "volume": [0, "m^3"],
    "density": [40, "kg/m^3"],
    #800 g/m^3 auf 20 mm Dicke werden zu 0,8 kg/m^ /20*10^-3 m
    "mass": [0.75136, "kg"],
    "cp": [840, "J/(kg*K)"],
    "conductivity": [0.0493, "W/(m*K)"] }

c_cont = {
    "Material": ["Steel", "--"],
    "width": [0, "m"],
    "height": [0, "m"],
    "depth": [0, "m"],
    "thickness": [0, "m"],
    "area" : [0, "m^2"],
    "volume": [0, "m^3"],
    "density": [0, "kg/m^3"],
    "mass": [0, "kg"],
    "cp": [0, "J/(kg*K)"],
    "conductivity": [0, "W/(m*K)"] }

c_salt = {
    "Material": ["CaC2O4", "--"],

```

```

    "width": [0, "m"],
    "height": [0, "m"],
    "depth": [0, "m"],
    "area" : [0, "m^2"],
    "volume": [0, "m^3"] ,
    "density": [0, "kg/m^3"],
    "mass": [0, "kg"],
    "mass_hy": [0, "kg"],
    "mass_dehy": [0, "kg"],
    "cp": [0, "J/(kg*K)"],
    "conductivity": [0, "W/(m*K)"],
    "Energy-Density": [0, "J/kg"],
    "Chemical-Energy (J)": [0, "J"],
    "Chemical-Energy (Wh)": [0, "Wh"]}
c_cavity = {
    "Material": ["Air", "--"],
    "width": [0, "m"],
    "height": [0, "m"],
    "depth": [0, "m"],
    "area" : [0, "m^2"],
    "volume": [0, "m^3"] ,
    "density": [0, "kg/m^3"],
    "mass": [0, "kg"],
    "cp": [0, "J/(kg*K)"],
    "conductivity": [0, "W/(m*K)"], }

```

Geometrische Funktionen

```
def fc_volume_container(height, depth, width, thickness):
```

```
    # Annahmen:
```

```
    # 1.) Dichte Oxalat = 1 g/cm^3
```

```
    c_salt["density"] = [1000, "kg/m^3"]
```

```
    # 2.) V-Oxalat / V-Container-Hohlraum (gesamt; innen) = 9
```

```
    # 3.) Dicke Container = 2mm
```

```
    c_cont["thickness"] = [thickness, "m"]
```

```
    # 4.) Kein Deckel direkter Kontakt von Oxalat und Backofenwand "width"
    wird nur einmal um thickness container erhöht
```

```

c_cont["height"] = [height, 'm']
c_cont["depth"] = [depth, 'm']
c_cont["width"] = [width, 'm']
c_cont['area'] = [c_cont["height"][0] * c_cont["depth"][0], 'm^2']
c_cont['volume'] = [c_cont["height"][0] * c_cont["depth"][0] *
c_cont["width"][0], 'm^3']
c_cont["density"] = [7900, "kg/m^3"]

# Das es sich um einen Hohlkörper handelt muss für die Massenberechnung
das Volumen entsprechend verkleinert werden
# c_cont['mass'] = [c_cont['volume'][0] * c_cont['density'][0], 'kg']
# bzw. muss in den anderen Rechnungen beachtet werden

c_cont["cp"] = [500, 'J/(kg*K)']
c_cont["conductivity"] = [40, 'W/(m*K)']

c_salt["height"] = [c_cont["height"][0] - 2*c_cont["thickness"][0], "m"]
c_salt["depth"] = [c_cont["depth"][0] - 2*c_cont["thickness"][0], "m"]
c_salt["width"] = [(c_cont["width"][0] - c_cont['thickness'][0]) * 0.9,
"m"]
c_salt['area'] = [c_salt["height"][0]*c_salt["depth"][0], 'm^2']
c_salt['volume'] =
[c_salt["height"][0]*c_salt["depth"][0]*c_salt["width"][0], 'm^3']
#c_salt['density'] siehe Annahmen

c_salt['mass'] = [c_salt['density'][0] * c_salt['volume'][0], 'kg']
#c_salt['mass_hy'] = [c_salt['mass'][0], 'kg']
#c_salt['mass_dehy'] = [0, 'kg']
c_salt["cp"] = [1094.85, "J/(kg*K)"]
c_salt["conductivity"] = [0.415, "W/(m*K)"]
c_salt["Energy-Density"] = [473446.4823, "J/kg"]
c_salt['Chemical-Energy (J)'] = [c_salt['mass'][0] * c_salt['Energy-
Density'][0], 'J']
c_salt['Chemical-Energy (Wh)'] = [c_salt['Chemical-Energy (J)'][0] / 3600,
'Wh']

# Luft bei Normbedingungen Anpassungen in Bezug auf Druck etc über
Zustangsgleichungen und die Wasserbeladung werden noch hinzugefügt

```

```

c_cavity["height"] = c_salt["height"]
c_cavity["depth"] = c_salt["depth"]
c_cavity["width"] = [(c_cont["width"][0] - c_cont['thickness'][0]) *
0.1, 'm']
c_cavity['area'] = c_salt['area']
c_cavity["volume"] = [c_cavity["height"][0] * c_cavity["depth"][0] *
c_cavity["width"][0], 'm^3']
c_cavity["density"] = [1.2041, 'kg/m^3']
c_cavity['mass'] = [c_cavity["density"][0] * c_cavity["volume"][0], 'kg']
c_cavity["cp"] = [1005, 'J/(kg*K)']
c_cavity["conductivity"] = [0.0262, 'W/(m*K)']

c_cont['mass'] = [(c_cont['volume'][0] - (c_salt['volume'][0] +
c_cavity['volume'][0])) * c_cont['density'][0], 'kg']

c_iso["volume"] = [c_iso['volume_0'][0] - 2* c_cont["volume"][0], 'm^3']
c_iso['mass'] = [c_iso["volume"][0] * c_iso["density"][0], 'kg']

return c_salt, c_cont, c_cavity

```

```
def fc_volume_container_2(height, depth, width, thickness, x, y):
```

```
# Annahmen:
```

```
# 1.) Dichte Oxalat = 1 g/cm^3
```

```
c_salt["density"] = [1000, "kg/m^3"]
```

```
# 3.) Dicke Container = 1mm
```

```
c_cont["thickness"] = [thickness, "m"]
```

```
# 4.) Kein Deckel direkter Kontakt von Oxalat und Backofenwand "width"
wird nur einmal um thickness container erhöht
```

```
c_cont["height"] = [height, 'm']
```

```
c_cont["depth"] = [depth, 'm']
```

```
c_cont["width"] = [width, 'm']
```

```
c_cont['area'] = [c_cont["height"][0] * c_cont["depth"][0], 'm^2']
```

```
c_cont['volume'] = [c_cont["height"][0] * c_cont["depth"][0] *
```

```
c_cont["width"][0], 'm^3']
```

```

c_cont["density"] = [7900, "kg/m^3"]

# Das es sich um einen Hohlkörper handelt muss für die Massenberechnung
das Volumen entsprechend verkleinert werden
# c_cont['mass'] = [c_cont['volume'][0] * c_cont['density'][0], 'kg']
# bzw. muss in den anderen Rechnungen beachtet werden

c_cont["cp"] = [500, 'J/(kg*K)']
c_cont["conductivity"] = [40, 'W/(m*K)']

c_salt["height"] = [c_cont["height"][0] - 2*c_cont["thickness"][0], "m"]
c_salt["depth"] = [c_cont["depth"][0] - 2*c_cont["thickness"][0], "m"]
c_salt["width"] = [(c_cont["width"][0] - c_cont['thickness'][0]) * x, "m"]
c_salt['area'] = [c_salt["height"][0]*c_salt["depth"][0], 'm^2']
c_salt['volume'] =
[c_salt["height"][0]*c_salt["depth"][0]*c_salt["width"][0], 'm^3']
#c_salt['density'] siehe Annahmen

c_salt['mass'] = [c_salt['density'][0] * c_salt['volume'][0], 'kg']
#c_salt['mass_hy'] = [c_salt['mass'][0], 'kg']
#c_salt['mass_dehy'] = [0, 'kg']
c_salt["cp"] = [1094.85, "J/(kg*K)"]
c_salt["conductivity"] = [0.415, "W/(m*K)"]
c_salt["Energy-Density"] = [473446.4823, "J/kg"]
c_salt['Chemical-Energy (J)'] = [c_salt['mass'][0] * c_salt['Energy-
Density'][0], 'J']
c_salt['Chemical-Energy (Wh)'] = [c_salt['Chemical-Energy (J)'][0] / 3600,
'Wh']

# Luft bei Normbedingungen Anpassungen in Bezug auf Druck etc über
Zustangsgleichungen und die Wasserbeladung werden noch hinzugefügt
c_cavity["height"] = c_salt["height"]
c_cavity["depth"] = c_salt["depth"]
c_cavity["width"] = [(c_cont["width"][0] - c_cont['thickness'][0]) *
y, 'm']
c_cavity['area'] = c_salt['area']
c_cavity["volume"] = [c_cavity["height"][0] * c_cavity["depth"][0] *
c_cavity["width"][0], 'm^3']
c_cavity ["density"] = [1.2041, 'kg/m^3']

```

```

c_cavity['mass'] = [c_cavity["density"][0] * c_cavity["volume"][0], 'kg']
c_cavity["cp"] = [1005, 'J/(kg*K)']
c_cavity["conductivity"] = [0.0262, 'W/(m*K)']

```

```

c_cont['mass'] = [(c_cont['volume'][0] - (c_salt['volume'][0] +
c_cavity['volume'][0])) * c_cont['density'][0], 'kg']

```

```

c_iso["volume"] = [c_iso['volume_0'][0] - 2* c_cont["volume"][0], 'm^3']
c_iso['mass'] = [c_iso["volume"][0] * c_iso["density"][0], 'kg']

```

```

return c_salt, c_cont, c_cavity

```

```

def fc_volume_salt(height, depth, width, thickness):

```

```

    # Annahmen:

```

```

    # 1.) Dichte Oxalat = 1 g/cm^3

```

```

    c_salt["density"] = [1000, "kg/m^3"]

```

```

    # 2.) V-Oxalat / V-Container-Hohlraum (innen) = 9 -> aktuell über reinen
    Faktor in constant_container width

```

```

    # 3.) Dicke Container = 2mm

```

```

    c_cont["thickness"] = [thickness, "m"]

```

```

    # 4.) Kein Deckel direkter Kontakt "width" wird nur einmal um thickness
    container erhöht

```

```

    c_salt["height"] = [height, "m"]

```

```

    c_salt["depth"] = [depth, "m"]

```

```

    c_salt["width"] = [width, "m"]

```

```

    c_salt['area'] = [round(c_salt["height"][0] * c_salt["depth"][0],5),
    'm^2']

```

```

    c_salt['volume'] = [round(c_salt["height"][0] *

```

```

    c_salt["depth"][0]*c_salt["width"][0],5), 'm^3']

```

```

    #c_salt['density'] siehe Annahmen

```

```

    c_salt['mass'] = [round(c_salt['density'][0] *

```

```

    c_salt['volume'][0],5), 'kg']

```

```

    c_salt["cp"] = [1094.85, "J/(kg*K)"]

```

```

c_salt["conductivity"] = [0.415, "W/(m*K)"]
c_salt["Energy-Density"] = [473446.4823, "J/kg"]
c_salt['Chemical-Energy (J)'] = [round(c_salt['mass'][0] * c_salt['Energy-
Density'][0],5), 'J']
c_salt['Chemical-Energy (Wh)'] = [round(c_salt['Chemical-Energy (J)'][0] /
3600,5), 'Wh']

# Luft bei Normbedingungen Anpassungen in Bezug auf Druck etc über
Zustangsgleichungen und die Wasserbeladung werden noch hinzugefügt
c_cavity["height"] = c_salt["height"]
c_cavity["depth"] = c_salt["depth"]
c_cavity["width"] = [round(c_salt["width"][0] / 9,5), 'm']
c_cavity['area'] = c_salt['area']
c_cavity["volume"] = [round(c_cavity["height"][0] * c_cavity["depth"][0] *
c_cavity["width"][0],5), 'm^3']
c_cavity ["density"] = [1.2041, 'kg/m^3']
c_cavity['mass'] = [round(c_cavity["density"][0] *
c_cavity["volume"][0],5), 'kg']
c_cavity["cp"] = [1005, 'J/(kg*K)']
c_cavity["conductivity"] = [0.0262, 'W/(m*K)']

c_cont["height"] = [round(c_salt["height"][0] + 2 *
c_cont["thickness"][0],5), "mm"]
c_cont["depth"] = [round(c_salt["depth"][0] + 2 *
c_cont["thickness"][0],5), "m"]
c_cont["width"] = [round(c_salt["width"][0] / 0.9 +
c_cont["thickness"][0],5), "m"]
c_cont['area'] = [round(c_cont["height"][0] * c_cont["depth"][0],5),
'm^2']
c_cont['volume'] = [round(c_cont["height"][0] * c_cont["depth"][0] *
c_cont["width"][0],5), 'm^3']
c_cont["density"] = [7900, "kg/m^3"]
c_cont['mass'] = [round((c_cont['volume'][0] - (c_salt['volume'][0] +
c_cavity['volume'][0])) * c_cont['density'][0],5), 'kg']
c_cont["cp"] = [500, 'J/(kg*K)']
c_cont["conductivity"] = [40, 'W/(m*K)']

c_iso["volume"] = [round(c_iso['volume_0'][0] - 2* c_cont["volume"][0],5),
'kg']

```

```
c_iso['mass'] = [round(c_iso["volume"][0] * c_iso["density"][0],5), 'kg']
```

```
return c_salt, c_cont, c_cavity
```

```
def fc_mass_salt(height, depth, thickness, mass):
```

```
    # Annahmen:
```

```
    # 1.) Dichte Oxalat = 1 g/cm3
```

```
    c_salt["density"] = [1000, "kg/m3"]
```

```
    # 2.) V-Oxalat / V-Container-Hohlraum (innen) = 9 -> aktuell über reinen
    Faktor in constant_container width
```

```
    # 3.) Dicke Container = 2mm
```

```
    c_cont["thickness"] = [thickness, "m"]
```

```
    # 4.) Kein Deckel direkter Kontakt "width" wird nur einmal um thickness
    container erhöht
```

```
    if mass == 0:
```

```
        height = 0
```

```
        depth = 0
```

```
        thickness = 0
```

```
    # Masse des Salzes wird auf beide Seiten gleichmäßig aufgeteilt
```

```
    c_salt['mass'] = [round(mass / 2,5), 'kg']
```

```
    #c_salt['mass_hy'] = [c_salt['mass'][0], 'kg']
```

```
    #c_salt['mass_dehy'] = [0, 'kg']
```

```
    c_salt["height"] = [height, "m"]
```

```
    c_salt["depth"] = [depth, "m"]
```

```
    c_salt['area'] = [round(c_salt["height"][0] * c_salt["depth"][0],5),
    'm2']
```

```
    #c_salt['density'] siehe Annahmen
```

```
    c_salt['volume'] = [round(c_salt["mass"][0] / c_salt["density"][0],5),
    'm3']
```

```
    #c_salt["width"] = [c_salt['volume'][0] / c_salt['area'][0], "m"]
```

```
    try:
```

```

    c_salt["width"] = [round(c_salt['volume'][0] / c_salt['area'][0],5),
    "m"]
except:
    c_salt["width"] = [0, "m"]

c_salt["cp"] = [1094.85, "J/(kg*K)"]
c_salt["conductivity"] = [0.415, "W/(m*K)"]
c_salt["Energy-Density"] = [473446.4823, "J/kg"]
c_salt['Chemical-Energy (J)'] = [round(c_salt['mass'][0] * c_salt['Energy-
Density'][0],5), 'J']
c_salt['Chemical-Energy (Wh)'] = [round(c_salt['Chemical-Energy (J)'][0] /
3600,5), 'Wh']

# Luft bei Normbedingungen Anpassungen in Bezug auf Druck etc über
Zustangsgleichungen und die Wasserbeladung werden noch hinzugefügt
c_cavity["height"] = c_salt["height"]
c_cavity["depth"] = c_salt["depth"]
c_cavity["width"] = [round(c_salt["width"][0] / 9,5), 'm']
c_cavity['area'] = c_salt['area']
c_cavity["volume"] =
[round(c_cavity["height"][0]*c_cavity["depth"][0]*c_cavity["width"][0],5),
'm^3']
c_cavity ["density"] = [1.2041, 'kg/m^3']
c_cavity['mass'] = [round(c_cavity["density"][0] *
c_cavity["volume"][0],5), 'kg']
c_cavity["cp"] = [1005, 'J/(kg*K)']
c_cavity["conductivity"]= [0.0262, 'W/(m*K)']

c_cont["height"] = [round(c_salt["height"][0] + 2 *
c_cont["thickness"][0],5), "mm"]
c_cont["depth"] = [round(c_salt["depth"][0] + 2 *
c_cont["thickness"][0],5), "m"]
c_cont["width"] = [round(c_salt["width"][0] / 0.9 +
c_cont["thickness"][0],5), "m"]
c_cont['area'] = [round(c_cont["height"][0] * c_cont["depth"][0],5),
'm^2']
c_cont['volume'] = [round(c_cont["height"][0] *

```

```

c_cont["depth"][0]*c_cont["width"][0],5), 'm^3']
c_cont["density"] = [7900, "kg/m^3"]
c_cont['mass'] = [round((c_cont['volume'][0] - (c_salt['volume'][0] +
c_cavity['volume'][0])) * c_cont['density'][0],5), 'kg']
c_cont["cp"] = [500, 'J/(kg*K)']
c_cont["conductivity"] = [40, 'W/(m*K)']

c_iso["volume"] = [round(c_iso['volume_0'][0] - 2* c_cont["volume"][0],5),
'kg']
c_iso['mass'] = [round(c_iso["volume"][0] *c_iso["density"][0],5), 'kg']

return c_salt, c_cont, c_cavity

```

Statische Funktionen

```

def storedenergy (oven, isolation, container, salt, t0, t1):
    # Berechnet die gespeicherte Energie im Gesamtsystem
    # Q = m*cp*dT

    # Infos für q_oven
    # 301.71Wh = 317.93 (Gesamte Speichermenge) - 16.22 (Isolation)
    # 101.3 Wh sind die Glasstür - Daten von BSH 301.71Wh * 3600 = 1086156 J
    # heating element haben ein dT = 400 - 25 statt 175 - 25

    q_oven = [oven["Stored-Energy (J)"][0], 'J']
    # BSH verwendet g/m^2 als Einheit der Dichte; wird dann auf 20mm
    reduziert;

    #v_iso = c_iso['volume'][0] - 2* c_cont["volume"][0]
    #m_iso = v_iso * c_iso["density"][0]

    #Bestimmung der Temperaturänderung aus Excel von BSH
    q_isolation = [round(isolation['mass'][0] * isolation["cp"][0] * ((t1 +
60) / 2 - t0),5), 'J']

    q_cont = [round(container['mass'][0] * container["cp"][0] * (t1-t0),5),
'J']

    q_salt = [round(salt['mass'][0] * salt["cp"][0] * (t1-t0),5), 'J']

```

```

#q_cavity = c_cavity['mass'][0] * c_cavity["cp"][0] * (t1-t0)

# 2x weil pro Seite ein Speicher ist

stored_J = [round(q_oven[0] + q_isolation[0] + ((q_cont[0] + q_salt[0]) *
2),5), 'J']

stored_Wh = [round(stored_J[0] / 3600,5), 'Wh']

return stored_J, stored_Wh, q_oven, q_isolation, q_cont, q_salt

def storedenergy2 (oven, isolation, container, salt, cavity, t0, t1):
# Berechnet die gespeicherte Energie im Gesamtsystem
# Q = m*cp*dT

# Infos für q_oven
# 301.71Wh = 317.93 (Gesamte Speichermenge) - 16.22 (Isolation)
# 101.3 Wh sind die Glasstür - Daten von BSH 301.71Wh * 3600 = 1086156 J
# heating element haben ein dT = 400 - 25 statt 175 - 25

q_oven = [oven["Stored-Energy (J)"][0], 'J']
# BSH verwendet g/m^2 als Einheit der Dichte; wird dann auf 20mm
reduziert;
# v_iso = c_iso['volume'][0] - 2* c_cont["volume"][0]
# m_iso = v_iso * c_iso["density"][0]

# Bestimmung der Temperaturänderung aus Excel von BSH
q_isolation = [round(isolation['mass'][0] * isolation["cp"][0] * ((t1 +
60) / 2 - t0),5), 'J']

q_cont = [round(container['mass'][0] * container["cp"][0] * (t1-t0),5),
'J']

q_salt = [round(salt['mass'][0] * salt["cp"][0] * (t1-t0),5), 'J']

q_cavity = [round(cavity['mass'][0] * cavity["cp"][0] * (t1-t0),5), 'J']

# 2x weil pro Seite ein Speicher ist

```

```

stored_J = [round(q_oven[0] + q_isolation[0] + ((q_cont[0] + q_salt[0] +
q_cavity[0]) * 2),5), 'J']

stored_Wh = [round(stored_J[0] / 3600,5), 'Wh']

return stored_J, stored_Wh, q_oven, q_isolation, q_cont, q_salt, q_cavity

```

```

def storedenergy3 (isolation, container, salt, cavity, t0, t1):
    # Berechnet die gespeicherte Energie im Gesamtsystem

    # !! Ändert im Gegensatz zu storedenergy die Berechnung der Wärme
    # !! in den "Heating Elements" vorher dT = 400 - t0
    # !! jetzt dt = t1 - t0; BSH berechnung der Isolation
    # Q = m*cp*dt

    # Infos für q_oven
    # 301.71Wh = 317.93 (Gesamte Speichermenge) - 16.22 (Isolation)
    # 101.3 Wh sind die Glasstür - Daten von BSH 301.71Wh * 3600 = 1086156 J
    # heating element haben ein dT = 400 - 25 statt 175 - 25

    # m = Summe der Elemente aus Eisen im Backofen entnommen aus Excel
    # Die Tür hat cp = 830 [J/(kg*K)]; bei dt = 150; 101.3WH gespeicherte
    Energie
    # führt zu m_Tür = 2.929 kg Wert ist in Excel nicht angegeben
    q_metall          = 8.046 *490 *(t1-t0)
    q_tuer            = 2.929*830*(t1-t0)
    q_heating_elements = 0.708*490*(t1-t0)
    q_oven = q_metall + q_tuer + q_heating_elements

    # BSH verwendet g/m^2 als Einheit der Dichte; wird dann auf 20mm
    reduziert;
    # v_iso = c_iso['volume'][0] - 2* c_cont["volume"][0]
    # m_iso = v_iso * c_iso["density"][0]

    #Bestimmung der Temperaturänderung aus Excel von BSH
    q_isolation = [round(isolation['mass'][0] * isolation["cp"][0] * ((t1 +
60) / 2 - t0),5), 'J']

```

```

q_cont = [round(container['mass'][0] * container["cp"][0] * (t1-t0),5),
'J']

q_salt = [round(salt['mass'][0] * salt["cp"][0] * (t1-t0),5), 'J']

q_cavity = [round(cavity['mass'][0] * cavity["cp"][0] * (t1-t0),5), 'J']

# 2x weil pro Seite ein Speicher ist
stored_J = [round(q_oven[0] + q_isolation[0] + ((q_cont[0] + q_salt[0]) *
2),5), 'J']

stored_Wh = [round(stored_J[0] / 3600,5), 'Wh']

return stored_J, stored_Wh, q_oven, q_isolation, q_cont, q_salt, q_cavity

```

Zeitabhängige Funktionen

```

def heatloss(isolation, container, salt, cavity, t0, t1):

# Senario I: diekte 1-dimensionale Berechnung des Wärmeverluststroms
über Zusammenschaltung der einzelnen Rs.
# Szenario II: Betrachtung einer möglichen Wärmebrücke
# (Vernachlässigung von Konvektion und dem Erwärmen des Hohlraums ->
statischer Zustand)
# Wärmestrom an die Umwelt erfolgt im Bereich des Speichers an der
Metalloberfläche; verringert Dämmungsdicke
# Wärmewiderstand  $R = d/(\lambda \cdot A)$ 
#  $Q_p = \lambda \cdot (A/d) \cdot \Delta T = 1/R \cdot \Delta T$ 

# Wärmeverlust in den Bereichen ohne Speicher -> Position des Speichers
aktuell an den Seiten

Q_p_loss_top= isolation['conductivity'][0] * isolation["area_tb"][0] /
isolation["thickness"][0] * (t1 - t0)
Q_p_loss_bottom = isolation['conductivity'][0] * isolation["area_tb"][0] /
isolation["thickness"][0] * (t1 - t0)
Q_p_loss_back = isolation['conductivity'][0] * isolation["area_back"][0] /
isolation["thickness"][0] * (t1 - t0)
Q_p_loss_tbb = [Q_p_loss_top + Q_p_loss_bottom + Q_p_loss_back, 'W']
#print('Q_loss_tbb',Q_p_loss_tbb)

```

```

# Szenario I
# Durchgehende Isolation
R_I_1 = [isolation["thickness"][0] / (isolation["conductivity"][0] *
(isolation["depth"][0] \
    * (isolation['height'][0] - container["area"][0]))), 'K/W']
try:
    # Container und Isolation
    R_I_2 = [(isolation["thickness"][0] -
container['width'][0])/(isolation["conductivity"][0] \
    * (container['area'][0]-salt['area'][0])) +
container['width'][0]/(container["conductivity"][0] \
    * (container['area'][0]-salt['area'][0]))), 'K/W']

    # Salt + Cavity + Steel + Isolation
    R_I_3 = [salt['width'][0]/(salt['conductivity'][0]*salt['area'][0]) +
cavity['width'][0] \
        / (cavity['conductivity'][0]*cavity['area'][0]) +
container['thickness'][0] \
        / (container['conductivity'][0]*cavity['area'][0]) +
(isolation["thickness"][0] - container["width"][0]) \
        / (isolation["conductivity"][0]*container['area'][0]), 'K/W']

    R_I_ges = [pow(1/R_I_1[0]+1/R_I_2[0]+1/R_I_3[0], -1), 'K/W']

    # Mal zwei wegen beiden Seiten
    Q_p_loss_I= [(1/R_I_ges[0])*(t1-t0) * 2 + Q_p_loss_tbb[0], 'W']
except:
    print('Except-Fall I kein Speicher vorhanden')
    Q_p_loss_I = [(1/R_I_1[0])*(t1-t0) * 2 + Q_p_loss_tbb[0], 'W']

# Szenario II
# Durchgehende Isolation
R_II_1 = [isolation["thickness"][0] / (isolation["conductivity"][0] *
(isolation["depth"][0] * (isolation['height'][0]
- container["area"][0]))), 'K/W']
try:
    # Container und Isolation
    R_II_2 = [(isolation["thickness"][0] -
container['width'][0])/(isolation["conductivity"][0]*

```

```

(container['area'][0] - salt['area'][0])) +
container['width'][0]/(container["conductivity"][0] *
(container['area'][0] - salt['area'][0])), 'K/W'
    # Steel (Brücke) + Isolation
    R_II_3 = [(isolation["thickness"][0] -
container["width"][0])/(isolation["conductivity"][0]*container['area'][0])
    + container['width'][0]/(container["conductivity"][0] *
salt['area'][0]), 'K/W']
    R_II_ges = [pow(1/R_II_1[0]+1/R_II_2[0]+1/R_II_3[0], -1), 'K/W']
    Q_p_loss_II = [(1/R_II_ges[0])*(t1-t0) * 2 + Q_p_loss_tbb[0], 'W']
except:
    print('Except-Fall II kein Speicher vorhanden')
    Q_p_loss_II = [(1/R_II_1[0])*(t1-t0) * 2 + Q_p_loss_tbb[0], 'W']

return Q_p_loss_I, Q_p_loss_II

```

```
def kinetics_t(x,T):
```

```

T = T+273.15          # K
R = 8.314             # J/(mol*K)
E = 118.6 * pow(10,3) # J/mol
k_0 = 1.11667* pow(10,12) # 1/sec

time = (1-pow((1-x),1/3))/(k_0*np.exp(-E/(R*T)))

return time

```

```
def kinetics_x(time,T):
```

```

T = T+273.15          # K
R = 8.314             # J/(mol*K)
E = 118.6 * pow(10,3) # J/mol
k_0 = 1.11667* pow(10,12) # 1/sec

c= time*k_0*np.exp(-E/(R*T))
if c >= 1:
    c=1
else:
    c=c

```

```
x = 1- pow((1-c),3)
```

```
return x
```

```
#Funktion für Gesamtsystem
```

```
def kinetics_to_Q_dehy (salt, x_1):
```

```
    delta_salt = salt['mass_hy'][0]*x_1
```

```
    salt['mass_hy'][0] = salt['mass_hy'][0] - delta_salt
```

```
    salt['mass_dehy'][0] = salt['mass_dehy'][0] + delta_salt
```

```
    # salt['mass_hy'][0] = salt['mass'][0]-salt['mass_dehy'][0]
```

```
    Q_J = 2 * delta_salt * salt["Energy-Density"][0] #J
```

```
    Q_Wh = Q_J/3600
```

```
    return [Q_J, 'J'], [Q_Wh, 'Wh']
```

```
def kinetics_to_Q_hy (salt, x_1):
```

```
    delta_salt = salt['mass_dehy'][0]*x_1
```

```
    salt['mass_dehy'][0] = salt['mass_dehy'][0] - delta_salt
```

```
    salt['mass_hy'][0] = salt['mass_hy'][0] + delta_salt
```

```
    # salt['mass_hy'][0] = salt['mass'][0]-salt['mass_dehy'][0]
```

```
    Q_J = 2 * delta_salt * salt["Energy-Density"][0] #J
```

```
    Q_Wh = Q_J/3600
```

```
    return [Q_J, 'J'], [Q_Wh, 'Wh']
```

```
def Q_to_Temp (isolation, container, salt, Q, t_0):
```

```
    # Berechnung der Temperatur des Systems auf Basis der enthaltenen  
    Wärmemenge Q
```

```
    #  $Q = \sum(m_i * cp_i) * (T_1 - T_0)$ 
```

```

# T_1 = Q/sum(m_i*cp_i)+T_0

# Berechnung der Einzelteile des Backofens:
# Zahlenwerte am Ende der Funktion sind erklärt in storedenergy3 und
entnommen der BSH-Excel
t0_k =t_0+273.15
t30 =(60+273.15)/2

m_cp = 8.046*490 + 2.929*830 + 0.708*490 + (container['mass'][0] *
container['cp'][0] +salt['mass'][0] * salt['cp'][0])*2
m_cpis = isolation['mass'][0] * isolation['cp'][0]

T_K= (Q+(m_cp+m_cpis)*t0_k - m_cpis*t30) / (m_cp+(m_cpis/2))
T = T_K-273.15

return T

```

Bestimmung eines Datenpunkts (Geometrisch)

```

height = 0.302      # m
depth = 0.302      # m
width = 0.01       # m
thickness = 0.001  # m
#mass = 3          #kg

fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)

c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]

df_1 = pd.DataFrame.from_dict(c_salt, orient='index',
columns=['Value', 'Unit'])
df_2 = pd.DataFrame.from_dict(c_cont, orient='index',
columns=['Value', 'Unit'])
df_3 = pd.DataFrame.from_dict(c_cavity, orient='index',
columns=['Value', 'Unit'])
df_1_T = df_1.T
print('-----')
printpretty(c_salt)
print('-----')

```

```

printpretty(c_cont)
print('-----')
printpretty(c_cavity)

#Ergebnisse in Excel speichern:
with pd.ExcelWriter('sample_data.xlsx',mode='a',if_sheet_exists="overlay") as
writer:
    df_1.to_excel(writer,sheet_name='sheet1')
    df_2.to_excel(writer,sheet_name='sheet1', startcol=4)
    df_3.to_excel(writer,sheet_name='sheet1', startcol=8)

```

Bestimmung eines Datenpunkts (Thermisch)

```

t0 = 25          # °C
t1 = 175        # °C
height = 0.05   # m
depth = 0.05    # m
width = 0.005   # m
thickness = 0.001 # m
mass = 0        # kg

fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)

c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]

stored = e_f.storedenergy (c_oven, c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
stored_J = stored [0]
stored_wh = stored [1]

print('Thermische Masse (ursprünglich): 317,93 Wh')
print()
print('Thermische Masse (neu): ', stored[0], ', ', stored[1])
print()
print('Differenz: ', round(stored[1][0]-317.93,5), 'Wh')
print('-----')
print("Für einen Speicher: ")
print()

```

```

print('Chemische Energie: ', round(c_salt['Chemical-Energy (J)'][0],5),"J, ",
      round(c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0],5), 'Wh')
print('-----')
print("Für das gesamte System:")
print()
print('Chemische Energie: ', round(c_salt['Chemical-Energy (J)'][0]*2,5),"J, ",
      round(c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]*2,5), 'Wh')
print()
print('-----')
print('Nutzen/Kosten: ', round((c_salt['Chemical-Energy
(Wh)'][0]*2)/(stored[1][0]-317.93),5) )
print()
print('-----')
print('Verlorene Energie: ',round(stored[0][0]-2*c_salt['Chemical-Energy
(J)'][0],5),'J,',round(stored[1][0]-2*c_salt['Chemical-Energy
(Wh)'][0],5),'Wh' )

```

Variation über die Füllhöhe des Speichers

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt

#Eigene Funktionen:
import energy_funktionen as e_f
import geometrie_funktionen as g_f

t0 = 25          #°C
t1 = 175        #°C
thickness = 0.001 #m 1mm Dicke der Speicherhülle
q_J_old   = 1144548 #J
q_Wh_old  = 317.93  #Wh

i = 0.15        #m
j = 0.15        #m
k = 0.019       #m

height_list = ['Height']
depth_list  = ['Depth']

```

```
width_list = ['Width']

A_list = ['Area']
V_list = ['Volume']

chem_J_list = ['chem. Energy']
chem_Wh_list = ['chem. Energy']

q_J_stored_list = ['Ther. Masse']
q_Wh_stored_list = ['Ther. Masse']

diff_J_list = ['Costs']
diff_Wh_list = ['Costs']

use_cost_J_list = ['--']
use_cost_Wh_list = ['--']

Qloss_J_list = ['J']
Qloss_Wh_list = ['Wh']
x_list=['--']
x=0.1
while x <=1:
    x_list.append(x)
    y=1-x
    height = i           #m
    depth = j           #m
    width = k           #m
    A = height*depth    #m^2
    V = height*depth*width #m^3

    height_list.append(height)
    depth_list.append(depth)
    width_list.append(width)

    A_list.append (A)
    V_list.append (V)
```

```
fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container_2 (height, depth, width,
thickness,x,y)
```

```
c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]
```

```
stored = e_f.storedenergy (g_f.c_oven, g_f.c_iso, c_cont, c_salt,
c_cavity, t0, t1)
```

```
q_J_stored = stored[0][0]
#print(q_J_stored)
q_Wh_stored = stored[1][0]
q_J_stored_list.append(q_J_stored)
q_Wh_stored_list.append(q_Wh_stored)
```

```
diff_J = stored[0][0] - q_J_old
diff_Wh = stored[1][0] - q_Wh_old
diff_J_list.append(diff_J)
diff_Wh_list.append(diff_Wh)
```

```
chem_J_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (J)'][0]
chem_Wh_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]
chem_J_list.append(chem_J_gesamt)
chem_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt)
```

```
use_cost_J_list.append(chem_J_gesamt/diff_J)
use_cost_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt/diff_Wh)
```

```
Qloss_J_list.append(q_J_stored-chem_J_gesamt)
Qloss_Wh_list.append(q_Wh_stored-chem_Wh_gesamt)
x+=0.1
```

```
#Speichern der Ergebnisse in Excel:
```

```
result = pd.DataFrame({'H (m)':height_list,'D (m)':depth_list,'W
(m)':width_list, 'A (m^2)':A_list,
'V (m^3)':V_list,'tM (J)':q_J_stored_list,'tM (Wh)':q_Wh_stored_list,
'Diff (J)':diff_J_list,'Diff (Wh)':diff_Wh_list,
```

```
'chem (J)':chem_J_list,'chem (Wh)':chem_Wh_list,'Use-
Cost':use_cost_Wh_list,'Loss':Qloss_Wh_list})

result.to_excel('Result_Füllhöhe_0.xlsx',sheet_name='Data', index=False)

##Darstellung der Ergebnisse in Form eines Graphen
#####
#Plot Use/Cost
plt.title('Use/Cost in dependency of the salt level')
plt.xlabel('Salt level (%/100)')
plt.ylabel('Use/Cost')
plt.plot(x_list[1::],use_cost_J_list[1::],marker='.')
plt.grid(True)
#plt.legend(loc='lower right')

#####
#Speichern des Graphen

plt.savefig('Saltlevel_01.png')
```

Bestimmung der Kosten/Nutzen Funktion und der verlorenen Energiemenge (statisch)

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt

#Eigene Funktionen:
import energy_funktionen as e_f
import geometrie_funktionen as g_f

t0 = 25          #°C
t1 = 175         #°C
thickness = 0.001 #m 1mm Dicke der Speicherhülle
q_J_old = 1144548 #J
q_Wh_old = 317.93 #Wh

# Initiale Abmessungen des Speichersystems
i = 0.10        #m (Länge des Speichers)
```

```
j = 0.10    #m (Breite des Speichers)
k = 0.005   #m (Höhe des Speichers)
```

```
# Listen zum Speichern der Ergebnisse:
```

```
height_list = ['Height']
depth_list  = ['Depth']
width_list  = ['Width']
```

```
A_list = ['Area']
V_list = ['Volume']
```

```
chem_J_list      = ['chem. Energy']
chem_Wh_list     = ['chem. Energy']
```

```
q_J_stored_list  = ['Ther. Masse']
q_Wh_stored_list = ['Ther. Masse']
```

```
diff_J_list = ['Costs']
diff_Wh_list = ['Costs']
```

```
use_cost_J_list = ['--']
use_cost_Wh_list = ['--']
```

```
Qloss_J_list = ['J']
Qloss_Wh_list = ['Wh']
```

```
# Vergrößerung der Grundfläche:
```

```
while i <= 0.30:
```

```
    height = i          #m
    depth  = j          #m
    width  = k          #m
    A      = height*depth #m^2
    V      = height*depth*width #m^3
```

```
    height_list.append(height)
    depth_list.append(depth)
    width_list.append(width)
```

```
A_list.append (A)
V_list.append (V)

fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)

c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]

stored = e_f.storedenergy (g_f.c_oven, g_f.c_iso, c_cont, c_salt, t0,
t1)

q_J_stored = stored[0][0]
q_Wh_stored = stored[1][0]
q_J_stored_list.append(q_J_stored)
q_Wh_stored_list.append(q_Wh_stored)

diff_J = stored[0][0] - q_J_old
diff_Wh = stored[1][0] - q_Wh_old
diff_J_list.append(diff_J)
diff_Wh_list.append(diff_Wh)

chem_J_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (J)'][0]
chem_Wh_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]
chem_J_list.append(chem_J_gesamt)
chem_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt)

use_cost_J_list.append(chem_J_gesamt/diff_J)
use_cost_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt/diff_Wh)

Qloss_J_list.append(q_J_stored-chem_J_gesamt)
Qloss_Wh_list.append(q_Wh_stored-chem_Wh_gesamt)

i += 0.005
j += 0.005

# Vergrößerung der Höhe:
while k < 0.020:
```

```
height = i          #m
depth = j           #m
width = k           #m
A = height*depth    #m^2
V = height*depth*width #m^3

height_list.append(height)
depth_list.append(depth)
width_list.append(width)
A_list.append (A)
V_list.append (V)

fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)

c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]

stored = e_f.storedenergy (g_f.c_oven, g_f.c_iso, c_cont, c_salt, t0, t1)

q_J_stored = stored[0][0]
q_Wh_stored = stored[1][0]
q_J_stored_list.append(q_J_stored)
q_Wh_stored_list.append(q_Wh_stored)

diff_J = stored[0][0] - q_J_old
diff_Wh = stored[1][0] - q_Wh_old
diff_J_list.append(diff_J)
diff_Wh_list.append(diff_Wh)

chem_J_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (J)'][0]
chem_Wh_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]
chem_J_list.append(chem_J_gesamt)
chem_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt)

use_cost_J_list.append(chem_J_gesamt/diff_J)
use_cost_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt/diff_Wh)

Qloss_J_list.append(q_J_stored-chem_J_gesamt)
```

```
Qloss_Wh_list.append(q_Wh_stored-chem_Wh_gesamt)

k+=0.001

# Initiale Abmessungen eines zweiten Speichersystems:
i = 0.10    #m (Länge des Speichers)
j = 0.10    #m (Breite des Speichers)
k = 0.010   #m (Höhe des Speichers)

# Listen zum Speichern der Ergebnisse
height_1list = ['Height']
depth_1list  = ['Depth']
width_1list  = ['Width']
A_1list     = ['Area']
V_1list     = ['Volume']

chem_J_1list      = ['chem. Energy']
chem_Wh_1list     = ['chem. Energy']

q_J_stored_1list  = ['Ther. Masse']
q_Wh_stored_1list = ['Ther. Masse']

diff_J_1list     = ['Costs']
diff_Wh_1list    = ['Costs']

use_cost_J_1list = ['--']
use_cost_Wh_1list = ['--']

Qloss_J_1list = ['J']
Qloss_Wh_1list = ['Wh']

# Vergrößerung der Grundfläche:
while i <= 0.30:

    height = i           #m
    depth  = j           #m
    width  = k           #m
    A      = height*depth #m^2
    V      = height*depth*width #m^3
```

```
height_1list.append(height)
depth_1list.append(depth)
width_1list.append(width)
A_1list.append (A)
V_1list.append (V)

fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)

c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]

stored = e_f.storedenergy (g_f.c_oven, g_f.c_iso, c_cont, c_salt, t0,
t1)

q_J_stored = stored[0][0]
q_Wh_stored = stored[1][0]
q_J_stored_1list.append(q_J_stored)
q_Wh_stored_1list.append(q_Wh_stored)

diff_J = stored[0][0] - q_J_old
diff_Wh = stored[1][0] - q_Wh_old
diff_J_1list.append(diff_J)
diff_Wh_1list.append(diff_Wh)

chem_J_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (J)'][0]
chem_Wh_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]
chem_J_1list.append(chem_J_gesamt)
chem_Wh_1list.append(chem_Wh_gesamt)

use_cost_J_1list.append(chem_J_gesamt/diff_J)
use_cost_Wh_1list.append(chem_Wh_gesamt/diff_Wh)

Qloss_J_1list.append(q_J_stored-chem_J_gesamt)
Qloss_Wh_1list.append(q_Wh_stored-chem_Wh_gesamt)

i += 0.005
```

```
j += 0.005
```

```
while k < 0.020:
```

```
    height = i           #m
    depth = j           #m
    width = k           #m
    A = height*depth    #m^2
    V = height*depth*width #m^3
```

```
    height_1list.append(height)
    depth_1list.append(depth)
    width_1list.append(width)
    A_1list.append(A)
    V_1list.append(V)
```

```
    fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)
```

```
    c_salt = fc_volume_cont [0]
    c_cont = fc_volume_cont [1]
    c_cavity = fc_volume_cont [2]
```

```
    stored = e_f.storedenergy (g_f.c_oven, g_f.c_iso, c_cont, c_salt, t0, t1)
```

```
    q_J_stored = stored[0][0]
    q_Wh_stored = stored[1][0]
    q_J_stored_1list.append(q_J_stored)
    q_Wh_stored_1list.append(q_Wh_stored)
```

```
    diff_J = stored[0][0] - q_J_old
    diff_Wh = stored[1][0] - q_Wh_old
    diff_J_1list.append(diff_J)
    diff_Wh_1list.append(diff_Wh)
```

```
    chem_J_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (J)'][0]
    chem_Wh_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]
    chem_J_1list.append(chem_J_gesamt)
    chem_Wh_1list.append(chem_Wh_gesamt)
```

```

use_cost_J_1list.append(chem_J_gesamt/diff_J)
use_cost_Wh_1list.append(chem_Wh_gesamt/diff_Wh)

Qloss_J_1list.append(q_J_stored-chem_J_gesamt)
Qloss_Wh_1list.append(q_Wh_stored-chem_Wh_gesamt)

k+=0.001

```

Bestimmung der Kosten/Nutzen Funktion und der verlorenen Wärme (zeitabhängig)

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt

#Eigene Funktionen:
import energy_funktionen as e_f
import geometrie_funktionen as g_f

t0 = 25          #°C
t1 = 175         #°C
thickness = 0.001 #m 1mm Dicke der Speicherhülle
q_J_old = 1144548 #J
q_Wh_old = 317.93 #Wh
Q_W_old = 347    #W

# Initiale Abmessungen des Speichersystems
i = 0.10 #m (Länge des Speichers)
j = 0.10 #m (Breite des Speichers)
k = 0.005 #m (Höhe des Speichers)

height_list = ['Height']
depth_list = ['Depth']
width_list = ['Width']

A_list = ['Area']
V_list = ['Volume']

chem_J_list = ['chem. Energy']
chem_Wh_list = ['chem. Energy']

```

```
q_J_stored_list = ['Ther. Masse']
q_Wh_stored_list = ['Ther. Masse']
q_p_I_W_list = ['Q_Verlust']
q_p_II_W_list = ['Q_Verlust']
```

```
diff_J_list = ['Costs']
diff_Wh_list = ['Costs']
diff_W_I_list = ['Costs']
diff_W_II_list = ['Costs']
```

```
use_cost_J_list = ['--']
use_cost_Wh_list = ['--']
use_cost_W_I_list = ['--']
use_cost_W_II_list = ['--']
```

```
Qloss_J_list = ['J']
Qloss_Wh_list = ['Wh']
Q_p_W_I_list = ['W']
Q_p_W_II_list = ['W']
```

```
while j <= 0.30:
```

```
    height = i           #m
    depth = j           #m
    width = k           #m
    A = height*depth    #m^2
    V = height*depth*width #m^3
```

```
    height_list.append(height)
    depth_list.append(depth)
    width_list.append(width)
```

```
    A_list.append (A)
    V_list.append (V)
```

```
fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)
```

```
c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]

stored = e_f.storedenergy (g_f.c_oven, g_f.c_iso, c_cont, c_salt, t0, t1)
heat = e_f.heatloss (g_f.c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
#print(heatloss)
```

```
q_J_stored = stored[0][0]
q_Wh_stored = stored[1][0]
```

```
q_J_stored_list.append(q_J_stored)
q_Wh_stored_list.append(q_Wh_stored)
```

```
q_p_I_W = heat[0][0]
q_p_II_W = heat[1][0]
```

```
q_p_I_W_list.append(q_p_I_W)
q_p_II_W_list.append(q_p_II_W)
```

```
diff_J = stored[0][0] - q_J_old
diff_Wh = stored[1][0] - q_Wh_old
diff_J_list.append(diff_J)
diff_Wh_list.append(diff_Wh)
```

```
diff_W_I = q_p_I_W - Q_W_old
diff_W_II = q_p_II_W - Q_W_old
diff_W_I_list.append(diff_W_I)
diff_W_II_list.append(diff_W_II)
```

```
chem_J_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (J)'][0]
chem_Wh_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]
chem_J_list.append(chem_J_gesamt)
chem_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt)
```

```
use_cost_J_list.append(chem_J_gesamt/diff_J)
use_cost_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt/diff_Wh)
```

```

use_cost_W_I_list.append(chem_J_gesamt/(diff_W_I*60))
use_cost_W_II_list.append(chem_J_gesamt/(diff_W_II*60))

Qloss_J_list.append(q_J_stored-chem_J_gesamt)
Qloss_Wh_list.append(q_Wh_stored-chem_Wh_gesamt)

i += 0.01
j += 0.01

while k < 0.016:

    width = k                #m
    A = height*depth        #m^2
    V = height*depth*width  #m^3

    height_list.append(height)
    depth_list.append(depth)
    width_list.append(width)
    A_list.append (A)
    V_list.append (V)

    fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)

    c_salt = fc_volume_cont [0]
    c_cont = fc_volume_cont [1]
    c_cavity = fc_volume_cont [2]

    stored = e_f.storedenergy (g_f.c_oven, g_f.c_iso, c_cont, c_salt, t0, t1)
    heat = e_f.heatloss (g_f.c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)

    q_J_stored = stored[0][0]
    q_Wh_stored = stored[1][0]
    q_J_stored_list.append(q_J_stored)
    q_Wh_stored_list.append(q_Wh_stored)
    q_p_I_W = heat[0][0]
    q_p_II_W = heat[1][0]
    q_p_I_W_list.append(q_p_I_W)
    q_p_II_W_list.append(q_p_II_W)

```

```

diff_J = stored[0][0] - q_J_old
diff_Wh = stored[1][0] - q_Wh_old
diff_J_list.append(diff_J)
diff_Wh_list.append(diff_Wh)
diff_W_I = q_p_I_W - Q_W_old
diff_W_II = q_p_II_W - Q_W_old
diff_W_I_list.append(diff_W_I)
diff_W_II_list.append(diff_W_II)

chem_J_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (J)'][0]
chem_Wh_gesamt = 2*c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]
chem_J_list.append(chem_J_gesamt)
chem_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt)

use_cost_J_list.append(chem_J_gesamt/diff_J)
use_cost_Wh_list.append(chem_Wh_gesamt/diff_Wh)
use_cost_W_I_list.append(chem_J_gesamt/(diff_W_I*60))
use_cost_W_II_list.append(chem_J_gesamt/(diff_W_II*60))

Qloss_J_list.append(q_J_stored-chem_J_gesamt)
Qloss_Wh_list.append(q_Wh_stored-chem_Wh_gesamt)

k+=0.001

```

#Speichern der Ergebnisse in Excel:

```

result = pd.DataFrame({'H (m)':height_list,'D (m)':depth_list,'W
(m)':width_list, 'A (m^2)':A_list,
'V (m^3)':V_list,'tM (J)':q_J_stored_list,'tM (Wh)':q_Wh_stored_list,
'Diff (J)':diff_J_list,'Diff (Wh)':diff_Wh_list,
'chem (J)':chem_J_list,'chem (Wh)':chem_Wh_list,'Use-
Cost':use_cost_Wh_list,'Loss':Qloss_Wh_list,'Use-Cost Sz-
I':use_cost_W_I_list,'Use-Cost Sz-2':use_cost_W_II_list})

result.to_excel('Result_Wärmeverluste_1.xlsx',sheet_name='Data', index=False)

```

```
##Darstellung der Ergebnisse in Form eines Graphen
# Wärmeverluste
plt.title('Lost heatstream in dependency of the device volume')
plt.xlabel('Volume (m^3)')
plt.ylabel('Lost Energy (W)')
plt.plot(V_list[1:::],diff_W_I_list[1:::], marker='.', label = 'Szenario I')
plt.plot(V_list[1:::],diff_W_II_list[1:::], marker='.', label = 'Szenario II')
plt.grid(True)
plt.legend(loc='upper left')
plt.savefig('Ergebnis_Waermeverlust_01.png')

#Kosten/Nutzen:
plt.title('Use/Cost in dependency of the device volume')
plt.xlabel('Volume (m^3)')
plt.ylabel('Time (min)')

plt.plot(V_list[1:::],use_cost_W_I_list[1:::],marker='.', label = 'Szenario I')
plt.plot(V_list[1:::],use_cost_W_II_list[1:::],marker='.', label = 'Szenario
II')

plt.grid(True)
plt.legend(loc='upper left')
plt.savefig('Ergebnis_KN_SzenarioI_II_01.png')
```

Bestimmung der Reaktionszeit

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt

#Eigene Funktionen:
import energy_funktionen as e_f
import geometrie_funktionen as g_f

T_list = [25,75,125,175]
x_dic = {'25':0, '75':0, '125':0, '175':0}
time_dic = {'25':0, '75':0, '125':0, '175':0}

for i in range(len(T_list)):

    T = T_list[i]
    x_list = []
    time_list = []
    for j in range (0,3600):
        time_list.append(j)
        x = e_f.kinetics_x(j,T)
        x_list.append(x)
    x_dic[str(T)] = x_list
    time_dic[str(T)] = time_list

plt.title('Reaction over time')
plt.xlabel('Time (sec)')
plt.ylabel('Amount Reaction (%)')

#plt.plot(time_dic['175'],x_dic['175'], label = '175 °C')
#plt.plot(time_dic['125'],x_dic['125'], label = '125 °C')
#plt.plot(time_dic['75'],x_dic['75'], label = '75 °C')
#plt.plot(time_dic['25'],x_dic['25'], label = '25 °C')

plt.grid(True)
plt.legend(loc='lower right')
plt.savefig('Reaction1_25.png')
```

```
T_list = [25,75,125,175]
x_dic = {'25':0, '75':0, '125':0, '175':0}
time_dic = {'25':0, '75':0, '125':0, '175':0}

for i in range(len(T_list)):

    T = T_list[i]
    x_list = []
    time_list = []
    j=0
    while j <=1:
        x_list.append(j)
        time = e_f.kinetics_t(j,T)
        time_list.append(time)
        j+=0.2
        j = round(j,2)
    x_dic[str(T)] = x_list
    time_dic[str(T)] = time_list

plt.title('Reaction over time')
plt.xlabel('Amount Reaction (%)')
plt.ylabel('Time (sec)')

#plt.plot(x_dic['175'],time_dic['175'],marker='o', label = '175 °C')
#plt.plot(x_dic['125'],time_dic['125'],marker='o', label = '125 °C')
#plt.plot(x_dic['75'],time_dic['75'],marker='o', label = '75 °C')
plt.plot(x_dic['25'],time_dic['25'],marker='o', label = '25 °C')

plt.grid(True)
plt.legend(loc='upper left')
plt.savefig('Reaction2_25.png')
```

Berechnung des zeitabhängigen Ladevorgangs der Batterie

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.sankey import Sankey
from IPython.display import Image

import energy_funktionen as e_f
import geometrie_funktionen as g_f

#Programm Gesamtsystem

#Listen zur grafischen Darstellung der Ergebnisse:
time_list = []
T_list = []
Q_stored_list = []
Q_list=[]
Q_Wh_list = []
C_list = []
C_Wh_list = []
Q_sum_list = [0]
C_sum_list = [0]

#c_salt = fc_volume_cont [0]
#c_cont = fc_volume_cont [1]
#c_cavity = fc_volume_cont [2]

#Geometrie:
height = 0.300      # m
depth = 0.300      # m
width = 0.013      # m
thickness = 0.001  # m

#Berechnung der unbekanntenen Geometrie:
fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)
c_salt = fc_volume_cont [0]
c_cont = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]
```

```

c_oven = g_f.c_oven
c_iso = g_f.c_iso
g_f.c_salt['mass_hy'] = [c_salt['mass'][0], 'kg']
#Aussetemperatur (t0) und Starttemperatur (t1):
t0 = 25 # °C
t1 = 200
#Startzeit:
time = 0 # Sec
stored_0 = e_f.storedenergy3 ( c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
print(stored_0)
while t1 >= 50:
    time_list.append(time)
    T_list.append(t1)

    stored = e_f.storedenergy3 (c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
    Q_stored_list.append(stored[0][0])

    heat = e_f.heatloss (c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
    Q_list.append(heat[0][0])
    Q_Wh_list.append(heat[0][0]/3600)
    Q_sum_list.append(heat[0][0]/3600 + Q_sum_list[len(Q_list)-1])

    x = e_f.kinetics_x(1,t1)
    Q_chem= e_f.kinetics_to_Q_dehy (c_salt, x)
    C_list.append(Q_chem[0][0])
    C_Wh_list.append(Q_chem[0][0]/3600)
    C_sum_list.append(Q_chem[0][0]/3600 + C_sum_list[len(C_list)-1])

    Q_neu = stored[0][0] - heat[0][0] - Q_chem[0][0]

    T_neu = e_f.Q_to_Temp(c_iso, c_cont, c_salt, Q_neu, t0)

    time+=1

    t1=T_neu
#####

fig, ax1 = plt.subplots()

```

```
ax2 = ax1.twinx()

ax1.axhline(y=c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]*2,color='r', label='Max. saved
Heat')
ax1.plot(time_list,Q_sum_list[:len(Q_sum_list)-1],color='b', label =
'Heatloss')
ax1.plot(time_list,C_sum_list[:len(C_sum_list)-1],color='g', label = 'Saved
Heat')

ax2.plot(time_list,T_list,color='black', label = 'Temperature')

ax1.set_xlabel('Time (sec)')
ax1.set_ylabel('Heat (Wh)')
ax2.set_ylabel('Temperature (°C)')
fig.tight_layout()
plt.title('Battery charging process')
ax1.grid(True)
ax2.grid(True)
ax1.set_ylim(0,275)
ax2.set_ylim(0,275)
ax1.legend(loc='center right')
ax2.legend(loc='lower right')
plt.savefig('BatterieCharge_xx.png')
#plt.show()

fig, ax1 = plt.subplots()
ax2 = ax1.twinx()

ax1.plot(time_list[100:500],C_Wh_list[100:500],color='b', label = 'Rate of
stored heat per second')
ax1.plot(time_list[100:500],Q_Wh_list[100:500],color='g', label = 'Rate of
lost heat per second')

ax2.plot(time_list[100:500],T_list[100:500],color='black', label =
'Temperature')

plt.title('Heatloss and stored energy per second')
ax1.set_xlabel('Time (sec)')
```

```

ax1.set_ylabel('Heat-Rate (Wh/s)')
ax2.set_ylabel('Temperature (°C)')

fig.tight_layout()
ax1.grid(True)
ax2.grid(True)
ax1.legend(loc='best')
ax2.legend(loc='center right')
plt.savefig('Heatloss and stored energy per second_01.png')
#plt.show()

```

Berechnung der Gleichgewichtstemperatur (Entladen)

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.sankey import Sankey
from IPython.display import Image

import energy_funktionen as e_f
import geometrie_funktionen as g_f

#Programm Gesamtsystem

#Listen zur grafischen Darstellung der Ergebnisse:
time_list = []
T_list = []
Q_stored_list = []
Q_list=[]
Q_Wh_list = []
C_list = []
C_Wh_list = []
x_list = []
Q_sum_list = [0]
C_sum_list = [0]
x_sum_list = [0]

#Geometrie:
height = 0.150          # m

```

```

depth = 0.150          # m
width = 0.015         # m
thickness = 0.001     # m

#Berechnung der unbekanntenen Geometrie:
fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)
c_salt   = fc_volume_cont [0]
c_cont   = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]
c_salt['mass_dehy'] = [c_salt['mass'][0], 'kg']
c_salt['mass_hy']   = [0, 'kg']
print('Start Energy: ', c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]*2)
#Ausstemperatur (t0) und Starttemperatur (t1):
t0 = 25              # °C
t1 = 130             # °C 130->150°C andere Temp.
#Startzeit:
time = 0             # Sec
stored_0 = e_f.storedenergy3 (g_f.c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
#print(stored_0)
#i=0
while time < 500: # vorher 3000
#while i <= 10:
    time_list.append(time)
    T_list.append(t1)

    stored = e_f.storedenergy3 (g_f.c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
    #print('Stored: ', stored[0][0]/3600)
    Q_stored_list.append(stored[0][0])

    heat = e_f.heatloss (g_f.c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
    #print('heat: ', heat[0][0]/3600)
    Q_list.append(heat[0][0])
    Q_Wh_list.append(heat[0][0]/3600)
    Q_sum_list.append(heat[0][0]/3600 + Q_sum_list[len(Q_list)-1])

    x = e_f.kinetics_x(1,t1)

    #x_sum_list.append(x + x_sum_list[len(x_list)-1])

```

```

Q_chem= e_f.kinetics_to_Q_hy (c_salt, x)
#print('Q_chem: ',Q_chem)
x_list.append(c_salt['mass_hy'][0]/c_salt['mass'][0])
C_list.append(Q_chem[0][0])
C_Wh_list.append(Q_chem[0][0]/3600)
C_sum_list.append(Q_chem[0][0]/3600 + C_sum_list[len(C_list)-1])

#Entladevorgang durch Q_chem ! + !
Q_neu = stored[0][0] - heat[0][0] + Q_chem[0][0]

T_neu = e_f.Q_to_Temp(g_f.c_iso, c_cont, c_salt,Q_neu, t0)

time+=1
t1=T_neu

```

```

fig, ax1 = plt.subplots()
ax2 = ax1.twinx()

#ax1.axhline(y=c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]*2,color='r', label='Max.
saved Heat')
#ax1.plot(time_list,Q_sum_list[:len(Q_sum_list)-1],color='b', label =
'Discharged Heat')
#ax1.plot(time_list,C_sum_list[:len(C_sum_list)-1],color='g', label = 'Saved
Heat')

ax1.plot(time_list[1:],C_Wh_list[1:],color='b', label = 'Rate of stored Heat
per second')
ax1.plot(time_list[1:],Q_Wh_list[1:],color='g', label = 'Rate of lost Heat per
second')

ax2.plot(time_list,T_list,color='black', label = 'Temperature')

plt.title('Batterie charging process')
ax1.set_xlabel('Time (sec)')
ax1.set_ylabel('Heat-Rate (Wh/s)')
ax2.set_ylabel('Temperature (°C)')

fig.tight_layout()
plt.title('Batterie discharging process')

```

```
ax1.grid(True)
ax2.grid(True)

#ax1.set_ylim(0,275)
#ax2.set_ylim(0,275)
ax1.legend(loc='best')
ax2.legend(loc='center right')
plt.savefig('BatterieDischarge_rate_05.png')
```

Berechnung des zeitabhängigen Entladevorgangs der Batterie

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.sankey import Sankey
from IPython.display import Image

import energy_funktionen as e_f
import geometrie_funktionen as g_f

#Programm Gesamtsystem

#Listen zur grafischen Darstellung der Ergebnisse:
time_list = []
T_list = []
Q_stored_list = []
Q_list=[]
Q_Wh_list =[]
C_list = []
C_Wh_list = []
x_list = []
Q_sum_list = [0]
C_sum_list = [0]
x_sum_list = [0]

#Geometrie:
height = 0.150          # m
```

```

depth = 0.150          # m
width = 0.015         # m
thickness = 0.001     # m

#Berechnung der unbekanntenen Geometrie:
fc_volume_cont = g_f.fc_volume_container (height, depth, width, thickness)
c_salt   = fc_volume_cont [0]
c_cont   = fc_volume_cont [1]
c_cavity = fc_volume_cont [2]
c_salt['mass_dehy'] = [c_salt['mass'][0], 'kg']
c_salt['mass_hy'] = [0, 'kg']
print('Start Energy: ', c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]*2)
#Aussetemperatur (t0) und Starttemperatur (t1):
t0 = 25              # °C
t1 = 130             # °C 130->150°C andere Temp.
#Startzeit:
time = 0             # Sec
stored_0 = e_f.storedenergy3 (g_f.c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
#print(stored_0)
#i=0
while time < 500: # vorher 3000
#while i <= 10:
    time_list.append(time)
    T_list.append(t1)

    stored = e_f.storedenergy3 (g_f.c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
    #print('Stored: ', stored[0][0]/3600)
    Q_stored_list.append(stored[0][0])

    heat = e_f.heatloss (g_f.c_iso, c_cont, c_salt, c_cavity, t0, t1)
    #print('heat: ', heat[0][0]/3600)
    Q_list.append(heat[0][0])
    Q_Wh_list.append(heat[0][0]/3600)
    Q_sum_list.append(heat[0][0]/3600 + Q_sum_list[len(Q_list)-1])

    x = e_f.kinetics_x(1,t1)

    #x_sum_list.append(x + x_sum_list[len(x_list)-1])

```

```

Q_chem= e_f.kinetics_to_Q_hy (c_salt, x)
#print('Q_chem: ',Q_chem)
x_list.append(c_salt['mass_hy'][0]/c_salt['mass'][0])
C_list.append(Q_chem[0][0])
C_Wh_list.append(Q_chem[0][0]/3600)
C_sum_list.append(Q_chem[0][0]/3600 + C_sum_list[len(C_list)-1])

#Entladevorgang durch Q_chem ! + !
Q_neu = stored[0][0] - heat[0][0] + Q_chem[0][0]

T_neu = e_f.Q_to_Temp(g_f.c_iso, c_cont, c_salt,Q_neu, t0)

time+=1
t1=T_neu

fig, ax1 = plt.subplots()
ax2 = ax1.twinx()

#ax1.axhline(y=c_salt['Chemical-Energy (Wh)'][0]*2,color='r', label='Max.
saved Heat')
#ax1.plot(time_list,Q_sum_list[:len(Q_sum_list)-1],color='b', label =
'Discharged Heat')
#ax1.plot(time_list,C_sum_list[:len(C_sum_list)-1],color='g', label = 'Saved
Heat')

ax1.plot(time_list[1:],C_Wh_list[1:],color='b', label = 'Rate of stored Heat
per second')
ax1.plot(time_list[1:],Q_Wh_list[1:],color='g', label = 'Rate of lost Heat per
second')

ax2.plot(time_list,T_list,color='black', label = 'Temperature')

plt.title('Batterie charging process')
ax1.set_xlabel('Time (sec)')
ax1.set_ylabel('Heat-Rate (Wh/s)')
ax2.set_ylabel('Temperature (°C)')

fig.tight_layout()
plt.title('Batterie discharging process')

```

```
ax1.grid(True)
ax2.grid(True)

#ax1.set_ylim(0,275)
#ax2.set_ylim(0,275)
ax1.legend(loc='best')
ax2.legend(loc='center right')
plt.savefig('BatterieDischarge_rate_05.png')
```

7 Literatur

- [1] A. Werner, „Thermochemical Energy Storage for thermal boost and heat recovery in baking ovens: TECHEBAKOV“.
- [2] M. Ornetzeder, L. Capari, A. Guttig, „Monitoring urbaner Technologien: Ein Modell zur Abschätzung der Reife soziotechnischer Innovationen für die Stadt der Zukunft“.
- [3] S. Flegkas, F. Birkelbach, F. Winter, N. Freiberger und A. Werner, „Fluidized bed reactors for solid-gas thermochemical energy storage concepts - Modelling and process limitations“, *Energy*, Jg. 143, Nr. 7, S. 615–623, 2018.
- [4] Stylianos Flegkas, Felix Birkelbach, Andreas Werner und Norbert Freiberger, „Thermochemical Energy Storage Concept Based on a Reactor Cascade with Different Storage Materials“, S. 40–49.
- [5] F. Birkelbach, M. Deutsch, S. Flegkas, W. Franz und A. Werner, „A higher-order generalization of the NPK-method“, *Thermochimica Acta*, Jg. 661, Nr. 3, S. 27–33, 2018.
- [6] F. Birkelbach, M. Deutsch, S. Flegkas, F. Winter und A. Werner, „NPK 2.0: Introducing tensor decompositions to the kinetic analysis of gas-solid reactions“, *Int. J. Chem. Kinet.*, Jg. 51, Nr. 4, S. 280–290, 2019.
- [7] Georg Gravogl *et al.*, „Cycle Stability and Hydration Behavior of Magnesium Oxide and Its Dependence on the Precursor-Related Particle Morphology“.
- [8] C. Knoll *et al.*, „Probing cycle stability and reversibility in thermochemical energy storage – CaC₂O₄·H₂O as perfect match?“, *Applied Energy*, Jg. 187, S. 1–9, 2017.
- [9] M. Deutsch *et al.*, „Systematic search algorithm for potential thermochemical energy storage systems“, *Applied Energy*, Jg. 183, S. 113–120, 2016.
- [10] Rodríguez Quintero, R., Boyano, A., Bernad D., Donatello, S., Paraskevas, D., Villanueva, A., „Review study of Ecodesign and Energy Labelling for Cooking appliances“, https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-07/CA_%20Prep%20Study_draft1_Feb2020.pdf, 2020.
- [11] P. Office, *Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Angabe des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch energieverbrauchsrelevante Produkte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen* Text von Bedeutung für den EWR, 2010.
- [12] Europäische Union, „A Consumer’s Guide to Energy-Efficient Ovens and Range Hoods“.
- [13] P. Office, *Delegierte Verordnung (EU) Nr. 65/2014 der Kommission vom 1. Oktober 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen*

Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieverbrauchskennzeichnung von Haushaltsbacköfen und - dunstabzugshauben Text von Bedeutung für den EWR, 2013.

- [14] Europäische Union, *New EU energy labels applicable from 1 March 2021*.
- [15] Corinna Hochscheid und Ina Rüdenauer, „Fallstudie zur Haushaltsgeräte: Fallstudie für das Umweltbundesamt im Rahmen des Vorhabens „Marktanalyse und Interventionen zur Förderung von grünen Produkten“, https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Fallstudie_Haushaltsgeraete.pdf, 2021.
- [16] D. Amienyo, J. Doyle, D. Gerola, G. Santacatterina und A. Azapagic, „Sustainable manufacturing of consumer appliances: Reducing life cycle environmental impacts and costs of domestic ovens“, *Sustainable Production and Consumption*, Jg. 6, Nr. 3, S. 67–76, 2016.
- [17] D. H. Park, E. R. Seo, M. K. Kwon und Y. J. Park, „The study on the heater usage for better energy efficiency of domestic convection oven“, *J Mech Sci Technol*, Jg. 32, Nr. 2, S. 907–914, 2018.
- [18] Michael Sterner, *Energiespeicher-Buch-Michael Sterner // Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [19] Y. Zhang und R. Wang, „Sorption thermal energy storage: Concept, process, applications and perspectives“, *Energy Storage Materials*, Jg. 27, S. 352–369, 2020.
- [20] Y. Ding und S. B. Riffat, „Thermochemical energy storage technologies for building applications: A state-of-the-art review“, *Int. J. Low-Carbon Tech.*, Jg. 8, Nr. 2, S. 106–116, 2015.
- [21] N. Yu, R. Z. Wang und L. W. Wang, „Sorption thermal storage for solar energy“, *Progress in Energy and Combustion Science*, Jg. 39, Nr. 5, S. 489–514, 2013.
- [22] Lager Daniel, „Evaluation of thermophysical properties for thermal energy storage materials- determining factors, prospects and limitations“. Doktorarbeit, Institute for Energy Systems and Thermodynamics, TU Wien, Wien, 2017.
- [23] Z. Zeng, B. Zhao und R. Wang, „Water based adsorption thermal battery: Sorption mechanisms and applications“, *Energy Storage Materials*, Jg. 54, Nr. 7797, S. 794–821, 2023.
- [24] R.-J. Clark, A. Mehrabadi und M. Farid, „State of the art on salt hydrate thermochemical energy storage systems for use in building applications“, *Journal of Energy Storage*, Jg. 27, January, S. 1–18, 2020.
- [25] B. Michel, P. Neveu und N. Mazet, „Comparison of closed and open thermochemical processes, for long-term thermal energy storage applications“, *Energy*, Jg. 72, S. 702–716, 2014.
- [26] L. Scapino, H. A. Zondag, J. van Bael, J. Diriken und C. C.M. Rindt, „Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the

- advancements at material and prototype scale“, *Applied Energy*, Jg. 190, S. 920–948, 2017.
- [27] A. Werner, „Thermochemical Energy Storage for thermal boost and heat recovery in baking ovens: TECHEBAKOV“.
- [28] B. Michel und M. Clause, „Design of thermochemical heat transformer for waste heat recovery: Methodology for reactive pairs screening and dynamic aspect consideration“, *Energy*, Jg. 211, S. 1–11, 2020.
- [29] W. Wagner und A. Pruss, „International Equations for the Saturation Properties of Ordinary Water Substance. Revised According to the International Temperature Scale of 1990. Addendum to J. Phys. Chem. Ref. Data 16 893 (1987)“, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Jg. 22, Nr. 3, S. 783–787, 1993.
- [30] I. I. El-Sharkawy, „On the linear driving force approximation for adsorption cooling applications“, *International Journal of Refrigeration*, Jg. 34, Nr. 3, S. 667–673, 2011.
- [31] L. Garofalo, F. V. Vitiello, F. Montagnaro, H. Bürgmayr und F. Winter, „Salt Hydrates for Thermochemical Storage of Solar Energy: Modeling the Case Study of Calcium Oxalate Monohydrate Dehydration/Rehydration under Suspension Reactor Conditions“, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Jg. 60, Nr. 30, S. 11357–11372, 2021.
- [32] A. Freni, G. Maggio, F. Cipiti und Y. I. Aristov, „Simulation of water sorption dynamics in adsorption chillers: One, two and four layers of loose silica grains“, *Applied Thermal Engineering*, Jg. 44, Nr. 4, S. 69–77, 2012.
- [33] L. Vlaev, N. Nedelchev, K. Gyurova und M. Zagorcheva, „A comparative study of non-isothermal kinetics of decomposition of calcium oxalate monohydrate“, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Jg. 81, Nr. 2, S. 253–262, 2008.
- [34] P. Honcová *et al.*, „Kinetic study of dehydration of calcium oxalate trihydrate“, *J Therm Anal Calorim*, Jg. 124, Nr. 1, S. 151–158, 2016.
- [35] H. Tanaka, S. Ohshima, S. Ichiba und H. Negita, „Kinetics and mechanism of the thermal dehydration of calcium oxalate monohydrate“, *Thermochimica Acta*, Jg. 48, 1-2, S. 137–146, 1981.
- [36] I. Nerád, I. Proks, S. Sausova, „Zitiert in: Thermodynamische Eigenschaften und Umsatzverhalten von Salzhydraten zur Speicherung und Transformation von Wärme; Michael Niermann: Chem. Paper“ 45, 1991.
- [37] M. T. S. Shimzu, „Zitiert in: Thermodynamische Eigenschaften und Umsatzverhalten von Salzhydraten zur Speicherung und Transformation von Wärme; Michael Niermann“, 1977.

- [38] N. Gérard, G. Watelle-Marion, A. Thrierr-Sorel, „Zitiert in: Thermodynamische Eigenschaften und Umsatzverhalten von Salzhydraten zur Speicherung und Transformation von Wärme; Michael Niermann“, 1968.
- [39] G. Sádovská und G. Wolf, „Enthalpy of dissolution and thermal dehydration of calcium oxalate hydrates“, *J Therm Anal Calorim*, Jg. 119, Nr. 3, S. 2063–2068, 2015.
- [40] D. D. Wagman, W. H. Evans, V. B. Parker, R. H. Schumm, I. Halow, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1982.