Diplomarbeit

Lebenszyklusanalyse von saisonalen thermischen Wärmespeicher

Tank- und Latentwärmespeicher

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Heimo Walter
Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Technische Universität Wien
und
Richard Lüchinger, MSc
Institut für Maschinen- und Energietechnik, Hochschule Luzern

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Camilla Wenzl
[redacted]

Wien, 07.01.2026

Camilla Wenzl, BSc

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

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

Weiters erkläre ich, dass 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, 07.01.2026

_____

Camilla Wenzl, BSc

Gender Erklärung

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit auf eine gleichzeitige Verwendung weiblicher, männlicher und diverser Personenbezeichnungen verzichtet. Sämtliche personenbezogenen Bezeichnungen sind geschlechtsneutral zu verstehen und beziehen sich, sofern nicht anders angegeben, gleichermaßen auf alle Geschlechter. Diese sprachliche Vereinfachung impliziert keinerlei Wertung.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Heimo Walter, der mir diese Arbeit unter seiner Leitung ermöglicht hat und mich immer unterstützt hat. Großer Dank gilt ebenso Herrn Richard Lüchinger. Richard hat nie aufgehört, an mich zu glauben und mich selbst in Momenten, in denen ich an ein Aufgeben dachte, stets erneut motiviert. Seine fortwährende Unterstützung, seine hervorragende Betreuung sowie sein Vertrauen und seine Geduld haben entscheidend zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen: von Herzen danke!

Ebenso möchte ich der Hochschule Luzern danken, die mir den Zugang zu den erforderlichen Datenbanken ermöglichte. Durch diese Ressourcen war es mir möglich, die Analysen mit *openLCA* umfassend und fundiert durchzuführen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die ökologische Bewertung zweier Wärmespeichertechnologien durchgeführt: der sensiblen sowie der latenten Speicher. Ziel ist es, durch eine Lebenszyklusanalyse (LCA) die Umweltauswirkungen der Speichersysteme systematisch zu vergleichen und ihre Relevanz für eine nachhaltige Wärmewende zu bewerten.

Die Untersuchung basiert auf einer Literaturrecherche und Modellierung in openLCA. Dabei wurden unterschiedliche funktionelle Einheiten, wie die Speicherkapazität oder die Masse der Speicher kritisch gegenübergestellt und die Ergebnisse mithilfe der Wirkungsabschätzungsmethoden ReCiPe 2016 und GHG Protocol (CO_2-Äquivalente) ausgewertet. Da die Ergebnisse von LCA-Studien stark von den gewählten Parametern abhängen, werden im Rahmen der Arbeit die Relevanz und mögliche Ansatzpunkte für Sensitivitätsanalysen, wie z. B. Materialwahl, Dämmstärke oder Lebensdauer, diskutiert.

Die Resultate verdeutlichen, dass der ökologische Fußabdruck maßgeblich von der Größe der Speicher bestimmt wird, wobei insbesondere die Herstellung große Auswirkungen hat. Gleichzeitig weisen innovative Speicher mit Phasenwechselmaterialien (PCM) ein günstigeres Verhältnis von Energieeinsatz zu Speicherkapazität auf, jedoch ist ihre ökologische Vorteilhaftigkeit stark vom eingesetzten Material und der Lebensdauer abhängig. Die Bewertung von Latentwärmespeichern stützt sich auf Ergebnisse aus der Literatur, die in dieser Arbeit eingeordnet und diskutiert werden. Für konventionelle Wasserspeicher konnte bestätigt werden, dass die Wahl der funktionellen Einheit maßgeblich die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bestimmt.

Insgesamt verdeutlicht die Arbeit, dass Wärmespeicher ein erhebliches Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen können, die Aussagekraft von LCA-Studien jedoch stark von den gewählten Systemgrenzen, Annahmen und funktionellen Einheiten abhängt. Die Ergebnisse liefern daher nicht nur eine ökologische Einordnung aktueller Speichertechnologien, sondern auch methodische Hinweise für zukünftige LCA-Studien.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

This thesis conducts an ecological assessment of two thermal storage technologies, with the focus on a sensible and a latent heat storage. The aim is to systematically compare the environmental impacts of storage systems through a life cycle assessment (LCA) and to evaluate their relevance for a sustainable energy transition.

The study is based on a literature review and modeling in openLCA. Different functional units (e.g., storage capacity, mass) were critically compared, and the results were evaluated using the impact assessment methods ReCiPe 2016 and GHG Protocol (CO_2 equivalents). Since the outcomes of LCA studies strongly depend on the chosen parameters, this thesis discusses the relevance and possible approaches for sensitivity analyses, e.g., material choice, insulation thickness, or lifetime.

The results demonstrate that the ecological footprint is largely determined by the size of the storage units, with manufacturing in particular having significant impacts. At the same time, innovative storage systems using phase change materials (PCM) show a more favorable ratio of energy input to storage capacity; however, their ecological advantages strongly depend on the material used and their lifetime. The assessment of latent heat storage relies on results from the literature, which are contextualized and discussed in this work. For conventional water-based sensible storage, it was confirmed that the choice of functional unit crucially affects the comparability of results.

Overall, this thesis highlights that thermal energy storage can make a significant contribution to reducing greenhouse gas emissions, but also shows that the informative value of LCA studies depends strongly on the selected system boundaries, assumptions, and functional units. The results therefore provide not only an ecological assessment of current storage technologies but also methodological insights for future LCA studies.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Problemstellung 3
1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung der Arbeit 3
1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit 4
2 Grundlagen und Funktionsprinzipien saisonaler Wärmespeicher 6
2.1 Sensible Wärmespeicher 9
2.2 Latentwärmespeicher 11
2.3 Thermochemische Wärmespeicher 13
2.4 Praktische Anwendungen von saisonalen Energiespeichern 14
2.4.1 Tankspeicher 16
2.4.2 Latente Wärmespeicher 25
3 Theorie und Methodik der LCA 32
3.1 Grundlagen und Zielsetzung der LCA 33
3.2 Methodischer Rahmen der LCA 33
3.3 Aufbau und Ablauf der LCA 34
3.3.1 Festlegung von Zielen und Untersuchungsrahmen 36
3.3.2 Sachbilanz 37
3.3.3 Wirkabschätzung 39
3.3.4 Auswertung 41
3.4 Greenhouse Gas Protocol 42
3.5 Kennzahlen 42
3.6 Grenzen der LCA 44
4 Methodik 46
4.1 Literaturrecherche 46
4.1.1 Desk-Research 46
4.1.2 Vorgehensweise der Desk-Research 47
4.1.3 Auswahl der Literatur 47
4.1.4 Ergebnisse der Desk-Research 47
4.1.5 Primärdatenerhebung 48
4.2 Methodologie der LCA 49
4.3 openLCA 50

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

5 Stand der Forschung 51
5.1 Arbeiten zu saisonale Wärmespeicher 51
5.2 Arbeiten zur LCA 52
5.3 Umgesetzte Projekte von Tankspeicher 55
5.4 Gegenüberstellung PCM Speicher und Tankspeicher 58
5.5 Fazit zum Stand der Forschung 59
6 Durchführung der LCA 61
6.1 Software 61
6.2 Durchführung der LCA in *openLCA* 62
6.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen der LCA 62
6.2.2 Systemgrenzen, Einschränkungen und Annahmen 63
6.2.3 Beschreibung der untersuchten Speicher 64
6.2.4 Funktionelle Einheit 70
6.2.5 Modellbildung mit *openLCA* 71
6.2.6 Wirkungsabschätzung - Life Cycle Impact Assessment (LCIA) 76
6.3 LCA Latentwärmespeicher 76
7 Ergebnisse der LCA 78
7.1 Ergebnisse Speicher A 78
7.2 Ergebnisse Speicher B 80
7.3 Ergebnisse Speicher C 81
7.4 Ergebnisse Speicher D 83
7.5 Zusammenfassung der vier Speicher 84
8 Diskussion 87
8.1 Ergebnisdiskussion der Tankspeicher 87
8.2 Limitationen 88
8.3 Wahl der funktionellen Einheit 89
8.4 Sensitivitätsanalyse 90
8.5 Zusammenfassung der Diskussion 91
9 Ausblick und Fazit 93
10 Anhang 95
10.1 Speichers B 95
10.2 Speicher C 99

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

10.3 Speicher D 101
11 Literaturverzeichnis 105
12 Abbildungsverzeichnis 109
13 Tabellenverzeichnis 111
14 Abkürzungsverzeichnis 112

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

Energie ist erneuerbar – unsere Welt nicht.

Eine der zentralen Herausforderungen der kommenden Jahre besteht darin, den Ausbau erneuerbarer Energien konsequent voranzutreiben. Der Klimawandel und seine weitreichenden ökologischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Folgen sind längst Realität und in nahezu allen Lebensbereichen spürbar. Um diesen Entwicklungen wirksam zu begegnen, ist ein tiefgreifender Wandel im Energiesystem erforderlich. Technologischer Fortschritt und die Verfügbarkeit neuer, nachhaltiger Technologien bieten hierbei die Chance, den Übergang zu einer klimaneutralen Energieversorgung zu gestalten. Das Ziel liegt darin, den Einsatz fossiler Energieträger deutlich zu reduzieren und alternative Energiekonzepte flächendeckend zu etablieren. Erneuerbare Energiequellen wie Windkraft, Solarthermie, Photovoltaik, Geothermie, Wasserkraft sowie Gezeiten- und Wellenkraftwerke können dabei, sowohl einzeln als auch in hybriden Systemen, einen wesentlichen Beitrag leisten. Von entscheidender Bedeutung ist jedoch nicht allein die Bereitstellung erneuerbarer Energie, sondern insbesondere auch deren Speicherung. Ohne leistungsfähige Energiespeicher wird die Energiewende nicht realisierbar sein. Sie sind erforderlich, um die natürlichen Schwankungen von fluktuierenden Energiequellen wie Wind- und Solarenergie auszugleichen, die Energieerzeugung zu verstetigen und die Differenz zwischen Produktion und Nachfrage zu kompensieren. Darüber hinaus tragen sie wesentlich zur Effizienzsteigerung von Energieanlagen bei.

Gerade im Bereich der Wärmeerzeugung zeigt sich ein enormes Potenzial: In Österreich entfallen rund 50% des Endenergieverbrauchs auf die Bereitstellung von Wärme. Damit stellt der Wärmemarkt den größten Energiesektor des Landes dar – und zugleich ein zentrales Handlungsfeld für den verstärkten Einsatz von Wärmespeichern (Lassacher et al., 2018). Die Motivation und das Potenzial für die Weiterentwicklung von Energiespeichern kommt aus folgenden Punkten (Lassacher et al., 2018):

- Integration erneuerbarer Energien
- Ausgleich fluktuierender Energiequellen
- Effizientere Nutzung vorhandener Energiepotenziale
- Nutzbarmachung ungenutzter Energien

Eine Dekarbonisierung des Energiesystems mit einem hohen erneuerbaren Anteil ist nur durch ein Zusammenspiel von verschiedenen Energietechnologien möglich. Das gilt auch für den Bereich der erneuerbaren Wärmeerzeuger welche notwendig sind um Wohnhäuser, Büros und die Industrie mit Wärme und Kälte zu versorgen. Hat man eine alternative Energiequelle zur Verfügung, ist es sinnvoll das Energiesystem mit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

den notwendigen Speichern auszustatten, um die Lücke von Angebot und Nachfrage zu schließen und die notwendige Flexibilität zu gewährleisten. Nutzt man eine Photovoltaikanlage zur Erzeugung von Strom und in weiterer Folge zur Erzeugung von Wärme, so steht man vor der Herausforderung wie man die Energie der Sonne in den warmen Monaten mit in den Winter nimmt. Hier kann die Lösung ein saisonaler Wärmespeicher sein. Die Frage ist, wie zukünftig die von der Sonne abgegebene Wärme in einer Form gespeichert werden kann, um im Winter damit zu heizen.

Thermische Energiespeicher ermöglichen es, überschüssige Wärme, sei es aus erneuerbaren Energien, industrieller Abwärme oder in Wärme umgewandeltem Strom, zwischenzuspeichern und bei Bedarf wieder nutzbar zu machen. Besonders relevant sind saisonale Wärmespeicher [1], die Wärme aus den Sommermonaten über längere Zeiträume speichern und im Winter für die Raumwärmeversorgung bereitstellen. In der Praxis existieren verschiedene Speichertechnologien, darunter Tankspeicher[2], Erdbeckenspeicher[3], Bohrlochwärmespeicher[4], Aquiferwärmespeicher[5], sowie latent[6]- und thermochemische[7] Wärmespeicher. Welche Technologie geeignet ist, hängt stark von den jeweiligen Standortbedingungen ab, wie etwa den geologischen und hydrologischen Gegebenheiten, den Anforderungen des Fernwärmesystems oder dem benötigten Temperaturniveau.

Da einzelne Technologien großskaliger saisonaler Speicher noch nicht vollständig ausgereift sind, bestehen Unsicherheiten hinsichtlich Effizienz, Wirtschaftlichkeit und ökologischen Auswirkungen. In dieser Arbeit wird daher der ökologische Fußabdruck, eine Lebenszyklusanalyse[8], zweier ausgewählter Speichertechnologien, des Tankspeichers und des Latentwärmespeichers, untersucht. Aufgrund der vorhandenen Datenlage wurden die Tankspeicher modelliert und die Latentwärmespeicher aus vorhandener Literatur diskutiert. Ziel ist es, mithilfe einer Lebenszyklusanalyse die Umweltwirkungen zu quantifizieren und Ansatzpunkte für eine nachhaltige Wärmewende aufzuzeigen. Dadurch soll ein Beitrag zum besseren Verständnis der ökologischen Chancen und Grenzen saisonaler Wärmespeicher geleistet und eine Grundlage für die technologische Weiterentwicklung sowie zukünftige Entscheidungsprozesse geschaffen werden.

[1] engl. sensible seasonal thermal energy storage (SSTES)
[2] engl. tank thermal energy storage (TTES)
[3] engl. pit thermal energy storage (PTES)
[4] engl. borehole thermal energy storage (BTES)
[5] engl. aquifer thermal energy storage (ATES)
[6] engl. latent thermal energy storage (LTES)
[7] engl. thermochemical storage (TCS)
[8] Ökobilanz, engl. Life Cycle Assessment (LCA)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1.1 Problemstellung

Für eine Energieversorgung mit einem hohen Anteil erneuerbarer Quellen ist es notwendig, das Ungleichgewicht zwischen dem Energieangebot in den Sommermonaten, vor allem durch Solar- und Windenergie, und der erhöhten Energienachfrage im Winter auszugleichen. Saisonale Wärmespeicher bieten hierfür eine vielversprechende Möglichkeit, die in den Sommermonaten anfallende Wärmeenergie langfristig zu speichern und in der Heizperiode bedarfsgerecht bereitzustellen. Derzeit bestehen jedoch noch begrenzte wirtschaftliche und technologische Anreize für die Umsetzung langfristiger Speicherlösungen. Dennoch ermöglichen saisonale Wärmespeicher eine ganzjährige Nutzung unterschiedlicher Wärmequellen wie Solarenergie, Umweltwärme, Biomasse, industrielle Abwärme oder Power-to-Heat-Systeme[9] und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zu einer stabilen, effizienten und klimaneutralen Wärmeversorgung.

1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung der Arbeit

Saisonale Wärmespeicher finden bereits Anwendung sowohl im privaten Bereich als auch auf kommunaler Ebene, ihr Einsatz entspricht jedoch noch nicht dem technisch möglichen Potenzial. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, Zugang zu belastbaren Unterlagen über die konkrete Auslegung und Praxisanwendung von Tank- und Latentwärmespeichern zu erhalten. Die Forschungsfrage der Arbeit zielt deshalb auf die Untersuchung der Umweltauswirkungen unterschiedlicher Wärmespeicher ab, wobei die Ergebnisse zusätzlich mit bereits veröffentlichten Studien verglichen werden.

Zur Beantwortung der Frage wurde zunächst eine umfassende Literatur- und Desk-Research durchgeführt, um den aktuellen Forschungsstand zu analysieren. Darauf aufbauend erfolgte die Erstellung einer Lebenszyklusanalyse[10], die den gesamten Lebenszyklus – von der Rohstoffgewinnung und Produktion über die Nutzung bis zum End-of-Life – berücksichtigt. Grundlage für die Modellierung waren sowohl Daten aus wissenschaftlichen Publikationen als auch Informationen, die auf Anfrage von Unternehmen bereitgestellt wurden.

Die Zielsetzung der Arbeit besteht darin, durch die Ergebnisse der LCA eine fundierte Einschätzung des ökologischen Fußabdrucks der Speicher zu ermöglichen und damit eine Vergleichsbasis zu finden, in welche Speichertechnologien künftig verstärkt investiert werden sollte. Zur Umsetzung dieses Vorhabens wurden Teilziele formuliert, die sowohl theoretische als auch praktische Aspekte abdecken: eine umfassende

[9] Power-to-Heat: Diese Technologie bietet eine Möglichkeit Strom als Energieträger in Wärme umzuwandeln. In den meisten Fällen wird hier Überschussstrom verwendet, um damit das Stromnetz zu entlasten.
[10] engl. Life Cycle Assessment, LCA

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Literaturrecherche zu LCA-Methoden und Energiesystemen, die Auswahl relevanter Bewertungsindikatoren, wie zum Beispiel das Material des Speichers, die Analyse verfügbarer Datensätze und die exemplarische Anwendung verschieden großer Tankspeicher und eines Latenwärmespeichers.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Im Anschluss an die Einleitung folgt die Darstellung des theoretischen und methodischen Hintergrunds. Eine umfassende Desk-Research bietet einen Überblick über derzeit am Markt verfügbare Speichertechnologien sowie über bereits umgesetzte Projekte. Darauf aufbauend wird die LCA gemäß der Norm DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 als zentrale Bewertungsmethode beschrieben. Sie bildet die methodische Grundlage dieser Arbeit.

Zu Beginn werden Ziel und Umfang der Analyse definiert, die Systemgrenzen und relevanten Parameter festgelegt sowie geeignete Kennzahlen und Bewertungsmethoden identifiziert. Anschließend werden die Primärdaten erhoben und das Vorgehen für die Nutzungsphase sowie die End-of-Life-Phase detailliert erläutert. Die Modellierung und Auswertung erfolgen mithilfe der Software *openLCA*, um eine fundierte Aussage über die ökologische Nachhaltigkeit und Umweltwirkung der untersuchten Systeme treffen zu können.

Die LCA wird exemplarisch an einem Tankspeicher durchgeführt, der für den Einsatz in einem Einfamilienhaus geeignet ist, sowie an drei weiteren Tankspeichern, die in das öffentliche Versorgungsnetz einspeisen. Auf Grundlage der erhobenen Daten werden in *openLCA* Modelle erstellt, mit denen die Umweltauswirkungen und Potenziale der verschiedenen Speicherlösungen verglichen werden.

Im Anschluss werden die Ergebnisse dargestellt, kritisch reflektiert und mit bestehenden Forschungsarbeiten in Beziehung gesetzt. Zudem erfolgt eine Bewertung der eingesetzten Software *openLCA* im Hinblick auf ihre Aussagekraft und Anwendbarkeit. Das abschließende Kapitel fasst die wichtigsten Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf. Eine grafische Übersicht des Aufbaus der Arbeit zeigt Abbildung 1.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

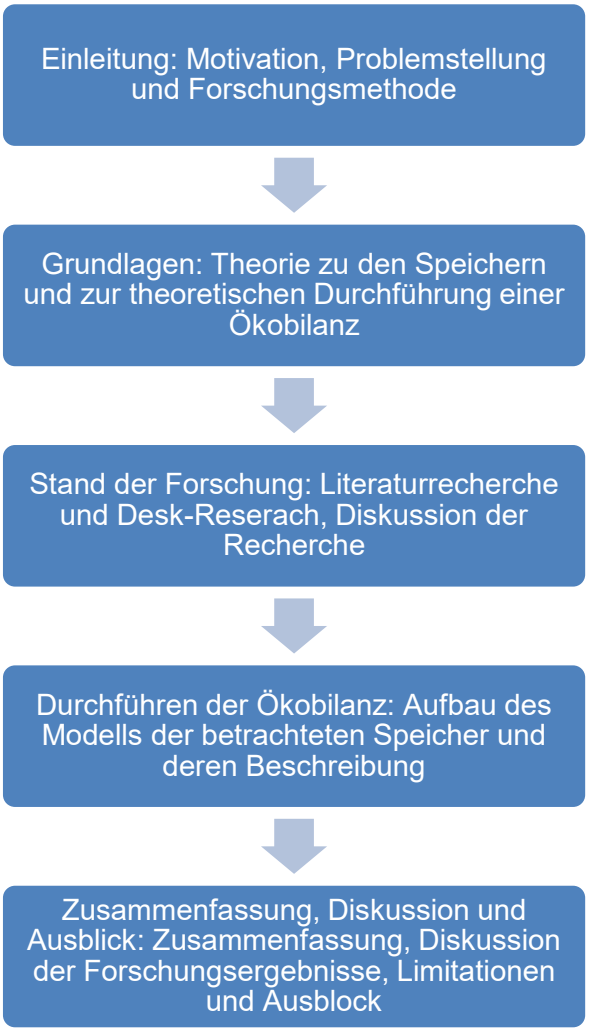


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Arbeit grafisch dargestellt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2 Grundlagen und Funktionsprinzipien saisonaler Wärmespeicher

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die vorhandenen Technologien zu saisonalen Wärmespeichern gegeben. Kurz zusammengefasst soll der Speicher über eine hohe Zuverlässigkeit und über eine geringe Amortisationszeit mit möglichst hohen Leistungen verfügen, und unterschiedliche Temperaturniveaus abdecken können. Die Punkte der Konzeptionierung des Wärmespeichers spielen bei einer LCA eine wesentliche Rolle, da sie das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. Unter dem Begriff der thermischen Energiespeicherung versteht man Systeme, die Wärme oder Kälte aufnehmen, über einen bestimmten Zeitraum speichern und bei Bedarf wieder abgeben können. Es wird dabei zwischen Wärmespeichern und Kältespeichern unterschieden, die nach demselben physikalischen Prinzip arbeiten, jedoch mit entgegengesetzter Funktionsrichtung.

Ein saisonaler Wärmespeicher stellt eine spezielle Form des Langzeitspeichers dar. Er dient dazu, überschüssige Wärmeenergie, beispielsweise aus Solarthermieanlagen oder aus Stromüberschüssen, über längere Zeiträume zu speichern und in der Heizperiode wieder nutzbar zu machen. Dadurch kann die Integration erneuerbarer Energiequellen im Wärmesektor gesteigert und gleichzeitig die Effizienz der Wärmebereitstellung verbessert werden. Thermische Energiespeicher kommen in unterschiedlichen Einsatzbereichen zum Tragen. Sie ermöglichen die zeitliche Entkopplung von Energieerzeugung und -nutzung. Je nach Anwendungsfall werden sie in Kurzzeitspeicher, z. B. für Tag-Nacht-Schwankungen und Langzeitspeicher, wie z. B. für saisonale Speicherung über Wochen bis Monate oder länger, unterteilt. Langzeitspeicher finden vor allem in Gebäuden, Nahwärmenetzen oder solarthermischen Kraftwerken Anwendung (Goeke, 2021).

Hinsichtlich der Temperaturniveaus unterscheidet man zwischen Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturspeichern, die jeweils für unterschiedliche Anwendungen, wie von der Brauchwassererwärmung bis zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Die technologische Einteilung thermischer Speicher erfolgt in drei grundlegende Systeme:

- sensible Wärmespeicher, bei denen Energie durch Temperaturänderung des Speichermediums, wie z. B. Wasser oder Gestein gespeichert wird
- latente Wärmespeicher, die den Phasenwechsel eines Materials, z. B. fest–flüssig, zur Speicherung nutzen
- thermochemische Speicher, die auf reversiblen chemischen Reaktionen basieren und besonders hohe Energiedichten ermöglichen.

Diese Einteilung wird in Abbildung 2 grafisch dargestellt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

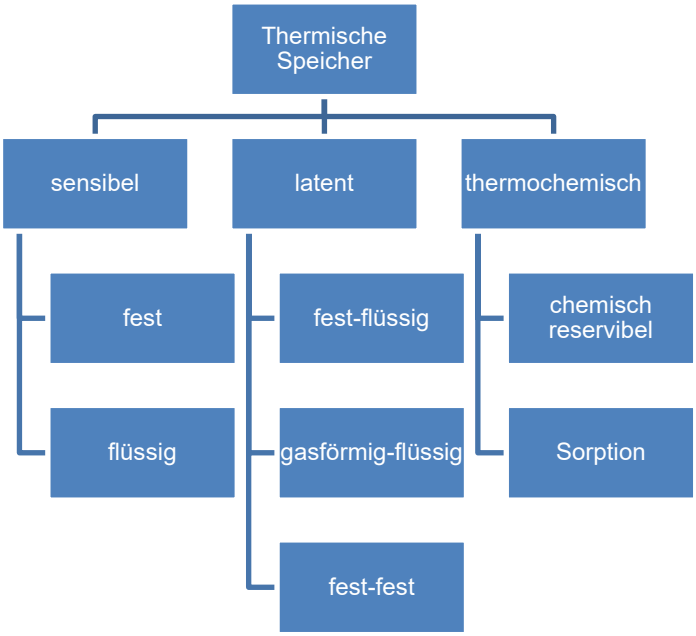


Abbildung 2: Übersicht thermische Speicher, eigene Darstellung (Goeke, 2021)

Der sensible Wärmespeicher speichert Wärme durch Temperaturänderung eines Stoffes, wie z.B. Wasser oder Gestein. Dem Funktionsprinzip liegt kein Phasenwechsel zu Grunde. Bei latenten Wärmespeichern findet der Wärmeaustausch durch eine Phasenänderung statt, beim thermochemischen Speicher mittels einer thermochemischen Reaktion. Der Wärmeinhalt setzt sich aus dem sensiblen und wenn vorhanden aus dem latenten, bzw. dem thermochemischen Anteil der Wärme zusammen.

Tabelle 1 (Wesselak et al., 2017) gibt einen Überblick der in den nächsten Kapiteln behandelten Speichern und deren Entwicklungsstand:

Speicherart	Stoff	Arbeitstemperatur [°C]	Speicher-kapazität [kWh/m³]	Entwicklungs-stand
Sensibel	Wasser	0-100	60	ausgereift
	Beton	0-500	30	ausgereift
Latent	Paraffine	0-70	60	entwickelt
	Salzhydrate	30-100	150	entwickelt
	Salze	100-400	100	entwickelt
Thermoche misch	Silikagele	40-100	200	in Entwicklung
	Zeolithe	100-300	200	in Entwicklung
	Metall-hybride	300-900	500	in Entwicklung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 1: Überblick über den Entwicklungsstand thermischer Speicher (Wesselak et al., 2017)

Aus der Übersicht wird deutlich, dass zwischen den verschiedenen Speichertechnologien noch erhebliche Unterschiede im Entwicklungsstand bestehen. Während die Speicherung sensibler Wärme bereits technisch ausgereift und weit verbreitet ist, befinden sich latente und thermochemische Speicher noch in einem früheren Entwicklungsstadium. Der technologische Reifegrad, die Marktdurchdringung sowie die gesellschaftliche Akzeptanz dieser Systeme stehen dabei in engem Zusammenhang.

Das wohl bekannteste Beispiel von Speicherung sensibler Wärme ist der Pufferspeicher wie er bereits in vielen Heizungssystemen zur Anwendung kommt. Einer der Merkmale von einem thermischen Speicher ist seine Temperatur. Die Temperatur mit der Speicher be- und entladen werden, gibt den Einsatzbereich vor. Hat man Temperaturen von 300°C bis 600°C spricht man von Hochtemperatur-Anwendungen (Sterner & Stadler, 2014). In diesem Temperaturbereich arbeiten hauptsächlich solarthermische Kraftwerke. Druckluftspeicher, bei denen thermische Speicher im Einsatz sind, werden ebenfalls mit Temperaturen von 600°C beladen. Im Temperaturbereich von 100°C-250°C wird oftmals die Herstellung von Dampf für industrielle Zwecke betrieben. Für die „klassische“ Wärmespeicherung von Speichern, wie sie in dieser Arbeit genauer betrachtet werden, befinden wir uns im Temperaturbereich von 25°C bis 90°C. Damit können Flächenheizsysteme wie eine Fußbodenheizung und Radiatoren mit kleineren Flächen betrieben werden. Ein weiteres wesentliches Merkmal ist die Dauer des zu überbrückenden Zeitraums zwischen Laden und Entladen. Während die Ladezyklen von Kurzzeitspeichern im Bereich von wenigen Stunden bis wenigen Tagen durchlaufen werden, hat man beim Langzeitspeicher Ladezyklen die sich über Zeiträume von Wochen bis zum einem Jahr strecken (Goeke, 2021). Um die kurzen Ladenzyklen beim Kurzzeitspeicher zu ermöglichen, ist eine hohe Lade- und Beladeleistung notwendig. Im Vergleich zur Lade- und Beladeleistung zum Kurzzeitspeicher wird beim Langzeitspeicher nur eine geringe Ladeleistung bereitgestellt. Auch der Standort hat bei der Wahl der Art des Energiespeichers einen großen Einfluss. Hier gibt es allerdings keine genaue Definition aus der Literatur und es kommt drauf an, welche Systemgrenzen man zieht. Befindet sich der Speicher in einem Kraftwerk so spricht man tendenziell von einem zentralen Speicher. Hingegen der Pufferspeicher in einem Einfamilienhaus wäre ein dezentraler Speicher da er sich sehr nahe an der Verbraucherseite befindet.

In den nächsten Unterkapiteln wird auf die Speichertechnologien genauer eingegangen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.1 Sensible Wärmespeicher

Von sensiblen Wärmespeichern[11] spricht man, wenn bei der Wärmeaufnahme bzw. bei der Wärmeabgabe eine fühlbare Änderung der Temperatur des Speichermediums stattfindet. Dabei wird das Speichermedium erhitzt oder abgekühlt. Bei dieser Art von Speicher ist die Energiemenge abhängig von der spezifischen Wärmekapazität des eingesetzten Stoffes und kann somit im Vergleich zu den anderen Methoden eine geringere Energiedichte bei gleicher Temperaturdifferenz aufweisen. Da bei den meisten sensiblen Wärmespeichern eine Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebungstemperatur vorhanden ist, spielt die Wärmedämmung eine große Rolle. Den Zusammenhang zwischen der *Wärmemenge* Q und der *Temperaturänderung* ΔT wird durch Formel (1) beschrieben (Goeke, 2021):

$$Q = m * c_p * (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Neben der Temperaturdifferenz $(T_2\text{-}T_1)$ und der Masse m des Speichermediums ist die Wärmemenge Q von der spezifischen Wärmekapazität c_p abhängig. T_1 entspricht der Temperatur bei Beginn der Beladung und T_2 der Temperatur bei Ende der Beladung. Je höher die spezifische Wärmekapazität, desto weniger Speichermedium wird für die Speicherung für eine bestimmte Wärmemenge benötigt, was wiederum bedeutet, je weniger Speichermedium benötigt wird, desto kleiner kann der Speicher dimensioniert werden. Die Energiedichte ist aufgrund der maximalen möglichen Temperaturdifferenz und der spezifischen Wärmekapazität begrenzt und somit niedriger als bei latenten und thermochemischen Wärmespeichern.

Tabelle 2 gibt einen Überblick der Wärmekapazität von verschiedenen Materialien:

[11] engl. sensible heat storage (SHS)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Medium	Temperaturbereich °C	Spezifische Wärmekapazität kJ/(kg K)	Volumetrische Wärmekapazität kJ/(m³ K)	Dichte kg/m³
Wasser	0-100	4,19	4175	998
Sand, Kies, Gestein	0-800	0,71	1278-1420	1800-2000
Granit	0-800	0,75	2062	2750
Beton	0-500	0,88	1672-2075	1900-2300
Eisen	0-900	0,47	3655	7860
Thermoöl	0-400	1,6-2,1	1630-1620	850-900
Kies-Wasser-Schüttungen	0-100	1,32	2904	2561-2243
Salz-Schmelze	150-450	1,3	1970-1725	2561-2243
Natrium	100-800	1,3	925-750	1203-975

Tabelle 2: Übersicht von spezifischer Wärmekapazität und Dichte von verschiedenen Materialien (Sterner & Stadler, 2014)

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich hat Wasser eine hohe spezifische Wärmekapazität im Vergleich zu anderen Speichermedien.

Vorteile von sensiblen Wärmespeichern sind die im Vergleich niedrigeren Investitionskosten, die Übertragbarkeit hoher Leistungen in flüssigen Systemen und eine mögliche Speicherung von hohen Temperaturen (Lassacher et al., 2018). Tankspeicher sind die am weitesten am Markt entwickelten Speicher. Oftmals werden sensible Wärmespeicher als Tankspeicher mit dem Speichermedium Wasser betrieben. Das Speichermedium Wasser hat einige Vorteile: hohe Verfügbarkeit, geringe Kosten, Umweltverträglichkeit, eine hohe Wärmekapazität und gute Fließeigenschaften. Nachteilig zu erwähnen ist, dass bei Wasser unter Umgebungsdruck Dampfbildung bei Speichertemperaturen über 100°C eintritt und dieser Anwendungsfall daher bestimmte sicherheitstechnische Maßnahmen erfordert. Kommt es zur Dampfbildung ist ein Druckbehälter erforderlich.

Arbeitet man mit Temperaturen über 95° Grad werden sehr oft Thermoöle als Wärmeträgerfluid eingesetzt. Flüssigkeiten als Speichermaterial haben den Vorteil, dass sie gleichzeitig als Wärmeträger verwendet werden können. Arbeitet man hingegen mit Temperaturen unter 0° Grad, einem sogenannten Eisspeicher, werden

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Wasser-Glykol-Mischungen eingesetzt. Neben sensiblen Wärmespeicher mit flüssigen Speichermaterial sind auch Feststoffe, wie Kies oder Eisendioxide verbreitet (Sterner & Stadler, 2014).

2.2 Latentwärmespeicher

Beim Latentwärmespeicher[12] wird zusätzlich zur sensiblen Wärme die für den Phasenwechsel notwendige Energie gespeichert, da das Speichern oder Abgeben von Wärme nicht durch eine fühlbare Temperaturdifferenz erfolgt. Das Ein- oder Ausspeichern des Speichers erfolgt über einen Phasenwechsel eines geeigneten Phasenwechselmaterial[13], bzw. über die Änderung des Aggregatszustandes des gewählten Speichermaterials, wie fest zu flüssig und umgekehrt, vorausgesetzt der Phasenwechsel findet in einem bestimmten Temperaturbereich um die Schmelztemperatur statt (Goeke, 2021). Beim Prozess wird über einen Wärmeträger Wärme zugeführt, wodurch das Speichermedium seinen Aggregatszustand ändert, und Wärme aufnehmen kann. Dabei bleibt die Temperatur konstant, bzw. die Wärme kann auf einem konstanten Temperaturniveau gespeichert werden, was zu einem glätten von Temperaturspitzen bei der Wärmeabgabe hilfreich sein kann (Goeke, 2021). Durch das Zuführen von Wärme bei konstanter Temperatur kommt es zu einer Unordnung im Atomgitter des Speichermaterials, was eine Entropieerhöhung zur Folge hat. Die Wärmeabgabe erfolgt durch die Kristallisation der Schmelze, wobei die Atome sich wieder anordnen und gleichzeitig die Entropie im System sinkt.

Diese Technologie hat den Vorteil, dass bei geringen Temperaturdifferenzen zwischen Be- und Entladen wesentlich größere Energiemengen abgedeckt werden können und die Energiedichte viel höher ist. Je nach Speichermedium können hier Temperaturen zwischen -40 und bis weit über 1000 °C erreicht werden (Goeke, 2021). Ein weiterer Vorteil von latenten Wärmespeichern ist, dass Wärme über lange Zeit relativ verlustfrei gespeichert werden kann (Goeke, 2021). Zu beachten ist, dass es bei einem Phasenwechsel zu einer Volumenänderung des gewählten Speichermaterials kommt. Allerdings ist die Technologie von latenten Wärmespeichern noch nicht ausgereift und daher kostenintensiv und bisher wenig verbreitet. Zusätzlich hat man die Herausforderung, dass PCMs im Vergleich zu Wasser eine niedrigere thermische Leitfähigkeit haben, was wiederum zu langsameren Wärmeübertragungsraten und Reaktionszeiten von Speichern führt. Hier versucht man zum Beispiel mit zusätzlichen Rippen zwischen dem Wärmeübertragungsfluid und dem PCM entgegenzusteuern oder das Wärmeübertragungsfluid wird direkt mit dem PCM vermischt. Da man bei latenten Wärmespeichern zusätzlich zwischen aktiven und passiven Systemen

[12] engl. latent heat storage (LHS)
[13] engl. phase change material (PCM)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

unterscheidet, spricht man bei einem direkten Kontakt zwischen Wärmefluid und PCM von einem aktiven System. Sind die beiden Medien hingegen voneinander getrennt, handelt es sich um ein passives System, das in der Regel eine geringere Entladeleistung aufweist. Der Wirkungsgrad solcher Systeme hängt stark von der Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Materials und der Oberflächenbeschaffenheit des Wärmetauschers ab. Folgende Flüssigkeiten werden als PCM verwendet (Goeke, 2021):

- Wässrige Salzlösungen
- Paraffine
- Fettsäuren
- Salzhydrate
- Zuckeralkohole
- Nitrate
- Hydrooxide
- Chloride
- Karbonate
- Fluoride

Damit während der Entladung eine getrennte Rückgewinnung des Speichermediums möglich ist, muss gewährleistet sein, dass sich die beiden Stoffe in der flüssigen Phase nicht vermischen. Eine weitere Herausforderung ist die Phasenseparation der anorganischen PCMs wie z.B. Salzhydrate. Diese tritt aufgrund von inkongruenten Schmelzen und Dichteunterschieden zwischen Wasser und dem anorganischen Salz auf. Um hier entgegenzuarbeiten kann man das PCM verkapseln was wiederrum das Problem der thermischen Instabilität der PCMs löst, da PCMs, speziell Salzhydrate, im Laufe der Speicherzyklen abgebaut werden können (Goeke, 2021).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

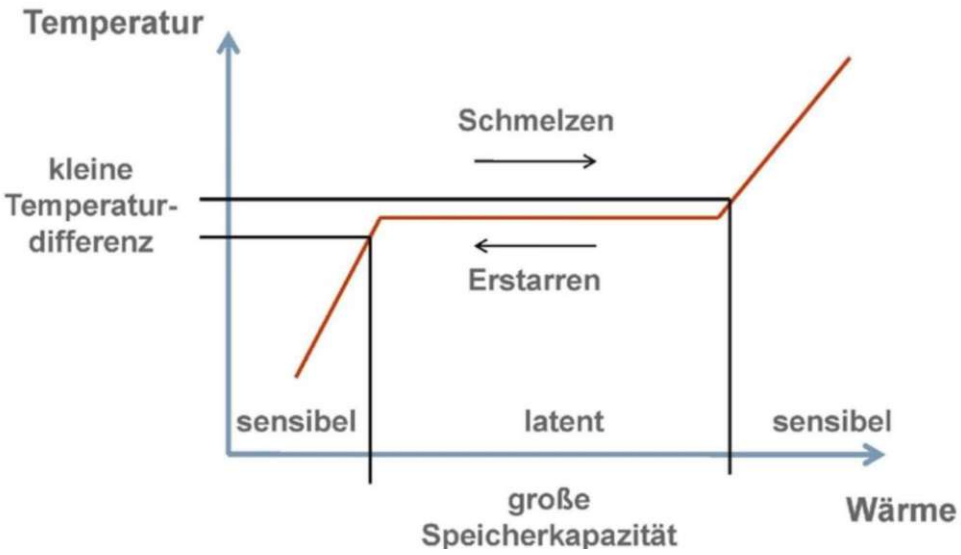


Abbildung 3: Zusammenhang Temperatur und speicherbare Wärmemenge (Institut für Luft- und Kältetechnik & gemeinnützige GmbH, 2025)

Abbildung 3 stellt den Unterschied der gespeicherten Wärmemenge zwischen sensiblen und Latentwärmespeichern dar. Eine Wärmezufuhr führt zunächst zu einen linearen Anstieg der Temperatur bis hin zur Schmelze, während des Schmelzvorganges hingegen eine isotherme Wärmezufuhr stattfindet.

Im Vergleich von sensiblen und latenten, bzw. thermochemischen Speicher haben sensible Wärmespeicher eine geringere Energiedichte, da diese durch die spezifische Wärmekapazität und die maximale mögliche Temperatur beschränkt ist.

2.3 Thermochemische Wärmespeicher

Thermochemische Wärmespeicher[14] nutzen den Wärmeumsatz einer reversiblen chemischen Reaktion. Durch eine endotherme Reaktion wird der Speicher geladen und nimmt Enthalpie auf. Die exotherme Reaktion gibt die gespeicherte Energie in Form von Wärme wieder frei, so wird der Speicher entladen. Die Energie bei thermochemischen Speichern wird nicht als Wärme, sondern als Reaktionsenergie gespeichert. Dadurch kommt es in der Theorie bei der Entladung zu keinen Verlusten und lange Speicherdauern werden ermöglicht (Goeke, 2021). Thermochemische Wärmespeicher ermöglichen eine hohe Energiedichte, bieten durch die Bereitstellung unterschiedlicher Temperaturniveaus vielseitige Anwendungsgebiete, befinden sich allerdings ähnlich wie die Latentwärmespeicher noch in der Grundlagenforschung. Man unterscheidet thermochemische Speicher nach deren Prozessen: chemische reversible Reaktion, Adsorptionsspeicher und Absorptionsspeicher (Goeke, 2021).

[14] engl. thermochemical heat storage (THS)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2.4 Praktische Anwendungen von saisonalen Energiespeichern

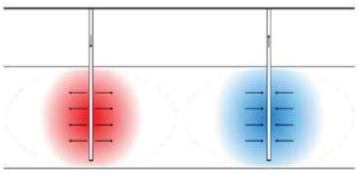
Die Technologie der sensiblen saisonalen thermischen Energiespeicher[15] kann die im Sommer gespeicherte Energie für den Winter zur Abdeckung des Heizwärmebedarf zur Verfügung stellen und trägt somit zur effizienteren Nutzung von erneuerbaren Energien bei. Ein solches System erhöht die Flexibilität bei der Erzeugung und Übertragung von Wärme, da saisonal bedingtes Angebot und Nachfrage ausgeglichen werden kann. Welche saisonalen thermischen Wärmespeicher zum Einsatz kommen soll, hängt von vielen Rahmenbedingungen ab. Folgende Aspekte sind im Vorfeld zu klären und können bei einer Entscheidung helfen (Goeke, 2021):

- zu speichernde Wärmemenge
- Betriebstemperatur
- Verfügbarkeit und Preis des Speichermaterials
- Umweltverträglichkeit der Speichermaterials
- geologische Gegebenheiten, wo der Speicher stehen soll
- genaue Betrachtung des Anwendungsfalles
- Tag/Nach-Variation
- saisonale Abhängigkeiten
- Leistungsschwankungen

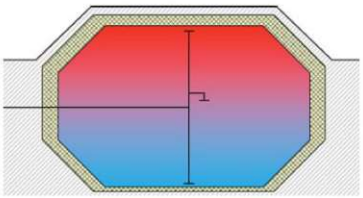
Bei den SSTES unterscheidet man vier Technologien, die der Tankspeicher (TTES), Erdbeckenspeicher (PTES), Bohrlochspeicher (BTES) und die der Aquiferspeicher (ATES), schematisch dargestellt in Abbildung 4 (Ruesch, Florian, 2019).

[15] engl. sensible saisonal thermal energy storage (SSTES)

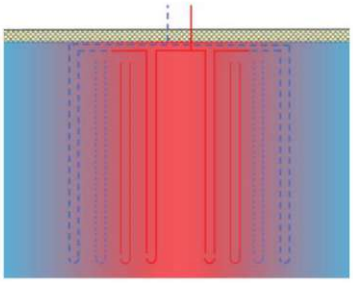
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



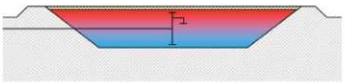
Schematischer Vertikalschnitt durch einen Aquifer-Wärmespeicher



Schematische Darstellung eines erdvergrabenen Betontanks



Schematischer Vertikalschnitt durch einen Erdsonden-Wärmespeicher



Schematische Darstellung eines Erdbecken-Wärmespeichers

Abbildung 4: Darstellung der vier großen Gruppen der SSTES (Ruesch, Florian, 2019)

Aquiferspeicher sowie Bohrlochspeicher nutzen den Untergrund als großvolumige Speicher, unterscheiden sich jedoch grundlegend im Speichermedium und Wärmetransportmechanismus. Beim Aquiferspeicher wird Wasser aus einem Brunnen entnommen, oberirdisch erwärmt, z.B. über Solarenergie, oder gekühlt und über eine zweite Bohrung in den Grundwasserleiter (Aquifer) zurückgepumpt. Aquiferspeicher sind dabei auf durchlässige Grundwasserleiter angewiesen. Bohrlochspeicher arbeiten hingegen mit vertikalen Erdsonden, in denen die Wärme ausschließlich durch Wärmeleitung im umgebenden Erdreich verteilt wird. Beide Systeme erfordern geeignete geologische Rahmenbedingungen, ermöglichen jedoch hohe Speicherkapazitäten und eignen sich besonders für langfristige Wärmebereitstellung (Ruesch, Florian, 2019). Erdbecken-Wärmespeicher bestehen aus einer mit Kunststoffdichtungsbahnen ausgekleideten, gedämmten Erdgrube, die mit Wasser oder einem Kies-Wasser-Gemisch befüllt wird und große saisonale Speichervolumina bei vergleichsweise einfacher Bauweise ermöglicht. Wasser als Speichermedium bietet hohe Wärmekapazitäten und gute thermische Schichtung, während Kies-Wasser-Speicher eine belastbare, nutzbare Oberfläche erlauben, jedoch geringere Temperaturspreizungen und Kapazitäten aufweisen. Tankspeicher sind weit verbreitet und in verschiedenen Ausführungen erhältlich. Sie unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich des Materials der Mantelhülle. Üblich sind Beton, Stahl oder faserverstärkter Kunststoff, sowie in der Betriebsweise als drucklose oder druckbehaftete Speicher. Je nach Anwendung werden freistehende Behälter oder erdvergrabene Tanks eingesetzt. Diese haben ihren Einsatzbereich in den Ein- oder

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Mehrfamilienhäusern wie auch in großskaligen Anlagen, wo Speicher mit mehreren Millionen Litern Speichervolumen betrieben werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Speichertechnologie besteht in ihrer Standortunabhängigkeit, da Tanks nahezu unabhängig von geologischen Gegebenheiten errichtet werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine LCA für Tank- und Latentwärmespeicher durchgeführt. Im Folgenden werden daher beide Speicherarten im Detail beschrieben und hinsichtlich ihrer Eigenschaften, Einsatzgebiete und ökologischen Bewertung näher betrachtet.

2.4.1 Tankspeicher

Im einfachsten Fall handelt es sich bei einem Tankspeicher zur Speicherung von sensibler Wärme um einen Wasserspeicher, einen herkömmlichen Pufferspeicher wie er bereits in vielen Anlagen zum Einsatz kommt. Ist der Speicher entsprechend groß und ausreichend isoliert, kann das System auch zur Speicherung von saisonaler Wärme verwendet werden.

Je nach Größe und Anwendung wird der Speicher aus Stahlbeton, Stahl oder aus faserverstärktem Kunststoff ausgeführt und häufig mit dem Speichermedium Wasser betrieben. Im einfachsten Fall ist der Tankspeicher nach innen wasserdicht isoliert und hat nach außen hin eine ausreichende Isolierung, um die Wärmeverluste möglichst gering zu halten. Eine weitere Möglichkeit den Speicher effizient zu isolieren wäre den Speicher im Boden zu vergraben. Durch die temperaturabhängige Dichte des Wassers ist es im oberen Teil heißer als im unteren, da das kalte Wasser eine höhere Dichte im Vergleich zum heißen Wasser hat. Dadurch entsteht im Tank eine Temperaturschichtung. Zwischen den beiden Schichten bildet sich eine sogenannte Thermokline[16]. Um möglichst geringe thermische Verluste im Tank zu haben, sollte die Thermokline möglichst gering sein.

Um den Tankspeicher zu be- und entladen, machen Wasserein- und Wasserauslassöffnungen im oberen bzw. im unteren Teil besonders Sinn, um den thermodynamischen Effekt bestmöglich ausnutzen und um mögliche Turbolenzen zwischen den beiden Schichten zu verhindern. Man unterscheidet zwischen direkter und indirekter Speicherung. Bei der direkten Speicherung sind Speicher- und das Wärmeträgermedium ident, bei indirekter Speicherung gibt es eine stoffliche Trennung von Speicher- und Wärmeträgermedium, die Übertragung erfolgt durch einen Wärmeüberträger. Die Speicher können zur Heizungsunterstützung wie auch zur Trinkwasseraufbereitung oder als Warmwasserpufferspeicher in Kombination mit solarthermischen Anlagen verwendet werden. Warmwasserspeicher werden in Ein-

[16] = Übergang von Wasserschichten unterschiedlicher Temperaturen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

bzw. in Mehrfamilienhäusern eingesetzt und zunehmend in Quartieren. Tankspeicher bieten viele Vorteile und sind somit einer der gängigsten saisonalen Wärmespeicher: durch die Unabhängigkeit von den geologischen Bedingungen kann ein Tankspeicher fast überall aufgestellt werden. Zusätzlich kann der Speicher freistehen, in ein Gebäude integriert oder unterirdisch vergraben werden. Wird der Speicher unterirdisch vergraben, können Teile der Wärmeisolierung eingespart werden und hydrostatische Kräfte ausgeglichen werden. Bei freistehenden Speichern muss eine ausreichende Wärmeisolierung vorgesehen werden, um den thermischen Einfluss der Umgebung und damit verbundene Energieverluste zu minimieren.

Tankspeicher mit Speichermedium Wasser haben viele Vorteile (Wesselak et al., 2017):

- hohe Wärmekapazität: Wasser besitzt eine der höchsten spezifischen Wärmekapazitäten aller gebräuchlichen Flüssigkeiten und eignet sich daher besonders gut zur Wärmespeicherung
- Verfügbarkeit und Umweltverträglichkeit: Wasser ist kostengünstig, leicht verfügbar und ökologisch unbedenklich
- günstige Betriebseigenschaften: Tankspeicher ermöglichen hohe Lade- und Entladeleistungen bei zugleich stabilem Betriebsverhalten
- gestalterische Flexibilität: die Behälter können in unterschiedlichen Geometrien konstruiert werden und sowohl drucklos als auch druckbehaftet ausgeführt sein
- thermische Schichtung: durch geeignete Speicherhydraulik kann eine Temperatur- bzw. Dichteschichtung im Speicher ausgebildet werden, was den Wirkungsgrad erhöht
- gute Zugänglichkeit: Tanks sind in der Regel frei zugänglich und bieten daher einfache Möglichkeiten für Wartung und Reparatur.

Trotz dieser Vorteile bestehen auch mehrere Nachteile, die den Einsatz insbesondere in großtechnischen oder saisonalen Anwendungen einschränken können:

- hohe Investitionskosten: der Bau großer Tankspeicher erfordert beträchtliche Material-, Isolations- und Installationsaufwendungen
- begrenzte Skalierbarkeit: Aufgrund statischer und konstruktiver Anforderungen sind Speichervolumina oberirdischer Wassertanks nur begrenzt erweiterbar
- Wärmeverluste: über längere Speicherzeiträume treten trotz guter Isolierung erhebliche Wärmeverluste auf, insbesondere bei saisonaler Nutzung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- hoher Flächenbedarf: großvolumige Speicher beanspruchen beträchtliche Stellflächen, was ihre Integration in dicht bebaute Gebiete erschwert
- Materialanforderungen: der langfristige Kontakt von Wasser mit Metall oder Beton kann Korrosion und Materialermüdung verursachen, wodurch regelmäßige Inspektionen erforderlich sind
- Temperaturbegrenzung: aufgrund des Siedepunkts von Wasser ist die Speichertemperatur in drucklosen Systemen auf etwa 100 °C begrenzt; höhere Temperaturen erfordern druckbehaftete Ausführungen mit erhöhtem technischem Aufwand
- begrenzte Langzeitspeicherung: für saisonale Anwendungen ist die Energiedichte von Wasser im Vergleich zu anderen Speichermedien gering, was große Volumina notwendig macht

In Abbildung 5 ist ein Tankspeicher in seiner einfachsten Form dargestellt:

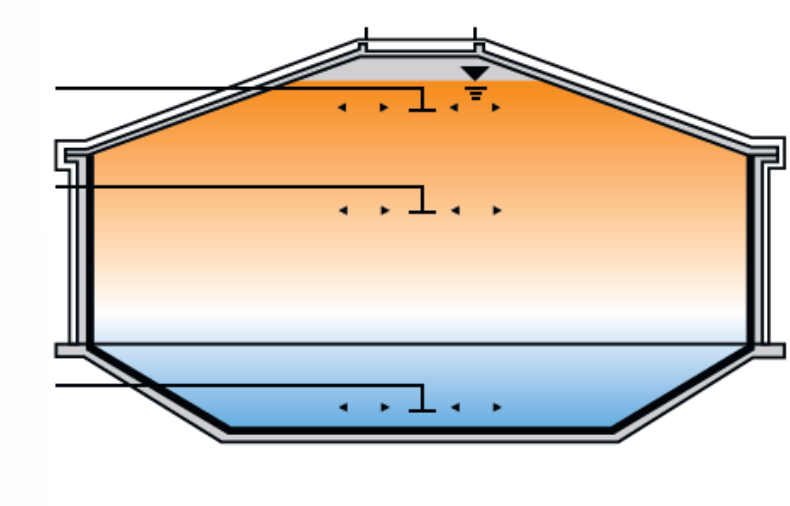


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung eines Tankspeicher (van Helden et al., 2021)

Ein Tankspeicher, wie in Abbildung 5 dargestellt, ist in einer Vielzahl von Größen und Bauformen erhältlich und kann je nach Anwendungsfall freistehend, teilweise im Erdreich eingebettet oder vollständig unterirdisch installiert werden. Der Aufbau besteht in der Regel aus einem zylindrischen Behälter mit einer Mantelhülle aus Stahl, Beton oder faserverstärktem Kunststoff, die eine hohe Druck- und Temperaturbeständigkeit gewährleistet. Zur Minimierung von Wärmeverlusten werden die Speicher mit mehrschichtigen Wärmedämmungen und häufig zusätzlich mit einer Erdüberdeckung versehen, die als thermische Isolation dient.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Das Unternehmen Jenni Energietechnik AG stellt beispielsweise solche Wassertankspeicher her, die in verschiedenen Größen, von kleineren Systemen für Einfamilienhäuser bis hin zu großvolumigen Speicheranlagen im mehrtausend Kubikmeter-Bereich, verfügbar sind. Ein typisches Beispiel eines im Gebäudebereich eingesetzten Speichers ist in Abbildung 6 gezeigt:

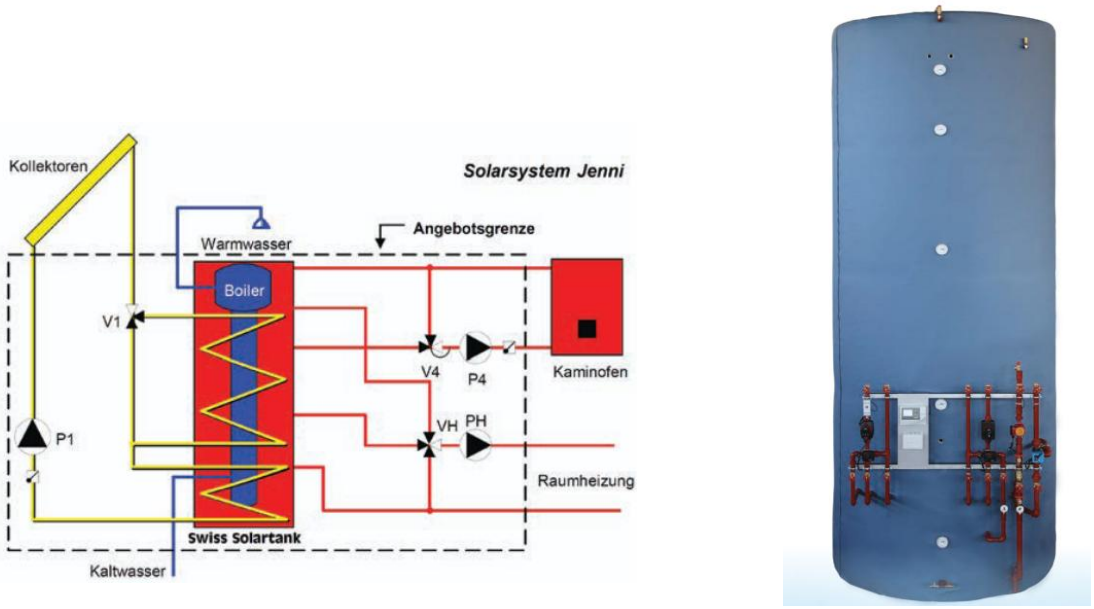


Abbildung 6: Vereinfachtes Regelschemata (links) und Tankspeicher mit 9.400 l mit Armaturen und Steuerung (Jenni Energietechnik AG, 2025a)

Bauart

TTES können je nach Anwendungsfall oberirdisch, unterirdisch, halbversenkt oder in Gebäuden integriert errichtet werden. Ihre geometrische Ausführung hat wesentlichen Einfluss auf die thermische Effizienz, die mechanische Stabilität und die Temperaturschichtung im Speicher. Die technisch ideale Form zur Minimierung von Wärmeverlusten wäre die Kugel, da sie das geringste Oberflächen-Volumen-Verhältnis aufweist (Sterner & Stadler, 2014). Da Kugelbauten jedoch konstruktiv aufwendig und kostenintensiv sind, werden in der Praxis überwiegend zylindrische Speicher eingesetzt. Das Höhe-Durchmesser-Verhältnis ist dabei eine entscheidende Entwurfsgröße. Es beeinflusst sowohl die Wärmeschichtung im Speicher als auch den Materialbedarf und die Standsicherheit. Typische Werte für Wärmespeicher liegen zwischen 2:1 und 5:1 (Höhe : Durchmesser) (Sterner & Stadler, 2014). Zylindrische Druckspeicher mit Volumina zwischen 0,1 und 200 m³ werden meist mit nach außen gewölbten Böden gefertigt, um dem Innendruck standzuhalten. Ab Größen von etwa 50.000 m³ kommen häufig Flachbodentanks zum Einsatz, die sich konstruktiv und wirtschaftlich besser realisieren lassen (Sterner & Stadler, 2014).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Speichergröße

Damit sich ein TTES wirtschaftlich betreiben lässt, ist eine Mindestgröße erforderlich. Mit zunehmender Speichergröße verbessern sich die Energieeffizienz und die Verlustbilanz, da das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen abnimmt. Das sogenannte Oberflächen-Volumen-Verhältnis beschreibt den Zusammenhang zwischen der Wärme abgebenden Fläche und der gespeicherten Energiemenge. Je kleiner dieses Verhältnis ist, desto geringer sind die spezifischen Wärmeverluste pro Energieeinheit. Da die Wärmeverluste über die Oberfläche zunehmen, die gespeicherte Energiemenge jedoch mit dem Volumen wächst, steigt die Gesamteffizienz des Systems mit wachsender Speichergröße deutlich an. Das Oberflächen-Volumen-Verhältnis ist somit eine zentrale Kennzahl zur Bewertung der thermischen Verlustanfälligkeit und der wirtschaftlichen Betriebsgrenzen von Tankspeichern (Sterner & Stadler, 2014).

Wärmedämmung

Um thermische Verluste zu minimieren, spielt die Wärmedämmung bei Tankspeichern eine zentrale Rolle. Der Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz und den resultierenden Wärmeverlusten lässt sich durch Formel (2) beschreiben (Goeke, 2021):

$$Q_{Verlust} = U * A * (T_S - T_U) \quad (2)$$

$Q_{Verlust}$ = Wärmeverlust
U = Wärmedurchgangskoeffizient
A = Fläche
T_S = Speichertemperatur
T_U = Umgebungstemperatur

Aus der Formel (2) wird deutlich, dass neben der Oberfläche A und der Umgebungstemperatur insbesondere der Wärmedurchgangskoeffizient U maßgeblich für die Qualität der Wärmedämmung ist. Er beschreibt die Wärmeleistung, die bei einer Temperaturdifferenz von 1K durch eine 1m² große Fläche übertragen wird. Je niedriger der U-Wert, desto besser die Dämmwirkung. Bei der Auswahl geeigneter Dämmstoffe ist darauf zu achten, dass diese einen hohen Diffusionswiderstand aufweisen und zugleich als Dampfsperre fungieren, um Feuchtigkeitsaufnahme und Wärmebrücken zu vermeiden. Häufig werden Weichschaum-Formteile aus synthetischem Kautschuk (EPDM) verwendet, während Fugen und Dichtungen meist aus Polyurethan (PU) bestehen. Weitere gängige Dämmstoffe sind Mineralwolle, Steinwolle und Glaswolle, die sich durch gute thermische Isolationseigenschaften und hohe Temperaturbeständigkeit auszeichnen (Sterner & Stadler, 2014).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tabelle 3 und Tabelle 4 werden die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmedurchgangskoeffizient verschiedener Materialien dargestellt:

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]
Wasser	0,562
Luft	0,0262
Beton	2,1
Eisen	80
Aluminium	235
Polyurethan (PUR)	0,021-0,035

Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien (Sterner & Stadler, 2014)

Material	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeit U [W/(m² K)]
Beton	25	3,3
Mauerziegel	24	1,5
Massivholz	20,5	0,5

Tabelle 4: Wärmedurchgangskoeffizient verschiedener Materialien (Sterner & Stadler, 2014)

Eine hohe Dämmwirkung erreicht man auch, in dem man das Dämmmaterial durch Vakuum ersetzt, wie bei einer herkömmlichen doppelwandigen Thermoskanne, da Wärmeverluste bei Drücken von weniger als 0,001mbar nur durch Wärmestrahlung hervorgerufen werden. Vakuumdämmung wird eingesetzt wenn aufgrund von konstruktiven Grenzen eine erforderliche Dämmstärke nicht möglich ist (Sterner & Stadler, 2014).

Die Dämmung wird in der Regel auf die Mantelhaut aufgebracht. Entweder durch das Aufschäumen des Zwischenraums von Stahlwand und Verkleidungsblech oder durch das Verlegen von Dämmmatten oder Dämmplatten.

Speichermedium Wasser

Wasser ist aufgrund seiner günstigen physikalischen Eigenschaften das am häufigsten verwendetet Speichermedium bei sensiblen Wärmespeichern. Im Temperaturbereich von 0-95°C wird es besonders häufig in gängigen Pufferspeichern eingesetzt und kann in diesem Bereich kurzfristige wie saisonale Differenzen zwischen erzeugter und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

verbrauchter Wärme ausgleichen. Wasser besitzt eine hohe spezifische Wärmekapazität und hat gute Fließeigenschaften. Dazu kommt, dass Wasser unbedenklich, günstig und vielfach verfügbar ist. Warm- oder Heißwasserspeicher können direkt als auch indirekt beladen werden und werden häufig als Schichtenspeicher betrieben. Bei der Ausführung als Schichtenspeicher macht man sich den Dichteunterschied zwischen kalten und warmen Wasser zu nutze. Wasser besitzt eine geringe Wärmeleitfähigkeit, was wiederum den Wärmeaustausch zwischen kaltem und heißem Wasser erschwert. Hat man Betriebstemperaturen oberhalb von 100°C steigt der Dampfdruck an und die Anforderungen an den Wärmespeicher erhöhen sich maßgeblich. Daher werden Wärmespeicher mit Wasser als Speichermedium meist im Niedrigtemperaturbereich angewandt (Goeke, 2021).

Aggregatzustand Dampf

Wird Wasser in Form von Dampf als Speichermaterial genutzt, sind aufgrund der hohen Temperaturen stets erhöhte Drücke erforderlich. Der Wärmespeicher muss daher als druckfester Behälter ausgeführt sein, in dem Wasserdampf eingespeist und anschließend durch Kondensation wieder verflüssigt werden kann. Die Temperatur des Wassers entspricht dabei der jeweiligen Siedetemperatur unter dem herrschenden Druck. Diese Art von Dampfspeicher ist aufgrund des hohen konstruktiven Aufwands und der sicherheitstechnischen Anforderungen für den Einsatz oft wirtschaftlich nicht geeignet. Solche Systeme werden vorwiegend in der Industrie eingesetzt. Da jedoch weder ein konstantes Druck- noch Temperaturniveau über längere Zeiträume gewährleistet werden kann, sind Dampfspeicher für den Langzeiteinsatz nur bedingt geeignet (Goeke, 2021).

Speichermedium Thermoöl

Bei Temperaturen über 100°C wird meist ein Thermoöl anstatt Wasser als Speichermedium verwendet, da Wasser aufgrund der Verdampfung nur mehr als Dampf in komplexen Druckbehältern gespeichert werden kann. Gängige Thermoöle wie Mineral-, Synthetik- oder Silikonöle haben im Vergleich zu Wasser niedrigere Wärmeleitfähigkeiten. Zusätzlich muss die thermische Zersetzung beachtet werden, wodurch ein bestimmter Temperaturbereich vorgegeben werden muss. Da für die Speicherung von größeren Energiemengen aufwendige Drucktanks benötigt werden, eignet sich diese Art von Speichermedium nicht für Langzeitspeicher. Neben der niedrigen Wärmeleitfähigkeit stehen auch andere Eigenschaften wie die Umweltverträglichkeit nachteilig dem Wasser gegenüber (Goeke, 2021).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Mantelmaterial

Die Behälter sind zumeist aus Beton, Stahl oder aus glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK) gefertigt. Heutzutage gibt es Behälter aus GFK mit einem Fassungsvolumen von bis zu 100.000m^3 (Haase Tank GmbH, 2025a). Behälter aus glasfaserverstärkten Kunststoffen können viele Vorteile bieten. So können solche Speicher direkt vor Ort montiert werden, haben ein geringes Gewicht, GFK ist korrosionsfrei, ist alterungsbeständig und hat gleichzeitig eine hohe Isolierfähigkeit (Haase Tank GmbH, 2025a). Bei sehr großen Speichern wird oftmals hochfester und ultrahochfester Beton verwendet, da dieser zugleich die Abdichtfunktion nach innen übernimmt und auf eine extra Auskleidung im inneren verzichtet werden kann (Sterner & Stadler, 2014). Speicher für den häuslichen Gebrauch bestehen in der Regel aus korrosionsunempfindlichen Materialien wie Edelstahl.

Be- und Entladen

Bei Warmwasserspeichern unterscheidet man zwischen direkter und indirekter Be- und Entladung. Bei der direkten Beladung ist das Wärmespeichermedium auch gleichzeitig das Wärmeüberträgerfluid, hier gibt es keine hydraulische Trennung. Das erzeugte Warmwasser wird im Idealfall oben in den Speicher eingespeist. Durch die direkte Be- und Entladung ist eine einfache Bauart möglich, da innere Speichereinbauten wegfallen. Bei einer indirekten Beladung ist ein Wärmetauscher notwendig über welchen die Wärme an das Speichermedium abgegeben werden kann. Die indirekte Be- und Entladung wird dann notwendig, wenn unterschiedliche Flüssigkeiten für den Wärmetransport und die Wärmespeicherung verwendet werden. Angewendet findet man solche Konzepte zum Beispiel, wenn ein Solarkollektor-Kreislauf mit einem fortschutz- und verdampfungssicheren Wasser-Alkohol-Gemisch betrieben und die Wärme über einen Wärmetauscher an das Heizwasser in einem Tank abgegeben wird. Ein Vorteil der indirekten Be- und Entladung ist der bessere Schutz vor Korrosion, Verschmutzung und Speichermaterialverlust, da durch die geschlossenen Systeme keine Stoffanbindung an die Umwelt besteht. Abbildung 7 zeigt einen zylindrischen Wärmespeicher mit einem Edelstahlwellrohr als Wärmetauscher (Haase Tank GmbH, 2025b). Dieses System stellt eine vollständige Trennung von Wärmeträgerfluid und Speichermedium dar.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

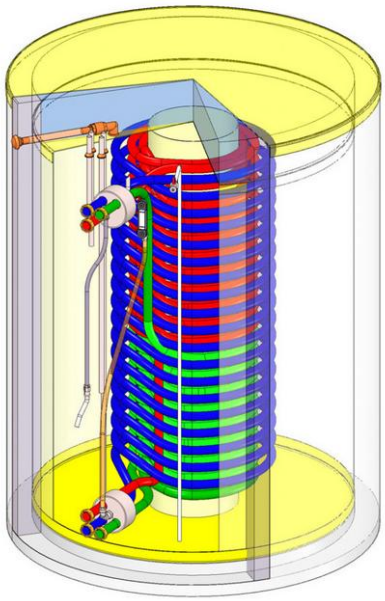


Abbildung 7: Wärmespeicher mit Wärmetauscher aus Edelstahlwellrohr (Haase Tank GmbH, 2025b)

Prinzip der Schichtenspeicher

Beim Schichtenspeicher macht man sich das physikalische Prinzip der temperaturabhängigen Dichte einer oder mehrerer scharfen thermischen Trennlinien zu Nutze. Da sich mit steigender Temperatur die Dichte des Wasser verringert, steigt der erwärmte Teil des flüssigen Speichermediums nach oben. Somit sammelt sich das kalte Wasser im unteren Teil des Speichers. Das wird insbesondere genutzt, um den Speicher unten zu beladen und oben zu entladen. In Abbildung 8 ist das Prinzip eines Schichtenspeicher mit einer scharfen Trennlinie grafisch dargestellt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

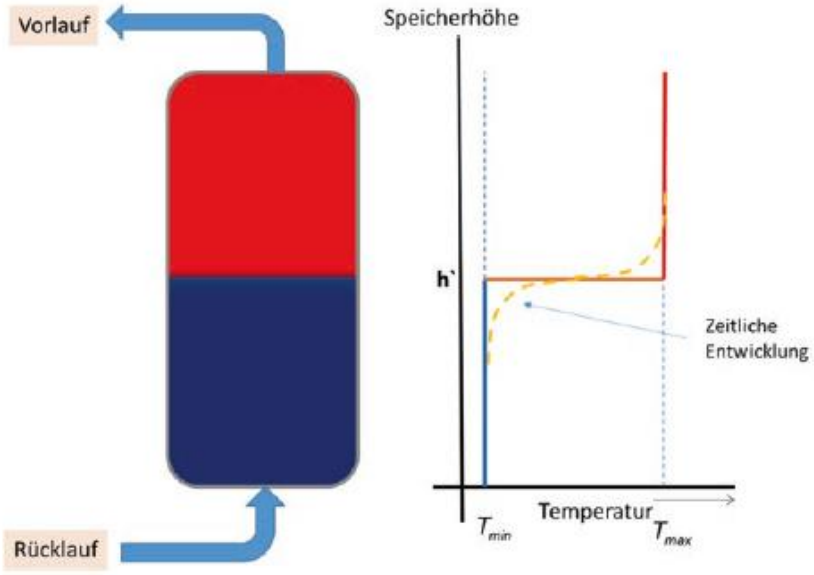


Abbildung 8: Prinzip eines ideal geschichteten Speicher (Goeke, 2021)

Im ideal geschichteten Speicher wird durch die Beladung das warme Medium oben gespeichert und die Thermokline von oben nach unten verschoben. Die Entladung erfolgt im umgekehrten Prinzip. Um die nutzbaren Wärmeinhalte möglichst auszunutzen sind mindestens zwei Temperatursensoren notwendig. In der Realität hat man durch das Be- und Entladen auch mit Strömungen zu tun, welche den idealen Speicher stören. Daher sollte der Speicher möglichst impulsarm be- und entladen werden, was mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und großen Einströmquerschnitten erreicht werden kann. Der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die thermische Schichtung ist gegeben. Wenn bei einer großen oder unsymmetrischen Einströmung eine Turbulenz entsteht, kann die thermische Schicht gestört bzw. zerstört werden. Das hat das Ergebnis, dass der exergetische Vorteil nicht mehr vorhanden ist. Daher gilt es, insbesondere bei der direkten Beladung von Speichern Turbulenzen zu vermeiden (Goeke, 2021). Gerade für Großspeicher ist der Energieaustausch über Be- und Entladen die einzig ökonomische sinnvolle Möglichkeit (Sterner & Stadler, 2014).

2.4.2 Latente Wärmespeicher

Bei den Speichermaterialien latenter Wärmespeicher handelt es sich um sogenannte Phasenwechselmaterialien[17]. Diese Materialien speichern Wärme, indem sie beim Phasenübergang, meist zwischen fest und flüssig, latente Wärmeenergie aufnehmen oder abgeben. Im Gegensatz zu Wasser, das sowohl als Speichermedium als auch als Wärmeträger zum Verbraucher eingesetzt werden kann, verbleibt das

[17] engl. phase change material (PCM)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Phasenwechselmaterial dauerhaft im Speicher und gibt seine Energie lediglich über Wärmeübertrager an das Heizsystem ab. Phasenwechselmaterialien können in unterschiedlichen Formen in den Speicher eingebracht werden: als gebundenes Granulat, in makroverkapselter Form, wie z. B. Kugeln, Platten oder als pumpfähiges Fluid, ein sogenannter Slurry. Die Wahl der Form hängt von der jeweiligen Anwendung, den Wärmeübertragungsbedingungen und der Betriebsweise des Speichers ab (Goeke, 2021). Da die Schmelztemperatur vom Speichermedium konstant bleibt, ist dieser Art von Speicher für die Stabilisierung von Kühl- und Heizkreisläufen im Einsatz. Bei der Wahl der Phasenwechselmaterialien ist die geeignete Phasenwechseltemperatur, eine hohe Wärmeleitfähigkeit, eine hohe spezifische Schmelzenthalpie, eine volumenabhängige Dichte beim Phasenwechsel wichtig (Goeke, 2021).

Die noch nicht vollkommen ausgereifte Technologie der Latentwärmespeicher spiegelt sich auch in den am Markt erhältlichen Phasenwechselmaterialien wider. Je nach eingesetzten PCM kann es zur Unterkühlung, zu Volumenänderungen oder zur Separierung kommen, was das System technisch komplex macht. Dadurch sind Latentwärmespeicher in der Regel auch teurer als sensible Wärmespeicher. Damit ein Material als PCM verwendet werden kann, sollten folgende Kriterien, bezüglich ökomischen, physikalischen und technischen Aspekten diskutiert werden (Sterner & Stadler, 2014):

Ökonomische Kriterien:

- niedriger Preis
- Verfügbarkeit
- Umweltverträglichkeit; nicht oder wenig toxisch

Physikalische Eigenschaften:

- beherrschbare Unterkühlung
- hohe Phasenübergangsenthalpie und spezifische Wärmekapazität
- geeignete Schmelztemperatur
- gute Wärmeleitfähigkeit
- reproduzierbarer Phasenübergang

Technische Kriterien:

- physikalische und chemische Stabilität
- geringer Dampfdruck
- beherrschbare Volumenänderung
- geringe Korrosivität gegenüber Konstruktionswerkstoffen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- geeignetes Schmelz- und Erstarrungsverhalten;
- Zyklenstabilität

Prinzipiell gibt es bei den Phasenwechselmaterialien zwei große Gruppen, die organische und die anorganische PCMs. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Vor- und Nachteile (Ghasemi et al., 2022):

organische PCM (Paraffine)	**anorganische PCM (Salzhydrate)**
Vorteile: • nicht korrosiv • chemisch und thermisch stabil • keine oder geringe Unterkühlung	Vorteile: • höhere Phasenwechselenthalpie • größere Dichte
Nachteile: • niedrige Phasenwechselenthalpie • geringere Dichte • geringere Wärmeleitfähigkeit • brennbar	Nachteile: • Unterkühlung • korrosiv • Phasenentmischung (Separation) • nicht Zyklenstabil

Tabelle 5: Übersicht der Vor- und Nachteile von Phasenwechselmaterialien (Ghasemi et al., 2022)

Zu den Gruppen der anorganischen PCM gibt es noch Untergruppen. Die Tabelle 6 gibt einen Überblick von verschiedenen Phasenwechselmaterialien und ihre Eigenschaften.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Material-klasse	Material	Summen-formel	Schmelz-temperatur [°C]	Schmelz-enthalpie [kJ/kg]	Wärmeleit-fähigkeit [W/m²K]	Dichte [kg/m³]
eutek-tische Salz-wasser-mischung	Wasser/ Natrium-chlorid	H_2O/NaCl	-21	222		1165 (flüssig 20°C)
Wasser	Wasser	H_2O	0	334	0,597 (flüssig, 20°C)	998 (flüssig, 20°C), 917 (fest)
Paraffin	Oktadekan	$C_{18}H_{38}$	28	245	0,315 (fest)	777 (flüssig)
Zucker-alkohol	Erythritol	$C_4H_5(OH)_6$	120	340	0,32 (flüssig, 140°C)	1300 (flüssig, 70°C)
Salze	Natriumnitrat	$NaNO_3$	307	172	0,51 (flüssig)	1890 (flüssig)
	Kaliumnitrat	KNO_3	333	266	0,5 (flüssig)	1950 (flüssig)
Salz-hydrate	Calcium-chlorid Hexahydrat	$CaCl_2$ *$6H_2O$	29	171	0,54 (flüssig, 39 °C)	1562 (flüssig, 32°C)
	Natrium-thiosulfat Pentha-hydrat	$Na_2S_2O_3$ *$5H_2O$	48	187		1670 (flüssig)
	Magnesium-chlorid Hexahydrat	$MgCl_2$ *$6H_2O$	117	165	0,57 (flüssig, 120°C)	(flüssig)

Tabelle 6: Übersicht verschiedener PCMs und ihre Eigenschaften (Sterner & Stadler, 2014)

In Tabelle 6 wird die breite Fächerung der PCM sichtbar. Die PCMs decken mit ihrer Schmelztemperatur einen Bereich von -21°C bis +333°C ab womit viele unterschiedliche Anwendungen abgedeckt werden können. Abbildung 9 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen der gespeicherten Wärme und der Temperatur von Wasser und zwei verschiedenen PCM. PCM 1 hat eine höhere Schmelzenthalpie als PCM 2. Daraus kann man ablesen, dass nur bei kleineren Temperaturdifferenzen die Phasenwechselmaterialien Vorteile gegenüber dem Wasser haben. Sind die Temperaturdifferenzen größer, wird die Schmelzenthalpie des PCM durch die des Wassers wieder ausgeglichen. Im Diagramm entspricht die Steigung der Geraden der spezifischen Wärmekapizität (Sterner & Stadler, 2014):

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

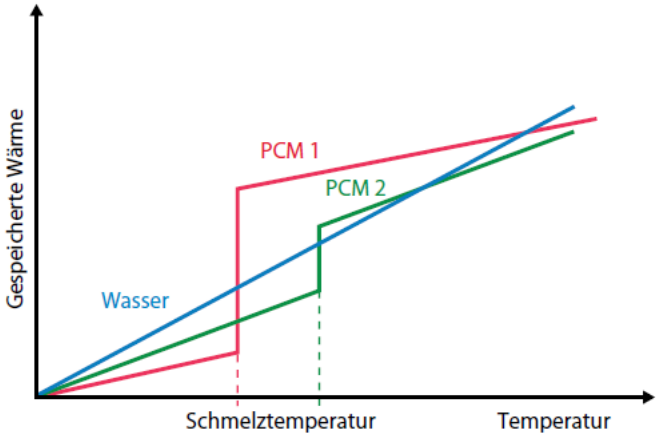


Abbildung 9: Gespeicherte Wärmemenge in Abhängigkeit der Temperatur (Sterner & Stadler, 2014)

Sind große Mengen an Energie in kleinen Temperaturintervallen zu speichern bietet sich ein Latentwärmespeicher an. Dabei ist der Exergieverlust geringer als bei sensiblen Speichern, da die Temperaturzufuhr nicht gleichzeitig die Temperaturdifferenz zur Umgebung erhöht (Sterner & Stadler, 2014).

Abbildung 10 zeigt verschiedene Klassen von PCM in Abhängigkeit von Schmelzenergie und der Schmelztemperatur.

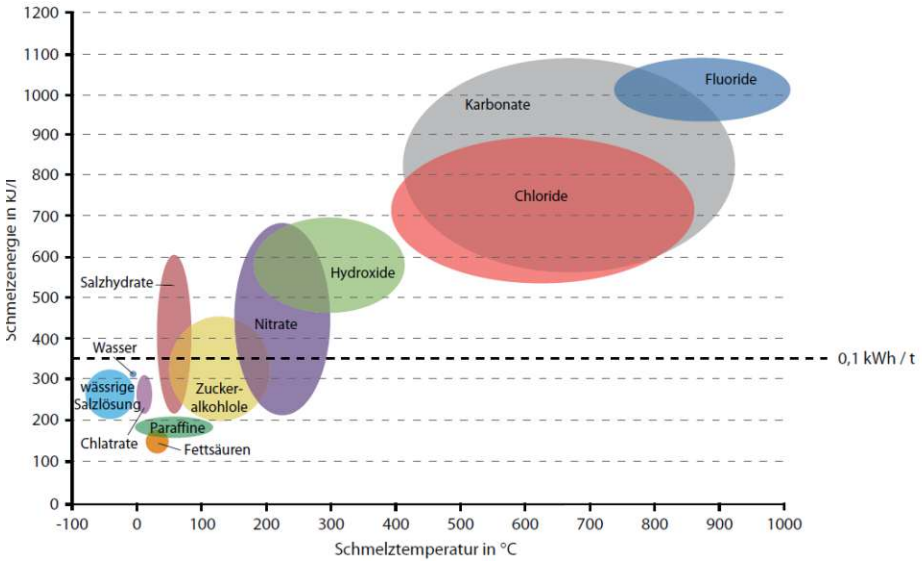


Abbildung 10: Materialklassen von PCM (Sterner & Stadler, 2014)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Salzhydrate

Salzhydrate sind Salze, die Wasser in stöchiometrischen festen Anteilen an die Kristallstruktur gebunden haben. Die Übergangsenthalpie kann bereits mit der geringsten Änderung der stöchiometrischen Konzentration negativ beeinflusst werden. Somit muss beim Einsatz von Salzhydraten als PCM über die Lebensdauer ein konstanter Wassergehalt sichergestellt werden. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass Salzhydrate ein kongruentes Schmelzverhalten aufweisen, da sich beim Aufschmelzen mehrere Phasen ausbilden und diese sich aufgrund ihrer Dichteunterschiede räumlich trennen. Dadurch verringert sich die Wärmekapazität mit einer zunehmenden Zyklenanzahl. Um diesen Effekt entgegenzuwirken kann in dem entsprechenden Tank umgerührt werden, bzw. gibt es auch Lösungen mit Makro- bzw. Mikroverkapselungen (Sterner & Stadler, 2014). Eine weitere Herausforderung ist, dass Salzhydrate zu hohen Unterkühlungsneigungen leiden was wiederum zu einer Verringerung der spezifischen Speicherkapazität führt. Um einer Unterkühlung entgegen zu wirken, können geeignete Keimbildner dem Material zugesetzt werden (Kavendra A. Thakare, 2015). Dabei wird eine Kristallisation knapp unterhalb der Schmelztemperatur bewirkt. Positiv zu erwähnen ist die hohe erreichbare volumenbezogene Speicherdichte und die sehr gute Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu den Paraffinen. Auch sind die Kosten bei Salzhydraten geringer als wie die bei Paraffinen (Sterner & Stadler, 2014).

Paraffine

Paraffine werden aus Rückständen bei der Destillation aus Erdöl gewonnen und sind ein Gemisch aus gesättigten Kohlenwasserstoffen, die sich größtenteils aus gesättigten und langkettigen Alkane zusammen setzen. Ein Vorteil ist, dass sich durch die Variation der Kettenlänge der Schmelzpunkt einstellen lässt, was durch das Mischen verschiedener langen Alkanketten ermöglicht wird. Paraffine schmelzen kongruent, da sie aus einem Gemisch von Paraffinen mit verschiedenen Kettenlängen bestehen. Dadurch weisen sie eine hohe Zyklenstabilität auf. Da Paraffine organisch sind, sind sie ökologisch unbedenklich, nicht gesundheitsschädlich und sind nicht korrosiv gegenüber Metallen. Des Weiteren weisen sie nur eine geringe Neigung bei Mikroverkapselung zur Unterkühlung auf. Ein Nachteil ist, dass Paraffine brennbar sind und ihre Wärmeleitfähigkeit sehr gering ist. Zu beachten ist auch, dass beim Phasenwechsel von Paraffinen ein Volumenänderung von bis zu 20% stattfinden kann (Sterner & Stadler, 2014). Paraffine können auch mit reinen und technischen Paraffinen gemischt werden, wobei hier in den meisten Fällen die Phasenübergangsenthalpie herabgesetzt und der Schmelzbereich erweitert wird. Um eine genaue Zusammensetzung zu gewährleisten gibt es das RAL-Gütezeichen der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Phase Change Materials (RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V., 2025).

Durch eine Kombination der Eigenschaften von latenten und sensiblen Wärmespeichern zeichnen sich sogenannte PCM-Slurries aus. PCM-Slurries sind Wärmeträgerflüssigkeiten, die bei geringen Temperaturspreizungen eine hohe Wärmekapazität bieten können. Sie werden durch Dispergieren eines organischen PCMs in Wasser hergestellt (Gschwander, o. J.). Sie vereinen die hohe Wärmekapazität des Phasenwechsels mit einer guten Transportfähigkeit und können damit eine bis zu vierfach höhere Speicherkapazität als Wasser erreichen (Ghasemi et al., 2022). Durch das annähernde isotherme Speicherverhalten der PCM wird mit dem PCM-Slurry eine sehr homogene Temperaturverteilung am Wärmeübertragungsfluid erreicht.

Verbundwerkstoffe

Um die geringe Wärmeleitfähigkeit zu erhöhen, oder um die mit steigender Zyklenanzahl auftretende Separation zu vermeiden, welche PCMs in ihrer reinen Form aufweisen, gibt es verschiedene Lösungsansätze. Ein Lösungsansatz um die Wärmeleitfähigkeit zu erhöhen wäre, eine Graphitmatrix in einem PCM zu tränken. Am ZAE Bayern konnte mit dieser Technik die Wärmeleitfähigkeit um den Faktor 8-100 erhöht werden, obwohl dem PCM nur ein Volumenanteil von 10% Graphit hinzugefügt worden ist. Ein weiterer Lösungsansatz ist die Verkapselung. Latentwärmespeicher bieten Vorteile als Wärmespeicher, sind jedoch ohne Verkapselung für den Einsatz in großen Mengen nicht geeignet (Ghasemi et al., 2022). Ein vielversprechender Ansatz zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von PCMs ist die Einbettung in metallische Schäume. In einer aktuellen Studie wurde Paraffin in hochporösen Kupferschaum (Porosität 97%, 20 PPI) infiltriert, wodurch die Wärmeübertragung innerhalb des Speichermaterials signifikant verbessert werden konnte (Venettacci et al., 2022). Stand heute gibt es Latentwärmespeicher noch nicht marktreif oder viele Anwendungen dazu. Anwendungen gibt es auch im Bereich der Kältespeicher.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3 Theorie und Methodik der LCA

Die ökologische Bewertung von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen gewinnt im Zuge steigender Nachhaltigkeitsanforderungen zunehmend an Bedeutung. Ein zentrales Instrument hierfür ist die LCA, mit der die Umweltauswirkungen entlang des gesamten Lebenszyklus systematisch erfasst und bewertet werden. Sie ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung, von der Rohstoffgewinnung über Herstellung und Nutzung bis hin zur Entsorgung, und bildet damit eine fundierte Grundlage für ökologische und ökonomische Entscheidungen.

Dieses Kapitel vermittelt die theoretischen und methodischen Grundlagen der LCA. Zunächst werden die Grundprinzipien, Zielsetzungen und Anwendungsbereiche erläutert, bevor der methodische Rahmen gemäß DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 beschrieben wird. Darauf aufbauend werden die Datenquellen und Datenbanken vorgestellt, die für die Modellierung und Berechnung relevant sind. Ergänzend werden relevante Standards und Protokolle, wie das Greenhouse Gas Protocol, herangezogen, um unterschiedliche Ansätze zur Emissionsbewertung einzuordnen (IPCC, 2023). Anschließend werden zentrale Bewertungskennzahlen, insbesondere CO_2-Emissionen, das Global Warming Potential (GWP) und der Energieverbrauch, diskutiert. Den Abschluss bildet eine kritische Betrachtung der Grenzen und Unsicherheiten der LCA, welche die methodischen Herausforderungen und Interpretationsspielräume solcher Bewertungen verdeutlicht.

Die Methodik der LCA ist in den internationalen Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 standardisiert. Sie stellt eine anerkannte Methode der ökologischen Wirkungs- bzw. Risikoabschätzung dar und ist in ihrer Zielsetzung mit einer Umweltverträglichkeitsprüfung vergleichbar. Gemäß DIN EN ISO 14040 kann die LCA insbesondere in folgenden Aufgabenfeldern eingesetzt werden (*DIN EN ISO 14040*, 2020; *DIN EN ISO 14044*, 2020):

- Identifikation von Verbesserungsmöglichkeiten, um Umweltauswirkungen von Produkten in allen Phasen ihres Lebenszyklus zu reduzieren
- Bereitstellung von Entscheidungsgrundlagen für Akteure in Regierung, Wirtschaft und Nichtregierungsorganisationen
- Auswahl geeigneter Leistungs- und Umweltindikatoren
- Unterstützung von Kommunikations- und Marketingmaßnahmen, beispielsweise durch die Entwicklung von Umweltzeichen (Eco-Labels)

Insgesamt ermöglicht die LCA somit nicht nur eine detaillierte Bewertung ökologischer Auswirkungen, sondern auch eine fundierte Grundlage für strategische Entscheidungen im Sinne nachhaltiger Entwicklung.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.1 Grundlagen und Zielsetzung der LCA

Soll die Umweltwirkung eines Produktsystems analysiert werden, schaut man sich im allgemeinen dessen Umweltbilanz an. Hierbei wird der gesamte Produktzyklus und dessen Lebensweg auf die potentielle Wirkung der Umwelt berechnet. Für die Durchführung der LCA werden umfangreiche Daten benötigt, welche gewöhnlich aus Datenbanken entnommen werden. Um eine hinzureichende Bilanz zu erstellen, ist ein möglichst genaues Modell notwendig. Je genauer das Modell, desto mehr Aussagekraft hat das Ergebnis der LCA. Für die Modellierung nimmt man sich eine Software zu Hilfe. In dieser Arbeit wurde mit *openLCA* gearbeitet. In den 1990er begann die Entwicklung von Standards für die Ökobilanzierung. 1997 wurde der erste Standard veröffentlich. Aktuell gibt es zwei gültige internationale Standards die die Durchführung und die Methode einer LCA definieren: DIN EN ISO 14040 und die DIN EN ISO 14044. Für die Ökobilanzierung gibt es aktuell keine verbindliche vorgeschriebene Vorgehensweise. Daher bietet die DIN EN ISO 14044 einen guten Leitfaden um die Vorgehensweise zu standardisieren und um Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Für die Durchführung der LCA wird der gesamte Lebenslauf analysiert, von der Rohstoffgewinnung und der Produktion, über die Anwendung bis hin zur endgültigen Entsorgung, wie in Abbildung 11 grafisch dargestellt (*DIN EN ISO 14040*, 2020):

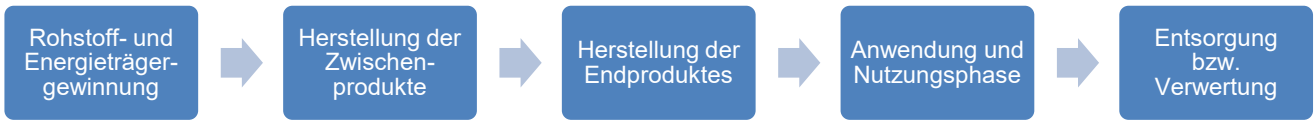


Abbildung 11: Fünf Phasen der LCA, eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14040

Eine LCA wird grundsätzlich in fünf Phasen durchgeführt und ist ein relativer Ansatz, der um eine funktionelle Einheit, welche zuvor definiert worden ist, aufbaut. Die funktionelle Einheit definiert sich über die Funktion des Produktsystems. Dieser Ansatz ermöglicht, dass unterschiedliche Produktsysteme mit gleicher Funktion verglichen werden können und wird in der DIN EN ISO 14040 so beschrieben.

3.2 Methodischer Rahmen der LCA

Material-, Energie- und Geldströme treten im gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung auf. Oft werden diese Ströme nur für bestimmte Phasen kalkuliert: für die Produktions- oder für die Nutzungsphase. Die verwendeten Ressourcen für den gesamten Lebenszyklus und deren Umweltauswirkungen werden von Konsumenten und Unternehmen oftmals nicht berücksichtigt. Ein typischer Produktlebenszyklus geht über den Rohstoffabbau und die Produktion bis hin zur

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Verwendung und abschließend zur Entsorgung. Dabei betrachtet man alle Ressourcen und Energien, welche in das System eingebracht werden. In sich geschlossene Systeme kommen nur in der Natur vor. Das Denken in Lebenszyklen hilft dabei, negative Effekte zu reduzieren und gleichzeitig die positiven Effekte zu verstärken. Startet man mit der Betrachtung gleich am Anfang des Lebenszyklus hat man den Blick für das meiste Einsparungspotential. Die Betrachtung aller Lebenszyklen hilft dabei, nicht einen Lebenszyklus auf Kosten einer anderen Phase zu verschlechtern („Ökologische Bewertung von Produktlebensläufen – Life Cycle Assessment“, 2024).

3.3 Aufbau und Ablauf der LCA

Die Methode der LCA beruht auf der Bestrebung, die Umweltauswirkungen eines Produktes möglichst umfangreich zu ermitteln und hält sich an die DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Die dabei betrachteten Systemgrenzen erstrecken sich von der Ressourcenentnahme bis hin zur endgültigen Entsorgung eines Produktes. Somit wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktes betrachtet. Die Standardisierung der Methode findet in den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 statt. Dabei soll erwähnt werden, dass es bei einer LCA keine vorgeschriebene Vorgehensweise gibt. Nach Norm teilt sich eine LCA in vier Hauptphasen auf, dargestellt in Abbildung 12. Die DIN EN ISO 14040 gibt die Grundsätze und Rahmenbedingungen für eine LCA vor. Eine LCA dient dazu, ein besseres Verständnis und eine Berücksichtigung der Auswirkungen auf die Umwelt eines Produktes zu generieren. Sie kann dabei helfen neue Wege aufzuzeigen, um die Umwelteigenschaften eines Produktes über seine verschiedenen Phasen des Lebensweges zu verbessern. Der Lebensweg ist nach Norm dabei definiert: von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Beseitigung. Außerdem kann sie eine wichtige Informationsquelle für Entscheidungsträger sein und das Marketing eines Produktes beeinflussen („Ökologische Bewertung von Produktlebensläufen – Life Cycle Assessment“, 2024). Abbildung 12 stellt die Phasen der LCA nach DIN EN ISO14044 dar.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

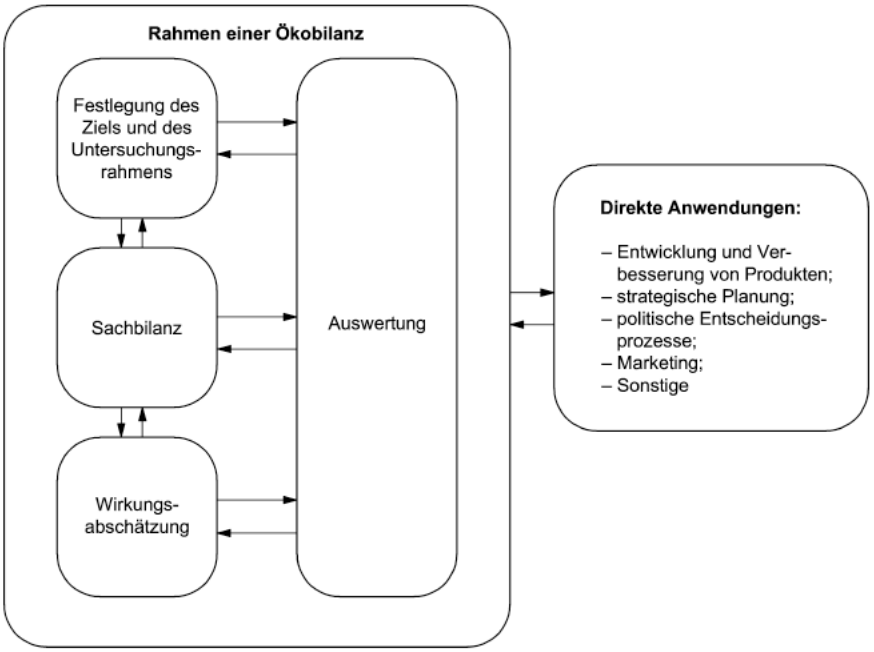


Abbildung 12: Phasen einer LCA (*DIN EN ISO 14040*, 2020)

Wie in Abbildung 12 dargestellt, gliedert die DIN EN ISO 14040 die LCA in vier Schritte:

1. Festlegung von Zielen und Untersuchungsrahmen
2. Sachbilanz
3. Wirkabschätzung
4. Auswertung

Die LCA nach DIN EN ISO 14040 betrachtet den gesamten Lebensweg, inklusive der Rohstoffgewinnung, Energieerzeugung bis hin zum Ende seines Lebens und der endgültigen Entsorgung. Da es sich um einen iterativen Ansatz handelt, können im Laufe der Durchführung der Bilanz bereits abgeschlossene Schritte noch erweitert und ergänzt werden, womit sich der Umfang und das Ergebnisse im Laufe der Durchführung durchaus noch ändern können. Ebenso ist eine Neudefinierung der Ziele im Laufe der LCA möglich, wenn neue Erkenntnisse während der Analyse gewonnen werden. In einer solchen LCA wird das betrachtete Produkt dabei als dessen Produktsystem, welches eine oder mehrere Funktionen ausführt, betrachtet. Das System wird dabei nicht durch das Endprodukt, sondern durch seine Funktion bestimmt. Das Produktsystem ist wiederum in sich durch verschiedene Gruppen von Prozessmodulen unterteilt, welche durch Flüsse von Zwischenprodukten oder Abfällen miteinander verbunden sind.

Die erste Phase ist die Ziel- und Untersuchungsrahmen-Definition, in der das Produkt sowie der Zweck der Studie festgelegt und beschrieben werden. Die zweite Phase ist die Sachbilanzanalyse bzw. das Lifecycle Inventory (LCI). In dieser Phase werden die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

für die Studie notwendigen Daten gesammelt, der Lebenszyklus modelliert sowie der Ressourcenverbrauch und die erzeugten Emissionen berechnet.

Die Ergebnisse der Sachbilanz bilden die Grundlage für die Wirkungsabschätzung, auch bekannt als Life Cycle Impact Assessment (LCIA). In dieser Phase werden die eingesetzten Ressourcen und verursachten Emissionen mithilfe der beiden Schritte Klassifizierung und Charakterisierung mit Umweltproblemen in Verbindung gebracht. Um die unterschiedlichen Umweltaspekte besser zu vergleichen, können sie zusätzlich gewichtet werden. Die vierte Phase ist die Interpretationsphase. In dieser Phase werden die Ergebnisse der vorhergehenden Phasen zusammengefasst und diskutiert („Ökologische Bewertung von Produktlebensläufen – Life Cycle Assessment“, 2024).

3.3.1 Festlegung von Zielen und Untersuchungsrahmen

Bevor Ziel und Untersuchungsrahmen festgelegt werden, müssen die beabsichtigte Anwendung der Studienergebnisse sowie die Gründe für die Durchführung der Untersuchung klar sein. Zur Phase der Ziel- und Untersuchungsrahmen-Definition gehören die Auswahl eines Produkts und seine Funktion, die Festlegung der funktionellen Einheit (FU), das Allokationsverfahren sowie die Definition des Zwecks der Studie. Ebenfalls erfolgt die Festlegung der Systemgrenzen, der berücksichtigten Umweltauswirkungen sowie des erforderlichen Detaillierungsgrades, einschließlich Methodik und Interpretation, die Datenanforderungen, Annahmen, Einschränkungen, Anforderungen an die Datenqualität, um die Zuverlässigkeit der Studie zu garantieren, sowie die Art der Ergebnisdarstellung, ob es sich um einen internen oder öffentlichen Bericht handelt.

Das Ziel und der Untersuchungsrahmen müssen präzise definiert werden. Die gesamte Datensammlung und die Ergebnisse beziehen sich darauf. Der Untersuchungsrahmen beinhaltet das zu untersuchende Produktsystem, mit den Funktionen des Produktsystems, und den zugehörigen funktionellen Einheiten und Systemgrenzen. Durch die Systemgrenze sind mögliche Annahmen und Beschränkungen definiert. Je klarer die Definition, desto besser lassen sich die Ergebnisse interpretieren. Die Systemgrenzen legen fest, welche Prozesse und Lebensphasen in die Betrachtung miteinbezogen werden. Ob nur die Rohstoffgewinnung und die Produktion eines Materials oder gesamte Lebenszyklus inklusive Nutzung und Entsorgung betrachtet wird. Zur Festlegung der Systemgrenzen können Cut-Off Methoden angewendet werden. Sollten Prozesse, In-/Outputs oder Lebenswegabschnitte weggelassen werden, ist dies zu begründen und zu dokumentieren. Hilfreich ist es hierfür die Prozesse anhand eines Systemfließbildes zu beschreiben. Dabei sollen die einzelnen Prozessmodule hinsichtlich ihrer In- und Outputs, sowie ihrer Arbeitsschritte und End- bzw. Zwischenprodukte definiert werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Idealerweise treten an den Prozessgrenzen nur Elementar- und Produktflüsse auf („Ökologische Bewertung von Produktlebensläufen – Life Cycle Assessment“, 2024).

Funktionelle Einheit (FU) [18]

Ein zentraler Bestandteil jeder LCA ist die funktionelle Einheit. Sie beschreibt die quantifizierte Funktion des untersuchten Produktsystems und dient als Bezugsgröße, auf die sich sämtliche Inputs, wie z. B. Ressourcen, Energie und Outputs, wie z. B. Emissionen und Abfälle beziehen. Durch diese einheitliche Referenzgröße wird gewährleistet, dass die Ergebnisse einer LCA eindeutig interpretierbar und zwischen unterschiedlichen Systemen vergleichbar sind. Die Definition der funktionellen Einheit orientiert sich an der beabsichtigten Anwendung und dem Zweck der Studie, da sie die Grundlage für die Bewertung und den Vergleich der ökologischen Auswirkungen verschiedener Produkte oder Prozesse bildet. Eine klar formulierte funktionelle Einheit ist somit entscheidend, um die Aussagekraft und Vergleichbarkeit von LCA-Ergebnissen sicherzustellen („Ökologische Bewertung von Produktlebensläufen – Life Cycle Assessment“, 2024).

3.3.2 Sachbilanz

Im zweiten Schritt der LCA, der Sachbilanz, werden alle Ressourcenaufwendungen und die Umwelteinwirkungen angeführt. Die Sachbilanz-Studie wird in drei Phasen gegliedert: die Festlegung der Ziele und des Untersuchungsrahmen, die eigentliche Sachbilanz und die Auswertung. Innerhalb der Sachbilanz findet die Datenerhebung und das Berechnungsverfahren zur Quantifizierung der relevanten Systemflüsse statt. Hierbei handelt es sich um einen iterativen Prozess. Während der Datenerhebung können neue Anforderungen oder Einschränkungen entdeckt werden, welche zu einer Änderung des Ziels und des Untersuchungsrahmens führen können. Nachdem die erforderlichen Daten erhoben worden sind, werden diese durch geeignete Berechnungsverfahren validiert. Sollte es notwendig sein, kann ein Allokationsverfahren angewendet werden. Abbildung 13 zeigt ein Beispiel wie ein Produktsystem für eine LCA dargestellt werden könnte. Dabei sind die dazugehörigen Einheitsprozesse durch Kästchen dargestellt. Diese beinhalten mindestens einen Input- und/oder Outputfluss welche durch Pfeile dargestellt sind (DIN EN ISO 14040).

[18] functional unit; engl., FU/FE

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

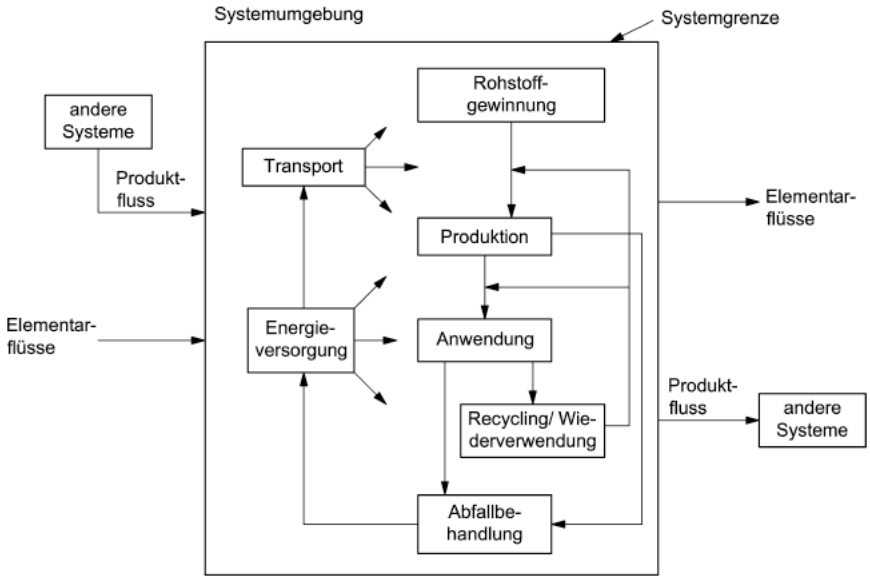


Abbildung 13: Beispiel eines Produktsystems für eine LCA (*DIN EN ISO 14044*, 2020)

Dabei wird das System nach außen hin durch die Systemgrenze begrenzt. Innerhalb der Systemgrenze wird der Produktlebenszyklus dargestellt. Dabei kann die Rohstoffgewinnung, der Transport, die Energieversorgung, die Produktion, die Anwendung, das Recycling sowie eine Abfallhandhabung berücksichtigt werden.

Die Sachbilanz bezieht sich auf die zuvor definierte funktionelle Einheit und es wird ein Modell des Produktsystems erstellt. Dabei müssen verschiedene Arten von Daten erfasst werden: der Einsatz von Rohstoffen und Energie, die Produkte und Kuppelprodukte, sowie Abfälle und Emissionen. Die sogenannten Inputs, welche für die Produktion benötigt werden, wie Ressourcen und Energie, und die dabei entstehenden Outputs, wie das Produkt, Emissionen und Abfälle, werden in der Sachbilanz dargestellt. Diese Darstellung nennt man LCI (Life Cycle Inventory Analysis) und ist der Kern der LCA. Dazu werden quantitative und qualitative Daten für jeden Teil des Prozesses dargestellt. Die Daten können auf verschiedene Arten erhoben werden. Je nach Verfügbarkeit basieren die Daten auf wissenschaftlicher Recherche, Messungen oder Schätzungen („Ökologische Bewertung von Produktlebensläufen – Life Cycle Assessment“, 2024). In Abbildung 14 wird ein Überblick über typische Inputs und Outputs gegeben. Nach der Datenerhebung müssen die Daten validiert und den entsprechenden Einheitsprozessen sowie dem Referenzfluss der funktionellen Einheit zugeordnet werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

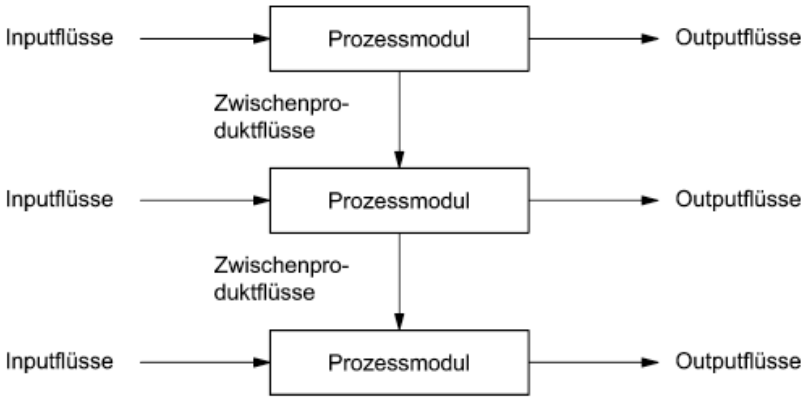


Abbildung 14: Überblick von Prozesse, Inputs und Outputs vom gesamten Lebenszyklus (*DIN EN ISO 14040*, 2020)

Das Systemmodell zeigt die Stoff- und Energieströme sowie die Prozesse innerhalb der Systemgrenzen, welche typischerweise in Form eines Flussdiagramms dargestellt werden. Inputflüsse können Rohmaterialen und Energieflüsse sein, Outputflüsse hingegen Emissionen und Luftverschmutzung. Für den Zweck einer LCA können diese Massen- und Energiebilanz unvollständig sein, da jene Flüsse, die für die Berechnung der Umweltwirkungen nicht relevant sind, vernachlässigt werden dürfen. Eine Darstellung des Produktlebenszyklus in einem Flussdiagramm gibt einen Überblick über die Aktivitäten, die im untersuchten System von Bedeutung sind, darunter die Produktion, die Verarbeitungsprozesse, der Transport, die Nutzungsphase sowie das Abfallmanagement. Wenn ein technischer Prozess mehrere Produkte hervorbringt, müssen die Umweltauswirkungen auf die einzelnen Produkte aufgeteilt, bzw. allokiert werden.

3.3.3 Wirkabschätzung

Nachdem die Sachbilanz aufgestellt wurde, folgt die dritte Phase, die Wirkungsabschätzung, das sogenannte Life Cycle Impact Assessment. Das Ziel der Wirkungsabschätzung ist es, die Umweltauswirkungen der in der Sachbilanz, des LCI, ermittelten Ressourcenverbräuche und Emissionen quantitativ zu bewerten. Dazu werden die Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft und die hieraus potenziellen Umweltwirkungen erkannt. Bei der Wahl der gewählten Wirkungsabschätzung wird keine konkrete Vorschreibung getroffen. Eine Wirkungsabschätzung hat nach DIN EN ISO 14040 eine Reihe an verbindlichen Bestandteilen wie auch einige optionale Bestandteile. Dargestellt werden diese in Abbildung 15.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

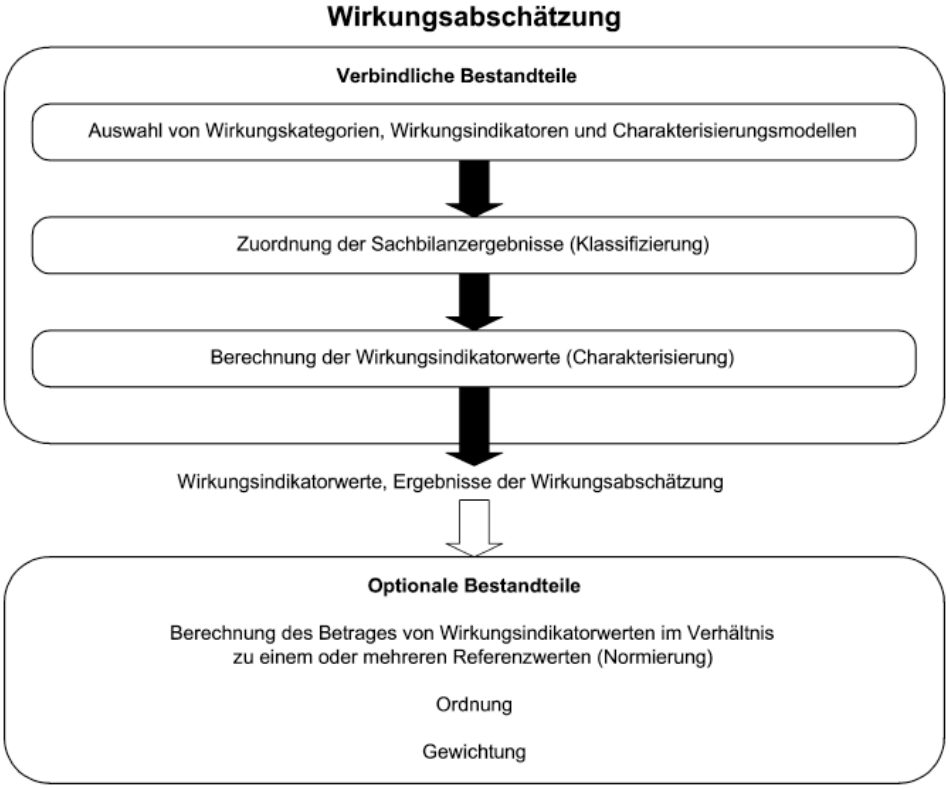


Abbildung 15: Elemente der LCIA, aufgeteilt in notwendige und optionale Elemente (*DIN EN ISO 14040*, 2020)

Um an ein Ergebnis zu kommen, müssen die Wirkungskategorien, die Charakterisierungsmodelle und die Kategorienindikatoren ausgewählt werden. Das erfolgt mittels Klassifizierung, wo die in der Sachbilanz erfassten Parameter den jeweiligen Umweltwirkungen zugeordnet werden. In der anschließenden Charakterisierung wird anhand wissenschaftlicher Modelle und unter Anwendung von Charakterisierungsfaktoren berechnet, in welchem Ausmaß die Ressourcennutzung und Emissionen zu spezifischen Wirkungskategorien beitragen. Beispielsweise werden die Beiträge verschiedener Treibhausgasemissionen zum Klimawandel erfasst, indem ihre Wirkungen in der Kategorie „Klimawandel“ zusammengeführt werden. Dadurch können unterschiedliche Emissionen miteinander verglichen werden, auch wenn sie sich hinsichtlich ihrer Wirkung pro Masseneinheit stark unterscheiden.

Je nach Zielsetzung der LCA kann es erforderlich sein, die Ergebnisse weiter zu aggregieren. Dabei besteht die Möglichkeit, die Resultate mit Hilfe von Referenzinformationen zu normalisieren und die dimensionslose Größenordnung der Ergebnisse zu berechnen. Zusätzlich können die Indikatoren gruppiert werden, beispielsweise in lokale, regionale und globale Umweltwirkungen. Durch eine anschließende Gewichtung können die wichtigsten Umweltwirkungen besonders hervorgehoben werden. Bei der Wirkungskategorie des Global Warming Potential ist

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

dabei die Bezugsgröße das CO_2 und die Referenzeinheit ist 1kg CO_2-Äquivalente. Dabei werden alle Inputs und Outputs, welche Auswirkung auf den Klimawandel haben, wie CO, N_2O oder CH_4, gemäß dem spezifischen Charakterisierungsfaktor in CO_2-Äquivalente umgewandelt.

Die Grenzen der Wirkungsabschätzung liegen dabei im festgelegten Ziel des Untersuchungsrahmens, da nur diese Aspekte betrachtet werden. Daher kann eine Wirkungsabschätzung keine vollständige Einschätzung aller Umweltaspekte abdecken. Weitere Einschränkungen können durch eine unvollständige Datenlage gegeben sein oder aufgrund einer ungenügenden Qualität innerhalb der Sachbilanzphase, bzw. durch Einschränkungen in der Sammlung der Sachbilanzen an seine Grenzen geführt werden.

3.3.4 Auswertung

In der Auswertung, der letzte und somit vierte Schritt der LCA, werden die Resultate der Sachbilanz zusammengefasst, interpretiert, quantifiziert, geprüft und evaluiert. Die Auswertung erfolgt dabei im Kontext der Ziele des Untersuchungsrahmen und sollten mit diesen übereinstimmen. Hierbei können Schlussfolgerungen, Erläuterungen und Einschränkungen zum Aussprechen von Empfehlungen abgeleitet werden. Da es sich um einen relativen Ansatz handelt ist es wichtig zu betonen, dass keine tatsächlichen Wirkungen und Umweltbelastungen angezeigt, sondern nur potenzielle Quellen aufgedeckt werden. Die Ergebnisse einer LCA sind keine Prognose realer Umweltauswirkungen, sondern sind lediglich ein Hinweis auf deren potenziellen Auswirkungen.

Als letzten Schritt in der Auswertung durchlaufen die Ergebnisse einer LCA noch eine kritische Prüfung. Dabei wird geprüft, ob die Anforderungen an die Methodik, Daten, Auswertung und Berichterstattung erfüllt werden. Diese Punkte werden bereits in der Vorbereitungsphase und in dem Untersuchungsrahmen festgelegt. Die kritische Prüfung dient dem besseren Verständnis und erhöht die Glaubwürdigkeit einer LCA. Eine kritische Prüfung kann dabei entweder durch einen Sachverständigen oder durch einen Ausschuss interessierter Kreise erfolgen.

Zusätzlich zur Auswertung werden zur Durchführung der LCA nach DIN EN ISO 14040 die Berichterstattung und die kritische Prüfung genannt. Die Berichterstattung ist ein integraler Bestandteil einer LCA und ein aussagefähiger Bericht sollte alle Phasen der Studie einschließen und in geeigneter Form mitgeteilt werden. Dazu gehören die verwendeten Daten, Verfahren sowie Annahmen und Einschränkungen im Bericht bekannt zu geben. Zur kritischen Prüfung schreibt die Norm, dass diese zum besseren Verständnis beitragen und somit die Glaubwürdigkeit erhöhen kann.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.4 Greenhouse Gas Protocol

Das Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) ist der weltweit wichtigste Standard zur Erfassung und Bilanzierung von Treibhausgasemissionen in Unternehmen, Organisationen und entlang von Lieferketten und soll an dieser Stelle kurz erwähnt werden. Es geht dabei über die DIN EN ISO 14040 und die DIN EN ISO 14044 hinaus, mit dem Ziel eine noch genauere Bestimmung der Treibhausgase zu erreichen (Greenhalgh et al., 2003). Im Greenhouse Gas Protocol wird dabei in drei Scopes unterschieden, welche die Bereiche beschreiben, wo Treibhausgase auftreten können. Das ermöglicht eine genauere Aufschlüsselung der Emissionen im Verlauf des Produktlebenszyklus mit dem Vorteil, dass diese bereits in *openLCA* hinterlegt sind, was die Berechnung erleichtert.

Die in Scope 1 direkt, auftretenden Emissionen sind die im eigenen Unternehmen anfallenden Emissionen, wie Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen in unternehmenseigenen Anlagen oder aus dem eigenen Fuhrpark. Hier sollten nur Emissionen aufgenommen werden, welche im Kyoto-Protokoll definiert sind (Greenhalgh et al., 2003). Scope 2, indirekte Emissionen durch Energiebezug, diese Emissionen entstehen nicht im Unternehmen selbst, sondern bei der Erzeugung von eingekaufter Energie, welche das Unternehmen nutzt (Greenhalgh et al., 2003). Scope 3, andere indirekte Emissionen, umfasst alle anderen indirekten Emissionen, die entlang der Wertschöpfungskette eines Unternehmens entstehen – sowohl vorgelagert, wie zum Beispiel bei Lieferanten, als auch nachgelagerte Bereiche, wie zum Beispiel bei Kunden. Diese Emissionen entstehen nicht im eigenen Unternehmen und nicht durch eingekaufte Energie, aber sie werden durch die Aktivitäten des Unternehmens verursacht oder beeinflusst (Greenhalgh et al., 2003). Im Gegensatz zu den in Scope 1 und 2 zusammengefassten Bereichen, ist der Scope 3 ein optionaler Bestandteil des Greenhouse Gas Protocol.

3.5 Kennzahlen

Der Vollständigkeit halber wird in diesem Abschnitt auf die wichtigsten Kennzahlen eingegangen, welche mit der LCA ermittelt und bestimmt werden können.

Kohlenstoffdioxid

Als erste Kennzahl ist das Kohlenstoffdioxid CO_2 und die CO_2 Äquivalente zu nennen. Hierbei handelt es sich um eine Standardkennzahl im Bereich der Ökobilanzen und des Umweltschutzes. Diese ist ein Bestandteil des Greenhouse Gas Protocol und umfasst etwa den Bereich der Luftverschmutzung und den Klimawandel. Die Wahl dieser Kennzahl und der miteinzubeziehenden Gase erfolgt dabei auf Grundlage vorrangig des Kyoto Protokolls, welches als internationales Abkommen die wichtigsten Treibhausgase definiert hat. Darunter fallen die folgenden sechs Gase:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1. Kohlendioxid (CO_2)
2. Methan (CH_4)
3. Distickstoffoxid (N_2O)
4. Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC)
5. Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC)
6. Schwefelhexafluorid (SF_6)

Diese sechs Gase werden dabei auf einen Äquivalenten Wert in CO_2 umgerechnet, um eine Vergleichbarkeit unter den einzelnen Stoffen zu erhalten. Zum Beispiel entspricht Methan etwa der 25-fachen Menge an CO_2. Diese Gase sind somit in den CO_2 Ausstoß miteinberechnet und werden ebenfalls für die Berechnung der Ergebnisse betrachtet (IPCC, 2023).

Global Warming Potential

Globales Erwärmungspotenzial (GWP), auf Deutsch Treibhauspotenzial genannt, ist ein Maß dafür, wie stark ein Treibhausgas zur Erderwärmung beiträgt, verglichen mit Kohlendioxid über einen bestimmten Zeitraum. Das Referenzgas CO_2 hat per Definition ein GWP von 1 und wird üblicherweise über einen Zeithorizont von 20, 100 oder 500 Jahre berechnet. Der Standard ist meist 100 Jahre (GWP-100). Je höher das GWP, desto stärker die Klimawirkung eines Gases (IPCC, 2023).

Energieverbrauch

Nach der Definition aus dem Greenhouse Gas Protocol ist davon auszugehen, dass im Scope 2 die meisten Emissionen entstehen, bzw. zu erwarten sind. Daher macht es Sinn, den Energieverbrauch ebenfalls als Kennzahl anzuführen.

Überblick über relevante Datenbanken

In diesem Absatz soll kurz auf die verschiedenen zur Verfügung stehenden Datenbanken eingegangen werden. *openLCA* stellt eine große Anzahl von Datenbanken verschiedener Organisationen im *openLCA*-Nexus zur Verfügung, welche sich einfach und direkt in das Berechnungsprogramm importieren lassen. Es gibt freie und kostenpflichtigen Datenbanken. Mögliche Datenbanken sind: Product Enviromental Footprint (PEF), European reference Life Cycle Database of the Joint Research Center (ELCD), *openLCA* LCIA methods und die ecoinvent-Datenbanken. Die Datenbank PEF ist eine von der Europäische Kommission erstellte Datenbank mit dem Ziel die Ökobilanzierung in Europa zu vereinheitlichen. Die ELCD-Datenbank ist ebenfalls eine von der Europäischen Kommission erstellte Datenbank. Diese umfasst vor allem Elementarflüsse. Die PEF-Datenbank hingegen enthält vor allem Prozesse und Produkte.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.6 Grenzen der LCA

Die LCA ist ein starkes Werkzeug zur Umweltbewertung von Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen. Dennoch hat sie ihre Grenzen, welche die Ergebnisse beeinflussen. Die Ergebnisse sind nur so gut wie die Daten, Annahmen und Systemgrenzen auf denen sie beruht. Wichtige Grenzen einer LCA können folgende sein (Hayatina et al., 2023; „Ökologische Bewertung von Produktlebensläufen – Life Cycle Assessment“, 2024)

- Datenverfügbarkeit und -qualität: wie genau ist die vorhandene Datenlage, vor allem für vorgelagerte Lieferketten
- Systemgrenzen und Annahmen: die Festlegung von Systemgrenzen beeinflusst das Ergebnis maßgeblich – dargestellt in Abbildung 16.

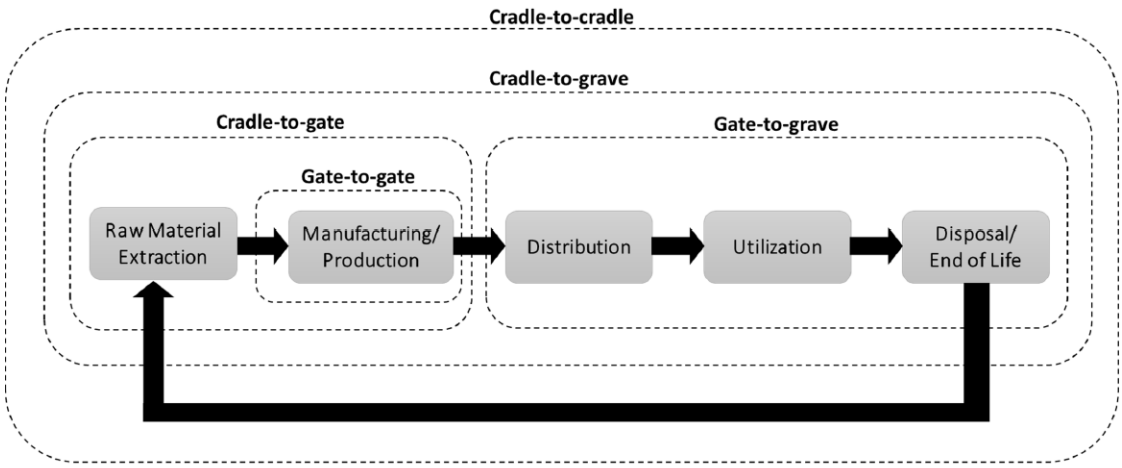


Abbildung 16: Grafische Darstellung der Begrifflichkeiten (Hayatina et al., 2023)

- Cradle-to-Grave (von der Wiege bis zur Bahre): Vollständige Bewertung eines Produkts über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg, wie der Beschaffung von Rohstoffen, Herstellung/Produktion, Nutzung und Entsorgung.
- Cradle-to-Cradle (von der Wiege zur Wiege): Hier wird ein zirkulärer Verlauf angenommen, bei welchem das Produkt am Ende des Lebenszyklus beispielweise durch Recyclingprozesse so aufbereitet wird, dass es erneut in einen Lebenszyklus eingeführt und der Produktkreislauf geschlossen werden kann.
- Gate-to-Gate: Beschreibt eine Teilbetrachtung innerhalb des gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder Prozesses. „Gate“ steht hier

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

symbolisch für das Werkstor und erfasst nur Prozesse innerhalb eines Unternehmens.
    - Cradle-to-Gate: Eine Teilbewertung des Produktlebenszyklus, die sich nur auf einen Prozess in der gesamten Herstellung/Produktion konzentriert, in der Regel innerhalb des Werksgeländes.
- Komplexität und Aufwand
- Fokus auf Umwelt – nicht auf soziale oder ökonomische Aspekte
- Unsicherheiten und Vergleichbarkeit
- Regionale Unterschiede: LCA-Datensätze sind oft global gemittelt, regionale Unterschiede werden nicht immer realistisch abgebildet.

Jede LCA-Studie ist mit Einschränkungen und Unsicherheiten behaftet. Eine grundlegende Einschränkung besteht darin, dass nicht alle Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen sowie andere für Entscheidungen relevante Aspekte wie wirtschaftliche oder technische Machbarkeit berücksichtigt werden. Welche Themen adressiert werden, wird im Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie festgelegt. Daher liefert eine LCA keine vollständige Bewertung aller Umwelt- oder Gesundheitsaspekte. Zudem werden im Verlauf der Studie zahlreiche Annahmen getroffen, Entscheidungen gefällt und Schätzwerte verwendet. Diese Vorgehensweise ist typisch für jede LCA, bringt jedoch Unsicherheiten mit sich. Aus diesem Grund ist es essenziell, diese Unsicherheiten und getroffenen Annahmen sorgfältig zu dokumentieren und transparent zu kommunizieren. Weitere Einschränkungen ergeben sich aus der Datenerhebung und der Sachbilanzphase. Die Verfügbarkeit geeigneter Primärdaten ist häufig begrenzt, zum Beispiel aus Gründen der Vertraulichkeit. Die Nutzung von Datenbanken wie *ecoinvent* ist zudem mit Unsicherheiten verbunden. Auch sind die Daten hinsichtlich für den konkreten Ort oder Zeitraum, wo die Studie relevant wäre, nicht eindeutig nachvollziehbar wo die einzelnen Schritte innerhalb der Prozesskette genau stattgefunden haben.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4 Methodik

In diesem Kapitel wird die Methodik der Arbeit beschrieben, insbesondere wie die Literaturrecherche durchgeführt wurde, welches methodische Vorgehen gewählt wurde, welche Begründungen diesen Entscheidungen zugrunde liegen und wie die methodische Vorgehensweise bei der Erstellung der LCA ist.

4.1 Literaturrecherche

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung und bestehende methodische Ansätze zur LCA zu erfassen. Die Recherche folgte dem Ansatz der Desk-Research, also der strukturierten Auswertung bereits vorhandener wissenschaftlicher Erkenntnisse, technischer Berichte und normativer Grundlagen. Dabei wurden relevante Sekundärquellen, wie Fachpublikationen, Richtlinien sowie Datenbankdokumentationen, gezielt analysiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf die vorliegende Untersuchung bewertet. Ergänzend wurden aktuelle Forschungspublikationen und Fallstudien einbezogen, um bestehende Modellierungsansätze, Systemgrenzen und Bewertungsmethoden im Kontext der LCA zu vergleichen und daraus die methodische Grundlage für die eigene Untersuchung abzuleiten.

4.1.1 Desk-Research

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine umfassende Desk Research durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung sowie bestehende technische Lösungen im Bereich saisonaler thermischer Energiespeicher der Tankspeicher und der Latentwärmespeicher zu erfassen. Ziel war es, eine Wissensbasis zu schaffen, die sowohl die physikalischen Grundlagen als auch den Stand der Technik in Bezug auf Materialeigenschaften, Speichergeometrien, Regelstrategien und Simulationswerkzeuge abdeckt. Besonderes Augenmerk lag auf wissenschaftlichen Arbeiten, die sich sowohl mit diesen Speichertechnologien als auch mit der Durchführung von Ökobilanzen beschäftigen.

Die Desk Research erfüllte mehrere zentrale Funktionen im Forschungsprozess:

- Grundlage für die Konzeption der Systemarchitektur und die Auswahl relevanter Komponenten der betrachteten Speicher
- Bereitstellung zentraler Parameter für die spätere Modellierung, etwa Schmelztemperatur, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Dichte

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Analyse bestehender Studien zur Abgrenzung des eigenen Forschungsschwerpunkts und zur Einordnung aktueller Erkenntnisse
- Ableitung von Referenzwerten und Effizienzkennzahlen aus der Literatur, die als Vergleichs- und Validierungsgrundlage dienten
- Identifikation offener Forschungsfragen, insbesondere im Hinblick auf Wärmeleitfähigkeit, Materialkombinationen und saisonale Speicherverluste

4.1.2 Vorgehensweise der Desk-Research

Um geeignete Arbeiten zu identifizieren, wurde eine mehrstufige Recherche durchgeführt. Zunächst wurden die Stichwörter „LCA“, „Life Cycle Assessment“, „Ökobilanz“ und „Lebenszyklusanalyse“ in allgemeinen Suchmaschinen wie Google und in Google Scholar verwendet, um einen ersten thematischen Überblick zu gewinnen. Auf dieser Basis wurden anschließend gezielt Fachquellen im Bibliothekskatalog der Technischen Universität Wien recherchiert. Darüber hinaus wurden vertiefende Suchen in wissenschaftlichen Datenbanken wie Web of Science, ScienceDirect und SpringerLink durchgeführt. Dabei kam ein Top-down-Suchansatz mit schrittweiser Eingrenzung zum Einsatz. Diese Methode ermöglichte es, zunächst einen breiten Überblick zu gewinnen und dann gezielt nach spezifischen Informationen zu suchen – etwa zur LCA thermischer Speicher.

Ein ähnliches Vorgehen wurde bei der Literaturrecherche zu Speichertechnologien angewandt. Ein Großteil der in dieser Arbeit verwendeten Daten basiert entweder auf Primärdaten, die durch Hersteller oder direkte Kommunikation zur Verfügung gestellt wurden, oder auf fundierten Angaben aus wissenschaftlichen Studien.

4.1.3 Auswahl der Literatur

Die Bewertung der gefundenen Literatur erfolgte mehrstufig. Zunächst wurden Titel und Abstract überprüft, um die Relevanz für das Forschungsthema einzuschätzen. Zeigten sich hier bereits relevante Inhalte, wurden diese genauer betrachtet. Die Papers wurden quergelesen, um einen Eindruck ihrer Relevanz zu gewinnen. Relevante Quellen wurden in einer Excel-Tabelle systematisch erfasst, klassifiziert und für die spätere Auswertung dokumentiert. Nicht relevante Quellen wurden konsequent ausgeschlossen. Auf diese Weise konnte ein qualitativ hochwertiger und thematisch passender Quellenpool aufgebaut werden.

4.1.4 Ergebnisse der Desk-Research

Die Analyse der Literatur ergab, dass die Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 eine etablierte Grundlage für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen darstellen. Viele wissenschaftliche Studien orientieren sich an dieser Methodik.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Ergänzend zeigt sich, dass sich das Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) insbesondere im internationalen Kontext als ergänzender Rahmen für die Treibhausgasbilanzierung etabliert hat. Im Rahmen der Desk Research konnten zudem mehrere relevante Studien zu Wärmespeichern identifiziert werden, die als inhaltliche und methodische Referenz für diese Arbeit dienten. Diese Arbeiten wurden herangezogen, um technische Daten, wie etwa zum Aufbau der Speicher, zu verwendeten Materialien, Isolationsarten und Betriebsparametern, zu erfassen und daraus Annahmen für die Lebenszyklusmodellierung abzuleiten und zu validieren.

Darüber hinaus wurden aus der Literatur auch Inventardaten (Life Cycle Inventory, LCI) gewonnen. Diese umfassten unter anderem Materialmengen, Herstellungsprozesse, Transportdistanzen, Energieaufwände sowie typische Lebensdauern der Komponenten. Die aus verschiedenen Studien extrahierten Daten wurden auf ihre Vergleichbarkeit geprüft und für die Modellierung in *openLCA* harmonisiert. Sie bilden zusammen mit den technischen Parametern eine wesentliche Grundlage für die im Kapitel 6 dargestellte ökobilanzielle Bewertung der vier untersuchten Speichersysteme.

4.1.5 Primärdatenerhebung

Neben der Auswertung von Literaturquellen wurde ergänzend eine Primärdatenerhebung bei Unternehmen durchgeführt, um detaillierte Informationen zur Konstruktion von Wärmespeichern zu erhalten. Hierzu wurden drei Unternehmen aus dem Bereich der Wärmespeichertechnologie ausgewählt und per E-Mail kontaktiert. Die Auswahl erfolgte auf Basis ihrer Relevanz hinsichtlich Bauweise und Materialeinsatz von großskaligen Speichern. In den Anschreiben wurde ein Bezug zur vorliegenden Masterarbeit hergestellt und konkrete Fragen zur Bauweise, zu den verwendeten Materialien sowie zur Wandstärke der Speicher formuliert. Von allen angeschriebenen Unternehmen erhielt ich Rückmeldungen: ein Unternehmen konnte nach interner Sicherheitsfreigabe lediglich kurze und allgemein gehaltene Antworten geben, während die beiden anderen Unternehmen sehr detaillierte Baupläne zur Verfügung stellten. Diese enthielten Informationen zur Anzahl und Dimensionierung der Bleche sowie zur Art der Verschweißung, welche Materialien verwendet worden sind und wie die Speicher gedämmt wurden. Da diese Daten vertraulich behandelt werden müssen, werden sie in der Arbeit nicht veröffentlicht, sondern ausschließlich zur internen Analyse herangezogen. Ein virtuelles Gespräch über Microsoft Teams mit einem der Unternehmen diente zusätzlich der Klärung offener Punkte. Es ist zu betonen, dass sich die erhaltenen Informationen ausschließlich auf die Bauweise der Speicher beziehen; Daten zu Betrieb oder Nutzung der Anlagen wurden nicht bereitgestellt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.2 Methodologie der LCA

Für die ökologische Bewertung der untersuchten Speichersysteme wurde die Methodik der LCA gemäß den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 angewendet. Ziel war es, die potenziellen Umweltauswirkungen der Speicher über ihren gesamten Lebenszyklus systematisch zu erfassen und vergleichbar zu machen.

Die LCA erfolgte in vier Schritten:

1. Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
2. Erstellung der Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI)
3. Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)
4. Auswertung und Interpretation

Die Definition einer funktionellen Einheit stellt sicher, dass Unterschiede in den Umweltauswirkungen auf die Bauweise, Materialien oder Technologie zurückgeführt werden können und nicht auf variierende Nutzungsbedingungen.

Zur Durchführung der Modellierung wurde die Open-Source-Software *openLCA* Version 2.1.0 verwendet. Als Datenbank kam die Ecoinvent-Datenbank v1.03 zum Einsatz, welche umfangreiche Datensätze zu Materialien, Prozessen, Energiequellen und Entsorgungsszenarien bereitstellt. Wo notwendig, wurden zusätzliche Datensätze aus wissenschaftlicher Literatur oder Herstellerangaben ergänzt. Die Auswahl der Umweltwirkungskategorien basiert auf ihrer Relevanz für Energiespeichersysteme sowie der Datenverfügbarkeit in Ecoinvent. Die folgenden Kategorien wurden ausgewählt:

- Global Warming Potential: zur Quantifizierung des Treibhauspotenzials in kg CO_2-Äquivalenten
- kumulierte Energieaufwand: zur Bilanzierung des Primärenergieverbrauchs
- ggf. weitere Kategorien wie Versauerungspotenzial, Feinstaubbildung oder Ressourcenverbrauch (je nach Datenlage)

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dienen als Grundlage für den Vergleich der Speichersysteme. Besonderes Augenmerk liegt auf der Identifikation ökologischer Verursacher, also jener Komponenten oder Lebensphasen, die den größten Einfluss auf die Gesamtumweltwirkungen haben.

Die im Folgenden beschriebenen methodischen Festlegungen stellen sicher, dass die spätere Modellierung in *openLCA* transparent, nachvollziehbar und replizierbar erfolgt. Die konkrete Umsetzung der LCA – inklusive Materialdaten, Modellstruktur und Ergebnisauswertung – wird in Kapitel 6 dargestellt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.3 openLCA

Die Modellierung der LCA erfolgte in *openLCA*. Grundlage bildete die Datenbank ecoinvent 3.9, die den größten Teil der benötigten Material- und Energieprozesse abdeckte. Fehlende Datensätze wurden Basis technischer Kennwerte abgeschätzt. Die Modellierung orientierte sich methodisch an der *openLCA*-Anleitung von GreenDelta (2024) und folgte einem standardisierten Schema, das auch in vergleichbaren Studien angewendet wird. Für jedes der vier untersuchten Speichersysteme wurde ein eigenständiges Prozessnetzwerk aufgebaut, das alle Lebensphasen von der Rohstoffgewinnung über Produktion und Nutzung bis zum End-of-Life-Szenario abbildet.

Das Vorgehen umfasste folgende Schritte:

1. Festlegung der funktionellen Einheit
2. Erstellung der Systemstruktur: Abbildung aller relevanten Prozesse (Materialbereitstellung, Herstellung, Betrieb, Entsorgung)
3. Zuordnung der Stoff- und Energieflüsse: Übertragung der in der Desk-Research gewonnenen Inventardaten (Materialmengen, Energieeinsätze, Transportdistanzen) auf passende ecoinvent-Prozesse
4. Verknüpfung der Prozesse: Aufbau eines vollständigen Lebenszyklusnetzwerks mit konsistentem Input-Output-Abgleich
5. Definition der Systemgrenzen: Abbildung im cradle-to-gate-Ansatz, um die Herstellung und Nutzung ohne sekundäre Nutzungseffekte zu bewerten

Für die Wirkungsabschätzung wurde die Methode IPCC 2021 eingesetzt, um die Treibhausgasemissionen in CO_2-Äquivalenten zu quantifizieren. Die Resultate wurden hinsichtlich ihrer dominanten Emissionsquellen analysiert und die Systeme untereinander verglichen. Dabei erfolgte eine getrennte Betrachtung der Material-, Energie- und Entsorgungsanteile, um die wesentlichen Umwelteinflussgrößen zu identifizieren.

Diese Datenbank (Datenbank *openLCA* – ecoinvent) konnte die meisten der benötigten Materialien abdecken. Nicht vorhandene Datensätze können aus anderen Datenbanken importiert werden oder geschätzt werden[19].

[19] https://www.openlca.org/

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5 Stand der Forschung

Die ökobilanzielle Bewertung saisonaler thermischer Energiespeicher ist ein vergleichsweise junges Forschungsfeld. Insbesondere bei großvolumigen Speichern für den Einsatz in Gebäuden oder Quartierslösungen bestehen bislang methodische Unterschiede und Datenlücken in Bezug auf Lebensdauer, Systemgrenzen und Bewertungskategorien. In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der wissenschaftlichen Forschung zu Tank- und Latentwärmespeichern sowie zu deren LCA dargelegt. Die hier vorgestellten Studien bilden eine wichtige Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte LCA.

Die Entwicklung und Integration saisonaler thermischer Energiespeicher hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen, insbesondere im Kontext der Energiewende und der Dekarbonisierung des Gebäudesektors. Zahlreiche Studien belegen, dass sich durch die Speicherung überschüssiger Wärme aus erneuerbaren Quellen, vor allem Solarenergie, der saisonale bedingte Markt zwischen Angebot und Nachfragen zwischen Energieerzeugung und -bedarf deutlich verringern lässt. Neben konventionellen Wasserspeichern rücken zunehmend Systeme mit Phase-Change-Materialien (PCM) in den Fokus der Forschung, da sie durch ihre hohe Energiedichte und isotherme Wärmefreisetzung wesentliche Effizienzgewinne versprechen. Dieses Kapitel fasst den aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand zusammen und stellt wesentliche technische Ansätze, Materialentwicklungen und Simulationsmethoden vor, die für die in dieser Arbeit untersuchte Systemkonfiguration von Relevanz sind. Darüber hinaus werden bestehende Forschungslücken identifiziert, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit adressiert werden.

PCM Speicher und Tankspeicher werden auf Basis einer Literaturanalyse gegenübergestellt, Tankspeicher werden im praktischen Teil modelliert und die Ergebnisse dargestellt.

5.1 Arbeiten zu saisonale Wärmespeicher

In diesem Kapitel werden aktuelle Forschungsarbeiten zum Einsatz von saisonalen Wärmespeichersystemen vergleichend analysiert. Ziel ist es, zentrale Unterschiede hinsichtlich Systemaufbau, Modellierungsansatz, Wirkungsgrad und Anwendungsbereich herauszuarbeiten und die Ergebnisse in den Kontext der eigenen Untersuchung einzuordnen.

Dahash et al. (2019) geben einen umfassenden Überblick über großtechnische saisonale Speichertechnologien für solare Nahwärmeversorgung. Besonders hervorgehoben werden die Unterschiede zwischen Tank- und Grubenspeichern hinsichtlich Bauweise, Speichervolumen und Einsatzgrenzen. Sie weisen auf fehlende

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Bewertungsstandards und mangelnde Modellierungsmöglichkeiten zur Kopplung mit der Umgebung hin (Dahash et al., 2019).

Yang et al. (2021) führten einen systematischen Review zu thermischen Energiespeichern für Quartierslösungen durch. Dabei identifizieren sie eine Vielzahl technologischer Ansätze, insbesondere für saisonale Speicher, sehen aber zugleich erheblichen Nachholbedarf bei der Bewertung ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte. Die Studie macht deutlich, dass neben technischen Parametern auch der Lebenszyklus und die Integration in bestehende Energiesysteme stärker berücksichtigt werden müssen. Bei der wirtschaftlichen Bewertung werden wichtige wirtschaftliche Kennzahlen wie die Kosten pro Kapazitätseinheit, die Kosten pro Speichervolumen und die durchschnittlichen Entstehungskosten betrachtet. Um im Wärmemarkt wirtschaftlich wettbewerbsfähig zu sein, müssen die Kosten von saisonalen thermischen Energiespeichern (STES) massiv gesenkt werden (Yang et al., 2021). Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass PCM-basierte STES-Systeme für Quartiere ein hohes Potenzial aufweisen und definieren zentrale Planungsparameter für deren Vergleich. Dabei werden Rahmenbedingungen wie die Wirtschaftlichkeit, die Marktsituation aber auch notwendige Genehmigungen, genauso wie die technischen Eigenschaften untersucht und beschrieben. In dem Bericht werden auch Zyklenanzahl und Lebensdauer analysiert (Kallert et al., 2023).

Der Forschungsbericht „Langzeit-Wärmespeicher in Fernwärmenetzen – Entwicklung, Monitoring und Wirtschaftlichkeit“ (2012) von Dieter Mangold stammt aus dem Solites-Institut (Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme) und ist ein zentraler Berichtsband zur Entwicklung von saisonalen Wärmespeichern (STES) in Deutschland (Mangold et al., 2012). Der Bericht dokumentiert die Forschung, Entwicklung und praktische Umsetzung von saisonalen Wärmespeichern für Solarthermie-gestützte Fernwärmenetze in Deutschland. Er entstand im Rahmen des Forschungsprogramms „Solarthermie2000plus“ und behandelt die technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung verschiedener Großspeichertechnologien und gibt detaillierte Angaben unter anderem zu Bauweise und Materialien. Mangold (2012) zeigt, dass saisonale Großspeicher ein entscheidender Baustein zur Dekarbonisierung von Fernwärmenetzen sind. Die Arbeit verbindet Praxisdaten aus realen Demonstrationsprojekten mit ökonomischen Analysen und liefert Grundlagenwissen.

5.2 Arbeiten zur LCA

Während die zuvor dargestellten Arbeiten vor allem die technische und energetische Leistungsfähigkeit saisonaler Wärmespeicher beleuchten, widmet sich das folgende Kapitel der ökologischen Bewertung dieser Systeme. Hierzu werden verschiedene

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Studien zur LCA thermischer Speicher miteinander verglichen, um deren Umweltwirkungen systematisch einzuordnen.

In den betrachteten Studien wird die funktionelle Einheit jeweils unterschiedlich definiert und an die Zielsetzung der Untersuchung angepasst. In der Studie von Shah et al. (2016) wurde die funktionelle Einheit als Bereitstellung eines Wassertanks mit 1000 Litern Speichervolumen definiert. Damit ist die Nutzleistung der Systeme, in der Studie die Trinkwasserspeicherung für einen Haushalt vergleichbar, festgelegt. Unterschiede in der Masse und im Materialeinsatz der drei betrachteten Speicher aus LLDPE[20], Stahl und Beton sind nicht Teil der funktionellen Einheit, sondern gehen in die Lebenszyklusinventur ein. Auf diese Weise spiegeln sich die variierenden Materialaufwände und Herstellungsprozesse in den Umweltwirkungen pro funktioneller Einheit wider (Shah et al., 2016).

Welsch et al. (2018) untersuchen die Umwelteinflüsse und die Wirtschaftlichkeit von Bohrlochwärmespeichern in der Fernwärme. Ihre Ergebnisse zeigen, dass BTES-Systeme das Treibhauspotenzial deutlich senken können, insbesondere bei Integration mit Solarthermie und KWK. In der Arbeit wird ein Bohrlochspeicher von 25 GWh über eine Lebensdauer von 30 betrachtet und somit diese Definition als funktionelle Einheit verwendet. Die angenommene Lebensdauer von 30 Jahren deckt die typische Lebensdauer von solchen Speichern ab. Somit können Herstellungs- und Betriebsphasen gegeneinander gewichtet und über die gesamte Nutzung verteilt werden (Welsch et al., 2018). Der saisonale Erdsondenspeicher (BTES) wird hierbei nicht über Masse oder Volumen beschrieben, sondern als Systemkomponente mit variabler Bohrlochlänge, deren Bau- und Betriebsemissionen in die Bilanz eingehen (Welsch et al., 2018).

Die von Shah et al. (2016) gewählte funktionelle Einheit unterscheidet sich mit der definierten funktionellen Einheit aus der Arbeit von Welsch et al. (2018). Welsch et al. (2018) definierten eine energiebasierte funktionelle Einheit: 25 GWh Wärme mit einer Lebensdauer von 30 Jahren. Dieser Zusammenhang wird in

Tabelle 7 zusammengefasst. Die funktionelle Einheit kann volumenbasiert, energiebasiert oder auch nutzungsbasiert sein.

[20] LLDPE steht für Linear Low Density Polythylen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Studie	Funktionelle Einheit	Speicherdefinition	Rolle von Masse & Volumen
Shah et al. (2016)	Bereitstellung eines 1000 L Wassertanks zur Haushaltsversorgung	Tanks aus LLDPE (~20kg), Stahl (~140kg) und RCC-Beton (>2000kg)	Masse und Materialeinsatz variieren stark und gehen in die LCI ein, sind aber nicht Teil der FU
Welsch et al. (2018)	25 GWh Wärme pro Jahr über 30 Jahre ins Fernwärmenetz eingespeist	großskaliger saisonaler Wärmespeicher BTES mit 371 Bohrungen, variable Tiefe bis 1000 m, gekoppelt an Wärmepumpe	Speichergröße über Bohrlochlänge variiert; Masse/Volumen des Erdreichs spielt keine Rolle, Materialaufwand (Bohrungen, Technik) geht in die LCI ein

Tabelle 7: Übersicht über unterschiedliche Definitionen der funktionellen Einheit

Die bereits diskutierte Arbeit von Shah et al. (2016) zeigt, dass insbesonders die energieintensive Produktion des Speichermaterials einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtumweltwirkung und somit LLDPE-Speicher in fast allen Wirkungskategorien die geringste Umweltbelastung aufweisen, während Betonspeicher die höchsten Emissionen verursachen. Bei dieser Studie wurde als funktionelle Einheit eine Kapazität von 1000 Litern gewählt. Speicher solcher Größer findet man häufig als Anwendung im Einfamilienhaus.

Hayatian et al. (2023) analysieren in einem Review die aktuelle Forschung zur LCA von thermischen Energiespeichern im Gebäudebereich. Sie kritisieren die uneinheitliche Definition von Systemgrenzen, die mangelnde Datenverfügbarkeit und den geringen Reifegrad standardisierter Bewertungsansätze. Besonders hervorgehoben wird die Notwendigkeit, alle Lebensphasen, einschließlich Herstellung, Nutzung und Entsorgung, konsistent zu berücksichtigen. Im Bereich der Wärmespeicher und insbesondere der Tankspeicher ist die Forschungslage bislang begrenzt, wächst jedoch kontinuierlich. Ein Großteil der vorhandenen Studien konzentriert sich auf großtechnische Speicherlösungen im Kontext von Fernwärmenetzen oder industriellen Anwendungen. Im Vergleich zu elektrischen Speichersystemen wie Batterien, Latentwärmespeicher oder thermochemische Speicher wurde die ökobilanzielle Betrachtung von Tankspeichern bislang seltener systematisch durchgeführt (Hayatina et al., 2023).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Ein Beispiel für eine vollständige cradle-to-grave-Analyse liefert Bernal et al. (2021). Die Autoren untersuchen ein PCM-basiertes Wärmespeichersystem für den häuslichen Einsatz in Großbritannien. Dabei analysieren sie 18 Umweltwirkungskategorien und identifizieren Hauptbeiträge in der Herstellung von PCM, Solarthermiekomponenten und Wärmetauschern. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass sich die Umweltwirkungen durch eine Erhöhung der Lebensdauer deutlich reduzieren lassen. Bei einer Nutzungsdauer von 40 Jahren liegt das globale Erwärmungspotenzial (GWP) unter jenem konventioneller Heizsysteme wie Gas oder Biomasse (Chocontá Bernal et al., 2021).

Simons & Firth (2011) zeigen, dass sich eine Verlängerung der Nutzungsdauer von saisonalen Speichern und Kollektoren deutlich positiv auf die Umweltbilanz auswirkt. Gleichzeitig beeinflusst das Recyclingpotenzial der eingesetzten Materialien, insbesondere von Stahl- und Kupferkomponenten, die Bewertung wesentlich. Die Autoren betonen, dass eine Lebensdauerverlängerung und die Berücksichtigung von Kreislaufwirtschaftsprinzipien das Kriterium zur Verbesserung der ökologischen Performance darstellen. Als funktionelle Einheit wurde in der Arbeit 1 MJ Speicherkapazität gewählt um Vergleiche zwischen den Heizsystemen zu ermöglichen (Simons & Firth, 2011).

5.3 Umgesetzte Projekte von Tankspeicher

Mehrere öffentlich zugängliche Online-Datenbanken geben einen Überblick über realisierte Projekte mit saisonalen Speichern. Eine gute Sammlung findet man unter. https://sdg21.eu/ueber-sdg21. Die sdg21.Webdatenbank wird seit dem Jahr 2000 betrieben und bietet speziell für Deutschland eine gute Übersicht. Auch unter https://www.solites.de/ findet man etliche in die Praxis umgesetzte Projekte.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Name	Ort	Nutz-volumen	Inbetrieb-nahme	Kurzbeschreibung
Energie-speicher der Stadtwerke Heidelberg	Heidelberg-Pfaffengrund, Deutschland	12.800 m^3	geplant 2027	Zweizonenspeicher mit maximaler Speichertemperatur von 115°; Wasser aus dem Fernwärmenetz wird im Speicher eingelagert und bei Bedarf wieder eingespeist (Kraft-Wärme-Kopplung)
Solare Wohnanlage "Helios"	Rostock, Deutschland	30 m^3	2000	108 Wohneinheiten, 1000 m² Kollektorfläche
Solarstadt Wiggenhausen	Friedrichs-hafen, Deutschland	12.000 m^3		570 Wohneinheiten, 4.056 m² Kollektorfläche, solarer Deckungsanteil liegt bei ca. 50% (Heizung und Warmwasser)
Messegelände Oederan	Oederan, Deutschland	8.000 m^3	2000	622 Wohneinheiten, 700 m² Kollektorfläche
Solarsiedlung Bramfeld	Hamburg-Bramfeld, Deutschland	4.000 m^3	2000	130 Wohneinheiten, 3000 m² Kollektorfläche
Solare Nahwärme Ackermann-bogen	München, Deutschland	6.000 m^3	2006	319 Wohneinheiten, 3000 m² Kollektorfläche
Solarthermie-anlage Römerhügel in Ludwigsburg	Ludwigsburg, Deutschland	2.000 m^3	2020	14.800 m² Kollektorfläche
Energiebunker, IBA Hamburg	Hamburg-Wilhelmsburg, Deutschland	2.000 m^3	2023	Großpufferspeicher in Flakturm
NRW-Solarsiedlung “Steinfurt-Borghorst”	Steinfurt-Borghorst, Deutschland	1.500 m^3	2000	42 Wohneinheiten, 510 m² Kollektorfläche, Projekt mit Solarer Nahwärme und Saisonalspeicher, solarer Deckungsanteil über das ganze Jahr: 35%

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

“Solarcity” Hannover Kronsberg	Hannover-Kronsberg, Deutschland	2.750 m^3	2000	106 Wohneinheiten, 1.473 m^2 Kollektorfläche, solarer Deckungsanteil rund 27% des Wärmebedarfs
Holzbau-siedlung Ingolstadt	Ingolstadt, Deutschland	270 m^3	2011	142 Wohneinheiten, 850 m^2 Kollektorfläche, saisonale Wärme-speicherung in 2 integrierten, haushohen Schichtspeichern, Warmwasser und Heizung zu ca. 60% aus Solarkollektoren
Solares Nahwärmenetz in Moosach	Moosach, Deutschland	100 m^3	2018	70 Wohneinheiten, 1.067 m^2 Kollektorfläche
Referenzanlage Ricola AG	Laufen, Schweiz	120,14 m^3		zur Speicherung und Verwertung von Abwärme, Ingenieurbüro Trinox Engieneering AG
Agro Energie Schwyz AG	Schwyz, Schweiz	28.000 m^3		

Tabelle 8: Überblick auserwählter Energiespeicher, eigene Sammlung (Berberich & Mangold, 2025; Wolpensinger, 2025)

Wie die Übersicht aus Tabelle 8 zeigt, ist die Kombination aus Wärmespeicher und einem Solar-Kollektorfeld eine gängige Anwendung, um den Nutzungsgrad und die Wirtschaftlichkeit der beiden Systeme zu erhöhen.

In Österreich wurde das dreijährige gigaTES Projekt durchgeführt, welches sich mit der Entwicklung von Material- und Baukonzepten, der Evaluierung der Effizienz von Großwärmespeichern und deren Wechselwirkungen mit der Umwelt sowie der Untersuchung der Integrationsmöglichkeiten von Großwärmespeichern in Fernwärmesystemen in ganz Österreich beschäftigt. Das Team bestand aus Unternehmen der gesamten Wertschöpfungskette für Großwärmespeicher mit dem Ziel eine Grundlage für ein Demonstrationsprojekt zu erarbeiten, um einen Fortschritt bei der Umsetzung von großen Wärmespeicher für erneuerbare Fernwärmesysteme darzustellen (van Helden et al., 2021).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5.4 Gegenüberstellung PCM Speicher und Tankspeicher

Das Paper von Xia et al. (2025) untersucht den Einsatz eines Latentwärmespeichers auf Basis von Natriumacetat-Trihydrat als Phasenwechselmaterial im Vergleich zu einem gleich großen Wassertank. Die Ergebnisse zeigen, dass der PCM-Speicher bei gleicher theoretischer Speicherkapazität mit nur 46% des Volumens eines Wassertanks auskommt, die Wärmeverluste um 43,4% reduziert und die nutzbare Wärmebereitstellung um 24,1% steigert. In der durchgeführten LCA ergibt sich eine Reduktion der CO_2-Emissionen um etwa 17%, während die Wirtschaftlichkeitsanalyse eine Amortisationszeit von rund sechs Jahren ausweist. Limitationen der Studie sind, dass die Ergebnisse auf einer Simulation basieren und das vereinfachte Annahmen zu Materialeigenschaften und Wärmeübertragungsprozesse zu Grunde liegen, eine Alterung des Phasenwechselmaterials nicht berücksichtigt wird und bislang keine langfristigen Praxiserfahrungen vorliegen. Damit verdeutlicht die Arbeit zwar das Potenzial von PCM-Speichern zur Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion, verweist aber gleichzeitig auf offene Fragen hinsichtlich technischer Stabilität und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Klimazonen oder größere Systeme, was auf die aktuelle Forschungslücke in diesem Bereich hinweist (Xia et al., 2025).

Die Studie von Venettacci et al. (2022) untersucht die ökonomische und ökologische LCA eines innovativen Wärmespeichers, basierend auf Phasenwechselmaterialien, eingebettet in porösen Kupferschäume in Kombination mit einem solaren Heiz- und Kühlsystem für Wohngebäude in Italien. Die Ergebnisse werden mit einem herkömmlichen wasserbasierten Speicher gleicher Speicherkapazität verglichen. Für beide Systeme wird ein zusätzlicher gasbefeuerter Kessel zur Integration erneuerbarer Energien berücksichtigt, um den Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes zu decken. Ein vielversprechender Ansatz zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von PCMs ist die Einbettung in metallische Schäume. In einer aktuellen Studie wurde Paraffin in hochporösen Kupferschaum (Porosität 97%, 20 PPI) infiltriert, wodurch die Wärmeübertragung innerhalb des Speichermaterials signifikant verbessert werden konnte. Das resultierende Speichersystem wurde in eine solarunterstützte Heiz- und Kühlanlage integriert und mittels LCA bewertet. Dabei zeigte sich, dass durch den Kupferschaum-PCM-Speicher der Erdgasbedarf um 18,4% und die Betriebskosten um 21,4% gesenkt werden konnten, wenngleich die hohen Materialkosten von Kupfer die Investition verteuern (Venettacci et al., 2022). Diese Studie zeigt auch, dass beim Vergleich unterschiedlicher Speicher eine Skalierung auf eine einheitliche Größe notwendig ist.

Der Vergleich verschiedener Latentwärmespeicher gestaltet sich methodisch anspruchsvoll, da sich die eingesetzten Phasenwechselmaterialien (PCM) in ihren thermophysikalischen Eigenschaften deutlich unterscheiden. Während Paraffine durch eine hohe Zyklenstabilität und chemische Beständigkeit gekennzeichnet sind, weisen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Salzhydrate zwar eine höhere volumetrische Speicherdichte auf, neigen jedoch zu Unterkühlung und Phasenseparation, was die effektive Nutzung im Langzeitbetrieb einschränken kann (Ghasemi et al., 2022; Sterner & Stadler, 2014). Zusätzlich erschwert die Vielzahl an Speicherformen, von Bulk-Systemen über Makro- und Mikroverkapselungen bis hin zu Verbundsystemen mit hochleitfähigen Additiven wie Graphit oder Metallschäumen eine direkte Gegenüberstellung, da die Wärmeleitfähigkeit und die Lade- bzw. Entladecharakteristik stark variieren (Ghasemi et al., 2022). Auch die Lebensdauer der Systeme unterscheidet sich erheblich: chemische Degradation, Unterkühlung oder Materialseparation führen dazu, dass die nutzbare Kapazität mit zunehmender Zyklenanzahl abnimmt, während bei PCM-Slurries zusätzlich Sedimentationseffekte auftreten können (Ghasemi et al., 2022; Kavendra A. Thakare, 2015).

Eine weitere Herausforderung liegt in den Vergleichsgrößen. Während manche Studien die gravimetrische Speicherdichte (kWh/kg) heranziehen, betrachten andere volumetrische Größen (kWh/m³) oder ökonomische Indikatoren wie Kosten pro gespeicherter Energieeinheit. Auch Betriebsparameter wie Lade- und Entladeleistung, Wirkungsgrad oder Temperaturspreizung werden nicht einheitlich berücksichtigt (Xia et al., 2025). Darüber hinaus unterscheiden sich die ökologischen und ökonomischen Randbedingungen: So kann ein Speichermaterial mit hoher Energiedichte aufgrund von Additiven oder energieintensiver Herstellung einen ungünstigeren ökologischen Fußabdruck aufweisen (Ardente et al., 2005; Simons & Firth, 2011). Schließlich sind die Ergebnisse stark vom Anwendungs- und Systemkontext abhängig. Phasenwechselmaterialien welche im Gebäudebereich vorteilhaft sind, erfüllen nicht zwingend die Anforderungen saisonaler Großspeicher oder von Kühlanwendungen im Energiesektor. Daraus ergibt sich, dass für eine belastbare Gegenüberstellung von Latentwärmespeichern eine einheitliche funktionelle Einheit, wie etwa die über die gesamte Lebensdauer gespeicherte Energiemenge in kWh, sowie klar definierte Systemgrenzen notwendig sind.

5.5 Fazit zum Stand der Forschung

Die in diesem Kapitel analysierten Studien zeigen, dass sowohl TTES- als auch PCM-Systeme ein hohes Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen bieten. Jedoch ist die Datenlage oft uneinheitlich, insbesondere im Hinblick auf Entsorgungsszenarien, Materialzusammensetzungen und tatsächliche Lebensdauer. Die untersuchten LCA-Studien variieren stark hinsichtlich Methodik, Systemgrenzen und Bewertungsrahmen, was eine direkte Vergleichbarkeit erschwert. Die Forschungslücke ist bei den PCM-Speichern noch größer, da sich diese Speichermodelle hauptsächlich noch in der Grundlagenforschung befinden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Arbeit von Simons & Firth (2011) unterstreicht zusätzlich die methodische Unsicherheit bei der Bewertung großvolumiger Speicherlösungen, da Lebensdauern, Recyclingquoten und reale Betriebsbedingungen meist nur grob geschätzt werden. Gleichzeitig fehlt es an praxisnahen Fallstudien, die auf realen Systemdaten basieren.

Diese Arbeit greift die genannten Forschungslücken auf, indem sie reale Speichersysteme unter Anwendung konsistenter methodischer Rahmenbedingungen modelliert, mit *openLCA* abbildet und vergleichend analysiert. Besonderes Augenmerk liegt auf der Berücksichtigung realistischer technischer Daten, vollständiger Lebenszyklusbetrachtung sowie der transparenten Dokumentation aller Annahmen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6 Durchführung der LCA

Im folgenden Kapitel wird die praktische Umsetzung der LCA für ausgewählte saisonale Wärmespeichersysteme dargestellt. Die Analyse basiert auf der Methodik nach DIN EN ISO 14040 und 14044 und wurde mithilfe der Software *openLCA* durchgeführt. Ziel ist es, die Umweltwirkungen der Speicher über ihren gesamten Lebensweg hinweg zu erfassen und vergleichend gegenüberzustellen.

Zunächst wird die verwendete Softwareumgebung beschrieben. Anschließend erfolgt die Darstellung des Ziel- und Untersuchungsrahmens der LCA, der funktionellen Einheit, der Systemgrenzen und der allgemeinen Modellierungsstrategie. In einem weiteren Schritt werden die vier Speichersysteme einzeln vorgestellt und deren ökobilanzielle Modellierung in *openLCA* dokumentiert.

Hierfür wurden die betrachteten Speichersysteme in ihre jeweiligen Komponenten zerlegt und analysiert. Abschließend wird erläutert, wie die End-of-Life-Phase in die Analyse einbezogen wurde. Das Kapitel endet mit einer Diskussion der gewonnenen Ergebnisse. In Abbildung 17 wird die Durchführung der LCA schematisch dargestellt:

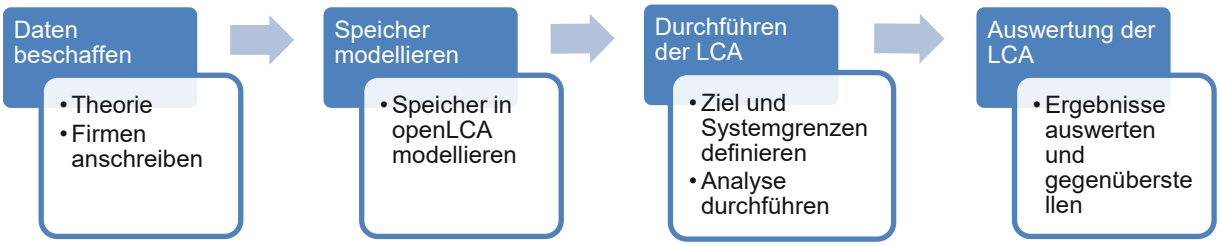


Abbildung 17: schematische Vorgehensweise Durchführung einer LCA, eigene Darstellung

Aufgrund einer fehlenden Datenlagen wird der Umfang der Studie an manchen Stellen reduziert werden. Auf eine detaillierte Modellierung der End-of-Life-Phase wurde verzichtet. Die Produktionsphase, einschließlich der Rohstoffgewinnung, Materialverarbeitung, Produktfertigung sowie der Transport, und die Nutzungsphase beider Systeme werden modelliert. Anschließend werden die Umweltauswirkungen in ausgewählten Wirkungskategorien berechnet.

6.1 Software

Das Modell der LCA wird mithilfe der Software *openLCA* gebildet. In *openLCA* stehen verschiedene Elemente zur Modellierung des Produktsystems oder Projektes zur Verfügung. In einem Projekt können dabei verschiedene Produktsysteme erstellt und miteinander verglichen werden. Bei den Elementen wird vor allem zwischen einem *Flow* und einem *Prozess* unterschieden. Ein *Flow* stellt hierbei einen Elementarfluss dar. Ein Elementarfluss ist ein Produkt oder Material. Ein *Prozess* hingegen produziert

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

entweder ein Material oder Produkt, oder wandelt diese um. In den Elementarflüssen lassen sich zusätzlich die Eigenschaften ebendieser anpassen, beispielsweise die Länge oder die Masse. Sollte sich ein Elementarfluss oder Prozess noch nicht in der importierten Datenbank befinden, können diese selbst modelliert werden.

Um eine LCA zu erstellen muss das zu betrachtende Produkt in ein Produktsystem definiert werden. Dieses System hat einen In- und Output. Im Input werden alle einzelnen notwendigen Bauteile dargestellt und der Output stellt den gesamten Speicher dar. Dabei fließen vor allem Elementarflüsse in die einzelnen Prozesse und werden in diese umgewandelt. Ist das fertige Produktsystem aufgebaut, kann mit der Berechnung der Umweltauswirkungen begonnen werden. Hierzu muss eine „Life Cycle Impact Assessment Method“, kurz LCIA-Methode, gewählt werden. Ist das geschehen, wird von *openLCA* die Berechnung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Umwelt begonnen. Diese Ergebnisse schlüsseln auf, an welcher Stelle beispielsweise das meiste CO_2 produziert wird, oder in welchem Land eine besonders hohe Umweltverschmutzung auftritt, wenn das jeweilige Herstellungsland der Elementarflüsse bekannt ist.

6.2 Durchführung der LCA in *openLCA*

In dem Kapitel wird die Vorgehensweise der Durchführung der LCA erklärt. Allen voran wie die Daten aufbereitet worden sind und die Modelle der Speicher in *openLCA* gebildet worden sind.

6.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen der LCA

Ziel dieser LCA ist es, die Umweltwirkungen von unterschiedlichen Tankwärmespeichersystemen unter standardisierten Rahmenbedingungen vergleichend zu bewerten. Die Ergebnisse sollen ökologische Verursacher identifizieren und mögliche Optimierungspotenziale aufzeigen.

Die Analyse erfolgt auf Produktebene und berücksichtigt alle relevanten Lebensphasen des jeweiligen Speichersystems. Dabei liegt der Fokus auf einer vollständigen Betrachtung von der Materialgewinnung über die Herstellung und Nutzung bis zur Entsorgung. Die Ergebnisse dienen darüber hinaus als Grundlage für strategische Entscheidungen im Kontext nachhaltiger Wärmespeicherung. Wie bereits oben erwähnt, werden aufgrund der Datenlage nicht alle Schritte im Detail betrachtet. Die Modellierung wurde so aufgebaut, dass jede der Speichervarianten als separates Produktsystem abgebildet wurde, jedoch unter vergleichbaren Rahmenbedingungen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

6.2.2 Systemgrenzen, Einschränkungen und Annahmen

Der typische Lebenszyklus eines Energiespeichers mit der Reihenfolge und Unterteilung der einzelnen Lebenswegphasen wird in Abbildung 18 dargestellt.

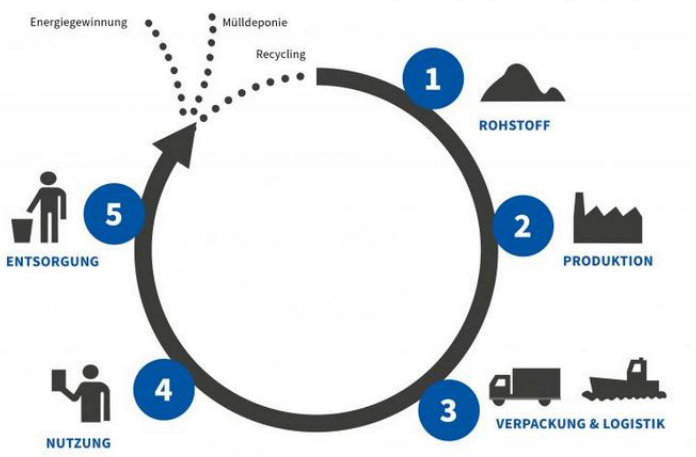


Abbildung 18: Darstellung Produktlebenszyklus (Communication Consultants, 2025)

Der Produktlebenszyklus beginnt mit der Rohstoffgewinnung, dabei werden Betriebsmittel und Energieaufwendungen berücksichtigt, die für die Extraktion der Rohstoffe aus ihren Fundstätten und für die ersten Verarbeitungsschritte benötigt werden. Als nächster Schritt folgt die Produktionsphase, diese umfasst alle Aufwendungen die mit der Produktion der Speicher verbunden sind. Anschließend folgt die Transportphase, welche die Aufwendungen für Transport, Aufstellung und die Installation beinhaltet. Für die Nutzungsphase werden alle Aufwendungen berücksichtigt, welche zwischen Installation und Entsorgung des Produktes anfallen. Da ein Energiespeicher mit dem Energiesystem in Wechselwirkung stehen kann, kann dies in die Bewertung der Nutzungsphase einbezogen werden. Abschließend betrachtet man die Entsorgungsphase. Diese kann aus einer Deponierung oder aus Verwertung bestehen. Nicht berücksichtigt wurden: Verpackung, Wartung, sekundäre Infrastruktur, wie z. B. Hausanschluss oder Anschlüsse an das öffentliche Energieversorgungssystem, sowie Betriebsstrategien außerhalb des Speichersystems.

Bei der Durchführung der LCA werden verschiedene Annahmen getroffen, Einschränkungen und begrenzte Datenverfügbarkeit müssen getroffen werden. Die Umsetzung dieser Systemgrenzen, Einschränkungen und Annahmen erfolgt transparent für jeden Speicher.

Eine Limitation dieser LCA ist, dass es keine vollständige Lebenszyklusbetrachtung gibt. Die End-of-Life-Phase wurde aufgrund ihrer Komplexität und der nicht vorhandenen Datenlage nicht modelliert. Bei der Primärdatenerhebung mussten ebenfalls Annahmen getroffen werden, da die Datenlage unvollständig war.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Limitationen bestehen zudem bei den Daten aus der Datenbank, da einige Prozesse veraltet sein oder die verwendeten Bauteile nur unzureichend abbilden können. Diese Einschränkungen führen zu Unsicherheiten in den Ergebnissen. Durch die einheitliche Anwendung der Annahmen auf alle betrachteten Speicher bleibt die Vergleichbarkeit der Szenarien dennoch gewährleistet. Alle Annahmen wurden dokumentiert und, sofern möglich, durch Literaturquellen abgesichert. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wurden Screenshots der Modellstruktur sowie die Flussdiagramme der Produktsysteme in den Anhang aufgenommen. Die Nutzungsphase wurde auf Grundlage eines vereinfachten Szenarios modelliert: Da Wärmespeicher selbst keine aktive Energie verbrauchen, sondern Wärme lediglich speichern, wurde lediglich ein geringer Wärmeverlust über die Nutzungsdauer in Form von Energieverlusten, die durch Nachheizung kompensiert werden müssen, berücksichtigt.

6.2.3 Beschreibung der untersuchten Speicher

Zur Erhebung der technischen Spezifikationen wurden Firmen und Energieanbieter kontaktiert. Die erhaltenen Datenblätter und Materialinformationen lieferten Angaben zu Wandstärke, Isolierungsart und verbauten Komponenten. Diese Informationen bildeten die Grundlage für die Materialmodellierung in *openLCA*. Die Bereitstellung von Daten und Unterlagen stellen einen wesentlichen Teil der Datenbasis dieser Arbeit dar. Die Daten beinhalten Ausschreibungen, technische Anforderungen und Baupläne, zusätzlich wurden konkrete Fragen von den Unternehmen und Energieanbietern beantwortet. Die technischen Angaben basieren auf vertraulichen Quellen und dürfen nicht veröffentlich werden. Daher werden die Speicher im Folgenden als Speicher A, Speicher B, Speicher C und Speicher D bezeichnet. Die vier betrachteten Speichersysteme unterscheiden sich hinsichtlich Größe, Materialauswahl und Anwendungskontext. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit wurden alle Speicher mit Blick auf Volumen, Einsatzdauer und Bauteilstruktur analysiert. Die Sachbilanz besteht aus den Einzelteilen der Speicher, welche in den nächsten Kapiteln genauer betrachtet werden. Abbildung 19 stellt einen Fernwärmespeicher für ein öffentliches Energienetz dar, welcher den in der Arbeit der betrachteten Speicher B, C und D ähnelt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 19: Fernwärmespeicher des Heizkraftwerks Leipzig Süd, Systemgrenze in rot markiert (VDE Verlag GmbH, 2025)

Der Fernwärmespeicher der Leipzig Süd ist eine 60 m hohe Stahlkonstruktion mit einem Durchmesser von 32m. Der Speicher kann durch die Zwei-Zonen-Technologie bis zu 42.300m^2 Wasser mit einer Temperatur bis zu 120°C speichern (VDE Verlag GmbH, 2025). Der Speicher ähnelt den betrachteten Speichern B, C und D. In

Tabelle 9 werden die in dieser Arbeit betrachteten Tankspeicher zusammengefasst.

Speicher	Volumen	Hauptmaterial Mantel	Isolierung	Durchmesser	Höhe
A	34 m^3	S235JR	Steinwolle	2,5 m	6,93 m
B	12.800 m^3	S235JR	Dämmfilz[21]	25 m	42 m
C	56.000 m^3	S235JR	Glaswolle-Dämmfilz	43 m	45 m
D	31.350 m^3	S235JR	Steinwolle	30 m	47,8 m

Tabelle 9 Übersicht betrachteter Speicher

Auf die Annahmen der einzelnen Speicher wird im nächsten Kapitel eingegangen. Ergänzend wurden Daten aus der Literatur verwendet, um Materialmengen, Lebensdauer und Entsorgungsszenarien fundiert zu modellieren. Alle vier betrachteten Speicher stehen im mitteleuropäischen Raum. Um an die Massen der Speicher zu kommen, wurde über die Fläche, die Dichte und das Material die Massenanteile berechnet. Dieses Vorgehen gewährleistet eine transparente, reproduzierbare Modellierung und erlaubt eine direkte Vergleichbarkeit mit anderen

[21] https://www.isover-technische-isolierung.de/produkte/u-tfn-23-as-si-technischer-filz-ultimate#descriptions

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Speichergeometrien und Materialkonfigurationen, die nach demselben Schema in *openLCA* aufgebaut wurden.

Generelle Annahmen

Aufgrund der fehlenden Datenlage wurde Annahmen getroffen und nicht relevante Bauteile vernachlässigt.

- bei allen vier Speichern wird nur der Speicher alleine betrachtet
- Pumpen, Verrohrungen, Anschlüsse, Armaturen, sowie die Mess- und Regelungstechnik werden vernachlässigt

Die Nutzungsphase wurde auf Grundlage eines vereinfachten Szenarios modelliert: Da Wärmespeicher selbst keine aktive Energie verbrauchen, sondern Wärme lediglich speichern, wurde lediglich ein geringer Wärmeverlust über die Nutzungsdauer berücksichtigt, in Form von Energieverlusten, die durch Nachheizung kompensiert werden müssen. Für die betrachteten Komponenten wird eine ähnliche Lebensdauer angenommen, sodass keine gesonderten Annahmen zur Lebensdauer erforderlich waren.

Speicher A: Einfamilienhaus

Für das Einfamilienhaus wurde ein ‚Idealspeicher' modelliert. Solche Speicher in der betrachteten Größenordnung, Höhe 6,93 m, Durchmesser 2,5m, Volumen 34m³, sind am Markt etabliert und werden typischerweise als glasfaserverstärkte Kunststoff- oder Stahlspeicher angeboten. Wird der Wärmespeicher in das Gebäude integriert, können die Speicherverluste als zusätzliche Wärmequelle in den Wintermonaten genutzt werden. Bei einer Außenaufstellung hingegen ist eine entsprechende Wärmedämmung erforderlich.

Im Modell wurde ein Stahlspeicher angenommen. Die Mantelhülle besteht aus Stahl S235JR (Dichte 7850kg/m³), woraus sich ein Gesamtgewicht von 2523kg ergibt. Als Dämmmaterial wurde Steinwolle berücksichtigt, welche eine Masse von 514,16kg aufweist. Ein Fundament wurde im Modell nicht einbezogen. Eine schematische Darstellung des Speichers findet sich in Abbildung 20.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

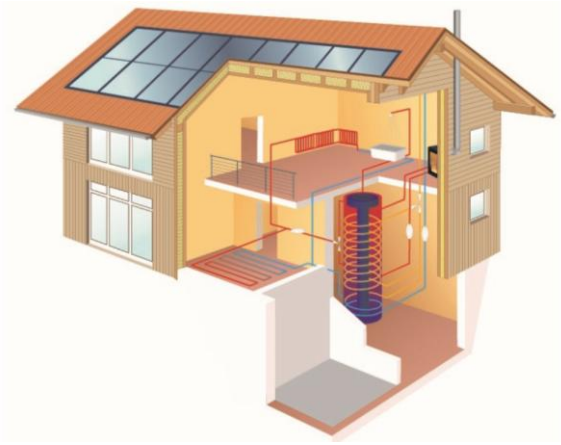


Abbildung 20: Schematische Darstellung von einem Wasserspeicher in einem Einfamilienhaus (Jenni Energietechnik AG, 2025b)

Speicher B: Einspeisung Fernwärmenetz

Der Speicher ist ein druckloser, wassergefüllter Zwei-Zonen-Speicher für saisonale Wärmespeicherung und konnte aufgrund der zur Verfügung gestellten Daten sehr genau analysiert werden. Der zylindrische Stahltank hat eine Höhe von 55 m bei einem Durchmesser von 25 m mit einem Speichervolumen von 12.800m^3. In der unteren Zone befindet sich das heiße Wasser mit bis zu 115°C, in der oberen Zone, welche mit kälterem Wasser gefüllt ist, wird der notwendige Druck erzeugt, um das heiße Wasser bei über 100°C drucklos zu halten und sicher gestellt wird, damit das Heizwasser darunter bei über 100°C nicht verdampft. Abbildung 21 zeigt den Zweizonenspeicher in einer schematischen Darstellung. Der obere Teil des Speichers wurde in der Betrachtung der LCA nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um einen Aufbau für ein Panorama-Restaurant handelt und diese für die Funktion und somit für die ökologische Betrachtung des Tankspeichers irrelevant ist.

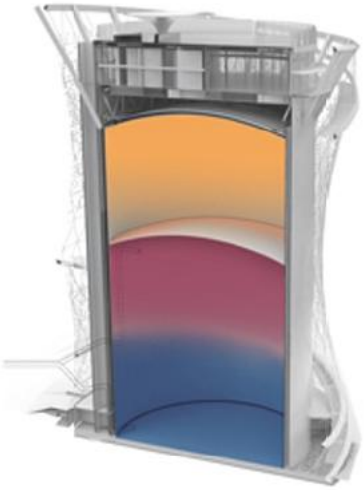


Abbildung 21: Zweizonenspeicher, Quelle vertraulich

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Aufgrund der zur Verfügung gestellten Baupläne konnte der Speicher sehr genau analysiert werden. So konnte über die Anzahl der verwendeten Bleche der Materialeinsatz berechnet werden. Da verschieden große Bleche verwendet wurden, wurde davon der Mittelwert genommen. Da die Anzahl der Bleche vorhanden war, konnten auch die notwendigen Meter, welche verschweißt werden müssen, berechnet werden. Das Dach des Speichers wurde mit Dämmplatten aus Steinwolle und der Mantel mit einem Isolierfilz isoliert. Auf die Isolierung wurde eine spezielle Abdeckung angebracht, welche mit einer dekorativen Fassade verkleidet wurde. Die Abdeckung und die Fassade wurden bei der Modellierung nicht berücksichtigt, da es sich hierbei um eine besonders aufwendige Kunst-Fassade handelt, welche keinen Einfluss auf den Speicher in dessen Funktion oder auf die ökologische Bewertung hat. Eine genaue Auflistung der Daten befindet sich im Anhang in den Tabelle 13, Tabelle 14, Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17.

Nach den Berechnungen kommt der Speicher auf folgendes Gewicht:

Gesamtgewicht Boden, Mantel, Dach	786.411,00 kg
Gewicht An- und Einbauten	44.393,00 kg
Gesamtgewicht Behälter	830.804,00 kg

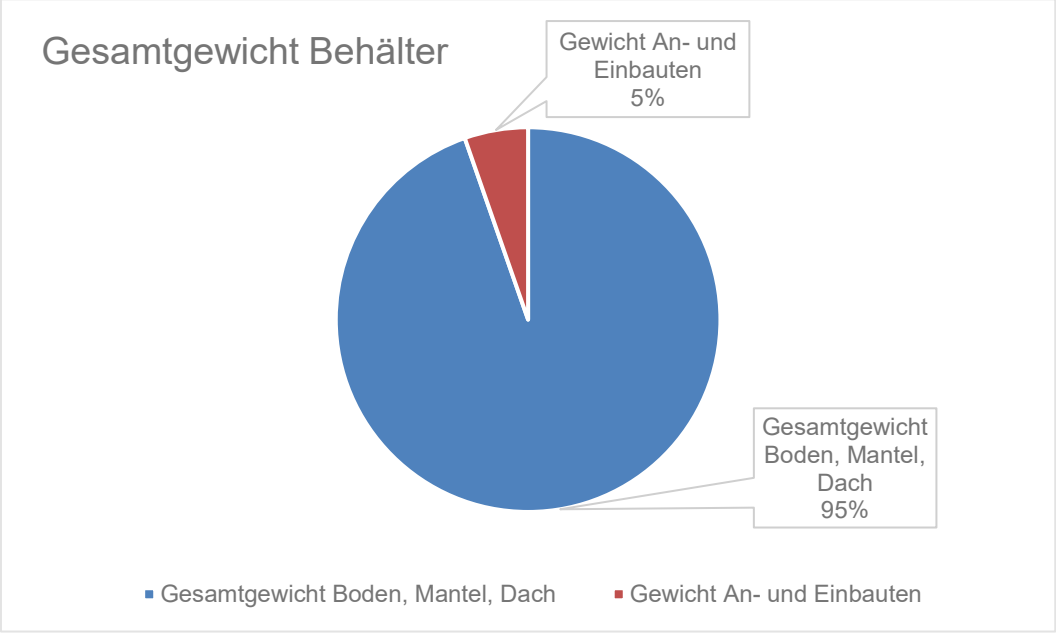


Abbildung 22: Grafische Darstellung der Materialanteile von Speicher B, eigene Darstellung

Für die Modellierung wurde die 95 %-Cut-off-Methode angewendet. Das bedeutet, dass alle Material- und Energieflüsse berücksichtigt wurden, die zusammen mindestens 95% der Masse- oder Energieinhalte des Systems ausmachen. Komponenten oder Prozesse, deren Beitrag unter 5% lag, wurden aus Gründen der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Datenverfügbarkeit und Komplexität nicht im Detail modelliert. Welche Komponenten davon betroffen sind, siehe Anhang in Tabelle 15. Diese nicht erfassten Anteile betreffen vor allem Ventile, Verrohrungen, Dichtungen, Halterungen und die Sensorik.

Da diese Anteile keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtergebnisse haben, ist die Anwendung des 95%-Cut-off-Kriteriums methodisch vertretbar und entspricht gängiger Praxis in Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14044.

Als Fundament für diesen Speicher wurden 400 Tonnen Stahl für die Bewehrung und 5000 Tonnen Beton angenommen.

Speicher C: Einspeisung Fernwärmenetz

Dabei handelt es sich um einen geschweißten Stahlspeicher mit einer Höhe von 45 m, einem Durchmesser von 43 m und einem Fassungsvermögen von 56.000 m^3. Das Wasservolumen in diesem Speicher bleibt durchgehend gleich hoch, sobald oben das heiße Wasser einströmt, wird unten Wasser entnommen wird. Der Speicher hat eine maximale Leistung von 200 Megawatt und kann 13 Stunden Wärme liefern bevor er vollständig entladen ist. Dieser Speicher wird ebenfalls täglich be- und entladen. Der Speicher ist aus Stahl gefertigt, die Mantelbleche haben im oberen Bereich eine Wandstärke von 12 mm und im untersten Bereich eine Wandstärke von 38 mm. Die Stahlbleche wurden mittels Elektroden- und UP-Schweißverfahren miteinander verbunden. Nach innen gibt es keine weitere Abdichtung oder Isolierung. Nach außen hin ist der Speicher mit einer 400 mm Glaswolle-Dämmfilz Schicht isoliert, die in 2 Lagen zu je 200 mm aufgeteilt ist. Im Inneren des Speichers gibt es keine Wärmetauscher und keine Pumpen, lediglich Vorlauf- und Rücklaufpumpen im separaten Pumpenhaus. Die Verrohrung umfasst eine Heiß-Leitung und eine Kalt-Leitung, welche außen am Speicher verlaufen. Im Inneren befindet sich ein Rohr mit Düse. Zusätzlich ist eine Polsterdampfanlage vorhanden, die zur Abschottung zur Atmosphäre dient. Bei diesem Speicher wurde das Schweißen in der Betrachtung vernachlässigt, da keine Daten über die Anzahl der Bleche vorhanden waren. Genaue Daten siehe Anhang Kapitel 10.2 Speicher C.

Speicher D: Einspeisung Fernwärmenetz

Bei Speicher D handelt es sich um einen einwandigen Flachbodentank ohne inneren Überdruck mit einer maximalen Betriebstemperatur von < 100°C in der unteren Zone mit einer maximalen Leistung von 75 Megawatt und einer Energieleistung von 650.000 kWh. Der Speicher hat eine Höhe von 47,8 m und einen Durchmesser von 30 m. Der Wärmespeicher dient als zentraler Puffer im regionalen Fernwärmenetz und ermöglicht die Entkopplung von Wärme- und Stromproduktion. Durch die große Speicherkapazität kann überschüssige Wärme aus Holzfeuerungen, Biomasse- oder Biogasanlagen aufgenommen und über mehrere Tage bedarfsgerecht abgegeben

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

werden. Dadurch wird die Versorgungssicherheit erhöht, insbesondere in Zeiten hoher Nachfrage oder bei Produktionsschwankungen. Gleichzeitig erlaubt der Speicher einen kontinuierlichen, effizienten Betrieb der Erzeugungsanlagen, was unnötige Start- und Stoppvorgänge sowie damit verbundene Emissionen vermeidet. Die Integration überschüssiger erneuerbarer Wärme steigert die Flexibilität des Gesamtsystems, reduziert den Einsatz fossiler Energieträger und stärkt die regionale Wertschöpfung. Der Speicher stellt eine Versorgungseinheit von zwei Tagen sicher. Auch hier konnte aufgrund der vertraulich zur Verfügung gestellten Datenlage die einzelnen Gewichtsanteile berechnet werden – siehe Anhang Tabelle 20, Tabelle 21 und Tabelle 22.

In Abbildung 23 wird der betrachtete Speicher dargestellt. Der rote Rahmen stellt symbolisch die Systemgrenze dar.

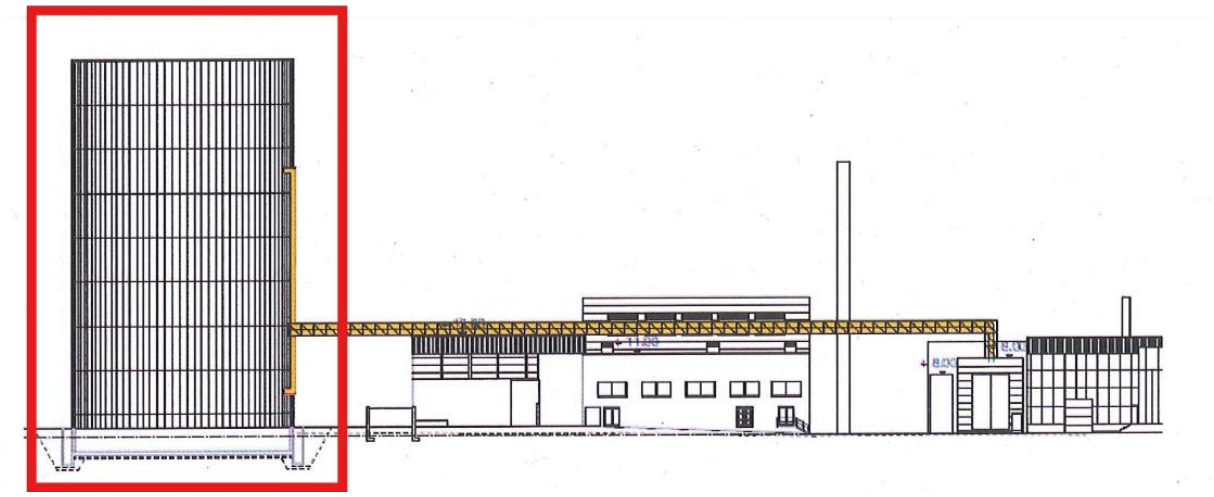


Abbildung 23: Schematische Darstellung Speicher D, vertrauliche Quelle

6.2.4 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit wurde gemäß den Vorgaben der DIN EN ISO 14044 definiert und orientiert sich an vergleichbaren Arbeiten. Für diese Arbeit wurde als funktionelle Einheit 1 kg genommen. Dadurch wird eine vergleichbare Bewertung der Umweltwirkungen der unterschiedlich großen Speicher möglich. Arbeiten, die sich mit dem Betrieb und der Speicherkapazität befassen und entsprechende Daten haben, haben andere funktionelle Einheiten gewählt. Wird ein Speicher mit seiner Speicherkapazität betrachtet, welcher in ein Fernwärmenetz einspeist, wird z.B. als funktionelle Einheit. 25 GWh und eine Lebensdauer von 30 Jahren definiert (Welsch et al., 2018). Die kontroverse Wahl der funktionellen Einheit wird in der vorliegenden Arbeit in der Diskussion der Ergebnisse diskutiert.

Bei der Modellierung der Speicher wurde angenommen, dass sich diese in Mitteleuropa befinden. Gütertransporte wurden nur in Hinblick auf den

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Rohstofftransport berücksichtigt, der bereits in den verwendeten Datensätze berücksichtigt wurde. Die betrachteten sensiblen Speicher sind aufgrund der Datenlagen hinsichtlich der Bauweise und ohne Nutzung oder Betrieb betrachtet worden.

6.2.5 Modellbildung mit *openLCA*

In diesem Abschnitt erfolgt die Erstellung der Speichermodelle, mit den Daten welche zuvor berechnet wurden. Die Modellierung erfolgte in *openLCA* auf Basis eines vereinfachten linearen Produktsystems. Die verwendeten Prozessdaten stammen aus der ecoinvent 3.9.1 Datenbank. Die Stahl- und Dämmstoffmengen wurden über individuelle Flüsse eingebunden und mit den entsprechenden Herstellungsprozessen verknüpft.

Es wurden keine weiteren Betriebskomponenten wie z. B. Wärmetauscher, Pumpen oder Sensorik modelliert. Ebenso wurden Transport, Installation und Entsorgung standardisiert angesetzt. Der Fokus liegt auf der Umweltwirkung der Mantelmaterialien und der Dämmung bei konstanter Nutzung über eine angenommene Lebensdauer von 30 Jahren – die alle betrachteten Komponenten und Bauteile erfüllen.

Speicher A: Einfamilienhaus

Der Speicher A wurde auf den Stahlzylinder und die Isolation reduziert, da die übrigen Komponenten nur einen geringen Einfluss auf die Gesamtergebnisse haben und keine präzisen Datensätze zu deren Materialeigenschaften verfügbar waren. Die Daten des Speichers basieren auf eigenen Annahmen. Der Speicher hat folgende geometrische Parameter:

Füllvermögen [m^3]	34,01
Höhe [m]	6,93
Durchmesser [m]	2,5
Mantelfäche [m^2]	54,42

Tabelle 10: Daten zum Speicher A, eigene Berechnung

Diese Größen bildeten die Basis für die Materialbilanzierung. In *openLCA* wurden die folgenden Materialflüsse als Inputs in das Modell eingebunden:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Flow	Category	Amount	Unit
steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	2523	kg
stone wool	C:Manufacturing/23:Manufacture of other non-metallic mineral products/239:Manufacture of non-metallic mineral products n.e.c./2399:Manufacture of other non-metallic mineral products n.e.c.	514,16	kg

Tabelle 11: Darstellung der Inputflüsse des Speichers A

Beide Flüsse stammen aus der ecoinvent-Datenbank, die als primäre Datenquelle in *openLCA* verwendet wurde. Die Materialien wurden den entsprechenden Prozesskategorien zugeordnet und in einem Produktsystem zusammengeführt, das die Herstellung des Speichers abbildet.

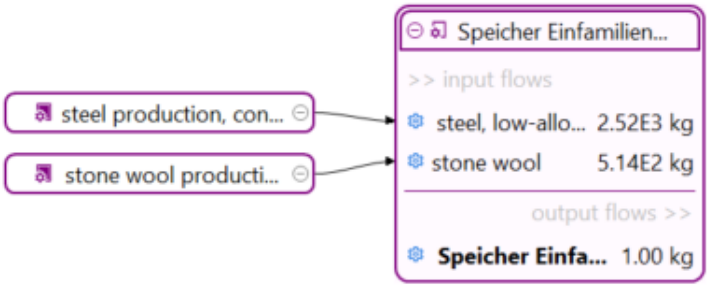


Abbildung 24: Modellgraph Speicher A

Die Abbildung 24 zeigt den in *openLCA* erstellten Prozess, der die Herstellung des Speichersystems abbildet. Die Abbildung visualisiert die Verknüpfung der einzelnen Materialflüsse mit dem übergeordneten Prozess. Auf der linken Seite sind die Input-Prozesse dargestellt:

- steel production, conventional: repräsentiert die Produktion von niedrig legiertem Stahl
- stone wool production: steht für die Herstellung der Dämmung aus Steinwolle

Diese beiden Input-Prozesse sind mit dem zentralen Prozess „Speicher Einfamilienhaus“ verbunden. In der Prozessbox sind die Input-Flüsse aufgeführt, die die für den Speicher benötigten Materialmengen beschreiben. Unterhalb der Input-Flüsse befindet sich der Output-Flow, der das Endprodukt des Prozesses darstellt:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Speicher Einfamilienhaus, 1.00 kg. Dieser Referenzfluss dient als Funktionseinheit des Modells und ermöglicht die spätere Skalierung auf das tatsächliche Gesamtgewicht des Speichers.

Die Abbildung verdeutlicht somit den grundsätzlichen Aufbau eines *openLCA*-Prozesses: links die Eingangsflüsse der benötigten Materialien, rechts der resultierende Produktfluss. Dieses Schema bildet die Grundlage für die Erstellung eines Produktsystems, mit dem die Umweltwirkungen des Speichers in der LCA berechnet werden.

Speicher B: Einspeisung Fernwärmenetz

Die Inputflüsse des Speichers B sind hingegen umfangreicher, da hier eine bessere Datenlage zu Grunde liegt. Die Modellierung des Speichers B erfolgte analog zum zuvor beschriebenen Speicher A (Einfamilienhaus) in *openLCA*, wobei dieselbe Vorgehensweise zur Definition von Materialflüssen, Prozessverknüpfungen und Systemgrenzen angewendet wurde.

Abbildung 25 zeigt den erstellten Prozess für Speicher B, in dem sämtliche relevanten Materialflüsse und Produktionsprozesse abgebildet sind. Neben Stahl und Steinwolle umfasst das Modell zusätzlich Beton, Erdarbeiten und Schweißverbindungen, um den realen Aufbau und die Fertigung des Großspeichers möglichst vollständig zu berücksichtigen. Hier wurde das Fundament und das Verschweißen der Belche berücksichtigt. Die Daten können aus dem Anhang, aus Tabelle 18 entnommen werden.

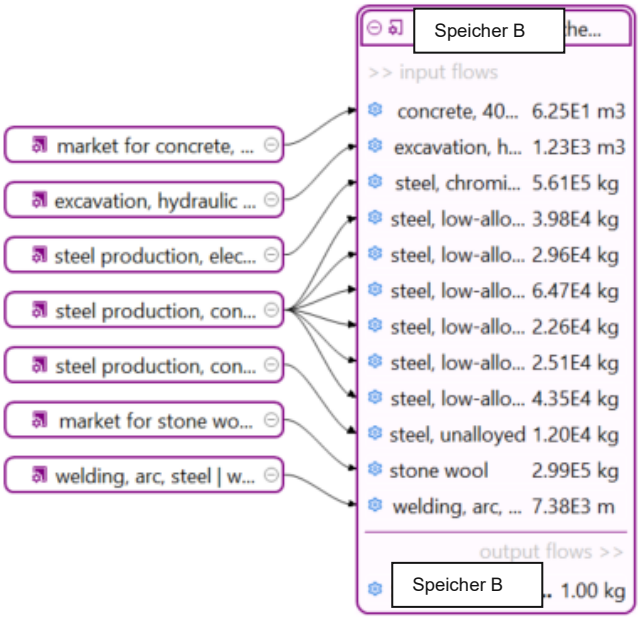


Abbildung 25: Modellgraph Speicher B

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die in Abbildung 25 gezeigten Flüssen wurden aus der ecoinvent-Datenbank entnommen und über die entsprechenden Prozesskategorien miteinander verknüpft. Der Output des Prozesses stellt den fertigen Speicher mit einer Funktionseinheit von 1 kg dar, wodurch eine direkte Vergleichbarkeit der Umweltwirkungen mit dem zuvor beschriebenen Speicher A gewährleistet ist.

Speicher C: Einspeisung Fernwärmenetz

Die Modellierung des Speichers C erfolgte nach dem gleichen Vorgehen wie bei den zuvor beschriebenen Speichern A und B. Der Prozess des Speichers C wurde in *openLCA* als eigenständiger Modellknoten aufgebaut und zeigt die Verknüpfung der relevanten Materialflüsse aus der ecoinvent-Datenbank. Wie in Abbildung 26 dargestellt, wurden die wesentlichen Bauteile des Speichers, wie Beton, Stahl und Dämmung als Input-Flüsse eingebunden. Ergänzt werden diese durch den Aushubprozess, das Fundament, des Speichers.

Bei den Input-Flüssen des Speichers C hingegen wurden die Schweißarbeiten, aufgrund der nicht vorhandenen Kenntnis der Schweißlängen welche beim Speicher B betrachtet wurden, vernachlässigt. Die genauen Daten können aus dem Anhang, siehe Tabelle 19 entnommen werden.

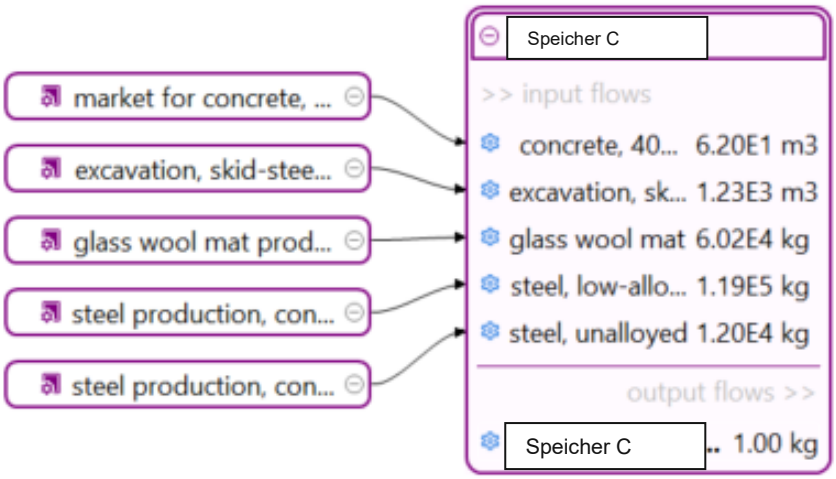


Abbildung 26: Modellgraph Speicher C

Der Prozess gibt als Output den fertigen Speicher C mit einer Funktionseinheit von 1 kg aus.

Speicher D: Einspeisung Fernwärmenetz

Der Speicher D wurde nach demselben Schema wie die zuvor beschriebenen Modelle aufgebaut. Der Prozess von Speicher D bildet den Material- und Energieeinsatz für

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

den Bau des Speichers ab und integriert alle relevanten Materialflüsse aus der ecoinvent-Datenbank. Abbildung 27 zeigt die in *openLCA* angelegten Prozessverknüpfungen. Die genauen Daten können aus dem Anhang, aus Tabelle 23 entnommen werden. Neben Beton und Stahl enthält das Modell den Prozess für Aushubarbeiten sowie die Wärmedämmung aus Steinwolle.

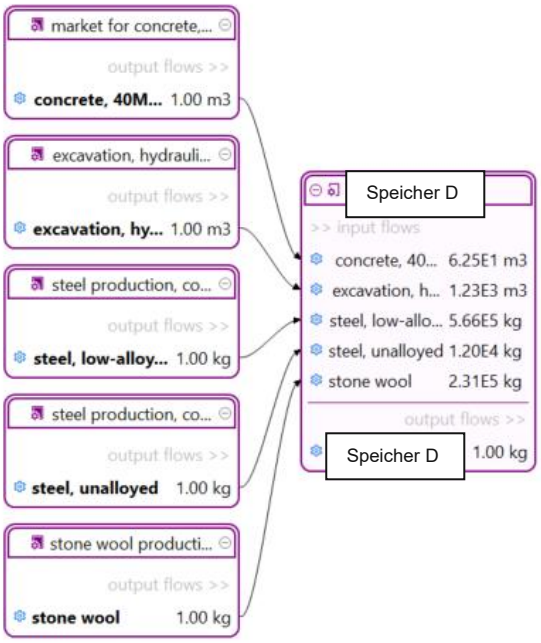


Abbildung 27: Modellgraph Speicher D

Der Prozess liefert als Output den fertigen Speicher D mit einer Funktionseinheit von 1 kg. Durch die identische Modellierungslogik und Systemabgrenzung wie bei den anderen Speichern sind die Ergebnisse direkt vergleichbar.

Die Abbildung 24 bis Abbildung 27 verdeutlicht den typischen Aufbau eines *openLCA*-Prozesses: Die Material- und Prozessflüsse, links, werden mit dem zentralen Speicherprozess, rechts, verknüpft. Dieses Vorgehen ermöglicht eine konsistente Bewertung der Umweltauswirkungen aller vier Speichertypen im weiteren Verlauf der LCA.

Die einheitliche Modellstruktur und Methodik ermöglichen es, Unterschiede in Materialeinsatz, Herstellungsaufwand und Umweltwirkungen zwischen den Speichern systematisch zu bewerten und anschließend im Rahmen der LCA gegenüberzustellen. Die Abbildungen verdeutlichen, dass sich die vier Speicher nicht in ihrer Bauweise, sondern in der modellierten Detaillierung und Systemtiefe unterscheiden. Während der Speicher A vereinfacht aufgebaut wurde und nur die Hauptmaterialien Stahl und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Dämmung enthält, sind in den Speichern B bis D zusätzliche Prozesse integriert, um den realen Bauablauf und Materialeinsatz vollständiger abzubilden. In allen Fällen wurde der Speicher als eigenständiger Prozess mit Input-Flüssen modelliert. Die Modelle folgen demselben methodischen Schema: Materialbereitstellung → Verarbeitung und Montage → Ausgabe des fertigen Produkts.

Damit zeigen die Abbildungen, dass alle Speicher technisch identisch aufgebaut, jedoch modelltechnisch unterschiedlich detailliert umgesetzt wurden. Diese Variation dient dazu, den Einfluss des Modellierungsumfangs auf die Ergebnisse der LCA zu analysieren und gleichzeitig die Vergleichbarkeit der vier Tankspeicher sicherzustellen.

6.2.6 Wirkungsabschätzung - Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, existieren zahlreiche Wirkungsabschätzungsmethoden, die je nach Untersuchungsrahmen unterschiedliche Schwerpunkte setzen. In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse mit der Methode *ecoinvent - ReCiPe 2016 v1.03, midpoint (H)* in *openLCA* erfasst. *ecoinvent - ReCiPe 2016 v1.03, midpoint (H)* wurde daher angewendet, da sie eine große Bandbreite an Wirkungskategorien abdeckt und insbesondere das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) in der gebräuchlichen Einheit kg CO_2-Äquivalent ausweist. Damit ist ein direkter Vergleich mit bestehenden Studien zu Wärmespeichern möglich. Alle Input- und Outputflüsse aus den Datenbanken sind Rohdaten und haben noch keine Umwelteinwirkung. Bei der Wirkungsabschätzung werden die Inventardaten, basierend aus dem Life Cycle Inventory, aus den Datenbanken entnommenen, in das Modell übertragen und durch die Software in Umweltwirkungen berechnet.

OpenLCA generierte automatisch die gesamte Prozesskette, sodass nicht nur die direkten Materialinputs, wie z. B. Stahl und Isolierung erfasst wurden, sondern auch alle vorgelagerten Prozesse wie Rohstoffförderung, Transport und Energieeinsatz. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung werden grafisch in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Das Sankey-Diagramm visualisiert Stoff- und Energieflüsse und die Umwelteinwirkungen innerhalb des Produktsystems. Die Breite der Pfeile ist proportional zum Beitrag eines Prozesses oder Flusses zur gewählten Wirkungskategorie: je breiter die Linie, desto größer der Einfluss.

6.3 LCA Latentwärmespeicher

Die LCA der Latentwärmespeicher wird nur in der Theorie diskutiert. Die Datenlage hier ist viel geringer. Nicht nur gibt es wenige umgesetzte und realisierte Projekte zu den unterschiedlichen Technologien, so sind die verfügbaren Studien und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Anwendungen sehr unterschiedlich bezüglich Größe und Gesamtkapazität der Speicher, was einen Vergleich der Ergebnisse erschwert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

7 Ergebnisse der LCA

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten LCA vorgestellt. Dabei werden die ermittelten Umweltwirkungen der untersuchten Speichersysteme aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Relevanz für die zuvor definierten Zielsetzungen bewertet. Das in *openLCA* generierte Sankey-Diagramm dient der Visualisierung der Stoff-, Energie- oder Wirkungspfade innerhalb eines Produktlebenszyklus. Es zeigt, wie verschiedene Prozesse miteinander verbunden sind und wie Material- oder Energieflüsse von einem Prozess zum nächsten Übergehen. Die Breite der Flüsse ist dabei proportional zur jeweiligen Menge bzw. zum Beitrag eines Prozesses zu einer bestimmten Umweltwirkung. In dieser Arbeit werden die Sankey-Diagramme genutzt, um die Beitragsanalyse der einzelnen Prozesse zu den untersuchten Wirkungskategorien darzustellen. Sie veranschaulichen, welche Materialien oder Prozessschritte, in welchem Ausmaß Versauerungspotential haben. Durch die mengenproportionale Darstellung lassen sich die Hauptverursacher der Umweltbelastungen im System leicht erkennen. Die Balkendiagramme ergänzen diese Darstellung, indem sie die Beiträge der Hauptkomponenten zum Treibhauspotenzial, der CO_2-Äquivalente aufzeigen. Somit werden sowohl die prozessspezifischen Einflüsse als auch die übergeordneten Unterschiede zwischen den vier modellierten Speichersystemen in Bezug auf ihre Klimawirkung sichtbar.

7.1 Ergebnisse Speicher A

Abbildung 28 zeigt das in *openLCA* erstellte Sankey-Diagramm, das die Beiträge der einzelnen Prozesse zum Versauerungspotenzial, SO_2-Äquivalente, darstellt. Das Diagramm visualisiert die Flüsse entlang der Vorkette, also alle indirekten Umweltwirkungen, die bei der Herstellung der eingesetzten Materialien entstehen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

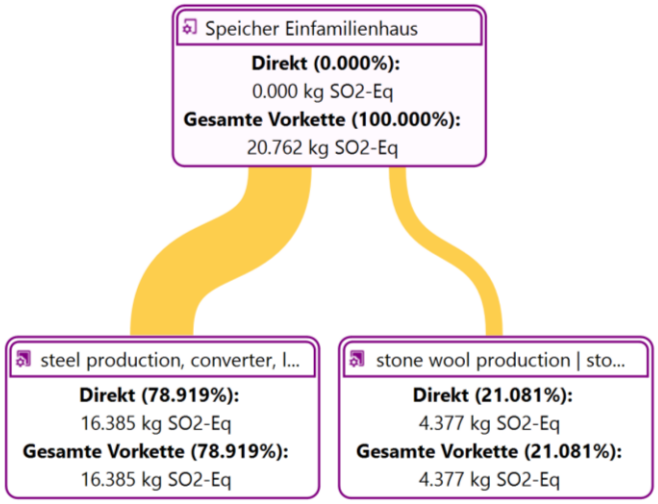


Abbildung 28: Sankey-Diagramm Speicher A

Der Anteil „Direkt (0%)“ bedeutet, dass innerhalb des eigentlichen Prozesses Speicher A keine direkten Emissionen erfasst wurden. Der Speicher selbst verursacht in *openLCA* keine Emissionen, da er nur als Zusammenführung der Materialflüsse modelliert ist und nur die Herstellungsphase berücksichtigt worden ist. Die Emissionen entstehen indirekt in den Vorkettenprozessen, also bei der Produktion der eingesetzten Materialien, wie z. B. dem Stahl und der Steinwolle. Das meiste Versauerungspotenzial stammt aus dem Materialeinsatz der Mantelhülle. Den größten Anteil liefert die Stahlproduktion, mit 78,9% (16,4kg SO_2-Äq), gefolgt von der Steinwolleproduktion, die 21,1% (4,4kg SO_2-Äq) beiträgt. Die gesamten Emissionen summieren sich auf 20,8kg SO_2-Äq.

Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in der Wirkungskategorie Global Warming Potential (GWP100) wider, Abbildung 29.

Abbildung 29: GWP Speicher A

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Das globale Erwärmungspotenziale (GWP100) summiert sich auf ca. 6.686kg CO_2-Äq. Den größten Anteil liefert die Stahlproduktion mit 5.941kg CO_2-Äq und einem Anteil von 89%, gefolgt von der Steinwolleproduktion mit 745kg CO_2-Äq, was rund 11% entspricht. Damit wird deutlich, dass der ökologische Fußabdruck des Speichers maßgeblich durch den Materialeinsatz des Stahlmantels bestimmt wird, während die Dämmung im Vergleich nur einen untergeordneten Beitrag leistet.

7.2 Ergebnisse Speicher B

Abbildung 30 zeigt das Sankey-Diagramm von Speicher B, der mit seiner Größe einen typischen Großspeicher darstellt, der in ein öffentliches Fernwärmenetz einspeist. Das Diagramm zeigt, analog zu Speicher A, die Beiträge der einzelnen Prozesse zum Versauerungspotenzial. Wie zuvor treten keine direkten Emissionen auf, da ausschließlich die Herstellungsphase betrachtet und der Betrieb des Speichers vernachlässigt wurde. Sämtliche Umweltwirkungen resultieren somit aus den Vorkettenprozessen der Materialproduktion und -verarbeitung.

Die Umweltwirkungen summieren sich auf 14.514kg SO_2-Äq. Wesentliche Beiträge stammen von der Steinwolleproduktion, mit einem Anteil von 17,6%, der Stahlproduktion mit 10,1%, sowie Betonherstellung 0,35%. Auffällig ist, dass die elektrische Stahlproduktion mit 71,5% und somit mit 10.384kg SO_2-Äq den größten Anteil darstellt.

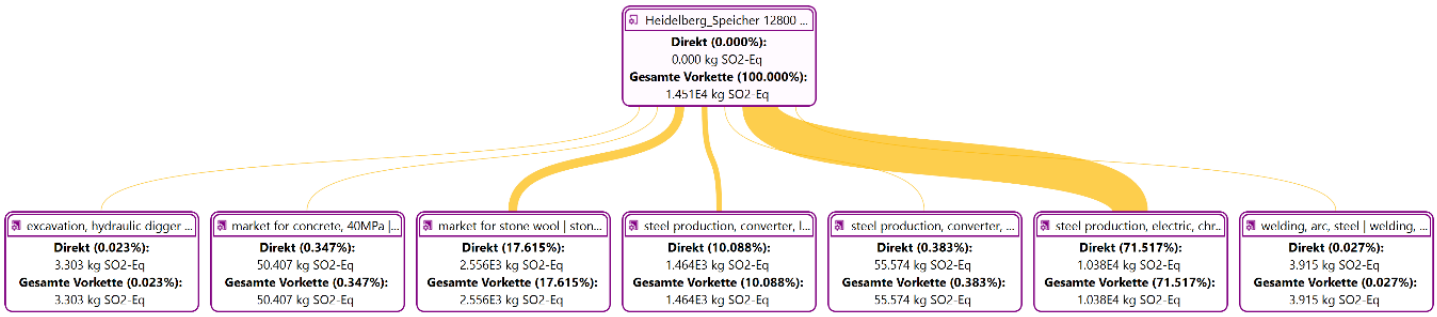


Abbildung 30: Sankey-Diagramm Speicher B

Die Ergebnisse der Wirkungskategorie Global Warming Potential (GWP100) sind in Abbildung 31 dargestellt. Die gesamten Treibhausgasemissionen betragen ca. 3,16 Mio. kg CO_2-Äq. Haupttreiber ist die Stahlproduktion, mit 2,72 Mio. kg CO_2-Äq, mit einem Anteil von ca. 86%. Weitere Beiträge stammen von niedriglegiertem Stahl 53.000kg CO_2-Äq, entspricht ca. 1,7%, der Steinwolle mit 437.000kg CO_2-Äq, ca. 14%)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

sowie dem Beton mit 22.700kg CO_2-Äq, und rund ca. 1% Anteil. Dargestellt in Abbildung 31.

Abbildung 31: GWP Speicher B

Damit bestätigt sich auch für Speicher B, dass die Stahlproduktion den dominanten Einflussfaktor sowohl auf das Versauerungs- als auch auf das Treibhauspotenzial darstellt. Der hohe Anteil chromhaltiger Stähle verstärkt diesen Effekt aufgrund der energieintensiveren Legierungsprozesse.

7.3 Ergebnisse Speicher C

Abbildung 32 zeigt das Sankey-Diagramm von Speicher C. Dieser Speicher speist ebenfalls ins öffentliche Fernwärmenetz ein. Wie bereits bei den vorherigen Speichern treten auch hier keine direkten Emissionen auf, da nur die Herstellungsphase betrachtet wurde und der Betrieb des Speichers nicht in die Analyse einfließt. Die Umweltwirkungen entstehen somit ausschließlich in den Vorkettenprozessen der Materialproduktion und -verarbeitung.

Die Gesamtemissionen belaufen sich auf 16.743kg SO_2-Äq. Den größten Beitrag liefern Glaswolleproduktion mit einem Anteil von 47,2% und der Stahlproduktion, mit einem Anteil von 46,3%. Beton mit einem Anteil von 3,0% und Erdarbeiten mit 0,2% sind im Vergleich gering. Aufgrund der Zahlen der Ergebnisse aus Speicher B wurde bei diesem Speicher das Schweißen vernachlässigt, da sich der Einfluss nicht wesentlich auf das Ergebnis auswirkt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

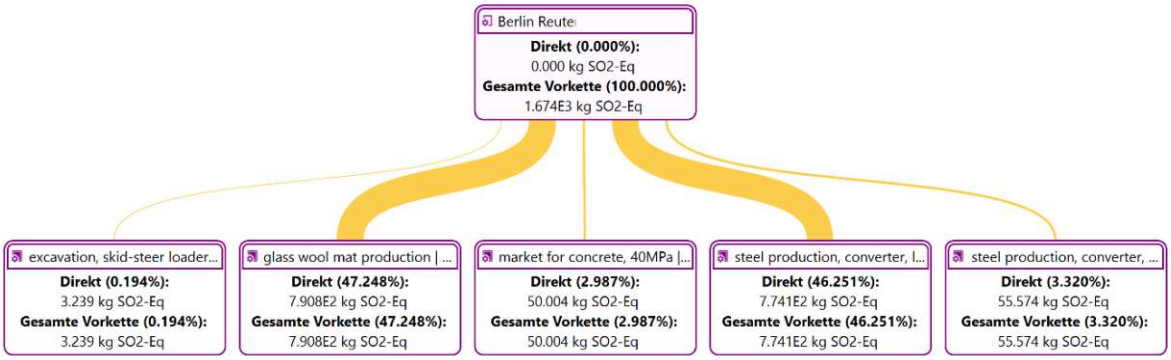


Abbildung 32: Sankey-Diagramm Speicher C

Bei Speicher C, dargestellt in Abbildung 33 belaufen sich die Gesamtemissionen auf ca. 515.000kg CO_2-Äq. Die größten Anteile entfallen auf die Stahlproduktion mit 281.000kg CO_2-Äq, und einem Anteil von ca. 55% und der Glaswolleproduktion mit 190.000kg CO_2-Äq und einem Anteil von 37%. Kleinere Beiträge stammen von Beton mit 22.500kg CO_2-Äq und einem Anteil von 4%, sowie Erdarbeiten

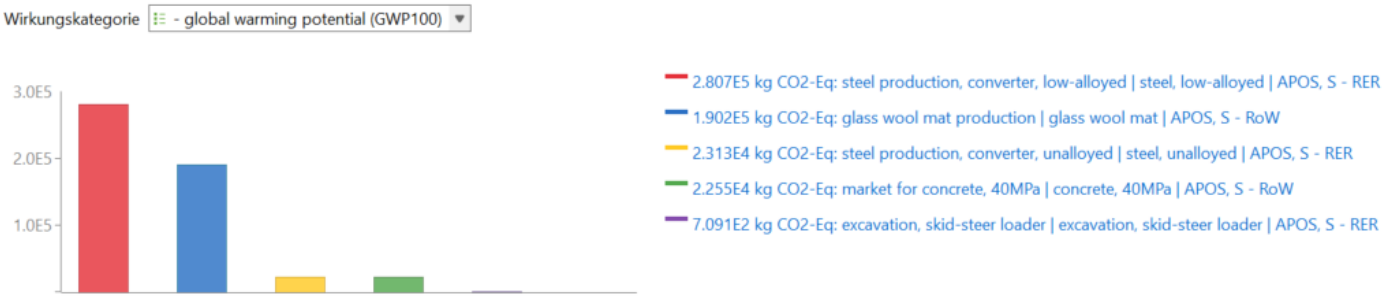


Abbildung 33: GWP Speicher C

Im Vergleich zu Speicher A fällt auf, dass sich die relative Verteilung der Emissionen verändert: Während bei Speicher A die Stahlproduktion klar dominiert, trägt beim Speicher C auch die Dämmung wesentlich zum Gesamtergebnis bei. Dies liegt am Einsatz von Glaswolle, deren Herstellung energieintensiver ist als jene von Steinwolle. Dadurch ergibt sich ein nahezu gleichwertiger Einfluss von Stahl- und Dämmstoffproduktion auf das Versauerungs- und Treibhauspotenzial.

Im Vergleich zu Speicher B sind die absoluten Emissionen deutlich geringer. Grund dafür ist der geringere Gesamtmaterialeinsatz sowie der Verzicht auf hochlegierte bzw. chromhaltige Stähle, die in Speicher B die größten Belastungen verursachen.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der ökologische Fußabdruck des Speichers C nicht mehr allein durch den Stahlanteil bestimmt wird, sondern in ähnlichem Maße

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

durch die gewählte Dämmung beeinflusst wird. Eine Optimierung beider Komponenten bietet somit das größte Potenzial zur Reduktion der Umweltwirkungen.

7.4 Ergebnisse Speicher D

Abbildung 34 zeigt das Sankey-Diagramm von Speicher D, der mit seiner Größe einen Speicher darstellt, welcher ebenfalls ins öffentliche Fernwärmenetz einspeist. Wie bei den vorherigen Speichern wurden keine direkten Emissionen berücksichtigt, da lediglich die Herstellungsphase in die Analyse einbezogen wurde. Alle Umweltwirkungen entstehen somit in den Vorkettenprozessen der Materialproduktion und -verarbeitung. Die Summe der Umweltwirkungen beträgt 5.715kg SO_2-Ä. Die Hauptanteile entfallen auf Stahlproduktion mit einem Anteil von 63,9% und der Steinwolleproduktion mit einem Anteil von 34,2%. Erdarbeiten und Beton spielen eine untergeordnete Rolle (<1%).

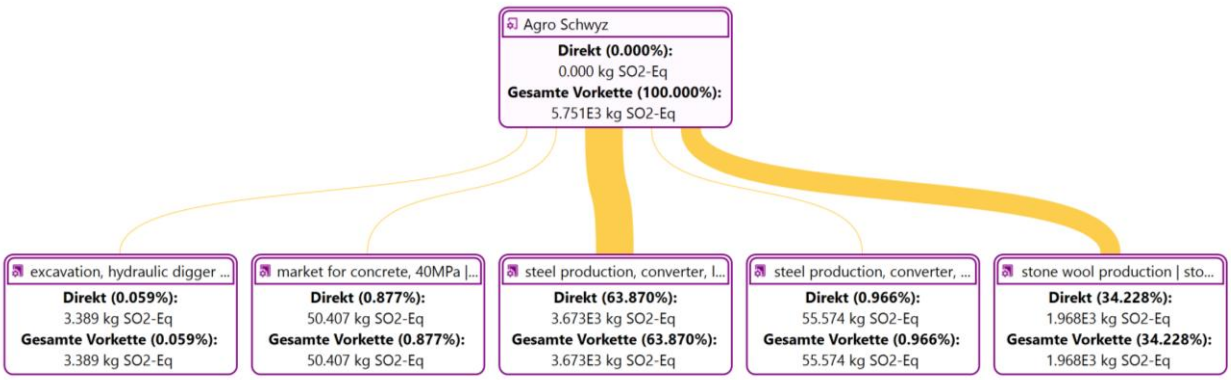


Abbildung 34: Sankey Diagramm Speicher D

Abbildung 35 zeigt die Gesamtemissionen von Speicher D. Diese summieren sich auf ca. 1,68 Mio. kg CO_2-Äq. Hauptanteil ist die Stahlproduktion mit 1,33 Mio. kg CO_2-Äq, und einem Anteil von 79%. Weitere Beiträge stammen von der Steinwolleproduktion, mit 335.000kg CO_2-Äq und ca. 20% Anteil, während Beton mit 22.700kg CO_2-Äq, und nur ca. 1% Anteil und Erdarbeiten ebenfalls nur eine geringe Rolle spielen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

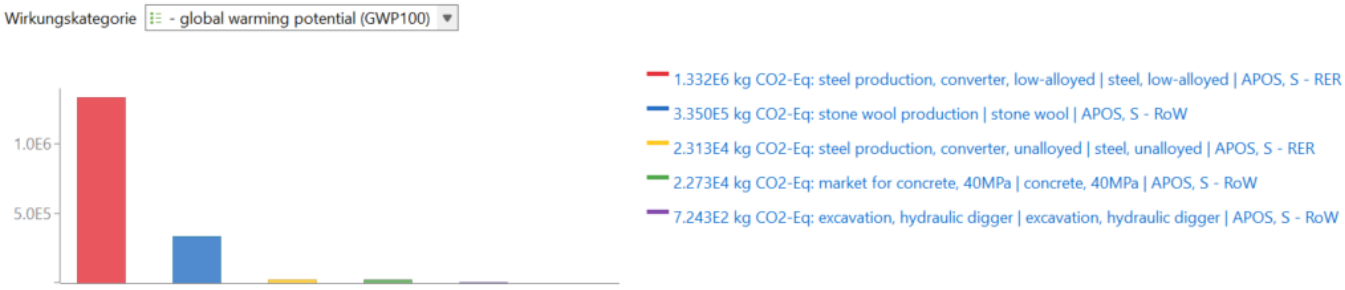


Abbildung 35: GWP Speicher D

Im Vergleich zu Speicher C fällt auf, dass sich das Verhältnis von Stahl- zu Dämmstoffanteil wieder stärker zugunsten des Stahls verschiebt. Während bei Speicher C die Glaswolle aufgrund ihres energieintensiven Herstellungsprozesses einen ähnlich hohen Beitrag wie der Stahl leistete, zeigt Speicher D – mit Steinwolle als Dämmmaterial – ein emissionsärmeres Dämmprofil. Die Umweltwirkungen werden daher wieder stärker durch die Stahlproduktion geprägt.

Im Vergleich zu Speicher B liegen die absoluten Emissionen deutlich niedriger. Dies lässt sich auf den verringerten Materialeinsatz und den Verzicht auf hochlegierte Chromstähle zurückführen, die in Speicher B dominieren. Im Verhältnis zu Speicher A zeigt sich hingegen ein ähnliches Muster, jedoch auf einem höheren absoluten Niveau, da Speicher D eine größere Baugröße aufweist.

Insgesamt bestätigt sich auch bei diesem Modell, dass die Stahlproduktion den größten Einfluss auf beide Wirkungskategorien ausübt. Dämmstoffe und Beton tragen sekundär bei, beeinflussen jedoch die Gesamtbilanz spürbar, insbesondere bei größeren Speichern mit entsprechend höherer Materialmenge.

7.5 Zusammenfassung der vier Speicher

Tabelle 12 fasst die Ergebnisse der LCA zusammen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Speicher	Hauptbeitrag SO_2-Äq	Hauptbeitrag CO_2-Äq
Speicher A	Stahl 78,9%, Steinwolle 21,1%	Stahl 89%, Steinwolle 11%
Speicher B	Stahl 71,5%, Steinwolle 17,6%, Stahl niedriglegiert 10,1%	Stahl 86%, Steinwolle 14%, andere <1%
Speicher C	Glaswolle 47,2%, Stahl 46,3%	Stahl 55%, Glaswolle 37%, andere <10%
Speicher D	Stahl 63,9%, Steinwolle 34,2%	Stahl 79%, Steinwolle 20%, andere <1%

Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse der vier betrachteten Speicher

Die vergleichende Auswertung der vier modellierten Speichersysteme zeigt deutliche Parallelen im Entstehungsmuster der Umweltwirkungen. Sowohl beim Versauerungspotenzial (SO_2-Äq) als auch beim Treibhauspotenzial (GWP100, CO_2-Äq) ist die Stahlproduktion in allen Fällen der dominante Einflussfaktor. Diese Wirkung ist auf den hohen Energiebedarf und die prozessbedingten Emissionen in der Primärstahlherstellung zurückzuführen. Der Anteil der Stahlproduktion an den Gesamtemissionen liegt in allen Szenarien zwischen 55% und 89%, womit sie den ökologischen Gesamteinfluss der Speicher maßgeblich bestimmt.

Mit zunehmender Speichergröße steigen die absoluten Emissionen erwartungsgemäß deutlich an. Der Vergleich von Speicher A und Speicher B zeigt, dass sich die Gesamtemissionen nicht linear, sondern überproportional erhöhen. Dies lässt sich auf den größeren Materialeinsatz sowie auf die Verwendung hochlegierter bzw. chromhaltiger Stähle in Speicher B zurückführen, deren Herstellung besonders energie- und emissionsintensiv ist.

Die Art der Dämmung wirkt sich insbesondere bei den größeren Speichern, wie C und D, merklich auf das Ergebnis aus. Während Steinwolle vergleichsweise geringere Umweltwirkungen aufweist, verursacht die Glaswolle wie in Speicher C einen deutlich höheren Beitrag. In Speicher C führt dies zu einem annähernd gleich großen Anteil von Stahl- und Dämmstoffproduktion am Versauerungs- und Treibhauspotenzial. Die Dämmung entwickelt sich somit bei großvolumigen Speichern zu einem relevanten sekundären Hotspot.

Im direkten Vergleich fällt auf, dass Speicher D, trotz seiner Größe, geringere spezifische Emissionen pro Volumeneinheit aufweist als Speicher B. Dies lässt sich auf die Verwendung einfacherer Stähle und eine materialeffizientere Konstruktion zurückführen. Speicher B zeigt dagegen aufgrund des Einsatzes von Spezialstählen die höchsten Emissionen je Funktionseinheit.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Insgesamt verdeutlicht die Analyse, dass die Umweltwirkungen der Speicher stark materialgetrieben sind. Stahl bleibt der entscheidende Faktor, jedoch beeinflussen auch Dämmmaterialien die Ergebnisse zunehmend, sobald das Verhältnis von Speichervolumen zu Oberfläche ansteigt. Optimierungspotenziale ergeben sich somit vor allem durch:

- den Einsatz von recyceltem oder sekundärem Stahl
- die Substitution hochlegierter Stähle
- der Auswahl von Dämmmaterialien mit geringerer Prozessenergie

Die Ergebnisse zeigen damit nicht nur die dominante Rolle der Materialproduktion, sondern auch den Einfluss konstruktiver und materialtechnischer Entscheidungen auf die ökologische Gesamtleistung thermischer Großspeicher.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Umweltwirkungen der untersuchten Speichersysteme im Wesentlichen durch die Materialwahl und Herstellungsprozesse bestimmt werden. Insbesondere die Stahlproduktion stellt in allen Szenarien den Hauptverursacher dar, während Dämmstoffe, abhängig von Art und Menge, einen signifikanten, aber sekundären Einfluss ausüben. Die Speichergröße und die verwendeten Stahllegierungen verstärken diese Effekte zusätzlich.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

8 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, welche durch *openLCA* berechnet wurden, ausgewertet, kritisch hinterfragt und diskutiert. Die Berechnung der Ergebnisse mithilfe von *openLCA* zeigt auf, in welchen Bereichen die meisten Fossilen CO_2-Äquivalente ausgestoßen werden und welcher Speicher dadurch ökologisch vorteilhaft ist. Des Weiteren wird auf die Ursachen in den Umwelteinwirkungen, die Bedeutung der Materialwahl, der Lebensdauer und der Herstellungsverfahren eingegangen. Ein wichtiger Diskussionspunkt ist auch die Modellierung der Datenlagen.

Bei der Diskussion der LCA der Tankspeicher stehen mehrere Aspekte im Vordergrund: zum einen die Identifizierung und Darstellung der wesentlichen Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, zum anderen die Durchführung und Interpretation von Sensitivitätsanalysen. Dies umfasst die Betrachtung der maßgeblichen Prozesse, Parameter und Annahmen sowie deren Einfluss auf die ermittelten Umweltwirkungen. Zudem wird diskutiert, wie empfindlich die Ergebnisse gegenüber Änderungen zentraler Eingangsgrößen sind und welche Faktoren die Gesamtergebnisse der Wirkungsabschätzung am stärksten prägen. Auf dieser Grundlage lassen sich abschließend fundierte Schlussfolgerungen ziehen und Handlungsempfehlungen ableiten.

8.1 Ergebnisdiskussion der Tankspeicher

Die durchgeführte LCA zeigt deutlich, dass die Umweltwirkungen der untersuchten Wärmespeicher im Wesentlichen durch den Materialeinsatz und die gewählte Konstruktion bestimmt werden. Insbesondere die Stahlproduktion erweist sich über alle Wirkungskategorien hinweg als dominanter Einflussfaktor. Diese Erkenntnis steht im Einklang mit anderen Studien zu thermischen Stahlspeichern, die die energie- und emissionsintensive Herstellung von Primärstahl als zentralen Hotspot bestätigen.

Während die absoluten Umweltwirkungen erwartungsgemäß mit der Speichergröße steigen, variiert deren relative Zusammensetzung. Bei kleinen Systemen (Speicher A) dominiert die Stahlproduktion nahezu vollständig, während bei großvolumigen Speichern (B–D) der Anteil der Dämmmaterialien deutlich zunimmt. Dieses Ergebnis unterstreicht, dass mit wachsender Speicherkapazität auch die Oberfläche und damit der Bedarf an Isolationsmaterial zunimmt, wodurch sich der relative Einfluss von Dämmstoffen auf das Gesamtergebnis verstärkt.

Die Analyse verdeutlicht zudem, dass sich die Ergebnisse verschiedener Wirkungskategorien, das SO_2-Äq und das CO_2-Äq, grundsätzlich decken, jedoch unterschiedliche Gewichtungen der Teilprozesse aufweisen. Dadurch wird die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Notwendigkeit einer mehrdimensionalen Betrachtung deutlich: Ein Material, das in einer Kategorie unauffällig erscheint, kann in einer anderen Wirkungskategorie erhebliche Belastungen verursachen.

Ein weiterer Diskussionspunkt ergibt sich aus der Modellstruktur: Da die Untersuchung auf die Herstellungsphase begrenzt ist, bleiben potenzielle Entlastungseffekte während der Nutzungsphase unberücksichtigt. Eine Einbeziehung des Betriebs, etwa durch Wärmespeicherverluste oder Wartungsmaßnahmen, könnte die Ergebnisse verändern, insbesondere bei großen, langfristig betriebenen Systemen. Ebenso wurde das Lebensende der Speicher, wie z. B. Recyclingpotenziale von Stahl, bislang nicht berücksichtigt, was die Gesamteinschätzung des ökologischen Profils beeinflussen kann. Die Ergebnisse zeigen somit nicht nur die Hotspots der untersuchten Systeme, sondern, wie bereits in Kapitel 7.5 erwähnt, auch zentrale Ansatzpunkte zur Optimierung. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Resultate konsistent und plausibel sind, jedoch im Kontext der getroffenen Annahmen und Systemabgrenzungen betrachtet werden müssen.

Schließlich ist auf die Sensitivität zentraler Parameter hinzuweisen. Veränderungen bei Materialwahl, Dämmstärke, Herstellungsverfahren oder Lebensdauer wirken sich unmittelbar auf die Resultate aus und stellen damit wesentliche Stellgrößen für die Optimierung dar. Die Datenlage erweist sich hierbei als zentrale Herausforderung. Teilweise mussten Annahmen getroffen oder Daten aus Sekundärquellen verwendet werden, was zu Unsicherheiten führt, die bei der Interpretation stets berücksichtigt werden müssen.

8.2 Limitationen

Trotz der gewonnenen Erkenntnisse weist die vorliegende Arbeit mehrere Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Ein zentraler Punkt betrifft die eingeschränkte Datenbasis**.** Für die Modellierung standen nur teilweise detaillierte Herstellerinformationen zur Verfügung, während andere Werte aus Literaturquellen oder Datenbanken übernommen wurden. Dies führt zu Unsicherheiten, insbesondere bei den Materialzusammensetzungen, Wandstärken und Herstellungsprozessen der Speicher.

Darüber hinaus wurde die Analyse auf die Herstellungsphase der Speicher fokussiert. Aspekte wie die Nutzung, Wartung, Alterung oder das Recycling am Ende der Lebensdauer wurden nicht berücksichtigt. Diese Faktoren könnten die Gesamtergebnisse erheblich verändern, indem sich die Umweltwirkungen pro Nutzungsjahr reduzieren oder durch Rückgewinnung von Materialien kompensieren lassen. Angaben zur Lebensdauer, zur Anzahl der Lade-/Entladezyklen oder zur Degradation des Speichermaterials wurden nicht in die Analyse einbezogen. Dadurch

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

bleibt unklar, wie nachhaltig die Speicher im realen Betrieb über 20, 30 oder 50 Jahre wären. Besonders der Vergleich von Speicher D, der nach 13 Stunden vollständig entladen ist, mit Speicher B, der die Wärme über zwei Tage hält, verdeutlicht, dass die Betrachtung allein des Materialeinsatzes nicht ausreicht.

Bei der Diskussion der Ergebnisse sollte berücksichtigt werden, dass während der Erhebung der Primärdaten mehrere Schwierigkeiten auftraten, welche sich erheblich auf das Ergebnis der LCA auswirken. Für die Berechnungen dieser Arbeit standen nicht in allen Bereichen gesicherte Daten zur Verfügung. Insbesondere lagen keine belastbaren Informationen zur Dimensionierung des Fundaments sowie zum erforderlichen Erdaushub vor.

Ein weiterer limitierender Faktor sind die Modellannahmen in *openLCA*. Dazu zählen die gewählten Systemgrenzen, die Allokationsmethoden und die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethoden. Abweichungen in diesen Parametern können zu unterschiedlichen Resultaten führen. Auch die Sensitivitätsanalysen wurden in dieser Arbeit nur in Ansätzen diskutiert, nicht jedoch systematisch durchgeführt, was die Aussagekraft weiter einschränkt. Zudem sind die Ergebnisse in hohem Maße orts- und kontextabhängig. Produktionsverfahren, Energiemix und Transportdistanzen variieren regional stark und beeinflussen die Umweltwirkungen. Die Übertragbarkeit der Resultate auf andere Länder oder Rahmenbedingungen ist daher nur eingeschränkt möglich. Auch geben die Ergebnisse keine Aussage darüber, mit welcher Energie die Speicher beladen werden.

Schließlich ist zu beachten, dass die ökologische Bewertung allein noch kein vollständiges Bild liefert. Eine ganzheitliche Betrachtung, die auch ökonomische und soziale Aspekte integriert, wäre notwendig, um umfassende Handlungsempfehlungen für die Praxis ableiten zu können.

8.3 Wahl der funktionellen Einheit

Ein kritischer Punkt in der vorliegenden Arbeit ist die Wahl der funktionellen Einheit. Als Bezugsgröße wurde 1 kg Speicher gewählt. Diese Entscheidung wich von den Empfehlungen der DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 ab, nach denen die funktionelle Einheit die „bereitgestellte Funktion“ abbilden soll. Der Grund für diese Wahl liegt in der eingeschränkten Datenlage: für die untersuchten Speicher standen detaillierte Angaben zu den Materialanteilen und Massen der Komponenten zur Verfügung, während Informationen zur Speicherkapazität, Lebensdauer oder zum Betrieb nicht in ausreichender Form vorlagen. Unter diesen Voraussetzungen stellte die Angabe pro kg Speicher die einzige konsistente Möglichkeit dar, die Systeme auf einer gemeinsamen Basis zu vergleichen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Allerdings ist diese Wahl mit Einschränkungen verbunden. Da die funktionelle Einheit „1 kg Speicher“ die eigentliche Funktion der Tanks, die Speicherung und Abgabe von Wärme über eine bestimmte Zeitspanne nicht direkt abbildet, ist ein funktionaler Vergleich der Speichergrößen und -typen nur eingeschränkt möglich. Zudem schneiden große Speicher bei dieser Bezugsgröße systematisch schlechter ab, obwohl sie pro gespeicherter kWh potenziell effizienter sein können. Auch der Betrieb der Speicher wird bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Für zukünftige Arbeiten wäre es daher sinnvoll, funktionalere Bezugseinheiten zu wählen, wie beispielsweise 1 kWh gespeicherte und abgegebene Wärme über die Lebensdauer oder ein definierter Lade-/Entladezyklus über eine festgelegte Nutzungsdauer. Damit könnten die Speicher hinsichtlich ihrer tatsächlichen Funktionalität vergleichbarer gemacht werden. Alternativ wäre auch eine Skalierung auf 1 m² Wohnnutzfläche pro Jahr denkbar, wie es Llantoy et al. (2021) vorgeschlagen haben. Aus diesem Grund wurde auf eine Skalierung über die Mantelfläche der einzelnen Speicher verzichtet, da diese im Wesentlichen zu denselben Einschränkungen und Aussagen führt wie die gewählte funktionelle Einheit.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Wahl der funktionellen Einheit „1 kg Speicher“ in dieser Arbeit zwar eine methodische Einschränkung darstellt, gleichzeitig aber eine plausible Lösung unter den gegebenen Rahmenbedingungen war. Für die weitere Forschung bleibt die Entwicklung und Anwendung funktionalerer Bezugseinheiten ein wichtiger Ansatzpunkt, um die Ergebnisse noch aussagekräftiger und praxisrelevanter zu gestalten.

8.4 Sensitivitätsanalyse

Mit einer Sensitivitätsanalyse lassen sich die Parameter mit dem größten Einfluss auf die Umweltwirkungen identifizieren und gezielt variieren, um Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

- Behälter
  Die Wahl des Behältermaterials hat den stärksten Einfluss auf die Ergebnisse. Besonders entscheidend sind das verwendete Material sowie die Variation der Wanddicke. Die Herkunft des eingesetzten Stahls, wie z. B. europäische Produktion im Vergleich zu asiatischen Herstellungsverfahren, kann die Ergebnisse maßgeblich verändern
- Dämmung
  Der Einfluss der Dämmung ist wesentlich. Parameter wie Dämmstoffwahl, Dicke und Wärmeleitfähigkeit bestimmen sowohl die Wärmeverluste als auch die Umweltbilanz. Studien wie Villasmil et al. (2019) zeigen, dass die Wahl und Dimensionierung der Dämmung einen entscheidenden Beitrag zur

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Gesamtperformance thermischer Speicher leisten. Eine systematische Variation dieser Faktoren verdeutlicht, wie stark sie die Ergebnisse prägen.

- Betrieb und Nutzung
  Lebensdauer, Zyklenanzahl und Entladetiefe eines Speichers beeinflussen die Ergebnisse unmittelbar. Längere Nutzungszeiten reduzieren die Umweltwirkungen pro Jahr, während eine hohe Zyklenzahl oder tiefere Entladungen die Effektivität der Ressourcennutzung erhöhen.
- Energie und Hintergrundsysteme
  Die Art der Beladung hat einen maßgeblichen Einfluss. Die Unterschiede zwischen solarthermischer Beladung, dem Einsatz von Wärmepumpen oder der Nutzung konventioneller Systeme, wie z. B. Gasheizwerke, verändern die Ergebnisse signifikant. Integriert man die Lebensdauer und den Energiebedarf der Kollektoren oder Wärmepumpen, ergeben sich weitere Stellgrößen. Alternativ können Abwärmeströme aus Industrieprozessen genutzt werden, was die Umweltwirkungen erheblich verringert.

8.5 Zusammenfassung der Diskussion

Für eine vollständige LCA wäre es notwendig, Annahmen zum Betrieb zu treffen oder auf empirische Daten zurückzugreifen. Für eine höhere Aussagekraft müssten zusätzlich Annahmen zur Lebensdauer und zum End-of-Life der Speicher berücksichtigt werden. Auch wenn in dieser Arbeit keine End-of-Life-Analyse durchgeführt wurde, ist es wichtig, die Auswirkungen der Entsorgung sowie das Potenzial zur Verringerung der Umweltwirkungen durch Recycling und Rückgewinnung von Materialien in Betracht zu ziehen.

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass größere Speichervolumina nicht zwangsläufig zu einer besseren Umweltbilanz führen. Zwar ermöglichen sie höhere Wärmespeicherkapazitäten, gleichzeitig steigt jedoch die Materialintensität erheblich, wodurch die ökologischen Vorteile teilweise wieder kompensiert werden. Ohne die Einbeziehung von Lebensdauer, Nutzung und Energieeffizienz bleiben die Ergebnisse daher nur eingeschränkt aussagekräftig.

Die praktische Arbeit mit *openLCA* verdeutlicht die Stärken und Grenzen der Software. Positiv hervorzuheben sind die einfache und intuitive Benutzeroberfläche sowie die breite Auswahl an verfügbaren Datenbanken und Wirkungsabschätzungsmethoden. Gleichzeitig ist die Qualität der Datenbanken heterogen, was die Aussagekraft der Ergebnisse beeinflusst. Da eine LCA stark von einer konsistenten Datenbasis abhängt, sind valide Herstellerangaben und robuste Datenquellen entscheidend. Hier hat sich gezeigt, dass primäre Herstellerinformationen wie Stücklisten und Materialmassen in Kombination mit Ecoinvent-Datensätzen eine tragfähige Grundlage für die Modellierung der Herstellungsphase darstellen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

Mithilfe einer Literaturrecherche wurden die theoretischen Grundlagen und der aktuelle Stand der Forschung erarbeitet. Die praktische Anwendung auf die untersuchten Speicher verdeutlicht, dass sich die aus der Literatur abgeleiteten Erkenntnisse mit den Ergebnissen aus *openLCA* verknüpfen lassen und praxisnah angewendet werden können.

Der Praxisteil der Arbeit zeigt zudem, dass eine saubere Ziel- und Umfangsdefinition, eine konsistente funktionelle Einheit und klar gesetzte Systemgrenzen entscheidend für die Vergleichbarkeit sind. Sinnvoll ist dabei die Kombination aus funktioneller Einheit und Lebensdauer, um die Ergebnisse auf die tatsächliche Funktionalität der Speicher zurückzuführen. Für den Vergleich von PCM-Speichern empfiehlt sich der saisonale Wassertank als Referenz, da sich Leistung, Verluste und Regelung auf dieser Basis fair gegenüberstellen lassen.

Insgesamt verdeutlicht die Diskussion, dass die Wahl der Modellierungsparameter und Systemgrenzen maßgeblich die Ergebnisse prägt und dass eine sorgfältige Datenaufbereitung ebenso entscheidend ist wie die methodische Konsistenz der LCA.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

9 Ausblick und Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, die ökologischen Auswirkungen verschiedener saisonaler Wärmespeichertechnologien systematisch zu bewerten. Grundlage bildete die Anwendung der Methode der LCA mit *openLCA*. Damit sollten die relevanten Material- und Prozessketten erfasst und die Speicher hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen vergleichbar gemacht werden. Die Forschungsfrage lautete, welche Speicherarten, im Vergleich von Tankspeicher unterschiedlicher Größe mit Latentwärmespeicher, ökologisch vorteilhaft sind und welche Faktoren die Ergebnisse entscheidend beeinflussen.

Die Ergebnisse der Durchführung der LCA der Tankspeicher verdeutlichen, dass vor allem die Stahlproduktion den größten Beitrag zu den Umweltwirkungen leistet. Dies gilt über verschiedene Wirkungskategorien hinweg, wobei die Anteile der Dämmstoffe je nach Speichergröße unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Während bei kleineren Speichern der Einfluss der Dämmung noch relativ gering ist, steigt er bei den großen Speichern auf bis zu knapp 50% an. Daraus lässt sich ableiten, dass die Materialwahl und die Dimensionierung der Speichersysteme entscheidend für ihre ökologische Gesamtbilanz sind. Ein reiner Blick auf das Speichervolumen führt dagegen zu Fehlschlüssen: Große Speichervolumina bedeuten nicht automatisch eine bessere Umweltbilanz, da mit zunehmender Größe die Materialintensität erheblich ansteigt.

Ein Vergleich von sensiblen Tankspeichern und Latentwärmespeichern konnte in dieser Arbeit nur im Rahmen des Kapitels Stand der Technik behandelt werden. Hintergrund ist die große Komplexität von Latentwärmespeichern, die sich aus den vielfältigen Materialkombinationen, Kapselungsstrategien und thermischen Eigenschaften der Phasenwechselmaterialien ergibt. Eine vollständige Modellierung im gleichen Detailgrad wie bei den sensiblen Speichern hätte den Rahmen dieser Arbeit überschritten. Dennoch konnte aufgezeigt werden, dass PCM-basierte Speicher, wie in der Literatur beschrieben, vor allem durch ihre hohe Energiedichte und potenziell geringere Wärmeverluste langfristig Vorteile bieten. Für eine belastbare ökologische Gegenüberstellung ist jedoch eine eigene, detaillierte Modellierung erforderlich.

Die Arbeit zeigt zugleich mehrere Limitationen auf. Im Zentrum steht die eingeschränkte Datenlage: während für die Materialmassen und Konstruktionsdetails zuverlässige Angaben vorlagen, fehlten umfassende Informationen zu Betrieb, Lebensdauer und End-of-Life der Speicher. Daher konzentrierte sich die Analyse auf die Herstellungsphase. Recycling- und Wiederverwendungspotenziale sowie Betriebsstrategien blieben unberücksichtigt, obwohl sie die Ergebnisse erheblich beeinflussen könnten. Zudem wurde die funktionelle Einheit „1 kg Speicher“ gewählt, da nur die Materialanteile bekannt waren. Diese Wahl erlaubt zwar eine konsistente

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Modellierung, bildet aber die eigentliche Funktion der Speicher, die Bereitstellung von Wärme, nur unzureichend ab.

Für eine weitere mögliche Forschung ergeben sich mehrere Ansatzpunkte. Zunächst sollte die Analyse systemseitig auf den gesamten Lebenszyklus ausgeweitet werden, sodass auch Betrieb, Wartung und Entsorgung einbezogen werden. Nur so lassen sich die ökologischen Wirkungen der Speicher realistisch erfassen. Darüber hinaus ist es notwendig, die methodische Basis zu verbessern, indem die Datenlage durch direkte Herstellerangaben, Messungen aus realen Anlagen oder den Einsatz zusätzlicher Datenbanken erweitert wird. Auf diese Weise lassen sich Unsicherheiten verringern und die Ergebnisse deutlich belastbarer machen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der technologischen Erweiterung der Betrachtung. Neben sensiblen Tankspeichern sollten künftig auch Latentwärmespeicher sowie Hybridlösungen systematisch modelliert und ökologisch bewertet werden, da diese Speicherarten aufgrund ihrer hohen Energiedichte ein erhebliches Potenzial besitzen. Schließlich ist es sinnvoll, die Speicher nicht isoliert, sondern in einem größeren Systemkontext zu betrachten. Die Einbettung in Energiesysteme mit Solarkollektoren, Wärmepumpen oder Abwärmenutzung eröffnet die Möglichkeit, die tatsächliche Rolle und den Nutzen der Speicher in der Praxis noch besser zu bewerten.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass Wärmespeicher ein zentrales Element für die Wärmewende darstellen, ihre ökologische Bewertung jedoch von zahlreichen Faktoren abhängt. Die vorliegenden Ergebnisse liefern eine erste Tendenz und einen Ausblick, auf der zukünftige Arbeiten aufbauen können. Durch die Kombination einer verbesserten Datenlage, umfassender Systemgrenzen und der Einbeziehung alternativer Technologien kann in weiteren Studien eine noch belastbarere Grundlage geschaffen werden, um nachhaltige Speicherlösungen für den Gebäudesektor zu entwickeln.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

10 Anhang

10.1 Speichers B

Höhe	42,00	m
Durchmesser	25,00	m
Radius	12,50	m
Mantelfläche	3.297,00	m^2
Deckel Fläche	490,63	m^2
Leistung	40	MW
Inbetriebnahme	2021	

Tabelle 13: Eckdaten Speicher B

Stahlbauteile mit Korrosionsschutz durch Feuerverzinken		
Höhe Zylinder	41966 mm	
Durchmesser Zylinder	25000 mm	
untere Zone		
hydrostatisch bar	Betriebstemperatur	+50-+115 Grad
Berechnungsdruck -10-+150 mbar	Berechnungstemperatur	+125 Grad
obere Zone		
hydrostatisch bar	Betriebstemperatur	+50-+98 Grad
Berechnungsdruck -10-+30 mbar	Berechnungstemperatur	+100 Grad
Isolierung Dach 500 mm	Isolierung Mantel 500 mm	
Schweißfaktor v=0,8/1		
Inhalt	20000 m^3	
Nutzvolumen	12800 m^3	

Tabelle 14: Datengrundlage des Speichers B

Gewichtsanteile der An- und Einbauten Speicher B:

Befüllstutzen	30,00	kg
Rohrleitung Beheizung	413,00	kg
Dachpoller	144,00	kg
Kabeltrasse	281,00	kg
Federstütze Warme Rohrleitung	348,00	kg
Raum Polsterdampfanlage	2.801,00	kg
Stabilisiator	3.612,00	kg

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Spritzwasseranlage	376,00	kg
Behälterschild	2,00	kg
Dachröhre	604,00	kg
Verankerung	6.192,00	kg
Erdungsöse	32,00	kg
Blitzschutzstangen	168,00	kg
Innenbühne	762,00	kg
Dachumgang	6.092,00	kg
Einspritzwasser Rohre	542,00	kg
Einspritzwasser Saugleitung	107,00	kg
Entleerungsstutzen DN100	38,00	kg
Druckstutzen Mantel Boden Dn80	38,00	kg
Levelstutzen	109,00	kg
Level+Druckstutzen	128,00	kg
Instrumentenrohr	34,00	kg
Überlauf	219,00	kg
Sicherheitsventil	934,00	kg
Wasserschleuse	640,00	kg
Mannloch Mantel	1.624,00	kg
Kalte Rohrleitung	3.228,00	kg
Untere Düse	1.901,00	kg
Warme Rohrleitung	3.964,00	kg
Temperaturmessstutzen	19,00	kg
Obere Düse	1.959,00	kg
Druckstutzen Mantel Zwischendach	55,00	kg
Ausgleichsleitung	6.198,00	kg
Entlüftung Zwischendach	799,00	kg

Tabelle 15: Gewichtsanteile der An- und Einbauten, welche aus den zur Verfügung gestellten Plänen entnommen worden sind

Isolierabdeckdach	25.129,00	kg	Material S355J2+N	
Zwischendach	39.780,00	kg	Material S235JR/S355J2, Anzahl der Bleche 289 Stk., 323 Stk.	
Oberes Dach	43.544,00	kg	Material S235JR/S355J2, Anzahl der Bleche 289 Stk.	
Oberer Ring und Steifen	64.724,00	kg		
Mantelbleche	561.006,00	kg	P335NH	10400*3250 mm, Anzahl der Bleche 124 Stk.
Mantel	22.634,00	kg	S235JR	40700 mm hoch (25000 untere Zone 15662 obere Zone), 78618 mm Durchmesser
Boden	29.594,00	kg	S355J2+N	Anzahl der Bleche 148 Stk.; Maße vom Blech ca. 4760*1990 mm

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Übersicht Boden und Dach					
Fundamentbelastung					
Dachisolierung	38.759,38	kg	2 x 200mm Dämmplatten aus Steinwolle, 100mm Dämmplatte Metac FLP1, Dachhaut Rhenovol 1,5mm, Abdeckblech, angenommen Dichte: 158 kg/m3		
Mantelisolierung	260.463,00	kg	2 *250 mm ISOVER Ultimate Filz, Typ U TFN 23 (AS) Si, darüber Alu-Trapezblech AlMN1Mg0,5 H48 A 35/207/0,7 mm, angenommen Dichte: 158 kg/m3		

Tabelle 16: Stückliste vom geschweißten Stahlspeicher bestehend aus Dach, Mantel, Boden

Schweißbahnen Mantel	4.000,24	m
Schweißbahnen Boden	814,33	m
Schweißbahnen Zwischendach	814,33	m
Schweißbahnen Deckel	814,33	m
Schweißbahnen Gesamt	6.443,23	m

Tabelle 17: Ergebnisse der berechneten Schweißbahnen aufgrund der Anzahl der Bleche und dessen Umfang

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

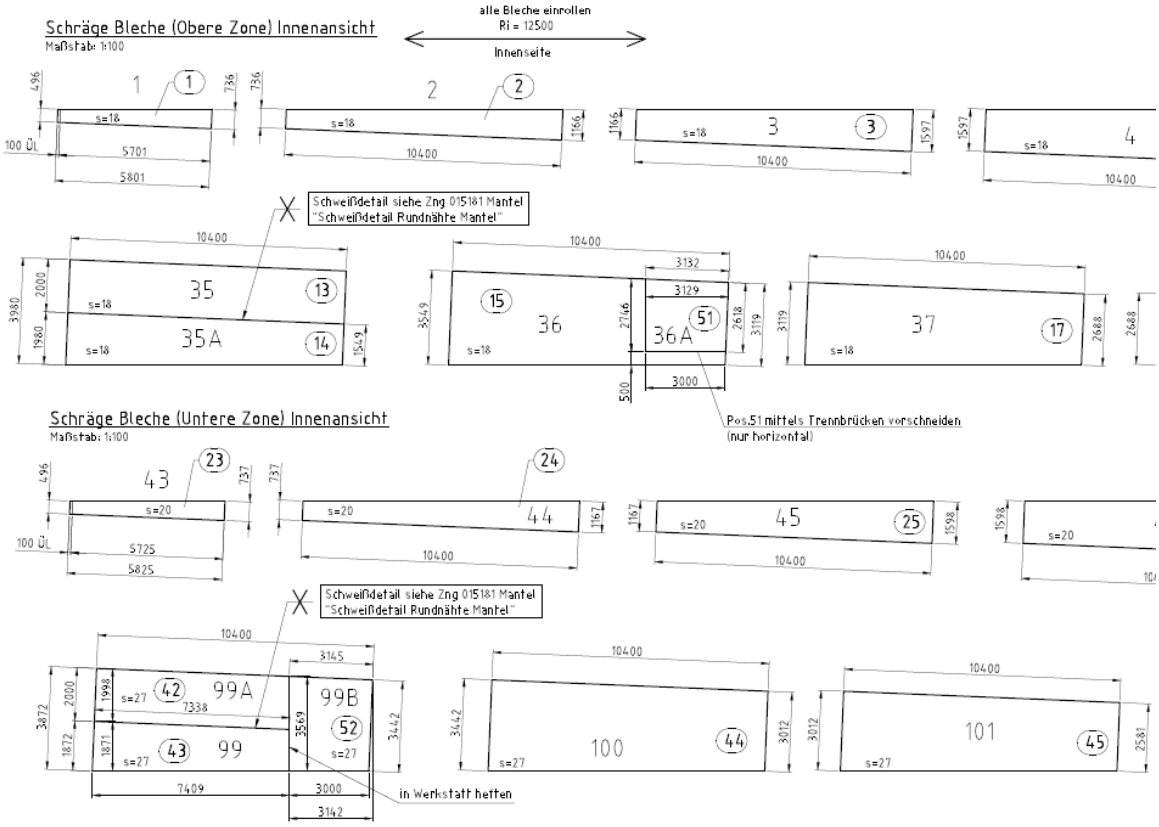


Abbildung 36: Ausschnitt aus den Plan mit den Mantelblechen

Flow	Category	Amount	Unit
concrete, 40MPa	C:Manufacturing/23:Manufacture of other non-metallic mineral products/239:Manufacture of non-metallic mineral products n.e.c./2395:Manufacture of articles of concrete, cement and plaster	62,5	m3
excavation, hydraulic digger	F:Construction/43:Specialized construction activities/431:Demolition and site preparation/4312:Site preparation	1226,56	m3
steel, chromium steel 18/8	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	561006	kg
steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	39780	kg
steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	29594	kg

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	64724	kg
steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	22634	kg
steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	25129	kg
steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	43544	kg
steel, unalloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	12000	kg
stone wool	C:Manufacturing/23:Manufacture of other non-metallic mineral products/239:Manufacture of non-metallic mineral products n.e.c./2399:Manufacture of other non-metallic mineral products n.e.c.	299222,35	kg
welding, arc, steel	C:Manufacturing/25:Manufacture of fabricated metal products, except machinery and equipment/259:Manufacture of other fabricated metal products; metalworking service activit/2592:Treatment and coating of metals; machining	7381,2	m

Tabelle 18: Inputflüsse des Speichers B

10.2 Speicher C

Folgende Annahmen sind in der Berechnung berücksichtigt worden:

- Speichermaterial: Stahl S235JR mit einer Dichte von 7,850 kg/m^3
  - Wandstärke: 38 mm im untersten Blech (durch den höheren Wasserdruck eine höhere Wandstärke notwendig), 12 mm im obersten Blech. Annahme für die Berechnung: Mittelwert von 25 mm
  - Materialanteil Stahlkörper Behälter = 119.200 kg
- Isolation: Glaswolle-Dämmfilz, mit einer Dichte von 20 kg/m^3
  - Materialanteil Isolation = 48.608 kg für den Behälter + 11.600 kg für den Deckel = 60.208 kg
- Schweißen wurde in der Betrachtung vernachlässigt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- Lebensdauer 30 Jahre
- Außenabdeckung über der Isolation wurden ebenfalls vernachlässigt
- Annahme Fundament
    - Aushub 2,5 m tief
    - 400 Tonnen Stahl für die Bewehrung
    - 5.000 Tonnen Beton

Flow	Category	Amount	Unit
concrete, 40MPa	C:Manufacturing/23:Manufacture of other non-metallic mineral products/239:Manufacture of non-metallic mineral products n.e.c./2395:Manufacture of articles of concrete, cement and plaster	62	m3
excavation, skid-steer loader	F:Construction/43:Specialized construction activities/431:Demolition and site preparation/4312:Site preparation	1226,56	m3
glass wool mat	C:Manufacturing/23:Manufacture of other non-metallic mineral products/239:Manufacture of non-metallic mineral products n.e.c./2399:Manufacture of other non-metallic mineral products n.e.c.	60208	kg
steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	119200	kg
steel, unalloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	12000	kg

Tabelle 19: Inputflüsse des Speichers C

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

10.3 Speicher D

[redacted]

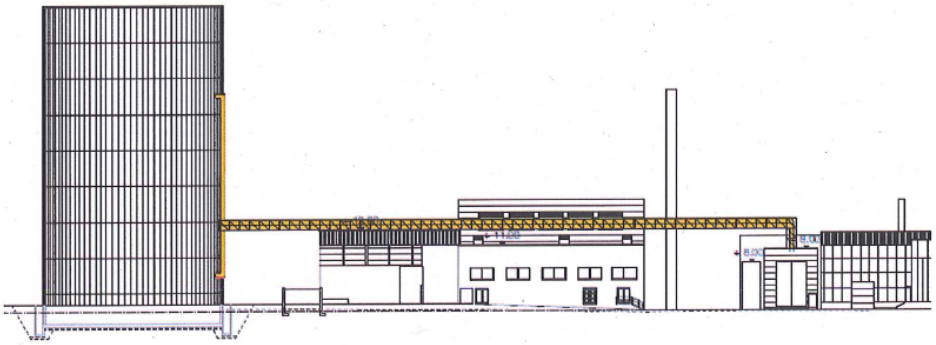
Auftraggeber:
[redacted]

(nachfolgend "**Auftraggeber**")

Standort der Anlage:
[redacted]

[redacted]

Energiespeicher
Lieferumfang, Planung, Montage und Inbetriebsetzung



Auftragsnehmer:
[redacted]

(nachfolgend "**Auftragnehmer**")

Abbildung 37: Titelblatt der Technik des betrachteten Speichers

Höhe inkl. Attika		50,87	m	
Mantelhöhe		47,8	m	
Durchmesser		30	m	(Stahlmantel innen 2.890 cm, Stahlmantel 6 cm, Dämmung 80 cm, Trapezblech 16 cm, Reserve 8 cm)
Fassungsvermögen			Millionen Liter	
max. Leistung		75	Megawatt	(max. Befüll/Entladeleistung)
Oberkante Fundament		444,93	m ü. M.	
Oberkante Speicher		495,8	m ü. M.	

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Betriebstemperaturen				
Vorlauf max.		95	°C	
Rücklauf Durchschnitt		55	°C	
Temperatur an Speicherdecke		100	°C	
Temperatur im unteren Teil		> 40	°C	
max. Speichertemperatur		+- 100	°C	
Auslegedruck		-10/+30	bar	
Isolierung (Lambda 50°C, W/m2K)				
Dach		500	mm	3 Stk. Dämmeinlagen Steinwolle POWER-TEK
Wand		400	mm	2 Stk. Dämmeinlagen Steinwolle POWER-TEK
Boden		keine		

Tabelle 20: Übersicht Speicher D

Speicherumhüllung

Fassadenblech	Montana SP 80/277 Alu	
Materialstärke	0,8	mm
Trapezblech	80	mm
Materialdachhaut PVC	1,6	mm

Tabelle 21: Daten Speicherumhüllung

Wärmespeicher technische Daten

Brutto-Volumen	31.350	m^3	
Durchmesser innen Stahlmantel	28.900	mm	
Durchmesser aussen Trapezblech	29.860	mm	
Mantelhöhe Oberkante Attika	50.870	mm	
Bodenblech	6	mm	Materialdicke (Material S460ML)
Materialdicke Mitte	22	mm	
Materialdicke Oben	10	mm	
Materialdicke Decke	5	mm	
Daten für LCA			
Mantelfläche	M = 2 * pi * r * h		
Mantelfläche =	4502,76	m^2	

Tabelle 22: technische Daten Speicher D

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Annahmen für Speicher D

- Speichermaterial: Stahl S460MLmit einer Dichte von 7,850 kg/m^3
  - Wandstärke: 22 mm im untersten Blech (durch den höheren Wasserdruck eine höhere Wandstärke notwendig), 10 mm im obersten Blech. Annahme für die Berechnung: Mittelwert von 16 mm
  - Materialanteil Stahlkörper Behälter = 565.547 kg
- Isolation: Steinwolle POWER-Tec, mit einer Dichte von 40 kg/m^3
  - Materialanteil Isolation = 144.088 kg für den Behälter (800 mm) + 87.132 kg für den Deckel (1.500 mm) = 231.220 kg
- Schweißen wurde in der Betrachtung vernachlässigt
- Lebensdauer 30 Jahre
- Außenabdeckung über der Isolation wurden ebenfalls vernachlässigt
- Annahme Fundament
  - Aushub 2,5 m tief
  - 400 Tonnen Stahl für die Bewehrung
  - 5.000 Tonnen Beton: 32 MPa Beton ist für Schwerlast geeignet, auch für Fundamente - gilt auch als hochfest. Dichte: 2400 kg/m3

Folgende Einbauten am Speicher wurden vernachlässigt:

- Wasserschloss Über- und Unterdruck
- Überdruckklappe
- Dacheinstieg
- Inspektionsbühne
- Tauchtemperaturfühler
- Druckmessstutzen
- Regenwasserrohre
- Überlaufleitung

Flow	Category	Amount	Unit
concrete, 40MPa	C:Manufacturing/23:Manufacture of other non-metallic mineral products/239:Manufacture of non-metallic mineral products n.e.c./2395:Manufacture of articles of concrete, cement and plaster	62,5	m^3
excavation, hydraulic digger	F:Construction/43:Specialized construction activities/431:Demolition and site preparation/4312:Site preparation	1226,56	m^3
steel, low-alloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	565547	kg

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

steel, unalloyed	C:Manufacturing/24:Manufacture of basic metals/241:Manufacture of basic iron and steel/2410:Manufacture of basic iron and steel	12000	kg
stone wool	C:Manufacturing/23:Manufacture of other non-metallic mineral products/239:Manufacture of non-metallic mineral products n.e.c./2399:Manufacture of other non-metallic mineral products n.e.c.	231220	kg

Tabelle 23: Inputflüsse des Speichers D

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11 Literaturverzeichnis

Ardente, F., Beccali, G., Cellura, M., & Lo Brano, V. (2005). Life cycle assessment of a solar thermal collector. *Renewable Energy*, *30*(7), 1031–1054. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.009

Berberich, M., & Mangold, D. (2025, März 2). *Solites*. Forschung, Beratung & Transfer für zukunftsfähige thermische Energiesysteme im Steinbeis-Verbund. https://www.solites.de

Chocontá Bernal, D., Muñoz, E., Manente, G., Sciacovelli, A., Ameli, H., & Gallego-Schmid, A. (2021). Environmental Assessment of Latent Heat Thermal Energy Storage Technology System with Phase Change Material for Domestic Heating Applications. *Sustainability*, *13*(20), 11265. https://doi.org/10.3390/su132011265

Communication Consultants. (2025, Juni 23). *Communication Consultants*. CC-PRESSEPORTAL. https://www.cc-stuttgart.de/presseportal/oekologisch-effiziente-verpackungen-mit-ecodesign/

Dahash, A., Ochs, F., Janetti, M. B., & Streicher, W. (2019). Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. *Applied Energy*, *239*, 296–315. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.189

DIN EN ISO 14040 (No. DIN EN ISO 14040:2021-02). (2020).

DIN EN ISO 14044 (No. DIN EN ISO 14044:2021-02). (2020).

Ghasemi, K., Tasnim, S., & Mahmud, S. (2022). PCM, nano/microencapsulation and slurries: A review of fundamentals, categories, fabrication, numerical models and applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *52*, 102084. https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102084

Goeke, J. (2021). *Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik: Sensible Speicher, Latente Speicher, Systemintegration*. Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34510-5

Greenhalgh, S., Broekhoff, D., Daviet, F., Ranganathan, J., Acharya, M., Corbier, L., Oren, K., & Sundin, H. (2003). GHG Protocol Initiative Team. *World Resources Institute*.

Gschwander, S. (o. J.). Flüssigkeiten als Hochleistungswärmeträger – PCM-Slurries. *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Haase Tank GmbH. (2025a, April 22). *Haase Tank GmbH*. https://www.haasetank.de/waermespeicher/waermespeicher-fuer-gewerbekunden/

Haase Tank GmbH. (2025b, April 22). *Haase Tank GmbH*. https://www.haasetank.de/waermespeicher/waermespeicher-fuer-gewerbekunden/

Hayatina, I., Auckaili, A., & Farid, M. (2023). Review on the Life Cycle Assessment of Thermal Energy Storage Used in Building Applications. *Energies*, *16*(3), 1170. https://doi.org/10.3390/en16031170

Institut für Luft- und Kältetechnik & gemeinnützige GmbH. (2025, August 28). *Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige GmbH*. ILK Dresden. https://www.ilkdresden.de/projekt/thermische-speicherung-mit-pcm

IPCC. (2023). *IPCC, Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1. Aufl.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Jenni Energietechnik AG. (2025a, Juni 28). *Jenni Energietechnik AG*. https://jenni.ch/energiespeicher.html

Jenni Energietechnik AG. (2025b, Juni 28). *Jenni Energietechnik AG - Sonnenhaus*. https://jenni.ch/sonnenhaus.html

Kallert, A., Lamvers, E., Schurig, M., & Young Jae, Y. (2023). *Thermische Energiespeicher für Quartiere—Aktualisierung, Überblick zu Rahmenbedingungen, Marktsituation und Technologieoptionen für Planung, Beratung und politische Entscheidungen im Gebäudesektor*. Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023).

Kavendra A. Thakare. (2015). Review on Latent Heat Storage and Problems Associated with Phase Change Materials. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, *04*(10), 176–182. https://doi.org/10.15623/ijret.2015.0410030

Lassacher, S., Puschnigg, S., & Lindorfer, J. (2018). *Technische Aspekte der Forcierung von Primärenergieeffizienz an oberösterreichischen Produktionsstandorten durch Nutzung von Wärmespeichern* (S. 56). Energieinstitut der Kepler Universität Linz.

Mangold, D., Miedaner, O., Tziggili, E., Unterberger, M., & Zeh, B. (2012). *Technisch-Wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Lanzeit-Wärmespeicherung*.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Ökologische Bewertung von Produktlebensläufen – Life Cycle Assessment. (2024). In A. Buchholz, K.-M. Lindemann, M. Özer, & P. Mösle, *Handbuch Unternehmensorganisation* (S. 1–13). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45370-0_28-2

RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. (2025, März 6). *Regelwerk der Gütesicherung RAL-GZ 896*. https://www.ral.de/guetezeichen-von-a-z/guetezeichen-uebersicht/gz-896/

Ruesch, Florian. (2019). *Aquifer—Wärmespeicher*. Bundesamt für Energie (BFE).

Shah, K. N., Varandani, N. S., & Panchani, M. (2016). Life Cycle Assessment of Household Water Tanks—A Study of LLDPE, Mild Steel and RCC Tanks. *Journal of Environmental Protection*, *07*(05), 760–769. https://doi.org/10.4236/jep.2016.75068

Simons, A., & Firth, S. K. (2011). Life-cycle assessment of a 100% solar fraction thermal supply to a European apartment building using water-based sensible heat storage. *Energy and Buildings*, *43*(6), 1231–1240. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.029

Sterner, M., & Stadler, I. (2014). *Energiespeicher—Bedarf, Technologien, Integration*. Springer Vieweg.

van Helden, W., Leusbrock, I., & O'Donovan, K. (2021). *Saisonale Speicher zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien für Distrikte* (Energieforschungsprogramm No. 860949).

VDE Verlag GmbH. (2025, August 11). *energie.de—Das Portal der Energiewirtschaft*. https://www.energie.de/euroheatpower/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/fernwaermespeicher-mit-zwei-zonen-technologie-erhoeht-flexibilitaet-des-heizkraftwerks-leipzig-sued

Venettacci, S., Cozzolino, R., Ponticelli, G. S., & Guarino, S. (2022). Environmental and economic life cycle assessment of thermal energy storage based on organic phase change material embedded in open-cell copper foams. *Sustainable Production and Consumption*, *29*, 387–405. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.10.026

Welsch, B., Göllner-Völker, L., Schulte, D. O., Bär, K., Sass, I., & Schebek, L. (2018). Environmental and economic assessment of borehole thermal energy storage in district heating systems. *Applied Energy*, *216*, 73–90. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.011

Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T., & Fischer, J. (2017). *Handbuch Regenerative Energietechnik*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53073-3

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Wolpensinger, H. (2025, März 2). *Webdatenbank nachhaltiger Siedlungen und Quartiere*. greenUP Architektur & Bauberatung. https://sdg21.eu/ueber-sdg21

Xia, S., Liu, Y., Ma, W., Xi, Z., & Wu, N. (2025). Thermal performance analysis of a seasonal heating system for small residential buildings with a packed bed latent heat storage. *Journal of Energy Storage*, *131*, 117609. https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117609

Yang, T., Liu, W., Kramer, G. J., & Sun, Q. (2021). Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *139*, 110732. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110732

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Arbeit grafisch dargestellt 5
Abbildung 2: Übersicht thermische Speicher, eigene Darstellung (Goeke, 2021) . 7
Abbildung 3: Zusammenhang Temperatur und speicherbare Wärmemenge (Institut für Luft- und Kältetechnik & gemeinnützige GmbH, 2025) 13
Abbildung 4: Darstellung der vier großen Gruppen der SSTES (Ruesch, Florian, 2019) 15
Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung eines Tankspeicher (van Helden et al., 2021) 18
Abbildung 6: Vereinfachtes Regelschemata (links) und Tankspeicher mit 9.400 l mit Armaturen und Steuerung (Jenni Energietechnik AG, 2025a) 19
Abbildung 7: Wärmespeicher mit Wärmetauscher aus Edelstahlwellrohr (Haase Tank GmbH, 2025b) 24
Abbildung 8: Prinzip eines ideal geschichteten Speicher (Goeke, 2021) 25
Abbildung 9: Gespeicherte Wärmemenge in Abhängigkeit der Temperatur (Sterner & Stadler, 2014) 29
Abbildung 10: Materialklassen von PCM (Sterner & Stadler, 2014) 29
Abbildung 11: Fünf Phasen der LCA, eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14040 33
Abbildung 12: Phasen einer LCA (*DIN EN ISO 14040*, 2020) 35
Abbildung 13: Beispiel eines Produktsystems für eine LCA (*DIN EN ISO 14044*, 2020) 38
Abbildung 14: Überblick von Prozesse, Inputs und Outputs vom gesamten Lebenszyklus (*DIN EN ISO 14040*, 2020) 39
Abbildung 15: Elemente der LCIA, aufgeteilt in notwendige und optionale Elemente (*DIN EN ISO 14040*, 2020) 40
Abbildung 16: Grafische Darstellung der Begrifflichkeiten (Hayatina et al., 2023) 44
Abbildung 17: schematische Vorgehensweise Durchführung einer LCA, eigene Darstellung 61
Abbildung 18: Darstellung Produktlebenszyklus (Communication Consultants, 2025) 63
Abbildung 19: Fernwärmespeicher des Heizkraftwerks Leipzig Süd, Systemgrenze in rot markiert (VDE Verlag GmbH, 2025) 65
Abbildung 20: Schematische Darstellung von einem Wasserspeicher in einem Einfamilienhaus (Jenni Energietechnik AG, 2025b) 67
Abbildung 21: Zweizonenspeicher, Quelle vertraulich 67
Abbildung 22: Grafische Darstellung der Materialanteile von Speicher B, eigene Darstellung 68
Abbildung 23: Schematische Darstellung Speicher D, vertrauliche Quelle 70
Abbildung 24: Modellgraph Speicher A 72

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 25: Modellgraph Speicher B 73
Abbildung 26: Modellgraph Speicher C 74
Abbildung 27: Modellgraph Speicher D 75
Abbildung 28: Sankey-Diagramm Speicher A 79
Abbildung 29: GWP Speicher A....79
Abbildung 30: Sankey-Diagramm Speicher B 80
Abbildung 31: GWP Speicher B 81
Abbildung 32: Sankey-Diagramm Speicher C 82
Abbildung 33: GWP Speicher C 82
Abbildung 34: Sankey Diagramm Speicher D 83
Abbildung 35: GWP Speicher D 84
Abbildung 36: Ausschnitt aus den Plan mit den Mantelblechen 98
Abbildung 37: Titelblatt der Technik des betrachteten Speichers....101

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über den Entwicklungsstand thermischer Speicher (Wesselak et al., 2017) 8
Tabelle 2: Übersicht von spezifischer Wärmekapazität und Dichte von verschiedenen Materialien (Sterner & Stadler, 2014) 10
Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien (Sterner & Stadler, 2014) 21
Tabelle 4: Wärmedurchgangskoeffizient verschiedener Materialien (Sterner & Stadler, 2014) 21
Tabelle 5: Übersicht der Vor- und Nachteile von Phasenwechselmaterialien (Ghasemi et al., 2022) 27
Tabelle 6: Übersicht verschiedener PCMs und ihre Eigenschaften (Sterner & Stadler, 2014) 28
Tabelle 7: Übersicht über unterschiedliche Definitionen der funktionellen Einheit .. 54
Tabelle 8: Überblick auserwählter Energiespeicher, eigene Sammlung (Berberich & Mangold, 2025; Wolpensinger, 2025) 57
Tabelle 9 Übersicht betrachteter Speicher 65
Tabelle 10: Daten zum Speicher A, eigene Berechnung 71
Tabelle 11: Darstellung der Inputflüsse des Speichers A 72
Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse der vier betrachteten Speicher ... 85
Tabelle 13: Eckdaten Speicher B 95
Tabelle 14: Datengrundlage des Speichers B 95
Tabelle 15: Gewichtsanteile der An- und Einbauten, welche aus den zur Verfügung gestellten Plänen entnommen worden sind 96
Tabelle 16: Stückliste vom geschweißten Stahlspeicher bestehend aus Dach, Mantel, Boden 97
Tabelle 17: Ergebnisse der berechneten Schweißbahnen aufgrund der Anzahl der Bleche und dessen Umfang 97
Tabelle 18: Inputflüsse des Speichers B 99
Tabelle 19: Inputflüsse des Speichers C 100
Tabelle 20: Übersicht Speicher D 102
Tabelle 21: Daten Speicherumhüllung 102
Tabelle 22: technische Daten Speicher D 102
Tabelle 23: Inputflüsse des Speichers D 104

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

14 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Äq	Äquivalent(e)
ATES	Aquiferspeicher
BTES	Bohrlochspeicher
Bzw.	Beziehungsweise
CO_2	Kohlendioxid
Cp	spezifische Wärmekapazität
d.h.	das heißt
ELCD	European Reference Life Cycle Database of the Joint Research Center
etc.	et cetera
€	Euro
FU	Funktionelle Einheit
GWh	Gigawattstunde
GWP 100	Treibhauspotenzial über 100 Jahre (Global Warming Potential 100)
h	Stunde
ISO	International Organization for Standardization
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kWh	Kilowattstunde
LCA	Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment)
LCIA	Wirkungsabschätzung der Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Impact Assessment)
LCI	Sachbilanz der Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Inventory)
LLDPE	Linear Low Density Polyethylen
λ	Wärmeleitfähigkeit (Lambda)
max.	maximal
m^3	Kubikmeter
MJ	Megajoule
PCM	Phasenwechselmaterial (Phase Change Material)
PEF	Product Environmental Footprint
PPI	Producer Price Index (Erzeugerpreisindex)
PTES	Erdbeckenspeicher (Pit Thermal Energy Storage)
RCC	Stahlbeton (Reinforced Cement Concrete)
ReCiPe	Bewertungsmethode zur Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen
sh.	siehe
SO_2	Schwefeldioxid
T	Temperatur
TTES	Tank Thermal Energy Storage (Tankspeicher)
u./o.Ä.	und/oder Ähnliche/s

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN