



DIPLOMARBEIT

Szenariientwicklung für saisonale thermische Speichertechnologien

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

Ao.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

Deyan Dimov



Wien, 12. Dezember 2022

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und dabei keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder gesamt noch in Teilen einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, 12. Dezember 2022


.....
Deyan Dimov

Gender Erklärung

In dieser wissenschaftlichen Abschlussarbeit wird aufgrund der besseren Lesbarkeit bewusst auf eine geschlechtsneutrale Formulierung verzichtet. Sämtliche männliche Schreibweisen beziehen sich dabei gleichermaßen auf alle Geschlechter.

Danksagung

Allen voran gilt mein Dank Herrn Professor Heimo Walter, der mir die Möglichkeit gegeben hat, mich mit einem sehr interessanten Thema zu beschäftigen und unter seiner Leitung diese Diplomarbeit zu schreiben. Herzlich bedanke ich mich bei Richard Lüchinger, der von dem ersten bis zum letzten Tag an meinem Fortschritt interessiert war. Ich hatte das Glück unter seiner hervorragenden Betreuung zu sein. Seine hilfreichen Anregungen und konstruktive Kritik haben mir bei der Erstellung dieser Arbeit viel geholfen.

Ebenfalls möchte ich mich bei allen interviewten Experten bedanken, die an dem Prozess der Szenarienentwicklung teilgenommen haben. Ein besonderer Dank gilt dem Team von Scenario Management International AG, das mir die Software zur Verfügung gestellt hat, und dem Herrn Jens-Peter Kuhle, der mir immer Hilfe geleistet hat.

Ich möchte mich bei allen meinen Freunden während des Studiums bedanken, mit denen wir uns immer gegenseitig motiviert und gemeinsam die schwierigen Prüfungen bestanden haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben, und meiner Freundin, die meine größte Unterstützung während des Studiums war. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

Kurzfassung

Saisonale thermische Energiespeicher speichern die in den Sommermonaten erzeugte Solarwärme für den Wintereinsatz. Sie ermöglichen eine Abdeckung des saisonalen Wärmebedarfs mit erneuerbaren Energieträgern, ohne auf fossile Reserven zurückzugreifen. Somit können sie eine Schlüsselrolle im Zuge der derzeit erforderlichen Energiewende spielen. Diese Arbeit gibt einen Überblick über die vier Haupttechnologien zur sensiblen saisonalen thermischen Energiespeicherung: Tankspeicher, Erdbeckenspeicher, Bohrlochwärmespeicher und Aquiferwärmespeicher. Anhand durchgeführter PESTEL- und Stakeholder-Analysen sowie sechs Experteninterviews werden drei Umfeldszenarien mittels der Szenario-Management Methodik erstellt. Die Szenarien dienen zu einer Unterstützung der strategischen Entwicklung und decken Einsatzmöglichkeiten der Speicher auf. Zusätzlich wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt, um den Einfluss von speicherbezogenen sowie externen Faktoren auf die Wärmegestehungskosten zu untersuchen. Die Resultate zeigen, dass die Speicher in der Zukunft sowohl Heizen im Winter als auch Kühlen im Sommer angesichts steigender Temperaturen aufgrund des Klimawandels ermöglichen sollen. Oberirdische Speicher sollen mit einer begehbaren Abdeckung ausgestattet werden, sodass einerseits keine Flächenkonkurrenz mit der Landwirtschaft entsteht, andererseits sie in dicht bebauten Regionen konstruiert werden können. Damit alle Speicher wirtschaftlich wettbewerbsfähiger werden, sollen ihre Lebensdauer gesteigert und ihre thermische Verluste verringert werden. Ein weiterer Beitrag dazu kann durch eine Senkung ihrer Investitionskosten und zusätzlich staatliche Förderungen geleistet werden.

Abstract

Seasonal thermal energy storage stores the solar heat generated during the summer months for winter use. It allows to meet the winter heat demand in combination with renewable energy resources and thus eliminates the need for fossil fuels. Therefore, this technology can play a key role in the current energy transition. This work gives an overview of the four major different technologies for sensible seasonal thermal energy storage: Tank, Pit, Borehole and Aquifer thermal energy storage. Three different scenarios are created using the Scenario-Management methodology. They are based on a PESTEL and stakeholder analysis as well as on six expert interviews. The scenarios serve to support the strategic development and uncover possible uses of the different storage types. In addition, an economical evaluation is performed to determine the influence of storage-specific and external factors on the levelized cost of heat. The results show that the thermal energy storage technology should be able to provide both energy for heating in the winter and cooling in the summer in the future due to rising temperatures. Thermal energy storages above ground level should be equipped with a walk-on cover, in order to be constructed in densely built regions. To make the thermal energy storages more economically competitive, their lifespan should be increased and their thermal losses reduced. Another possibility would be a reduction of their investment costs or the implementation of government subsidies.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Ausgangssituation	2
1.3	Struktur der Arbeit	2
2	Methodik	3
2.1	Methodische Vorgehensweise	3
2.2	PESTEL-Analyse	4
2.3	Stakeholder-Analyse	4
2.4	Experteninterviews	6
2.5	SWOT-Analyse	7
2.6	Szenario-Management Methodik	8
2.7	Wirtschaftlichkeitsberechnung	19
2.8	Sensitivitätsanalyse	19
3	Theoretischer Hintergrund	20
3.1	Sektoren der Energiewirtschaft	20
3.2	Thermische Energiespeicher	22
3.3	Sensible saisonale thermische Energiespeicher	24
3.3.1	Tankspeicher	25
3.3.2	Erdbeckenspeicher	25
3.3.3	Bohrlochwärmespeicher	26
3.3.4	Aquiferwärmespeicher	27
3.4	Technische und wirtschaftliche Aspekte der SSTES Systeme	28
3.4.1	Vergleich der SSTES Systeme	35
3.5	Fortschritte und Projekte bezüglich SSTES Systeme	36
3.6	Szenarien im Energiesektor	38
4	Technologie- und Umweltanalyse	41
4.1	PESTEL-Analyse	41
4.1.1	Politische Rahmenbedingungen	41
4.1.2	Gesellschaftliche Rahmenbedingungen	42
4.1.3	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	43
4.1.4	Technologische Rahmenbedingungen	44
4.1.5	Ökologisch-geographische Rahmenbedingungen	47
4.1.6	Rechtliche Rahmenbedingungen	47
4.2	Stakeholder-Analyse	48
4.2.1	Stakeholder-Identifikation	48
4.2.2	Stakeholder-Bewertung	49
4.3	SWOT-Analyse	51
5	Szenarien	58
5.1	Szenario-Vorbereitung	58

5.2	Szenariofeld-Analyse	58
5.2.1	Systematische Gliederung des Szenariofeldes	58
5.2.2	Wechselwirkungsanalyse	60
5.3	Entwicklung der Zukunftsprojektionen	61
5.4	Szenarien-Bildung	63
5.4.1	Konsistenzanalyse	63
5.4.2	Clusteranalyse	63
5.5	Szenarien-Interpretation	68
5.5.1	Multidimensionale Skalierung	68
5.5.2	Szenarien-Beschreibung	69
5.6	Szenarien-Bewertung	72
6	Wirtschaftlichkeitsberechnung	73
6.1	Referenzfall	73
6.2	Einfluss der Lebensdauer	74
6.3	Einfluss der Effizienz	75
6.4	Einfluss des Zinssatzes	76
6.5	Einfluss des Wärmepreises	77
6.6	Einfluss der spezifischen Investitionskosten und der Subvention	78
7	Diskussion und Ausblick	79
7.1	Stellenwert der Szenariotechnik	79
7.2	Chancen und Gefahren für die SSTES Systeme aus den entwickelten Szenarien	79
7.3	Disruptive Ereignisse	81
7.4	Diskussion über die Stakeholder	82
7.5	Diskussion der Wirtschaftlichkeitsberechnung	83
7.6	Ausblick	84
8	Schlussfolgerung	85
	Literaturverzeichnis	87
	Tabellenverzeichnis	93
	Abbildungsverzeichnis	93
	Anhang	95

Nomenklatur

Lateinbuchstaben

Zeichen	Einheit	Benennung
A	m^2	Fläche
C	€	Preis
C_{FW}	€/MWh	Wärmepreis
C_{inv}	€/m ³	spezifische Investitionskosten
C_t	€/Jahr	Wartungs- und Betriebskosten
c_p	J/kgK	spezifische isobare Wärmekapazität
c_v	J/m ³ K	volumetrische isochore Wärmekapazität
d	-	Distanzwert
DEP	€/Jahr	Abschreibung
E_D	J/m ³	Energiedichte
I_0	€	Investitionskosten
k_f	m/s	hydraulische Leitfähigkeit
$LCOH$	€/MWh	Wärmegestehungskosten
n	-	Anzahl
P	Jahre	Lebensdauer
P_R	Jahre	Rückzahlungsdauer
Q	J	Wärme
Q_{zu}	J	Zugeführte Wärme
Q_{ab}	J	Abgeführte Wärme
Q_{latent}	J	Latente Wärme
$Q_{sensibel}$	J	Sensible Wärme
Q_{ver}	J	Verlustwärme
r	%	Zinssatz
RV	€/Jahr	Restwert
S_0	€	Subvention

t	<i>Jahre</i>	Betrachtungszeitraum
T	K	Temperatur in Kelvin
TR	%	Körperschaftssteuer
U	W/m^2K	Wärmedurchgangskoeffizient
V	m^3	Volumen

griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Benennung
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatur in Grad Celsius
ϑ_m	$^{\circ}C$	Übergangstemperatur in Grad Celsius
Δ	%	relative Änderung
η_s	%	Effizienz
ρ	kg/m^3	Dichte

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ATES	engl. <i>Aquifer thermal energy storage</i> , dt. Aquiferwärmespeicher
BTES	engl. <i>Borehole thermal energy storage</i> , dt. Bohrlochwärmespeicher
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
EEG	Erneuerbare-Energie-Gemeinschaft
EU	Europäische Union
EPI	Energiepreisindex
HTF	engl. <i>Heat transfer fluid</i> , dt. Wärmeübertragungsmedium
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
k.A.	keine Ahnung
LCOH	engl. <i>Levelized Cost of Heat</i> . dt. Wärmegestehungskosten
LHS	engl. <i>Latent Heat Storage</i> . dt. Latentwärmespeicher

O/V	Oberfläche-Volumen-Verhältnis
PESTEL	engl. <i>Political, economic, social, technological, environmental and legal</i>
PCM	engl. <i>Phase change material</i> , dt. Phasenwechselmaterial
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PTES	engl. <i>Pit thermal energy storage</i> , dt. Erdbeckenspeicher
PtG	engl. <i>Power-to-Gas</i>
PtH	engl. <i>Power-to-Heat</i>
PtL	engl. <i>Power-to-Liquid</i>
RoI	engl. <i>Return on investment</i> , dt. Rückzahlungsperiode
SHS	engl. <i>Sensible Heat Storage</i> , dt. sensible Wärmespeicher
SSTES	engl. <i>Sensible seasonal thermal energy storage</i> , dt. sensible saisonale thermische Energiespeicherung
THS	engl. <i>Thermochemical Heat Storage</i> , dt. thermochemische Wärmespeicher
THG	Treibhausgas
TRL	engl. <i>Technology readiness level</i> , dt. Technologiereifegrad
TTES	engl. <i>Tank thermal energy storage</i> , dt. Tankspeicher
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
vgl.	Vergleich
WP	Wärmepumpe
WRG	Wasserrechtsgesetz
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Der Klimawandel mit seinen Konsequenzen für die Gesellschaft und die Wirtschaft stellt heutzutage ein kontroverses Thema weltweit dar und erfordert tiefgreifende Maßnahmen mit einem starken Nachhaltigkeitsaspekt. Die Haupttreiber des Klimawandels sind der steigende globale Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen [1]. Um die durch die Menschheit verursachte Klimaänderung zu beschränken, hat sich die Europäische Union (EU) das Ziel gesetzt, das Energiesystem in Europa bis 2050 klimaneutral zu gestalten. Einige EU-Länder, einschließlich Österreich, wollen diesen Umwandlungsprozess auf regionaler Ebene beschleunigen. Dementsprechend will Österreich eine Klimaneutralität bis 2040 erreichen. Daher sollen der nationale Gesamtstromverbrauch bis 2030 zu 100% aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt und in weiteren Schritte bis 2040 der gesamte Energiesektor dekarbonisiert werden [2].

Die sensiblen saisonalen thermischen Energiespeicher (engl. *sensible seasonal thermal energy storage*, SSTES) könnten für die Energiewende eine Schlüsseltechnologie darstellen, damit diese ambitionierten Ziele erreicht werden. Durch ihren Einsatz können die im Sommer erzeugte Solarwärme gespeichert sowie die saisonalen Engpässe der erneuerbaren hoch volatilen Energiequellen überbrückt werden. Beim SSTES wird die Wärme aus der warmen Jahreszeit über eine lange Periode, z.B. über eine Saison, gespeichert und folgend im Winter zu Heizzwecken verwendet. Derzeit befinden sich die SSTES Technologien in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, wobei sie in einigen Ländern wie Dänemark, den Niederlanden und Deutschland kommerziell verfügbar sind [3].

Das SSTES ist eine aufkommende Technologie, deren Zukunft mit einer gewissen Unsicherheit verbunden ist. Eine Methode, mit dieser Unsicherheit umzugehen und sich auf die Zukunft vorzubereiten, stellt die Szenarienentwicklung dar. Szenarien sind Beschreibungen einer möglichen zukünftigen Situation und des Ablaufs der Ereignisse, die es ermöglichen, von der aktuellen zur zukünftigen Situation zu gelangen. Sie dienen als ein wertvolles Werkzeug für Organisationen, sich auf mögliche Zukunftsentwicklungen vorzubereiten. Szenarien zielen nicht darauf ab, die Entwicklung neuer Technologien tatsächlich vorherzusagen, aber sie können helfen, ein besseres Verständnis für den Umfang möglicher Entwicklungen zu gewinnen, was den Erfolg und den richtigen Einsatz einer Technologie beeinflussen kann. Szenarien werden auch häufig von Managern verwendet, um bessere Entscheidungen treffen zu können [4].

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Szenarien für sensible saisonale thermische Energiespeicher zu entwickeln, um zukünftige gesellschaftliche, wirtschaftliche oder technologische Entwicklungen und deren möglichen Auswirkungen zu antizipieren. Anhand der Szenarien soll untersucht werden, wie die saisonale thermische Energiespeicherung in Zukunft genutzt werden kann, um den Forschungs- und Entwicklungsprozess zu unterstützen.

1.2 Ausgangssituation

Der Wärmesektor macht mit einem Anteil von circa 50% den größten Teil des Endenergieverbrauchs in Österreich, vor dem Strom- und Mobilitätssektor, aus. Dieser ist derzeit nur zu einem Drittel durch erneuerbare Energiequellen gedeckt, da viele Gebäude noch mit Gas oder Öl beheizt werden [5]. Im nationalen integrierten Energie- und Klimaplan aus dem Jahr 2019 wird eine sukzessive Verdrängung von fossilen Energieträgern durch den Einsatz erneuerbarer Energieformen für Heizung, Warmwasser und Kühlung vorgesehen. Daher wird eine Erhöhung des Anteils effizienter erneuerbarer Energieträger sowie der Einsatz von Energieeffizienzmaßnahmen für den Wärme- und Kühlbedarf forciert. Des Weiteren soll mittels dieser mehrdimensionaler Strategie das Ziel verfolgt werden, Investitionen in die Speicherinfrastruktur (von Kurzzeitspeichern bis hin zu saisonalen Speichern) und in das Übertragungs- und Verteilnetz zu erhöhen bzw. an einem erhöhten Wärmebedarf anzupassen [6]. Ein potentieller Lösungsansatz im Zuge der österreichischen und europäischen Energiewende stellen die saisonalen thermischen Energiespeicher dar.

1.3 Struktur der Arbeit

Diese wissenschaftliche Arbeit ist folgenderweise strukturiert: Im Kapitel 2 *Methodik* werden das ausgewählte Vorgehen zur Erstellung der Szenarien und die verwendeten Methoden erklärt. Das Kapitel 3 *Theoretischer Hintergrund* vermittelt die Kenntnisse über die saisonalen thermischen Energiespeicher und über die Szenarien im Energiesektor. Im Kapitel 4 *Technologie- und Umweltanalyse* werden die Resultate aus den analysierten internen und externen Einflussfaktoren für die SSTES Technologien anhand PESTEL- und Stakeholder-Analyse sowie die Technologiebewertung anhand einer SWOT-Analyse dargestellt. Das Kapitel 5 *Szenarien* stellt den ausführlichen Prozess der Erstellung der Szenarien und ihre Interpretation dar. Im Kapitel 6 *Wirtschaftlichkeitsberechnung* wird eine Sensitivitätsanalyse der Wärmegegestehungskosten von SSTES Systemen durchgeführt, um den Einfluss speicherbezogener und externer Faktoren zu untersuchen. Im Kapitel 7 *Diskussion und Ausblick* werden die Resultate aus den Szenarien sowie ihre Bedeutung diskutiert. Zusätzlich gibt das Kapitel einen Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf.

2 Methodik

2.1 Methodische Vorgehensweise

Die Abbildung 2.1 stellt die im Rahmen dieser Arbeit verwendete methodische Vorgehensweise zur Szenarienentwicklung und -interpretation dar. Im ersten Schritt werden der technologische Entwicklungsstand der SSTES Technologien anhand einer umfassenden Literaturrecherche analysiert sowie Innovationen aus durchgeführten und bevorstehenden Projekten erkannt. Durch die Anwendung einer SWOT-Analyse werden die unterschiedlichen SSTES Technologien bewertet. Anhand einer PESTEL-Analyse und einer Stakeholder-Analyse werden die Einflussfaktoren auf SSTES analysiert, die in einem weiteren Schritt für die Szenarienentwicklung mittels der Szenario-Management Methodik verwendet werden. Im Rahmen der Szenarienentwicklung werden Interviews mit Fachexperten aus dem Bereich der thermischen Energiespeicher durchgeführt, um die Erkenntnisse aus den Analysen zu validieren. Anschließend wird anhand einer Wirtschaftlichkeitsberechnung der Einfluss der unterschiedlichen Faktoren auf die Wärmegestellungskosten der SSTES Systemen untersucht. Alle verwendete Methoden werden in den folgenden Unterkapiteln im Detail erläutert.

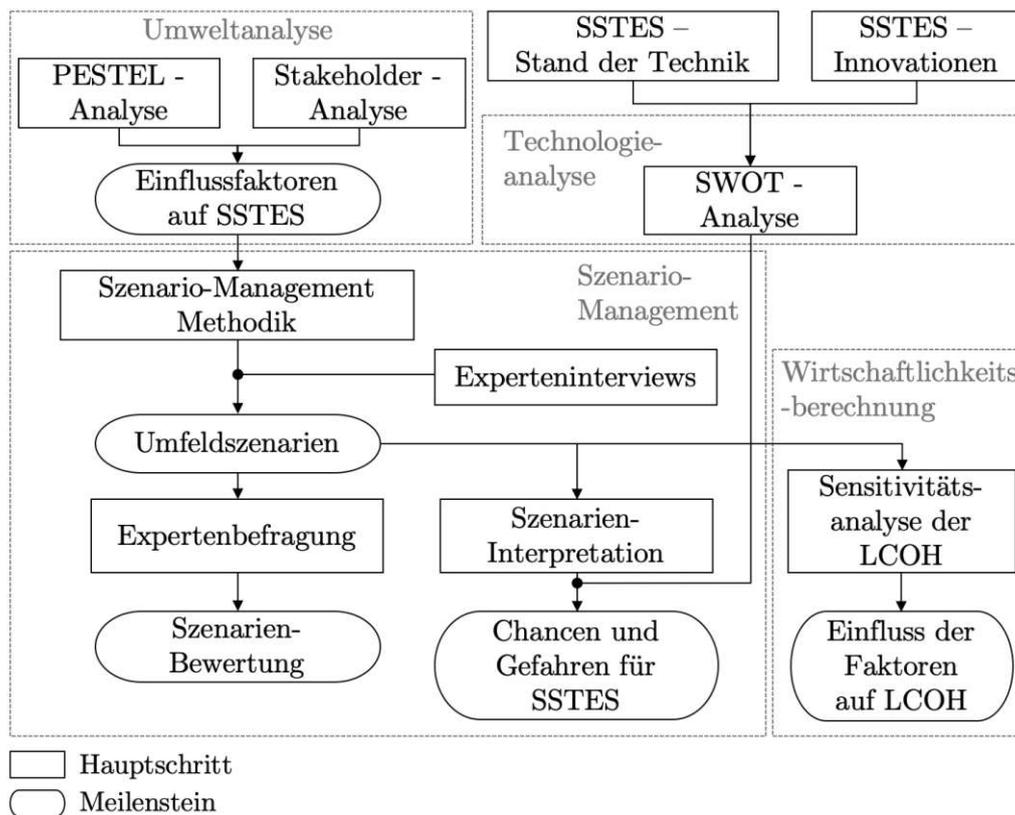


Abbildung 2.1: Methodische Vorgehensweise im Rahmen der Diplomarbeit, *eigene Darstellung*

2.2 PESTEL-Analyse

Die PESTEL-Analyse ist eine etablierte strategische Methode, die verwendet wird, um ein Makrobild einer Industrieumgebung zu erhalten. Sie ermöglicht es einem Unternehmen, sich einen Eindruck von den Faktoren zu verschaffen, die ein neues Geschäft oder eine neue Branche beeinflussen können. PESTEL steht für Political, Economic, Social, Technological, Legal and Environment [7].

- Die politischen Rahmenbedingungen bilden Möglichkeiten und Restriktionen für das Unternehmen in Form von Gesetzen und Verordnungen ab.
- Die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen und deren Veränderung prägen Werte, Normen und Strukturen einer Gesellschaft und somit auch das Nachfrageverhalten von Käufern eines Unternehmens.
- Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen beeinflussen eine Volkswirtschaft. Durch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden Angebots- und Nachfrageverhalten und damit im Endeffekt auch die wirtschaftliche Ausgangsbedingung für ein Unternehmen beeinflusst.
- Der Stand der technischen Rahmenbedingungen wird über den Einsatz und die Anwendung von Technologien zum Ausdruck gebracht. Die technischen Rahmenbedingungen beeinflussen sowohl die Wertschöpfungsprozesse im Unternehmen, als auch die Technologie von produzierten Gütern und Dienstleistungen.
- Die ökologisch-geographischen Rahmenbedingungen beschreiben die Umwelt eines Unternehmens sowie die verfügbaren Ressourcen.
- Die rechtlichen Rahmenbedingung spielen eine große Rolle für den Handlungsspielraum eines Unternehmens, denn unterschiedliche Rechtssysteme sowie das Rechtsbewusstsein der Bevölkerung beeinflussen strategische Entscheidungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die PESTEL Methode zur Erkennung der unterschiedlichen externen Einflussfaktoren im Bezug auf die SSTES Systeme verwendet. Für dieses Ziel wird eine PESTEL-Analyse des österreichischen Wärmesektors anhand einer umfassenden Literaturrecherche durchgeführt.

2.3 Stakeholder-Analyse

In der Industrie und in der Forschung versuchen Akteure ihre Pläne an die Absichten anderer Personen anzupassen. Im Zusammenhang mit neuen Technologien sind diese Rollen verschiedener Akteure in Bezug auf die Technologie, die auch als Stakeholder-Rollen bekannt sind, undefiniert [8].

Der Begriff „Stakeholder“ wurde von Freeman (1984) als „diejenigen, die eine Entscheidung oder Handlung beeinflussen oder von ihr betroffen sind“ im Kontext des Projektmanagements definiert. Die Stakeholder sind wichtig für den Erfolg einer Technologie aufgrund ihrer möglichen Beiträge und ihrer Einschätzung

des Technologiepotentials. Ihre möglichen Widerstände können ein Risiko für die Technologie darstellen. [9]. Stakeholder können Einzelpersonen oder Organisationen sein. Das Ziel einer Stakeholder-Analyse besteht hauptsächlich darin, ihre Interessen und Absichten abzudecken und zu definieren [10].

Stakeholder können hinsichtlich der Beziehungsart zur Organisation bzw. zur Technologie und damit, wie sie den Erfolg oder Misserfolg einer Strategie beeinflussen können, sinnvollerweise in drei Typen eingeteilt werden [11].

- Wirtschaftliche Stakeholder wie Lieferanten, Konkurrenten, Händler und Aktionäre.
- Gesellschaftliche und politische Stakeholder wie Politiker, Regulierungs- und Regierungsbehörden, die die „soziale Legitimität“ einer Strategie beeinflussen.
- Technologische Stakeholder wie „Key Adopters“, Normungsinstitute und Innovatoren, die die Verbreitung neuer Technologien und die Übernahme von Industriestandards beeinflussen.

Der Einfluss der einzelnen Arten von Stakeholdern ist in den verschiedenen Situationen unterschiedlich. Beispielsweise sind die technologischen Stakeholder für Strategien für die Einführung neuer Produkte von entscheidender Bedeutung, während die gesellschaftlichen und politischen Stakeholder den öffentlichen Sektor beeinflussen [11].

Es gibt verschiedene Methoden zur Feststellung der Wichtigkeit eines Stakeholders. Eine davon ist die Bewertung der Stakeholder nach dem jeweiligen Interesse und dem jeweiligen Einfluss. Diese Anwendung der Methode zeigt, wie viel Interesse die Stakeholder an SSTES Systemen haben, sowie wie sehr ihre Entscheidungen die SSTES Technologieentwicklung beeinflussen kann. Die Stakeholder-Bewertung wird in einer Einfluss-Interesse-Matrix dargestellt, siehe Abbildung 2.2. Für die Stakeholder-Bewertung in dieser Arbeit wird eine Skala von 1 (= *niedrig*) bis 10 (= *hoch*) verwendet.

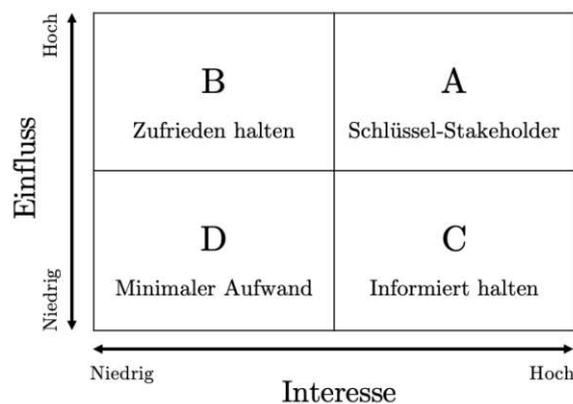


Abbildung 2.2: Prinzip der Stakeholder Bewertung: Einfluss-Interesse-Matrix, eigene Darstellung in Anlehnung an [11]

Die Schlüssel-Stakeholder in Gruppe A spielen die wichtigste Rolle. Dabei kann es sich um Großinvestoren oder auch um einzelne Personen oder Behörden mit großer Macht handeln. Bei der Zusammenarbeit mit dieser Gruppe ist es besonders empfehlenswert, diese regelmäßig und ausführlich zu informieren sowie verschiedene Entscheidungen oder Lösungsansätze mit ihnen abzustimmen. Häufig beziehen sich die komplizierten Probleme auf die Stakeholder in Gruppe B. Obwohl diese Gruppe im Allgemeinen relativ passiv sein kann, kann es zu einer katastrophalen Situation kommen, wenn ihr Interesse unterschätzt wird und sie sich plötzlich in Gruppe A neu positionieren [11]. Die Stakeholder in Gruppe B sind oft Entscheidungsträger, die aber selbst wenig Zeit für das jeweilige Projekt haben. Dabei wird durch selektive Information versucht, ihr positives Interesse zu wecken und negatives Interesse vorzubeugen, damit sie zufrieden bleiben. Eine Konfrontation soll auf jeden Fall vermieden werden. Ein häufiges Problem für die Stakeholder in Gruppe C kann die mangelnde Information sein, die zu einer folgenden Resignation führen kann. In den meisten Fällen resignieren schlecht informierte Personen und das Projekt scheitert, bevor es wirklich begonnen wird. Die letzte Gruppe D weist ein geringes Interesse und einen geringen Einfluss auf das Projekt auf. Daher soll auch der Aufwand für diese Gruppe minimal gehalten werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Stakeholder-Analyse mit der Unterstützung von einem Experteninterview [12] durchgeführt, um die wichtigsten Stakeholder zu identifizieren und anhand der beschriebenen Methode in Abbildung 2.2 zu bewerten. Die Stakeholder-Analyse bezieht sich auf das Projekt SOTES (engl. *Sociotechnological Breakthrough of Thermal Energy Storage*), dessen Ziel ist es, die unterschiedlichen Rollen, Motive und Präferenzen von relevanten Akteurgruppen und Stakeholdern im Zusammenhang mit der Anwendung von SSTES Systemen zu analysieren [13].

2.4 Experteninterviews

Qualitative Forschung stützt sich auf Daten, die der Forscher durch Beobachtungen, Interviews, Fragebögen, Fokusgruppen und Dokumente erhält. Die Daten sind im Allgemeinen nicht numerisch [14].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt sechs Experten aus dem Forschungsbereich sowie aus dem Industriebereich befragt, die über fachspezifische Berufserfahrung mit saisonalen thermischen Energiespeichern verfügen. Die Interviews wurden als semistrukturierte Interviews durchgeführt, um eine allgemeine Information über die Herausforderungen und Chancen von SSTES Technologien zu sammeln. Es wurde eine Liste mit den Einflussfaktoren auf SSTES vorbereitet und diese wurde im Rahmen der Interviews diskutiert, um die wichtigsten Einflussfaktoren festzustellen. Den Befragten wurden keine Anreize geboten und die Interviews werden auf der Grundlage ihres Wunsches durchgeführt, um zu dieser Forschung beizutragen. Die nachfolgende Liste gibt Information über die Experten, ihre Organisation, ihre Fachkompetenz sowie das Datum des durchgeführten Gespräches. Ihre personenbezogene Daten werden ausschließlich mit ihrer Einwilligung veröffentlicht.

- **Dr. phil. des. Ann-Kathrin Hess**
 Organisation: INTERFACE, Forschungswissenschaftlerin für Nachhaltigkeit
 Fachkompetenz: Stakeholder-Analyse für SSTES Systeme
 Datum: 28.04.2022
- **Dr. Wim van Helden**
 Organisation: AEE INTEC, Abteilungsleiter Technologieentwicklung
 Fachkompetenz: Thermische Energiespeicher
 Datum: 06.05.2022
- **DI Gerhard Bayer**
 Organisation: ÖGUT, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
 Fachkompetenz: Thermische Energiespeicher / Raumplanung
 Datum: 25.05.2022
- **Maria Moser, MSc**
 Organisation: SOLID, Projektmanagerin Forschung und Entwicklung
 Fachkompetenz: Thermische Energiespeicher / Solarwärme
 Datum: 01.06.2022
- **Morten Vang Bobach, MSc**
 Organisation: Aalborg CSP, Product Manager
 Fachkompetenz: Thermische Energiespeicher (Dänemark)
 Datum: 09.06.2022
- **Prof. Dr. Philipp Schütz**
 Organisation: HSLU Luzern, Dozent
 Fachkompetenz: Thermische Energiespeicher (Schweiz)
 Datum: 21.07.2022

2.5 SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse (engl. *Strengths (Stärken)*, *Weaknesses (Schwächen)*, *Opportunities (Chancen)*, *Threats (Risiken)*) ist ein Instrument zur strategischen Planung, das zur Positions- und Strategieentwicklung von Technologien dient. Die interne Bewertung zeigt die Stärken und Schwächen einer Technologie auf. Die Stärken stehen für alle verfügbaren Ressourcen, die genutzt werden können, um die Technologieleistung voranzutreiben. Die Schwächen sind Mängel, die Wettbewerbsvorteile, Effizienz oder finanzielle Ressourcen verringern. Die externe Bewertung dient dazu, Chancen und Risiken zu entdecken. Chancen sind externe Veränderungen, die zu einer weiteren Entwicklung der Technologie beitragen könnten, während Risiken externe Faktoren sind, welche den Funktionsprozess stören könnten [15].

Das Ziel der Analysephase besteht darin, die Stärken eines Produktes bzw. einer Technologie mit den Chancen des Umfeldes insofern in Einklang zu bringen, dass sich daraus Erfolgspotenziale für die Zukunft ergeben. Diese Erfolgspotenziale sollen die Einzigartigkeit der Technologie erkennbar und nutzbar machen [7].

Die Dimensionen des SWOT-Analysemodells werden häufig in einer SWOT-Matrix dargestellt, siehe Abbildung 2.3. Es wird versucht, den Nutzen aus Stärken und Chancen zu maximieren und die Verluste aus Schwächen und Gefahren zu minimieren. Hierzu werden vier strategische Zielsetzungen gebildet, um Handlungsoptionen für die Entwicklung einer Technologie abzuleiten [16]:

- Stärke-Chancen-Kombination: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken passen (Strategie "Ausbauen")
- Stärke-Gefahren-Kombination: Stärken nutzen, um Risiken bzw. Gefahren abzuwehren (Strategie "Absichern")
- Schwäche-Chancen-Kombination: Schwächen eliminieren, um neue Chancen zu nutzen, also Risiken in Chancen umwandeln (Strategie "Aufholen")
- Schwäche-Gefahren-Kombination: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen (Strategie "Vermeiden")

SWOT-Analyse		Interne Analyse	
		Stärken	Schwächen
Externe Analyse	Chancen	Strategie "Ausbauen"	Strategie "Aufholen"
	Risiken	Strategie "Absichern"	Strategie "Vermeiden"

Abbildung 2.3: Kombinierte SWOT-Matrix, *eigene Darstellung in Anlehnung an [16]*

2.6 Szenario-Management Methodik

Die im Rahmen dieser Arbeit genutzte Szenariotechnik ist eine Methode zur ganzheitlichen Entwicklung möglicher Zukunftsszenarien. Allgemeines Ziel ist es, aus mehreren Zukunftsszenarien, Handlungsempfehlungen für die Gegenwart abzuleiten, welche unter Beachtung einer multiplen Zukunft möglichst flexibel und robust sind. Dies geht mit dem Erkennen von zukünftigen Chancen und Risiken einher. Die Szenariotechnik eignet sich besonders gut für die Vorbereitung von Entscheidungen zur strategischen Technologieentwicklung. Im Rahmen des Technologiemanagements stellt die Szenariotechnik eine anerkannte Methode dar, da sie Market-pull und Technology-push Elemente verbindet. Die Szenariotechnik bietet zudem die Möglichkeit, visionäre Ideen zu fördern, und kann auch normativen Charakter haben. Damit eignet sich die Szenariotechnik sowohl zur Planung als auch zur Analyse und zur Bewertung [17].

Zur Entwicklung der Szenarien wird im Rahmen dieser Arbeit die von der Firma ScMI AG zur Verfügung gestellte Software *Szenario-Manager* genutzt. Der *Szenario-Manager* ermöglicht die Erarbeitung von Umfeld- und Strategieszenarien. Nach Festlegung des Szenariorahmens im ersten Schritt wird eine Wechselwirkungsanalyse der Einflussfaktoren, die anhand der durchgeführten Literaturrecherche, PESTEL- und Stakeholder-Analyse sowie Experteninterviews erkannt werden, durchgeführt, siehe Abbildung 2.4. Die Wechselwirkungsanalyse (englisch *Cross-Impact Analysis*) bezeichnet eine Technik, die die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren betrachtet und durch ihre Anwendung die wichtigsten Einflussfaktoren bzw. die Schlüsselfaktoren bestimmt werden. Nach Festlegung der Schlüsselfaktoren werden mögliche zukünftige Zustände für jeden Faktor ermittelt. Dieser Prozess wird als Projektionsentwicklung bezeichnet. In einem nächsten Schritt wird eine Konsistenzanalyse durchgeführt, die die Zusammenpassung der einzelnen Schlüsselfaktoren zueinander auswertet. Damit werden die Rohszenarien durch eine Clusteranalyse, die ähnliche Projektionen bündelt, gebildet. Abschließend werden die endgültigen Szenarien festgelegt und die Chancen und Risiken für die Speicher analysiert.

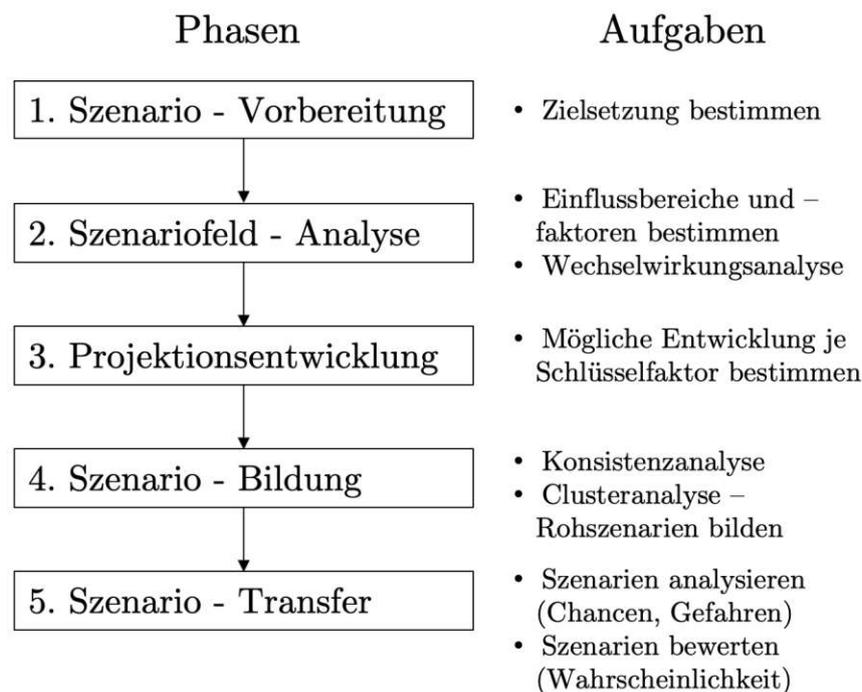


Abbildung 2.4: Methodik des Szenario-Managements, *eigene Darstellung in Anlehnung an [18]*

Szenario-Vorbereitung

Die Szenario-Vorbereitung definiert die Zielsetzung des Szenarioprojekts, analysiert die Ausgangssituation und legt die Projektorganisation fest. Die Ziele des Szenarioprojektes beziehen sich auf das Gestaltungsfeld. Typische Gestaltungsfelder sind zum Beispiel ein Unternehmen, ein Produkt, eine Branche oder eine Technologie [18]. Im Rahmen des Gestaltungsfeldes soll auch geklärt werden, inwieweit das Eintreten von einem Szenario beeinflusst werden kann. Das Gestaltungsfeld soll auch eine Antwort auf die Frage geben: Wofür werden die Szenarien eingesetzt? Es wird zwischen zwei Arten von Ausgangssituationen unterschieden. Diese sind die Entscheidungssituationen, wobei Szenarien direkt zur Bewertung von Strategien und Geschäftsmodellen genutzt werden, und die Orientierungssituationen, wobei Szenarien zur Orientierung und Vorbereitung zukünftiger Entscheidungen dienen [19].

Im Rahmen der Szenario-Vorbereitung ist es wichtig, den Zukunftshorizont festzulegen. Der Zukunftshorizont kann mit einer Zielsetzung der Organisation oder der Technologie verbunden sein. Typische Zeithorizonte liegen zwischen 10 und 20 Jahren [18].

Beim letzten Schritt der Szenario-Vorbereitung wird der räumliche Fokus festgelegt, das heißt für welches geographische Gebiet die Szenarien gelten. Dabei wird zwischen globalen und regionalen Szenarien unterschieden. Eine regionale Eingrenzung kann sich auf ein Land, auf eine Region oder auf eine Georegion wie zum Beispiel Europa beziehen [19].

Szenariofeld-Analyse

Systematische Gliederung des Szenariofeldes

Für eine direkte Vorausschau sind die meisten Themenstellungen zu komplex, da mehrere Faktoren einen Einfluss auf eine Technologie ausüben können. Daher wird das Szenariofeld in Umfelder und Einflussbereiche aufgeteilt, die eine Struktur des Szenariofeldes geben [19], siehe Abbildung 2.5.

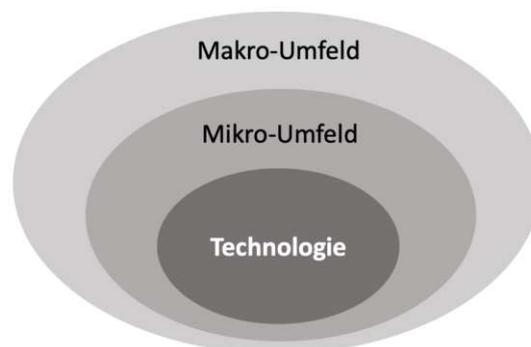


Abbildung 2.5: Das Umfeld einer Technologie zur strategischen Analyse, *eigene Darstellung*

Das allgemeine bzw. Makro-Umfeld umfasst die Rahmenbedingungen eines geographischen Raumes. Es wird nach unterschiedlichen Bereichen wie Politik, Wirtschaft, Gesellschaft, Technologie, Umwelt und Recht gegliedert. In der Literatur wird diese Gliederung als PESTEL bezeichnet. Das zweite Umfeld ist das Mikro-Umfeld. Dieses umfasst den Industriesektor, in dem eine Technologie einen Einsatz findet. Im Mikro-Umfeld agieren unterschiedliche Stakeholder, die in einer unmittelbaren Beziehung zu der Technologie stehen [7]. Im Mittelpunkt des Szenariofeldes steht das Hauptthema der Szenarientwicklung.

Ermittlung von Einflussfaktoren

Um die Entwicklungsmöglichkeiten des Szenariofeldes darzustellen, werden die einzelnen Einflussbereiche durch mehrere geeignete Einflussfaktoren beschrieben. Ein Faktor dabei stellt eine messbare und beschreibbare Variable dar, deren Ausprägung sich verändern kann. Für die Identifikation von Einflussfaktoren können verschiedene Methoden verwendet werden [19]. Im Rahmen der Arbeit werden PESTEL und Stakeholder-Analyse sowie sechs Experteninterviews durchgeführt, um die relevanten Einflussfaktoren zu bestimmen. Anschließend werden die Faktoren in einem Einflussfaktorenkatalog zusammengestellt. Im Katalog wird eine ausführliche Beschreibung von jedem Faktor verfasst, die einzelne Dimensionen bzw. Unsicherheiten, Teilaspekte und Fragen abdeckt. Gegebenenfalls im Katalog werden auch zugehörige Trends sowie relevante Quellen für weitere Informationen verzeichnet [19].

Wechselwirkungsanalyse

Ein Einflussfaktorenkatalog enthält in der Regel eine große und bei der Szenario-Bildung nicht zu handhabende Anzahl von Faktoren. Da nicht alle Faktoren gleichermaßen relevant sind, wird ein Instrument zur Komplexitätsreduktion gebraucht, damit die wesentlichen Einflussfaktoren identifiziert werden [19]. Im Rahmen der Methodik wird eine Wechselwirkungsanalyse genutzt. Diese Analyse beginnt mit dem Aufbau einer Einflussmatrix, siehe Abbildung 2.6. In deren Zeilen und Spalten werden die Kurzbeschreibungen aller Einflussfaktoren eingetragen. Dann werden die direkten Beziehungen zwischen den Faktoren bewertet. Dazu muss das Einflussausmaß für jedes Faktoraar bewertet werden, mit dem der eine Faktor auf den anderen wirkt – und umgekehrt. Die Bewertung erfolgt anhand einer Skala von 3 (= starke Wirkung) bis 0 (= keine Wirkung) [19]. Die gesamte Anzahl der Bewertungen beträgt $n(n - 1)$, wobei n die Anzahl der Einflussfaktoren ist.

Die Darstellung der Resultate aus der Wechselwirkungsanalyse erfolgt in einem Aktivität-Passivität-Diagramm. Auf der Abszisse wird die Passivsumme einzelner Faktoren nach ihrem Rang und auf der Ordinate die Aktivsumme einzelner Faktoren nach ihrem Rang aufgetragen, siehe Abbildung 2.7.

Wie stark beeinflusst der Einflussfaktor i (Zeile) den Einflussfaktor j (Spalte) und umgekehrt ?		1	2	3	4	...	n	
Bewertungsmaßstab: 0 = kein Einfluss 1 = schwacher Einfluss 2 = mittlerer Einfluss 3 = starker Einfluss		Einflussfaktor	Einflussfaktor	Einflussfaktor	Einflussfaktor	...	Einflussfaktor	Aktivsumme
1	Einflussfaktor	■	2	1	0	...	0	34
2	Einflussfaktor	0	■	2	1	...	2	48
3	Einflussfaktor	3	1	■	1	...	1	34
4	Einflussfaktor	2	1	0	■	...	3	33
...
n	Einflussfaktor	2	1	0	0	...	■	22
Passivsumme		30	23	44	58	...	45	

Abbildung 2.6: Beispielhafte Wechselwirkungsanalyse zwischen unterschiedlichen Einflussfaktoren, *eigene Darstellung in Anlehnung an [19]*

Im Aktivität-Passivität-Diagramm (siehe Abbildung 2.7) lassen sich vier charakteristische und einander überschneidende Bereiche unterscheiden. Die Felder I, II und VI stellen die Hebelkräfte dar, die einen starken Einfluss auf das betrachtete System auswirken, während sie von diesem nur wenig beeinflusst werden. In den Feldern II, III und IV befinden sich die Systemknoten. Sie sind stark in das Systemgefüge eingebunden. Einerseits üben alle diese Faktoren einen sehr großen Einfluss auf alle anderen Faktoren und das Gesamtsystem aus. Andererseits erfahren sie eine starke Rückwirkung aus dem System. Die Felder IV, V und VII stellen die Systemindikatoren dar, die einen geringen Einfluss auf das Gesamtsystem haben, aber primär durch alle anderen Faktoren beeinflusst werden. In der letzten Gruppe von Feldern VI, VII und VIII befinden sich die unabhängigen Faktoren, die eine marginale Einbindung in das Gesamtsystem besitzen [20].

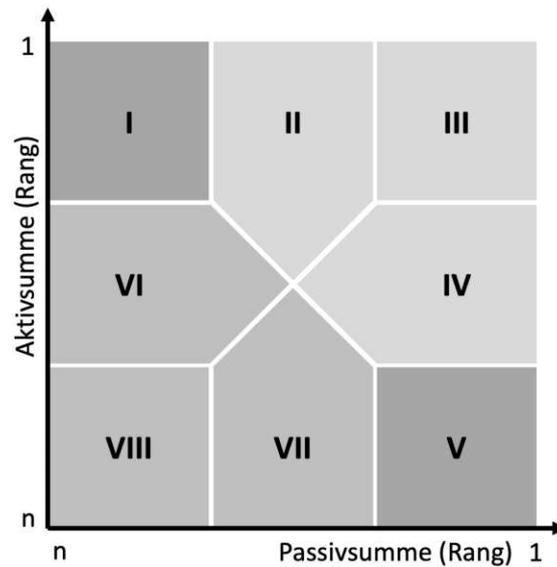


Abbildung 2.7: Aktivität-Passivität-Diagramm, *eigene Darstellung in Anlehnung an [19]*

Projektionsentwicklung

Nachdem eine handhabbare Zahl von Schlüsselfaktoren ausgewählt wird, beginnt die Szenario-Prognostik. Für jeden Schlüsselfaktor werden mögliche zukünftige Zustände systematisch ermittelt und in Form von Zukunftsprojektionen beschrieben. Je nach Form der Szenario-Entwicklung kommen unterschiedliche Arten von Zukunftsprojektionen zum Einsatz. Die erste Art von Zukunftsprojektionen stellen die eindimensionalen Schlüsselfaktoren dar – zum Beispiel Preis oder Wirtschaftswachstum, deren Entwicklung sich in der Zukunft anhand dreier Projektionen – eine Zunahme, eine Stagnation oder eine Abnahme in einer Trichterdarstellung beschreiben lässt, siehe Abbildung 2.8 a). Die zweite Kategorie stellen die zweidimensionalen Schlüsselfaktoren dar, die in einer Matrix präsentiert werden, siehe Abbildung 2.8 b). Hier werden zwei Schlüsseldimensionen bestimmt, deren Kombination sich in einer Projektion ergibt. Die Entwicklung der Schlüsseldimension darf nicht nur einen niedrigen oder hohen Wert, sondern auch einen mittleren Wert betragen. Bei zweidimensionalen Schlüsselfaktoren ist es auch wichtig, zwischen Alternativprojektionen, die nicht gemeinsam in der Zukunft auftreten – z.B. sinkende und steigende Preise, und Parallelprojektionen, die in der Zukunft gleichzeitig vorkommen – z.B. thermische und elektrische Energiespeicher, zu unterscheiden.

Bei der Entwicklung des Projektionsportfolios sind einige Regeln zu beachten. Die Projektionen sollen eindeutig alternativ oder eindeutig parallel sein, d.h. die zwei Schlüsseldimensionen sollen gleichzeitig entweder eine alternative Entwicklung oder eine parallele Entwicklung darstellen. Die Projektionen sollen auch Entwicklungsmöglichkeiten des Schlüsselfaktors und nicht deren Ursachen oder Folgen beschreiben. Schließlich sollen die Projektionen mit anderen Schlüsselfaktoren kompatibel sein [19].

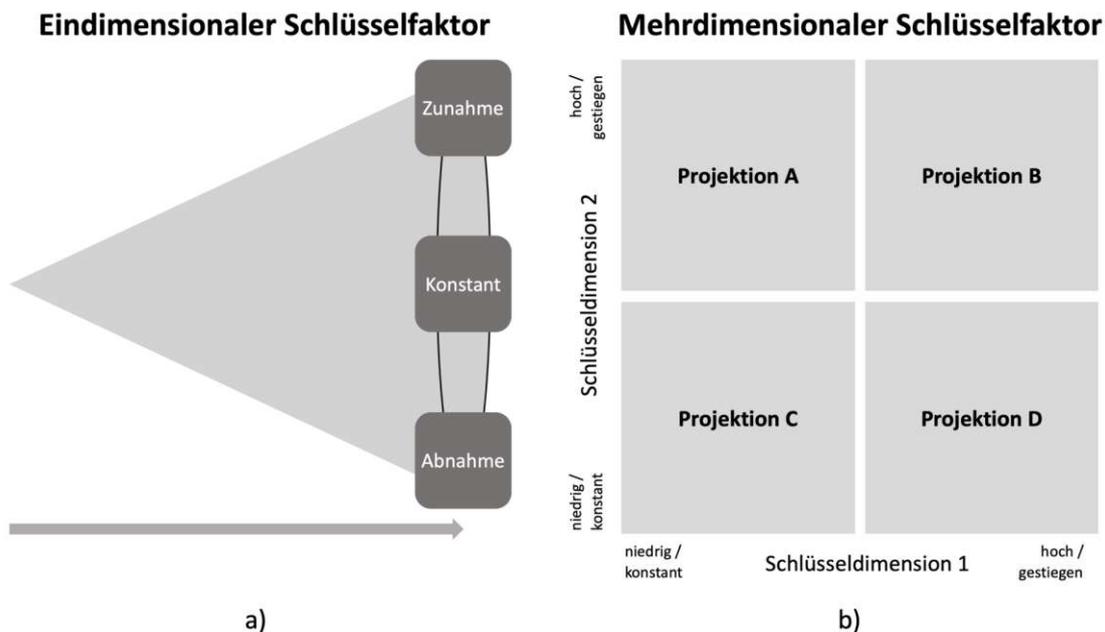


Abbildung 2.8: Projektionsentwicklungen auf Basis vom a) eindimensionalen Schlüsselfaktor, b) zweidimensionalen Schlüsselfaktor, *eigene Darstellung in Anlehnung an [20]*

Um einen Nachweis für die getroffenen Annahmen bzgl. der entwickelten Zukunftsprojektionen zu liefern, wurden die vergangene Entwicklung und der Status quo jedes Schlüsselfaktors im Rahmen der PESTEL- und Stakeholder-Analyse untersucht und im Rahmen der durchgeführten Experteninterviews diskutiert.

Szenario-Bildung

Konsistenzanalyse

Als nächster Schritt in der Szenarientwicklung wird überprüft, ob die entwickelten Zukunftsprojektionen zueinander passen. Diese Überprüfung erfolgt mittels einer Konsistenzanalyse, wobei die einzelnen Projektionen paarweise miteinander verknüpft werden, siehe Abbildung 2.9. Dabei wird nur eine Seite der Matrix ausgefüllt, da es sich im Gegensatz zur Wechselwirkungsanalyse nicht um gerichtete Beziehungen handelt. Für die Konsistenzbewertung eines Projektionspaares wird eine Skala von 1 bis 5 verwendet, wobei 1 einer totalen Inkonsistenz und 5 einer sehr hohen Konsistenz entspricht [19]. Der Konsistenzwert stellt das Ausmaß dar, in welchem sich zwei Zukunftsannahmen gegenseitig ausschließen oder vertragen [21]. Den paarweisen Kombinationen mit keiner direkten Wechselbeziehung zwischen den betrachteten Projektionen wurde ein Konsistenzwert von 1 zugeordnet. Diese Annahme muss besonders beachtet werden, da eine Bewertung mit totaler Inkonsistenz zwischen 2 Projektionen bedeuten würde, dass die beiden Projektionen nie in einem Szenario vorkommen können.

Bewertungsmaßstab: 5 = sehr hohe Konsistenz 4 = hohe Konsistenz 3 = unabhängig voneinander 2 = partielle Inkonsistenz 1 = totale Inkonsistenz			Schlüsselfaktor 1				Schlüsselfaktor 2				Schlüsselfaktor 3			
			A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
			Projektion	Projektion	Projektion	Projektion	Projektion	Projektion	Projektion	Projektion	Projektion	Projektion	Projektion	Projektion
Schlüsselfaktor 1	A	Projektion												
	B	Projektion												
	C	Projektion												
	D	Projektion												
Schlüsselfaktor 2	A	Projektion	4	4	2	2								
	B	Projektion	4	4	2	2								
	C	Projektion	2	2	4	4								
	D	Projektion	2	2	4	4								
Schlüsselfaktor 3	A	Projektion	3	3	3	3	2	1	3	5				
	B	Projektion	3	3	3	3	1	3	4	4				
	C	Projektion	3	3	3	3	4	4	4	1				
	D	Projektion	3	3	3	3	3	3	4	4				

Abbildung 2.9: Konsistenzmatrix zur Rohszenario-Bildung, *eigene Darstellung in Anlehnung an [20]*

Clusteranalyse

Auf Basis der ausgefüllten Konsistenzmatrix werden Projektionsbündel gebildet, siehe Abbildung 2.10 a). Ein Projektionsbündel ist eine Kette bzw. eine Kombination von Projektionen, wobei genau eine Projektion pro Schlüsselfaktor auftritt. Das Projektionsbündel stellt im Prinzip ein mögliches Szenario dar. Nach den Regeln der Kombinatorik ergeben sich k^n Projektionsbündel, wobei k die Anzahl der Projektionen pro Schlüsselfaktor und n die Anzahl der Schlüsselfaktoren sind. Somit ergeben sich zum Beispiel für 15 Schlüsselfaktoren mit je 4 Projektionen 10^9 Projektionsbündel [18]. Daher ist der Einsatz der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten *Szenario-Software* notwendig. Dabei nimmt die *Szenario-Software* eine Priorisierung der Projektionsbündel vor, indem sie die Gesamtkonsistenz (Summe aller wechselseitigen Konsistenzbewertungen der enthaltenen Projektionen) eines Projektionsbündels ermittelt [19], siehe Abbildung 2.10 b). Im ersten Schritt werden alle Bündel aussortiert, die totale Inkonsistenzen (die Konsistenz von zwei Projektionen dieses Bündels wurde mit „1“ bewertet) enthalten. Im zweiten Schritt wird für jede Projektion eine Rangliste der konsistentesten Projektionsbündel erstellt. Für jedes Projektionsbündel wird ein Konsistenzwert und ein Inkonsistenzwert ermittelt. Der Inkonsistenzwert gibt an, wie viele Projektionspaare des betrachteten Bündels mit einer „2 = Leichte Inkonsistenz“ bewertet wurden [20].

Zur abschließenden Auswahl der Bündel erfolgt die Festlegung eines Mindeststranges. Alle Projektionsbündel, die den innerhalb einer der Ranglisten definierten Mindeststrang (Heap) erreichen, werden unter Ausschluss von Doppelungen in die endgültige Auswahlmenge übernommen. Die Anzahl der aussortierten Pro-

jektionsbündel liegt zwischen ca. 100 und 400. Die ausgewählten Kombinationen bilden den Ausgangspunkt für die anschließende Clusteranalyse [20].

		Projektionen im Projektionsbündel					...
		Bündel 1	Bündel 2	Bündel 3	Bündel 4	Bündel 5	
1	Schlüsselfaktor	A	B	C	D	A	...
2	Schlüsselfaktor	A	A	A	A	B	...
3	Schlüsselfaktor	A	A	A	A	A	...
4	Schlüsselfaktor	A	A	A	A	A	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	Schlüsselfaktor	A	A	A	A	A	...

a)

		1	2	3	4	...	n
		A	D	B	B	...	D
1	A	■	■	■	■	...	■
2	D	4	■	■	■	...	■
3	B	4	4	■	■	...	■
4	B	3	4	3	■	...	■
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	D	3	3	3	3	...	■

Σ Bewertungen = 400
b)

Abbildung 2.10: a) Bildung von Projektionsbündeln und b) Ermittlung der Gesamtkonsistenz von einem Projektionsbündel (beispielhafte Darstellung), *eigene Darstellung in Anlehnung an* [20]

Im nächsten Schritt werden die hochkonsistenten Projektionsbündel entsprechend ihrer Ähnlichkeit in Clustern bzw. in Rohszenarien zusammengefasst. Die Clusteranalyse ist ein Verfahren zur Entdeckung und Gruppierung von Ähnlichkeitsstrukturen in Datenbeständen. Die auf diese Weise definierten Gruppen von „ähnlichen“ Objekten werden als Cluster bezeichnet, die Gruppenzuordnung als Clustering [22]. Die von der *Szenario-Software* dazu verwendete Methode basiert auf eine hierarchische Clusteranalyse bzw. Average linkage clustering. Als hierarchische Clusteranalyse wird eine bestimmte Familie von distanzbasierten Verfahren zur Clusteranalyse bzw. eine Strukturentdeckung in Datenbeständen bezeichnet. Die Cluster bestehen hierbei aus Objekten, die zwischeneinander eine geringere Distanz (oder anders formuliert: höhere Ähnlichkeit) im Vergleich zu den Objekten anderer Cluster aufweisen [23]. Ein üblicher Algorithmus zum Clustering stellt das sogenannte Weighted Pair Group Method with Arithmetic Mean (WPGMA) dar. Mittels dieses Algorithmus wird die Distanz zwischen den Clustern als Durchschnittswert berechnet. Bei jedem Clusteringsschritt werden die ähnlichsten Cluster, z. B. i und j , zu einem Cluster höherer Ebene kombiniert. Dann wird der Abstand des neu entstandenen Clusters zu den anderen Clustern, z.B. k , durch das arithmetische Mittel der durchschnittlichen Abstände zwischen k und i und k und j gemessen [24], siehe Gleichung (1).

$$d_{(i \cup j), k} = \frac{d_{i,k} + d_{j,k}}{2} \quad (1)$$

Die *Szenario-Software* betrachtet alle Projektionsbündel als eigenständige Objekte am Anfang, welche anschließend miteinander verglichen werden. Die Distanz zwischen den Bündeln wird anhand ihrer Anzahl an ungleichen Projektionen gemessen. Danach werden die zwei am ähnlichsten Bündel, d.h. die mit der geringsten Anzahl an unterschiedlichen Projektionen, zu einem Cluster zusammengefasst.

Durch weitere Verdichtungsschritte wird die Anzahl der Projektionsbündel bzw. Szenarien so weit um eins reduziert, bis die gewünschte Anzahl von Clustern bzw. Rohszenarien erreicht wird [20].

Mit jeder Zusammenfassung von Bündeln geht Information verloren. Dieser Informationsverlust kann gemessen und in einem sogenannten Scree-Diagramm aufgetragen werden. Zur Festlegung einer sinnvollen Anzahl von Rohszenarien müssen zwei Aspekte miteinander ins Gleichgewicht gebracht werden. Einerseits soll möglichst wenig Information verloren gehen, andererseits muss die Anzahl der Szenarien handhabbar bleiben [20], siehe Abbildung 2.11. Das Scree-Diagramm weist in der Regel einen charakteristischen Knick, den sogenannten „Ellbogen-Punkt“, auf. An dieser Stelle steigt der Informationsverlust, d.h. die Anzahl der verlorenen Projektionen, mit einer weiteren Zusammenfassung stark an. Aus diesem Punkt ergibt sich die geeignete Anzahl von Rohszenarien [18].

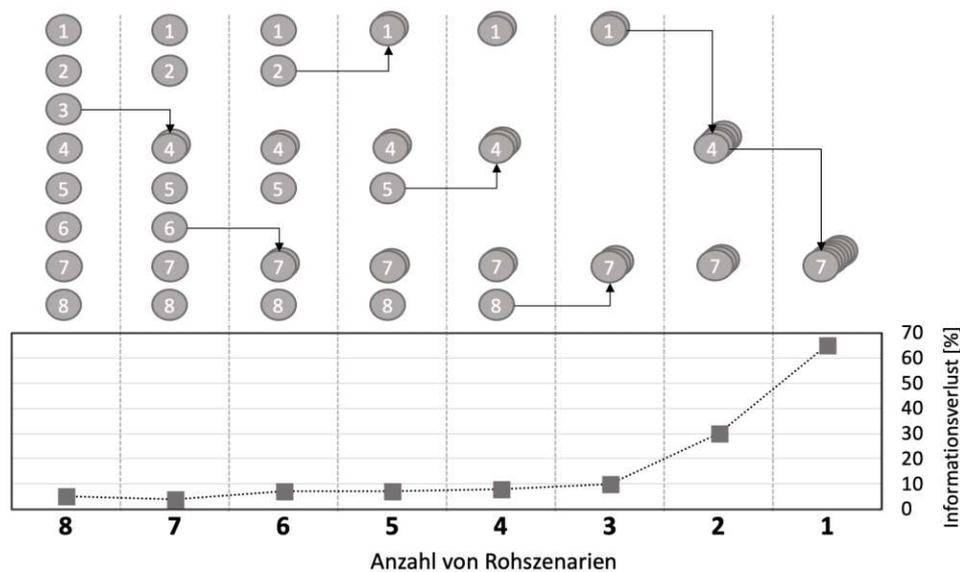


Abbildung 2.11: Beispielhafte Darstellung der Clusteranalyse (Zusammenfassung der Projektionsbündel) und des Scree-Diagramms, *eigene Darstellung in Anlehnung an* [20]

Im letzten Schritt der Clusteranalyse werden die Rohszenarien in einer Ausprägungsliste dargestellt. In dieser Liste wird die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Projektionen im jeweiligen Szenario zusammengefasst. Von einer eindeutigen Ausprägung der Projektion wird gesprochen, wenn eine Projektion zu über 70% in einem Szenario vorkommt. Dies bedeutet, dass sich der entsprechende Schlüsselfaktor im betrachteten Szenario eindeutig in Richtung dieser Projektion entwickelt. Sofern der Anteil einer Projektion zwischen 25% und 70% liegt, wird dagegen von einer alternativen Projektion gesprochen. Hier ist es möglich, dass innerhalb eines Szenarios zwei alternative Entwicklungen vorstellbar sind. Projektionen mit einem Anteil von unter 25% werden nicht im Szenario berücksichtigt [20].

Multidimensionale Skalierung

Die visuelle Wahrnehmung liefert rund 80 Prozent aller Informationen aus der Umwelt, die im Gehirn verarbeitet werden. Aus diesem Grund sind die visuellen Reize wie Bilder oder Formen für die menschliche Sinneswahrnehmung sehr wichtig [25]. Daher ist es besonders hilfreich die Szenarien bzw. die Zusammenhänge zwischen den Projektionsbündeln grafisch darzustellen. Eine Möglichkeit dafür bietet die multidimensionale Skalierung (MDS). MDS umfasst eine Gruppe von Skalierungsmethoden, die Messungen von Ähnlichkeiten bzw. Unähnlichkeiten zwischen Paaren von Objekten als Distanzen zwischen Punkten in einem niedrigen multidimensionalen Raum wiedergibt [26]. Im Zuge der Szenario-Management Methodik werden hier die unterschiedlichen Projektionsbündel anhand der vorberechneten Distanzwerte zwischen den einzelnen Bündeln in eine Konfiguration von Punkten dargestellt, die in einem abstrakten kartesischen Raum abgebildet werden. Die x- und y-Achse der sich daraus gebildeten Grafik haben keine inhaltliche Bedeutung. Sie dienen dazu, die Projektionsbündel relativ zueinander zu positionieren. Insofern kann die MDS-Grafik beliebig gedreht oder gespiegelt werden - solange die Abstände zwischen den Szenarien nicht verändert werden [19].

Szenario-Transfer

Szenario-Bewertung

In der letzten Phase der Szenario-Management Methodik können die Szenarien nach ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine detaillierte Szenario-Bewertung durchgeführt, wobei die einzelnen Schlüsselfaktoren und ihre Projektionen von den interviewten Experten, vgl. Kapitel 2.4, bewertet wurden [19]. Dieser Ansatz bietet den Vorteil, unabhängig von der Kombination der Projektionen oder von der Änderung der Rohszenarien eine Aussage über die Szenario-Bewertung im späteren Zeitpunkt zu bekommen.

Dafür wurde ein Fragebogen vorbereitet, siehe Anhang E. Für die Bewertung wurde eine Skala von 1 bis 5 genutzt, wobei 1 dem schlechtesten Zustand und 5 dem besten Zustand entspricht. Die von den Experten ausgefüllten Fragebogen werden im Rahmen dieser Arbeit aus Gründen der Vertraulichkeit und des Datenschutzes nicht dargestellt.

Konsequenzenanalyse

Zunächst werden die Folgen ermittelt, die sich für die Technologie aus den einzelnen Szenarien ergeben. Positiv eingeschätzte Auswirkungen werden als Chancen und negativ eingeschätzte Auswirkungen als Gefahren bezeichnet. Aus den Chancen und Gefahren ergeben sich Handlungsoptionen, wie die Technologie entwickelt und besser eingesetzt werden kann, um diese auf das Auftreten eines Szenarios vorzubereiten. Die Ableitung von Handlungsoptionen hängt auch davon ab, wie die Situation eingeschätzt wird. An dieser Stelle kann durchaus auf das bekannte Werkzeug der SWOT-Analyse zurückgegriffen werden [19], siehe Abbildung 2.3.

2.7 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Überall dort, wo sich Organisationen um Energieeinsparung bemühen, spielt auch die Frage der Wirtschaftlichkeit eine Rolle. Denn kaum eine investive Energiesparmaßnahme wird umgesetzt, ohne dass zuvor der wirtschaftliche Nutzen untersucht wurde. In der Praxis muss jedoch auch das jeweilige Marktumfeld berücksichtigt werden. Die Wirtschaftlichkeit entscheidet über die tatsächliche Umsetzung von denkbaren Energieeinsparmaßnahmen. Beispielsweise kann eine Energieeffizienzmaßnahme dann als wirtschaftlich betrachtet werden, wenn die dafür notwendigen Investitionskosten pro eingesparte kWh Energie den zu zahlenden Energiepreis unterschreiten [27]. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein wirtschaftlicher Vergleich aller SSTES Systeme mittels des Prinzips der Wärmegegestehungskosten durchgeführt. Das Ziel ist, den Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Kosten und Rückzahlungsperioden von den Speichern zu untersuchen. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind im Unterkapitel 3.4 erläutert.

2.8 Sensitivitätsanalyse

Bei der Sensitivitätsanalyse wird die Sensitivität von Modellparametern (Variablen) untersucht. Die Sensitivität beschreibt die Empfindlichkeit einer Ausgangsgröße auf die Veränderung einer oder mehrerer Eingangsgrößen (Variablen). Es wird überprüft, welche Modellparameter einen großen Einfluss auf das Systemverhalten ausüben und welche Parameter keinen oder nur geringen Einfluss aufzeigen und daher vernachlässigt werden können. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse wird versucht, die Unsicherheit eines Modells zu quantifizieren und die Zusammenwirkung einzelner Parameter darzustellen. Sie dienen somit dem besseren Modellverständnis und können zur Veranschaulichung komplexer Abläufe und für Entscheidungsmodelle herangezogen werden [28].

Im Rahmen der Arbeit wird eine Sensitivitätsanalyse für die Wirtschaftlichkeitsberechnung in Bezug auf die SSTES Systemen durchgeführt. Hier werden unterschiedliche Faktoren wie spezifische Investitionskosten, Subventionen, Lebensdauer, Effizienz und Zinssatz sowie der Wärmepreis um einen Wert verändert, um den Einfluss auf die Wärmegegestehungskosten und auf die Rückzahlungsperiode der SSTES Systeme zu untersuchen.

Der Ansatz der Sensitivitätsanalyse wird auch für die Einstellung des Mindestranges (Heap) in der *Szenario-Software* verwendet, um seinen Einfluss auf das Clustering der Projektionen zu untersuchen. Verschiedene Werte des Mindestranges werden eingestellt, um die Abweichung der Resultate aus der Clusteranalyse festzustellen.

3 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die vorhandenen Technologien zur saisonalen thermischen Energiespeicherung gegeben und ihre technischen und wirtschaftlichen Aspekte sowie ihre aktuellen Fortschritte werden erläutert. Zusätzlich werden die verschiedenen Szenarienarten im Energiesektor dargestellt.

3.1 Sektoren der Energiewirtschaft

Die Dekarbonisierung des Energiesektors steht seit mehreren Jahren im Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit und gewinnt in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung. Im Allgemeinen wird anerkannt, dass die Nutzung von erneuerbarer Energie der best mögliche Weg zur Dekarbonisierung eines Energiesystems ist [29]. Viele EU-Länder zeichnen sich bereits durch einen stetig wachsenden Anteil ihrer erneuerbaren Ressourcen wie Wind, Sonne, Geothermie oder Wasserkraft zur Stromerzeugung aus [29]. Der aus erneuerbaren Quellen bereitgestellte Strom ist jedoch eine hoch volatile Energieform.

Der Energiesektor umfasst neben der Stromversorgung noch zwei Energieformen, welche oft in der öffentlichen Diskussion vernachlässigt werden, nämlich die Wärmeversorgung und der Transport. Als Faustregel verbraucht ein EU-Land ein Viertel seiner Energie in Form vom Strom, ein Viertel als Kraftstoff für den Transport und den restlichen Teil als Wärme, die sich in Niedertemperaturwärme für Haushaltszwecke (Heizung, Kälteversorgung, Warmwasserbereitung) und Hochtemperaturwärme für industrielle Prozesse aufteilt [30].

In der Vergangenheit wurden die drei Hauptenergisektoren Strom, Transport und Wärme voneinander entkoppelt, das heißt jeder Energiesektor hat die erzeugte Energie für sich selbst verwertet. In der Zukunft sollen alle Sektoren miteinander gekoppelt sein, um die Ressourcen effizienter einzusetzen und die Energiebranche als Ganzes zu dekarbonisieren. Um die Sektorenkopplung zu verwirklichen, müssen verschiedene neue Technologien wie Power-to-Heat (PtH) bzw. Wärmepumpen (WP) und Elektrokessel, Power-to-Gas (PtG) sowie Power-to-Liquid (PtL) eingesetzt werden, siehe Abbildung 3.1. Sie ermöglichen die Umwandlung des elektrischen Stroms in andere Energieformen wie Wärme, Gas und Flüssigkeitskraftstoffe.

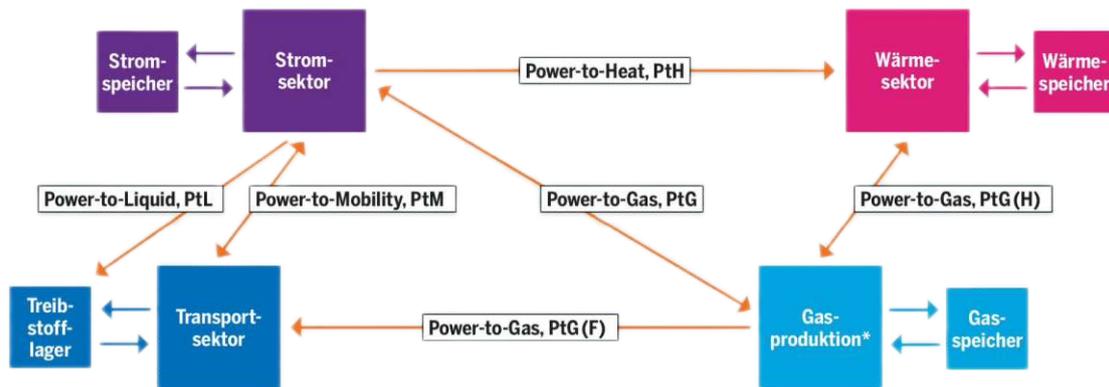


Abbildung 3.1: Sektorkopplung und verschiedene Power-to-X-Technologien [31]

Im Zuge der Energiewende und der Sektorkopplung finden auch diverse Speichertechnologien ihren Einsatz, siehe Abbildung 3.2. Besonders im Wärmesektor werden die thermischen Energiespeicher eine Schlüsselrolle spielen. Durch ihre Fähigkeit, die solare Wärme sowie die überschüssige elektrische Energie mittels PtH-Anlagen in Form von Wärme zu speichern, können sie einen großen Beitrag im Rahmen der Dekarbonisierung des Wärmesektors leisten.

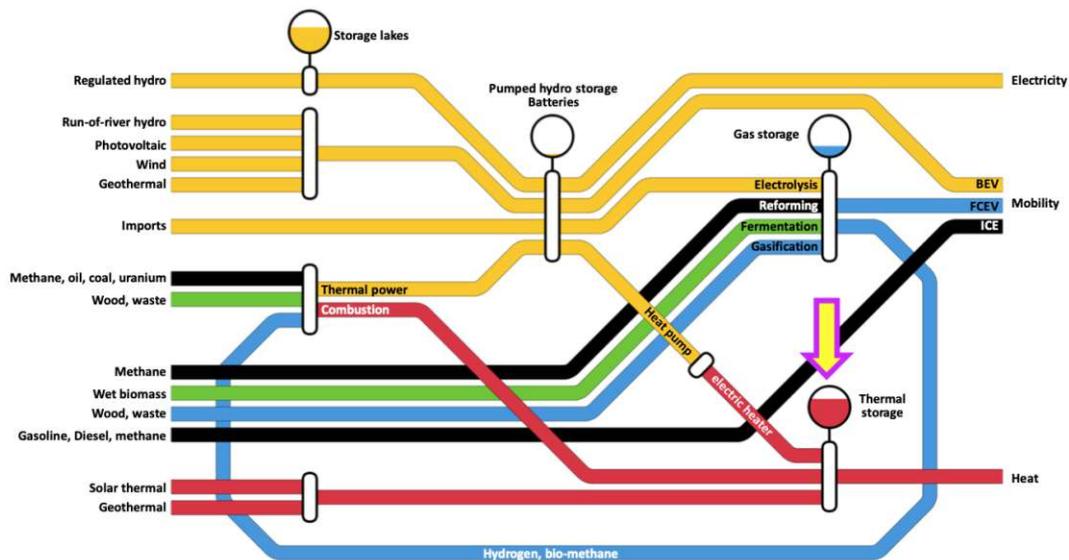


Abbildung 3.2: Allgemeine Darstellung eines Energiesystems und der verwendeten Speichertechnologien [32]

3.2 Thermische Energiespeicher

Die Technologien zur thermischen Energiespeicherung können in drei grundlegende Systeme unterteilt werden: sensible, latente und thermochemische Wärmespeicher, siehe Abbildung 3.3.

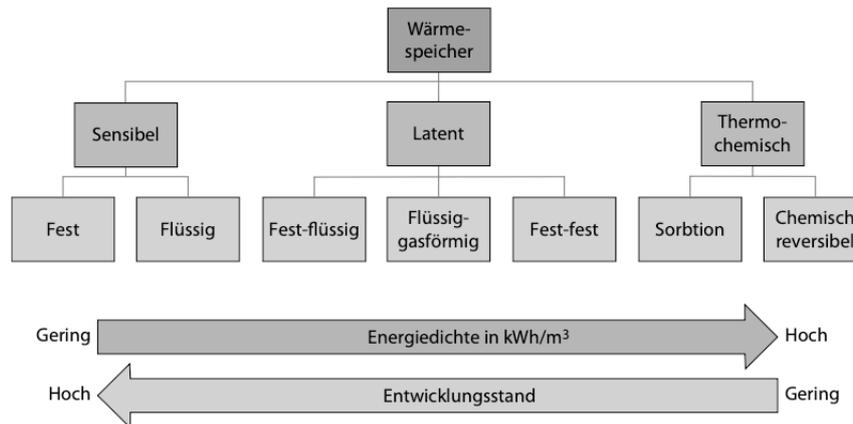


Abbildung 3.3: Übersicht über die verschiedenen Technologien zur Speicherung thermischer Energie [33]

Unter der sensiblen Wärmespeicherung (SHS, eng. *Sensible Heat Storage*) versteht man die Wärmeaufnahme oder Wärmeabgabe, die eine fühlbare Änderung der Temperatur zur Folge hat. Im Vergleich zu den anderen Methoden weist diese eine geringere Energiedichte bei gleicher Temperaturdifferenz auf. Diese Technologie verspricht eine Übertragbarkeit hoher Leistungen in flüssigen Systemen und eine Speicherung hoher Temperaturen. Deswegen ist sie am weitesten entwickelt und bereits am Markt etabliert [33].

Bei der latenten Wärmespeicherung (LHS, eng. *Latent Heat Storage*) wird zusätzlich zur sensiblen Wärme auch die für einen Phasenwechsel notwendige Energie gespeichert. Das am häufigsten verwendete Prinzip ist die Ausnutzung des Phasenübergangs fest-flüssig und umgekehrt. LHS hat einige Vorteile gegenüber SHS. Sie speichern mehr thermische Energie bei kleinen Temperaturunterschieden, wenn die Speicherung im Bereich des Phasenwechsels erfolgt, und weisen somit eine höhere Energiedichte auf. Des Weiteren ist die Temperatur beim Laden und Entladen für eine bestimmte Zeit konstant [33]. Auf der anderen Seite ist der Einsatz von den Phasenwechselmaterialien (PCM) in LHS mit Herausforderungen verbunden. PCMs haben eine niedrigere thermische Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum Wasser, was zu langsameren Wärmeübertragungsraten und Reaktionszeiten der Speicher führt. Um die Wärmeübertragungsfläche und somit die Wärmeübertragungsrate zu erhöhen, werden oft Rippen zwischen dem Wärmeübertragungsmedium (HTF) und dem PCM verwendet, oder das HTF wird mit dem PCM in einem Direktkontaktspeicher vermischt. Ein weiteres Problem ist die Phasenseparation der inorganischen PCMs (z.B. Salzhydrate). Es tritt aufgrund

von inkongruentem Schmelzen und von Dichteunterschieden zwischen dem anorganischen Salz und dem Wasser auf. Dafür können die PCMs verkapselt werden. Mit diesem Verfahren wird zusätzlich das Problem der thermischen Instabilität der PCMs gelöst, da die PCMs im Laufe der Speicherzyklen abgebaut werden können. Nichtzuletzt ist eine Unterkühlung der Schmelze in der Regel unerwünscht. Daher müssen geeignete Keimbildner dem Material zugesetzt werden, die eine Kristallisation knapp unterhalb der Schmelztemperatur bewirken [34].

Unter thermochemischer Energiespeicherung (THS, eng. *Thermochemical Heat Storage*) sind strenggenommen chemisch reversible Reaktionen zu verstehen. Die bei der endothermen Reaktion der Energiespeicherung entstehenden Reaktionsprodukte können getrennt und dauerhaft gespeichert werden. Durch die Trennung treten keine Speicherverluste auf. Erst bei der Entladung gibt eine exotherme Reaktion die gespeicherte Energie wieder frei. THS erlaubt sehr hohe Energiespeicherdichten, findet derzeit aber kaum Anwendung in der Praxis, da sich diese Technologie größtenteils noch in der Grundlagenforschung befindet [33]. Dafür sind weitere Untersuchungen zur Identifizierung geeigneter Reaktionen und zur Steigerung der Entladeleistung erforderlich [35].

Die Abbildung 3.4 stellt den Unterschied in der gespeicherten Wärmemenge zwischen SHS und LHS dar. Eine Wärmezufuhr führt zunächst zum linearen Anstieg der Temperatur bis zur Schmelz- beziehungsweise Übergangstemperatur ϑ_m . Während sich bei dem SHS der lineare Temperaturanstieg fortsetzt, findet bei dem LHS eine isotherme Wärmezufuhr statt. Daraus ergibt sich, dass die gespeicherte Wärmemenge ΔQ_{latent} beim LHS wegen der Schmelzenthalpie aufgrund einer Änderung des Aggregatzustandes höher als diese $\Delta Q_{sensibel}$ von dem SHS ist, wenn die Wärmezufuhr im Bereich der Schmelztemperatur erfolgt.

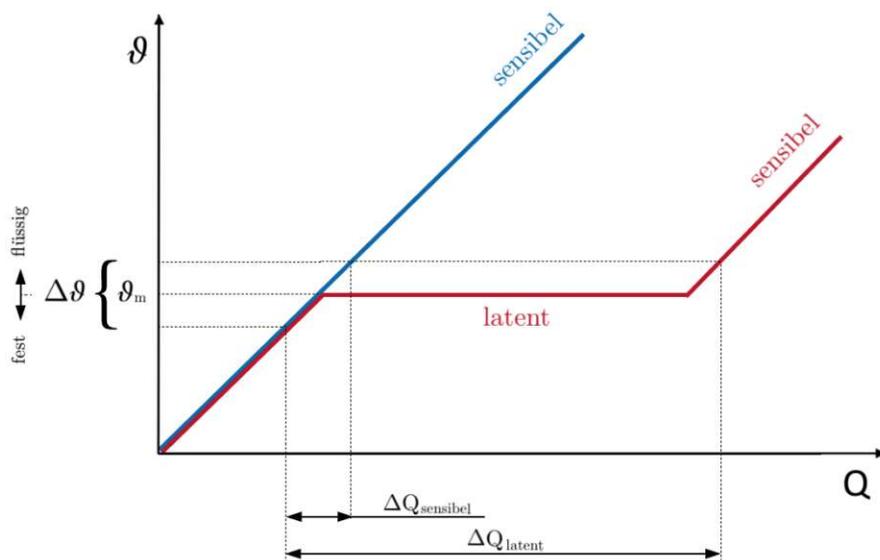


Abbildung 3.4: Unterschied in der gespeicherten Wärmemenge bei derselben Temperaturdifferenz zwischen sensiblen und latenten Wärmespeichern, *eigene Darstellung*

3.3 Sensible saisonale thermische Energiespeicher

Die SSTES Technologie ermöglicht es, die im Sommer gesammelte Solarwärme für den Heizwärmebedarf im Winter abzugeben. Somit trägt dieses Konzept zur effizienten Nutzung erneuerbarer Energien in Fernwärmesystemen und Anergienetzen bei. SSTES Systeme erhöhen die Flexibilität bei der Erzeugung und Übertragung von Wärme, indem sie die Wärmenachfrage und -bedarf saisonal ausgleichen. SSTES ist eine vielversprechende Technologie für die Zukunft, weil sie einen wichtigen Beitrag in der Übergangsphase zur 4. Generation von Fernwärmesystemen leisten kann [36]. Die Einführung von Fernwärmenetzen der 4. Generation bedeutet eine Verschiebung zu niedrigeren Temperaturverteilungssystemen mit Vorlauftemperaturen im Bereich von 60 °C. Diese niedrigeren Betriebstemperaturen eignen sich besser für die Integration von erneuerbaren Energiequellen und von SSTES Systemen [37].

Es gibt vier Grundtypen von SSTES Systemen: Tankspeicher (engl. *tank thermal energy storage*, TTES), Erdbeckenspeicher (engl. *pit thermal energy storage*, PTES), Bohrlochwärmespeicher (engl. *borehole thermal energy storage*, BTES) und Aquiferwärmespeicher (engl. *aquifer thermal energy storage*, ATES), siehe Abbildung 3.5. Die Entscheidung für ein bestimmtes Konzept hängt stark von den örtlichen Randbedingungen ab, die durch die geologischen und hydrologischen Bedingungen des jeweiligen Standorts und durch das jeweilige Fernwärmesystem sowie das Temperaturniveau gegeben sind [38].

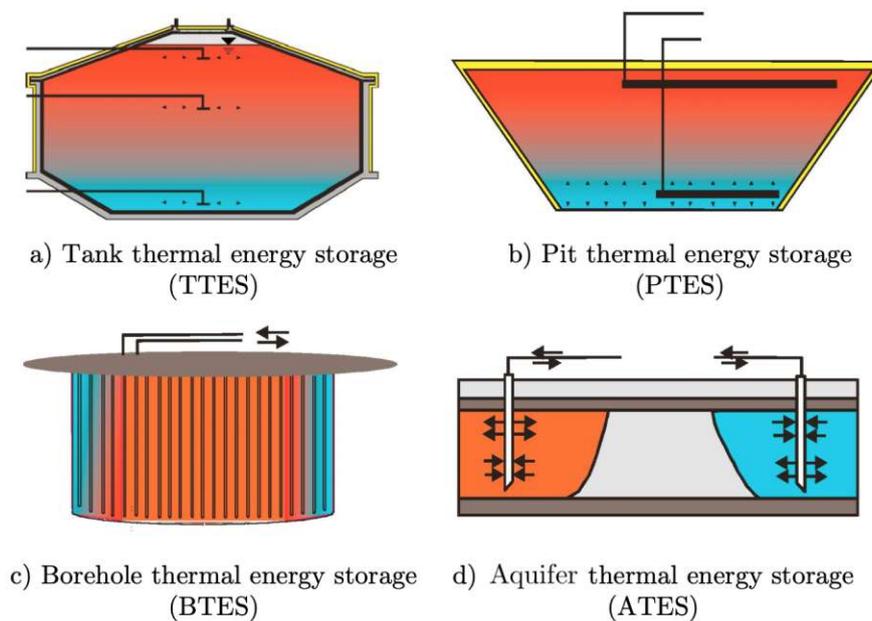


Abbildung 3.5: Darstellung der Technologien zur saisonalen sensiblen thermischen Energiespeicherung: a) Tankspeicher (TTES), b) Erdbeckenspeicher (PTES), c) Bohrlochwärmespeicher (BTES) und d) Aquiferwärmespeicher (ATES) [36]

3.3.1 Tankspeicher

Obwohl das TTES System oft als Pufferspeicher eingesetzt wird, wird TTES auch für saisonale Energiespeicherung genutzt. Der Speicher besteht aus Stahlbeton, Stahl oder faserverstärkten Kunststoffen und verwendet Wasser als Speichermedium. Zusätzlich verfügt der Speicher über eine Innenauskleidung, um eine wasserdichte Schicht zu bilden. Im Vergleich zu BTES und ATES ist das TTES System unabhängig von den ortsgebundenen geologischen Bedingungen und kann überall aufgestellt werden. Um den Tank gegen die Umgebungstemperatur effizienter zu isolieren, kann er entweder teilweise oder vollständig im Boden vergraben werden, wodurch das erforderliche Maß an Wärmedämmung reduziert wird [37], siehe Abbildung 3.5 a). Der Bau des Tanks im Untergrund trägt weiter dazu bei, die hydrostatischen Kräfte an den Wänden des Systems auszugleichen. Dies führt dazu, dass die Wände dünner gebaut werden können, als es bei einem Bau auf Bodenniveau erforderlich wäre [39].

Was die Thermodynamik von TTES Systemen betrifft, entsteht im Tank eine Temperaturschichtung, in welcher das Speichermedium bzw. das Wasser im oberen Teil des Tanks heißer als im unteren Teil ist. Dieser Unterschied ergibt sich aus der temperaturabhängigen Dichte des Wassers, wobei das kalte Wasser eine höhere Dichte im Vergleich zu heißem Wasser aufweist und sich dementsprechend im unteren Teil des Tanks sammelt. Folglich wird zwischen diesen beiden Schichten eine Thermokline gebildet, die als eine dynamische natürliche Barriere anzusehen ist, siehe Abbildung 3.6. Die Thermokline verhindert die Mischung des heißen Wassers mit dem kalten Wasser. Es ist wichtig, den Bereich der Thermokline so gering wie möglich zu halten, da dies zu einem geringeren Mischeffekt und somit zu geringeren thermischen Verlusten aus dem Tank führt [36].

Eine Schlüsselrolle für die gute Temperaturschichtung spielen die Wassereinlass- und -auslassöffnungen. Die Gestaltung (z.B. die Geometrie) des Ein- und Auslaufs hat einen Einfluss auf die Schichtung und somit auf die energetische Effizienz von TTES. Insbesondere erzeugt eine ungeeignete Einlassvorrichtung lokale Turbulenzen, die zu einer Vermischung beider Schichten führen. Daher ist es wichtig, die Einlass- und Auslassöffnungen so nahe wie möglich an der Ober- bzw. Unterseite des Tanks anzuordnen. Eine solche Anordnung erzeugt einen gleichmäßigen Wasserfluss und somit wird eine Vermischung der kalten und heißen Schicht vermieden [36].

3.3.2 Erdbeckenspeicher

Das PTES System wird aus betrieblicher Sicht häufig ähnlich wie das TTES System betrachtet, da beide Systeme das Konzept der Temperaturschichtung zur Wärmespeicherung verwenden. Bei dem PTES System wird ein künstliches Becken gebaut, das mit dem Speichermedium (Wasser oder Kies-Wasser-Mischung) gefüllt und mit einem Deckel geschlossen wird, siehe Abbildung 3.5 b). Die geeigneten Wände des Beckens sind wärmeisoliert und mit wasserdichter Kunststoffolie ausgekleidet. Die Konstruktion der Abdeckung kann entweder schwimmend oder

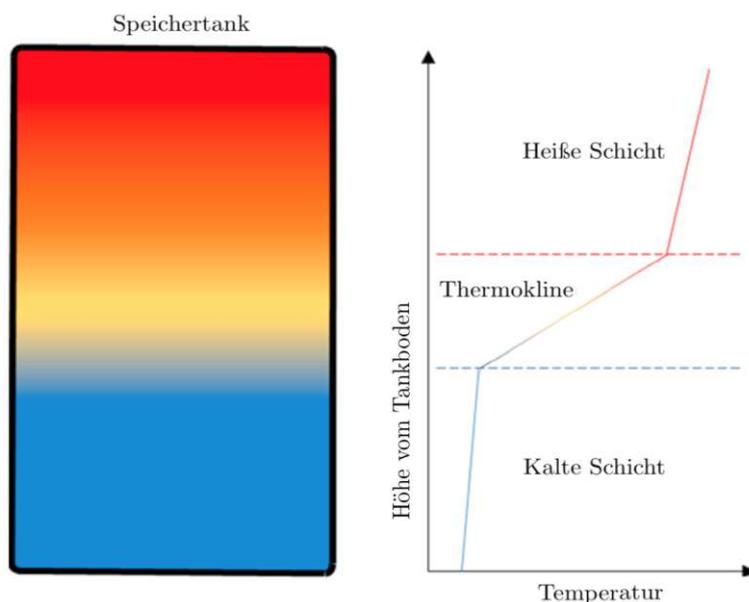


Abbildung 3.6: Thermokline-Region, die heiße und kalte Wasserschichten voneinander trennt [37]

selbsttragend sein. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Speicher mit einer Kies-Wasser-Mischung auszufüllen, wodurch das Dach leicht von der Kiesfüllung getragen werden kann [39].

Die Gestaltung der Abdeckfläche hat einen erheblichen Einfluss auf die Wärmeverluste. Aus diesem Grund stellt die Wärmedämmung der Oberfläche eine wesentliche Anforderung an die Konstruktion der Abdeckung. Eine weitere wichtige Anforderung ist die Nutzbarkeit der Abdeckung während der Betriebsphase des PTES Systems, sodass der hohe Flächenbedarf kompensiert werden kann. Dies kann mit der Schaffung einer Begehbarkeit für Fußgänger oder sogar einer Befahrbarkeit für leichten Verkehr erfolgen [38].

3.3.3 Bohrlochwärmespeicher

Beim BTES System wird die Wärme direkt im Untergrund gespeichert. U-förmige Rohre werden in vertikale Bohrlöcher, typischerweise 30 bis 200 m tief [37], eingesetzt, um einen großen Wärmetauscher zu bauen. Durch den Durchfluss des Wärmeträgerfluides bzw. des Wassers in den U-Rohren kann die Wärme im Boden gespeichert oder ihm entzogen werden. Beim Laden ist die Strömungsrichtung des Wassers in den Rohren von der Speichermitte zu der Speicherperipherie. Somit werden hohe Temperaturen in der Speichermitte und niedrigere an den Speichergerenzen erreicht [39]. Beim Entladen ist die Flussrichtung umgekehrt, siehe Abbildung 3.5 c). Die gespeicherte Wärme kann mittels einer Erdwärmepumpe entladen werden.

Die Speichereffizienz der BTES Systeme wird durch die Auslegung und Anordnung der Bohrlöcher, Materialeigenschaften, Bodeneigenschaften und Betriebspa-

parameter bestimmt. Der Wärmerückgewinnungsgrad hat typischerweise im ersten Betriebsjahr sehr niedrige Werte und erreicht erst im vierten oder fünften Betriebsjahr sein volles Potential, weil das Aufheizen des Bodens durch die Bohrlöcher gewisse Zeit braucht. [37].

Geeignete geologische Formationen für diese Art der Wärmespeicherung sind z.B. Gestein oder wassergesättigter Boden mit keinem oder nur sehr geringem Grundwasserfluss [39]. Langfristig gesehen können BTES Systeme einen allmählichen Anstieg der durchschnittlichen Bodentemperatur, eine Grundwasserbewegung und einen Verlust des Bodenwassergehalts verursachen [3]. Aus diesem Grund verlangen die Behörden in der Regel Berechnungen über die von der Temperaturänderung beeinflusste Fläche vor der Inbetriebnahme des Speichers [39].

3.3.4 Aquiferwärmespeicher

Bei dieser Art von thermischer Energiespeicherung werden natürlich vorkommende geschlossene Grundwasserschichten – sogenannte Aquifere – genutzt. Die Wärme wird in unterirdischen Brunnen gespeichert. Die ATES Systeme können sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen verwendet werden. Beim Heizbetrieb wird das Grundwasser aus dem warmen Brunnen entnommen, seine Wärme mittels einem Wärmetauscher entzogen und in den kalten Brunnen zugeführt. Beim Kühlbetrieb ist die Flussrichtung umgekehrt: Das Grundwasser wird aus dem kalten Brunnen entnommen und in den warmen Brunnen zugeführt, siehe Abbildung 3.5 d). Aufgrund der unterschiedlichen Fließrichtungen sind beide Brunnen mit Pumpen, Förder- und Injektionsleitungen ausgestattet [39].

Ein Nachteil der ATES Systeme ist, dass sie durch geografische Bedingungen begrenzt sind. Daher muss eine umfangreiche Erforschung für den Bauplatz des ATES Systems durchgeführt werden. Geeignete geologische Formationen für diese Art der Wärmespeicherung sind Aquifere mit hoher Porosität, hoher hydraulischer Leitfähigkeit ($k_f > 10^{-4} \text{ m/s}$) und Grundwasser mit geringer Fließgeschwindigkeit [39]. Dennoch können ATES Systeme nicht isoliert werden und weisen dementsprechend hohe thermische Verluste auf.

3.4 Technische und wirtschaftliche Aspekte der SSTES Systeme

Speichergröße

Damit die saisonale sensible Energiespeicherung technisch sowie wirtschaftlich realisierbar ist, ist eine minimale Größe erforderlich. Eine Kennzahl für das Verhältnis von Wärmeverlusten zur gespeicherten Energiemenge stellt das Oberfläche-Volumen (O/V)-Verhältnis dar. Diese Kennzahl gibt die Menge an gespeicherter Energie an, die über die Oberfläche abgegeben wird. Ein Speicher mit einem Volumen von 20 m^3 hat zum Beispiel ein O/V-Verhältnis, das dem achtfachen O/V-Verhältnis eines Speichers mit 10.000 m^3 entspricht. Dementsprechend sind die Wärmeverluste bezogen auf die gespeicherte Energie beim kleineren Speicher achtmal höher als beim größeren Speicher, siehe Abbildung 3.7. Aus diesem Grund sind die SSTES Systeme erst ab einem Speichervolumen von 1.000 m^3 Wasser energieeffizient [39].

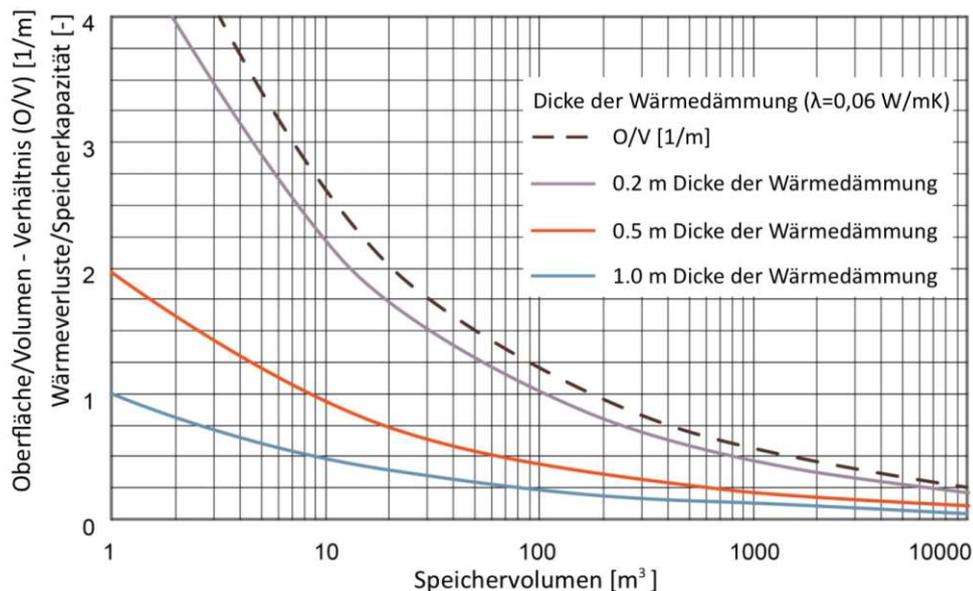


Abbildung 3.7: Wärmeverluste/Speicherkapazität-Verhältnis bezogen auf das Speichervolumen [39]

Einen weiteren Aspekt der Speichergröße stellen die visuellen Eigenschaften der Speicher dar. Die BTES und ATES Systeme werden unterirdisch gebaut und sind dementsprechend praktisch unsichtbar. Im Gegensatz dazu werden die TTES und PTES Systeme üblicherweise teilweise oder vollständig oberirdisch gebaut. Aus Gründen der besseren Speicherleistung und Ästhetik wird oft empfohlen, die oberirdischen Speicher in die sichtbare Umgebung zu integrieren, um die Sichtbehinderung zu verringern [40].

Hinsichtlich der Landnutzung weisen PTES Systeme den größten Platzbedarf auf. Die oberirdischen TTES Systeme verbrauchen viel Platz, dieser ist aber deutlich geringer als im Fall des PTES Systems. BTES und ATES Systeme sind vollständig unterirdisch und haben somit keine Landnutzung [40].

Speicherkapazität und Energiedichte

Eine wichtige Kennzahl für ein SSTES System ist die Energiemenge, die maximal gespeichert werden kann, siehe Gleichung (2).

$$Q_{zu} = V \rho c_p \Delta T \quad (2)$$

Neben der Temperaturdifferenz ΔT , dem Volumen des Speichers V und der Dichte des Speichermediums ρ ist die Wärmemenge von der spezifischen isobaren Wärmekapazität c_p abhängig. Diese physikalische Stoffeigenschaft gibt die Wärme an, die einem Kilogramm des Stoffes zugeführt werden muss, um seine Temperatur um ein Kelvin zu erhöhen. Eine hohe spezifische Wärmekapazität ist für die Wärmespeicherung hilfreich, da für eine zu speichernde Energiemenge eine geringere Menge des Stoffes benötigt wird und der Speicher damit kleiner gestaltet werden kann [33].

Eine weitere wichtige Kennzahl, womit die Speicher miteinander verglichen werden, ist die Energiedichte. Sie gibt die gespeicherte Energiemenge pro Volumeneinheit an. Für die TTES und PTES Systeme, die Wasser als Speichermedium verwenden, kann die Energiedichte mit der Gleichung (3) berechnet werden. TTES und PTES werden im Bereich 0-100 °C betrieben. Somit weist das Wasser konsistente Eigenschaften ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c_p = 4,19 \text{ kJ/kg}$) in diesem Bereich auf.

$$E_{D,TTES/PTES} = \rho c_p \Delta T \quad (3)$$

Als Speichermedium wird für BTES die Erde und für ATES ein Gemisch aus Sand-Wasser verwendet. Ihre Energiedichte kann mit der Gleichung (4) berechnet werden

$$E_{D,BTES/ATES} = c_v \Delta T \quad (4)$$

wobei c_v die spezifische volumetrische Wärmekapazität bezeichnet. Laut der Literatur beträgt diese 1,3–2,8 MJ/m^3K (Lockergestein) oder 1,8–3 MJ/m^3K (Festgestein) für BTES [41] und durchschnittlich 2,8 MJ/m^3K für ATES [42].

Speichereffizienz

Ein weiteres Ziel der SSTES Systeme ist es, die Wärme oder die Kälte mit minimalen Verlusten zu speichern. Wie viel Energie an der Umgebung verloren geht, wird mittels der Speichereffizienz η_S beschrieben, siehe Gleichung (5).

$$\eta_S = \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} = 1 - \frac{Q_{ver}}{Q_{zu}} \quad (5)$$

$$\text{mit } Q_{ver} = Q_{zu} - Q_{ab}$$

Dabei hängt die Speichereffizienz von den thermischen Verlusten des Systems ab, die hauptsächlich durch die Dämmung, die Speichertemperatur, das Speichervolumen und das Umgebungsmedium bestimmt werden. Im Allgemeinen führt eine Vergrößerung des Speichers zu einer höheren Effizienz, da der Speicher ein günstigeres

O/V-Verhältnis hat. Eine bessere Wärmedämmung verbessert die Speichereffizienz und niedrigere Anwendungstemperaturen senken die Wärmeverluste. Bei teilweise isolierten Systemen wie BTES oder nicht isolierten Systemen wie ATES ist das Umgebungsmedium ein entscheidender Faktor für die Speichereffizienz [39].

Wärmegestehungskosten

Die Wärmegestehungskosten (engl. *levelized cost of heat*, LCOH) sind eine Kennzahl zur Bewertung und zum Vergleich der Kosten unterschiedlicher Speichertechnologien innerhalb ihrer Lebensdauer. Die allgemeine Formel von LCOH wird folgenderweise in Gleichung (6) definiert

$$LCOH = \frac{I_0 - S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t(1-TR) - DEP \cdot TR}{(1+r)^t} - \frac{RV}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_{ab}}{(1+r)^t}} \quad (6)$$

wobei I_0 die Investitionskosten, S_0 die Subventionen, C_t die Wartungs- und Betriebskosten, TR der Körperschaftssteuer, DEP die Abschreibung, RV der Restwert, Q_{ab} die abgeführte Wärme, r der Zinssatz und t der Betrachtungszeitraum sind. Für Anwendungen im Wohnbereich kann die Gleichung (6) folgenderweise zur Gleichung (7) vereinfacht werden [43].

$$LCOH = \frac{I_0 - S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Q_{ab}}{(1+r)^t}} \quad (7)$$

Die Investitionskosten bzw. die Errichtungskosten von SSTES Systemen sind von der Bauweise und den verwendeten Materialien wie Stahl, Kunststoff oder Beton abhängig. Ebenso spielt die Form des Speichers eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund treten unterschiedliche Investitionskosten auf, wenn es sich um TTES, PTES, BTES oder ATES handelt [44]. Abbildung 3.8 zeigt die Investitionskosten von gebauten Pilot- und Demonstrationsanlagen. Um verschiedene Speicherkonzepte vergleichen zu können, werden die Investitionskosten auf das wasseräquivalente Speichervolumen bezogen [39]. Im Diagramm ist zu sehen, dass die Investitionskosten stark mit der Zunahme des Speichervolumens sinken. Geeignete Größe von SSTES Systemen sind üblicherweise über 1000 m^3 Wasseräquivalent. In dieser Spanne bewegen sich die Investitionskosten zwischen 20 und 320 €/m^3 [45].

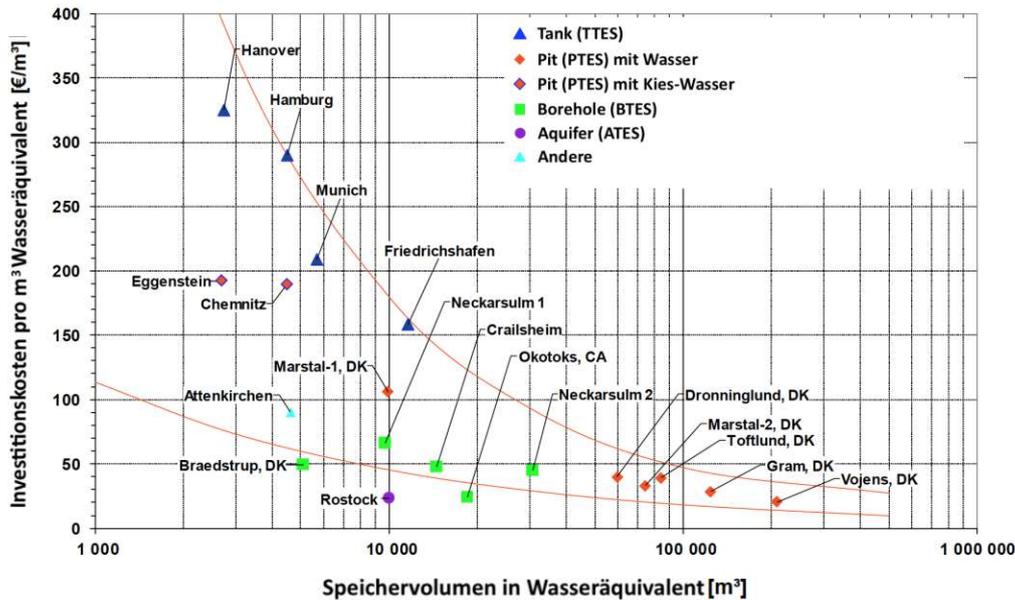


Abbildung 3.8: Spezifische Investitionskosten von sensiblen saisonalen thermischen Energiespeichern vorhandener Projekte (einschließlich aller Baukosten, ohne Auslegung, ohne Verbindungsleitungen und Ausrüstungen im Heizwerk, und ohne Mehrwertsteuer)[45]

Rückzahlungsperiode

Im Rahmen der Bewertung der Realisierbarkeit eines neuen Speichers wird die Rückzahlungsperiode P_R (engl. *return on investment*, RoI) des Projekts in Betracht gezogen. P_R wird durch einen Vergleich der Kosten der Anfangsinvestition mit den jährlichen Erträgen aus dem Projekt bestimmt, siehe Gleichung (8)

$$P_R = \left(\sum_{t=1}^n C_{FW,t} Q_{ab,t} \right) - \left(I_0 + \sum_{t=1}^n C_t \right) = 0 \quad (8)$$

wobei $C_{FW,t}$ der Energiepreis, $Q_{ab,t}$ die abgeführte Wärme, I_0 die Investitionskosten und C_t die jährlichen Wartungs- und Betriebskosten des Speichers sind. Die Multiplikation von $C_{FW,t} \cdot Q_{ab,t}$ stellt die eingesparten Energiekosten pro Jahr dar. Damit kann für einen Speicher ermittelt werden, wie lange es dauert, bis die Investition den ursprünglichen Betrag einbringt, der für den Speicherkonstruktion verwendet wurde. Je kürzer das RoI ist, desto aussichtsreicher ist das Projekt [46]. Im Allgemeinen gilt, dass je höher die Energiekosten und je mehr an Energie eingespart wird, desto schneller ist die Rückzahlungsperiode, was die Energiespeicherung attraktiver macht.

Technische Sicherheit

Bei der Entwicklung und dem Bau von SSTES Systemen ist die technische Sicherheit von großer Bedeutung. Die Speicherkonstruktion muss sicherstellen, dass der Wärmeaustausch mit dem Erdreich bei geschlossenen Systemen wie PTES und TTES minimal sein muss, damit die Bodentemperatur und die Grundwassertemperatur nicht beeinflusst werden. Dies stellt Herausforderungen für die Wärmedämmmaterialien dar, die eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen müssen, sodass der U-Wert niedrig gehalten wird.

Weitere Sicherheitsprobleme beziehen sich auf die Liner Materialien von PTES, die hohe Temperaturen standhalten und Lecks verhindern müssen. Bei PTES Systemen mit nur Wasser als Speichermedium können Lecks repariert werden, aber bei Systemen mit Kies-Wasser als Speichermedium ist ein Leck das Worst-Case-Szenario, da die Leckstelle aufgrund der dichten Kiesschicht nicht erreicht werden kann [39].

Weitere Sicherheitsanforderungen beziehen sich auf die Konstruktionsweise von TTES Systemen, weil der Wasserdruck am Boden des Behälters die Konstruktion und die Dichtungen stark beansprucht. Daher ist nur eine begrenzte Bauhöhe von TTES erlaubt [44].

Die Speichersysteme BTES und ATES sind mit weiteren technischen Herausforderungen verbunden. Langfristig können die BTES Systeme einen allmählichen Anstieg der durchschnittlichen Bodentemperatur, der Grundwasserbewegung und einen Verlust des Bodenwassergehalts verursachen. Für ATES Systeme bestehen länderspezifische Restriktionen bezüglich der injizierten Wassertemperatur in den Brunnen [3].

Erwartete Lebensdauer

In Bezug auf die Lebensdauer sind die TTES Systeme die langlebigsten sensiblen saisonalen Energiespeicher mit einer geschätzten Lebensdauer von bis zu 50 Jahren, gefolgt von BTES Systemen mit einer Lebensdauer von bis zu 30 Jahren. Im Vergleich dazu weisen die ATES Systeme eine niedrigere Lebensdauer von bis zu 25 Jahren auf. Die bestehenden PTES Systeme, bei denen Polyethylen-Liner-Materialien (PE) verwendet werden, haben die kürzeste Lebensdauer von bis zu 20 Jahren [40].

Temperaturniveau

Die meisten Fernwärmenetze werden nur für die Wärmeversorgung entwickelt und liefern die Wärme auf einem direkt nutzbaren Temperaturniveau. Es gibt jedoch auch Netze, die sowohl Wärme- als auch Kälte bereitstellen können. Das sind die sogenannten Anergienetze, die Wärme auf einer Temperatur zwischen 10 und 20 °C liefern. Die Anergienetze beinhalten dezentrale Wärmepumpen, die ihre Wärmeenergie aus dem Wärmenetz gewinnen. Die Kühlung kann entweder direkt über das Kaltwärmenetz oder indirekt über die Wärmepumpen erfolgen [47].

Die unterschiedlichen Temperaturniveaus von Fernwärmenetzen und Anergie-netzen stellen eine Herausforderung für die SSTES Systeme dar. Von den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten SSTES Systemen werden nur ATES und BTES auf einem nicht direkt nutzbaren Temperaturniveau betrieben. Diese Speicher können im Niedertemperaturbereich eingesetzt und mittels einer Wärmepumpe entladen werden. Die Speicherung von Wärme auf einem tiefen Temperaturniveau hat den Vorteil, dass keine großen Temperaturdifferenzen zur Umgebung entstehen, und somit die Wärmeverluste gering sind. Je nach Temperaturverlauf kann sogar über das Jahr oder kurzfristig im Winter zusätzliche Wärmeenergie aus dem umgebenden Erdreich gewonnen werden. Daher kann bei Speichern im Niedertemperaturbereich meist vollständig oder teilweise auf eine Wärmedämmung verzichtet werden, was die Kosten deutlich reduziert. Auf der anderen Seite können die ATES und BTES sowie auch die TTES und PTES Systeme auf einem direkt nutzbaren Temperaturniveau betrieben werden. Sie werden auf ein Temperaturniveau geladen, welches es erlaubt, die abgegebene Wärme ohne Einsatz einer Wärmepumpe direkt für die angestrebte Anwendung einzusetzen. Für Gebäudeheizungen sind die meist verwendeten Temperaturniveaus zwischen 40–90 °C.

Mit der Temperaturdifferenz zur Umgebung steigen jedoch auch die Wärmeverluste. Somit ist es meist unwirtschaftlich, saisonale Wärmespeicher auf sehr hohem Temperaturniveau zu betreiben. Eine Ausnahme besteht allerdings bei ATES in tiefen Erdschichten, welche von Natur aus hohe Temperaturen aufweisen und deshalb auch keine zu hohen Speicherverlusten haben [48].

Auswahl eines geeigneten Speichers

In der Zukunft wird der Kühlbedarf aufgrund der durch den Klimawandel steigenden Temperaturen zunehmen. Deshalb werden SSTES Systeme, die gleichzeitig die Wärme im Sommer und die Kälte im Winter speichern können, mehr an Bedeutung gewinnen [48].

Die Auswahl eines geeigneten SSTES Systems hängt von dem Wärmebedarf, von den Kosten, von der Projektgröße und von den hydrologischen Bedingungen ab. Der in Abbildung 3.9 dargestellte Entscheidungsbaum unterstützt den Prozess für die Auswahl eines geeigneten Speichers. Derzeit können nur die BTES und ATES Systeme gleichzeitig für Heizung sowie für Kühlung eingesetzt werden.

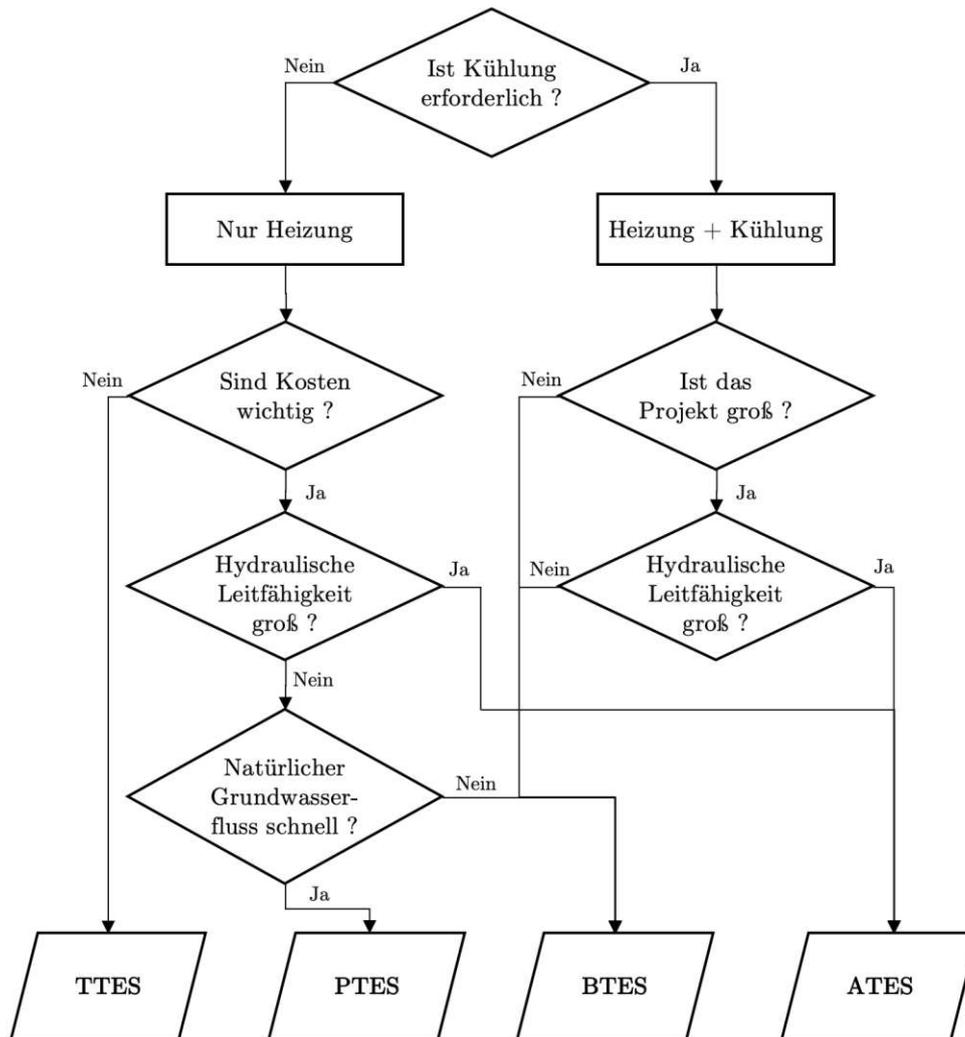


Abbildung 3.9: Entscheidungsbaum für die Auswahl eines geeigneten sensiblen saisonalen thermischen Energiespeichers, *eigene Darstellung in Anlehnung an [3]*

3.4.1 Vergleich der SSTES Systeme

Jedes SSTES System bringt Vorteile mit sich und zeichnet sich durch unterschiedliche Eigenschaften im Vergleich zu den anderen Systemen aus. Die Tabelle 3.1 basiert auf Daten aus realisierten Speicherprojekten und stellt somit einen praxisbezogenen Vergleich zwischen den unterschiedlichen SSTES Systemen hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften dar.

	E_D [kWh/m ³]	η_S [%]	$LCOH$ [€/MWh _{th}]	ϑ_{max} [°C]	P [Jahre]	Speichermedium [-]
TTES	60-80	80-90	180-228	90	20-50	Wasser
PTES	60-80	55-80	47-88	90	15-20	Wasser /
	30-50	45-75	k.A.	90	20	Kies-Wasser
BTES	15-30	40-60	146-245	70	20-30	Erde
ATES	30-40	50	229	60	15-25	Sand-Wasser

Tabelle 3.1: Vergleich von SSTES Systemen hinsichtlich Energiedichte, Speichereffizienz, Wärmegestehungskosten des gesamten Heizsystems, maximal speicherbarer Temperatur, Lebensdauer und Speichermedium, *in Anlehnung an* [36, 3, 49, 39, 35]

In der Tabelle 3.1 wird gezeigt, dass die Energiedichte von TTES und PTES Systemen mit Wasser um ca. 50% höher ist als die vom PTES System, das eine Kies-Wasser-Mischung als Speichermedium nutzt, und doppelt so hoch ist wie das ATES System. Das BTES System weist je nach Bodenbeschaffenheit die niedrigste Energiedichte auf [36]. Was die Speichereffizienz betrifft, können die höchsten Werte mit TTES und PTES erreicht werden. Die kostengünstigsten Speicher sind derzeit die PTES Systeme [49, 3]. Da die BTES Systeme sowie die ATES Systeme zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Bodentemperatur führen können, ist die maximale Speichertemperatur begrenzt und niedriger im Vergleich zu den anderen Systemen [3]. Zum Beispiel in Österreich darf die injizierte Temperatur des Wassers in den Brunnen für Niedertemperatur ATES Systeme, die oberflächennahe Geothermie (bis 300 m) nutzen, 20 °C nicht übersteigen. Auf diese Weise wird die Bodentemperatur nicht negativ beeinflusst und es entsteht kein thermisches Ungleichgewicht zwischen den beiden Brunnen [50]. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Kühlung des zugeführten Wassers im Boden erforderlich.

3.5 Fortschritte und Projekte bezüglich SSTES Systeme

gigaTES Projekt

Im Zeitraum von 2018 bis 2021 wurde das Projekt "Giga-Scale Thermal Energy Storage (gigaTES) for Renewable Districts" in Österreich durchgeführt. Im Rahmen des gigaTES-Projekts wurden neue Konzepte für den Bau von Großwärmespeichern sowie neue Komponenten und Materialien entwickelt, die einen Fortschritt bei der Umsetzung von großen Wärmespeichern für erneuerbare Fernwärmesysteme darstellen. Vier neue Tiefspeicher-Bauarten, deren Konstruktion den klassischen PTES Systemen ähnelt, wurden entworfen. Im Vergleich zu PTES weisen diese Konzepte eine größere Aushubhöhe auf bzw. sind tiefer gebaut, um die Fläche der schwimmenden Deckung zu verringern. Wenn Grundwasser vorhanden ist, kann eine umgebende Dichtwand oder eine Schlitzwand errichtet werden.

Auf der Ebene der Materialentwicklung wurde ein neuartiges Polypropylen-Liner-Material (PP) für PTES entwickelt, und gezielte Tests zeigten, dass im Vergleich zu bestehenden Liner-Materialien eine Lebensdauer von bis zu 35 Jahren im Hochtemperaturbereich ($60 - 95^{\circ}\text{C}$) und von bis zu 50 Jahren im Niedertemperaturbereich ($35 - 80^{\circ}\text{C}$) zu erwarten ist.

Für die Abdeckung, die aufgrund der geforderten Kombination von Wärmedämmung, Wasserdichtheit, Wasserdampfdichtheit sowie Tragfähigkeit die teuerste Komponente darstellt, wurden zwei neue Konzepte entwickelt, die zudem eine Nutzung der Speicherabdeckung ermöglichen. Die erste Abdeckung ist eine schwimmende modulare Abdeckung, die aus $4 \times 4 \text{ m}$ Modulen besteht, welche jeweils 4 Schwimmkörper besitzen. Die Schwimmer werden so dimensioniert, dass ein Hohlraum zwischen der Wasseroberfläche und der Unterseite des Deckels verbleibt. Dieser Hohlraum dient als Druckausgleich. Die zweite Abdeckung ist eine selbsttragende Abdeckung, die als eine runde Betonschale aus Ultra-Hochleistungsbeton oder als ein rundes oder quadratisches Stahlfachwerk konstruiert werden kann [38].

Laut dem Projekt werden in den nächsten Jahren Demonstrationsanlagen in Österreich gebaut, um die besten und kostengünstigsten Konstruktionsmethoden für die entworfenen Konzepte zu ermitteln und das Verhalten der neu entwickelten Materialien in der Praxis zu untersuchen. In den nächsten 3 Jahren wird erwartet, dass die ersten Demonstrationsprojekte mit kleineren Volumina von 10.000 m^3 bis 50.000 m^3 aufgesetzt werden. In 5 Jahren soll das erste große Demonstrationsprojekt aufgebaut werden [51].

AnergieUrban Projekt

Im Jahr 2020 wurde das österreichische Projekt AnergieUrban abgeschlossen. Das Ziel des Projektes war, zu prüfen, ob eine großflächige Wärmeversorgung mit einem System aus Solarkollektoren, BTES sowie Wärmepumpen, verbunden mit Anergienetzen in Städten möglich ist. Die Machbarkeit des Wärmeversorgungssystems wurde anhand von zwei Testgebieten in Wien, welche vor dem Start des Projektes noch mit fossilem Erdgas beheizt wurden, analysiert. Das Ergebnis der Studie

zeigt, dass in beiden Testgebieten genügend Platz für die Errichtung der notwendigen Erdwärmesonden sowie ausreichend Potenzial an Wärmequellen in Form von Abwärme und Solarenergie vorhanden ist. Auch in einem sehr dicht bebauten Testgebiet mit vergleichsweise wenig nutzbaren Freiflächen kann die Heizleistung, welche für Heizung und Warmwasser benötigt wird, durch BTES bereitgestellt werden. Das Ergebnis zeigt auch, dass Wärmequellen im untersuchten urbanen Raum ausreichend vorhanden sind. Bei einer Nutzung der Dachflächen durch thermische Solarenergie und der Abwärme von Gebäuden liegt das Potenzial für Wärmequellen bei rund dem Vierfachen des Wärmebedarfs der Gebäude.

Ein Vollkostenvergleich für die Wärmebereitstellung der Gebäude für einen Zeitraum von 20 Jahren zeigte, dass die Fortführung der Erdgas-Heizungen insgesamt etwa die gleichen Kosten verursachen würde wie der Umstieg auf ein System mit Wärmepumpe und BTES. Als Zusatznutzen ist die moderate Kühlung des Anergienetzes im Vergleich zum konventionellen Erdgas-Heizungssystem zu nennen. Ab dem zwanzigsten Jahr wäre das neue System aufgrund der geringeren Betriebskosten deutlich günstiger als das gasbetriebene System [52].

GeoTief Projekt

Im laufenden Projekt GeoTief geht es um die systematische Erforschung und Vermessung des geologischen Untergrunds im Wiener Becken. Ziel ist es, das Potenzial der Tiefengeothermie für die Wärmeversorgung von Wien zu quantifizieren und damit eine Entscheidungsgrundlage für Wärmeprojekte zu schaffen. Dem Wiener Becken wird ein Anteil von 40 bis 60 % an der geschätzten Anwendungskapazität dieser Energieform in Österreich (450 bis 700 MW thermisch) zugeschrieben. Aktuell wird das Datenmaterial aus den Seismik-Messungen von einer zweijährigen Analysephase wissenschaftlich ausgewertet. Sämtliche Informationen und Daten fließen in ein geologisches 3D-Modell ein, das ein klares Bild des Untergrunds geben wird und die Identifikation und die Analyse von potenziellen Thermalwasservorkommen ermöglichen wird [50].

ATES Vienna Projekt

Im Jahr 2021 wurde das Projekt ATES Vienna gestartet. Das Projekt adressiert erstmals die Integration von ATES Systemen in Fernwärmenetze mit dem Ziel der Konzeptionierung der ersten technischen Pilotanlage in Österreich. Zudem erfolgt die Identifikation bzw. Charakterisierung der vorhandenen ATES Ressourcen, deren wirtschaftliche Bewertung sowie die Erarbeitung optimaler regulatorischer Rahmenbedingungen. Im Rahmen des Projektes werden die saisonalen ATES (Kapazität > 10 GWh, Temperaturbereich > 40°C) aus geologischer, technischer und wirtschaftlicher Sicht einschließlich der Bewertung von Integrationsoptionen in Fernwärmenetze (mit Fokus Wien und Österreich) analysiert. Ein detailliertes Konzept einer zukünftigen ATES Pilotanlage in Wien wird erstellt sowie die sozioökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen für ATES in Wien werden bewertet. Das Projekt soll bis Anfang 2024 abgeschlossen werden [53].

3.6 Szenarien im Energiesektor

Die Technologiefrüherkennung stellt einen Bestandteil der unternehmensweiten strategischen Früherkennung (Business Intelligence) dar. Ziel dieser Früherkennung ist es, relevante Informationen über Veränderungen im gesamten Umfeld des Unternehmens rechtzeitig bereitzustellen, um potenzielle Chancen und Risiken frühzeitig zu erkennen. Die Schaffung einer transparenten Informationsbasis unterstützt strategische Entscheidungsprozesse und stellt ein Bindeglied zwischen der Strategieformulierung und der Technologieplanung dar. Die Technologiefrüherkennung fokussiert sich auf die Analyse und Prognose der technologischen Potenziale neuer sowie bestehender Technologien und auf die Bestimmung technologischer Leistungsgrenzen. Das Ziel ist die Identifikation von Entwicklungen in relevanten Technologiefeldern als Grundlage für Technologieentscheidungen [17].

Eine Methode für Technologiefrüherkennung stellen die Szenarien dar. Szenarien werden für Forschung, Vorausschau, Planung, Politikgestaltung und Geschäftsstrategie im Energiesektor verwendet. Szenarien werden für drei übergreifende Zwecke verwendet: zur Vorhersage, zur Erforschung und zur Antizipation zukünftiger Technologien, siehe Abbildung 3.10.

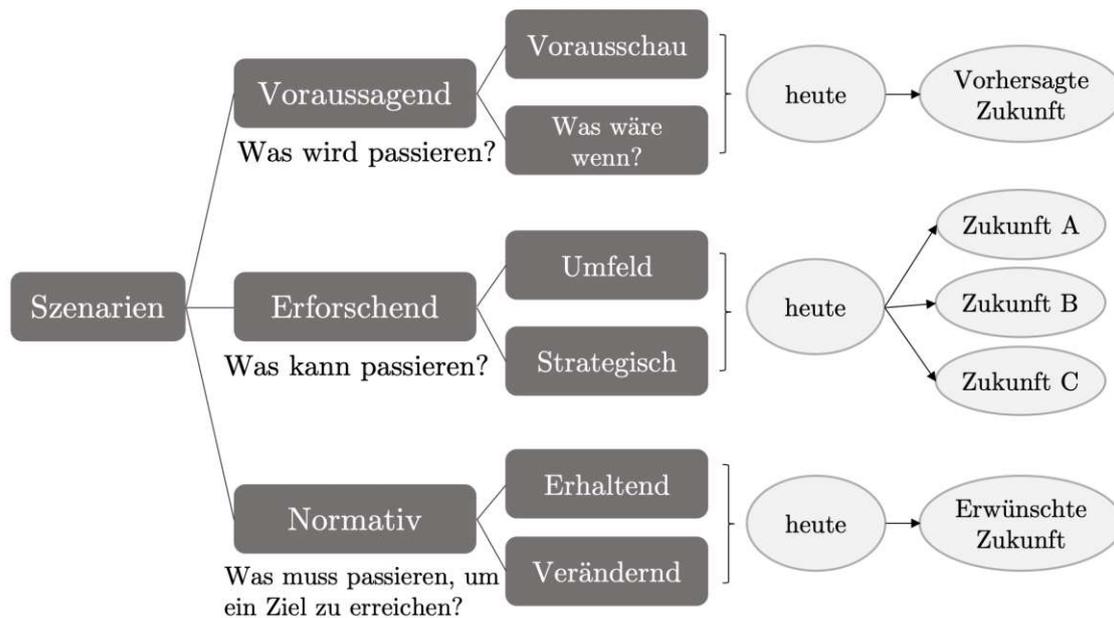


Abbildung 3.10: Szenario-Typologie unterteilt in drei Kategorien und sechs Typen, eigene Darstellung in Anlehnung an [54]

Voraussagende Szenarien zielen darauf ab, die wahrscheinlichste Zukunft zu beschreiben, und umfassen im Allgemeinen die Vorhersage aktueller Trends, um „überraschungsfreie“ oder „Business-as-usual“ Bilder der Zukunft zu erstellen. Auf der anderen Seite zielen die explorativen Szenarien darauf ab, eine Reihe plausibler Zukünfte zu beschreiben, die möglich, wünschenswert, befürchtet oder realisierbar sind. Sie gehen von gegenwärtigen Trends aus, die zu wahrscheinlichen Zukünften führen. Antizipative oder normative Szenarien bauen auf wünschenswerten oder

befürchteten Zukunftsvisionen auf. Im Gegensatz zu den anderen Methoden ist der Ausgangspunkt bei den normativen Szenarien die Zukunft selbst, wobei nach der Ursache zum Eintreten der Ereignisse gesucht wird. Diese Methode wird als „backcasting“ bezeichnet [54].

Szenarioplanung wird immer häufiger genutzt, um die Zukunft des Energiesystems zu diskutieren und gewisse Ziele zu priorisieren. Energieunternehmen (wie Shell, Exxon), Energieforscher sowie Staatsorganisationen auf der ganzen Welt verwenden Szenarien. Der Hauptgrund für die verbreitete Anwendung von Szenarien im Energiebereich ist, dass lange Planungshorizonte standardmäßig in diesem Sektor benötigt werden. Bestehende Energietechnologien können mehrere Jahrzehnte überdauern und die Entwicklung neuer Technologien kann mehrere Jahrzehnte dauern. Die heutigen Investitionen in Energietechnologien können sich auf den technologischen Weg des Energiesystems und die Möglichkeiten zur Änderung des technologischen Wegs in späteren Phasen auswirken. Im Energiesektor hat es sich als schwierig erwiesen, technologische Gewinner vorherzusehen und auszuwählen, da sich die gesellschaftliche Wahrnehmung und die Anforderungen an das Energiesystem ständig ändern. Außerdem ist die Verfügbarkeit von Energieressourcen mit einer großen Ungewissheit verbunden und zahlreiche soziale, wirtschaftliche, technische und umweltbezogene Merkmalen haben einen Einfluss auf die Entwicklung und auf den Einsatz von Energietechnologien und -systemen [55].

Szenarien finden einen Einsatz für die strategische Planung in Energieunternehmen, die darauf abzielen, alternative Zukünfte in einer unsicheren Welt zu erkunden und sich damit darauf vorbereiten zu können. Shell AG ist einer der Pioniere in diesem Bereich, die seit Anfang der 1970er Jahre Szenarien in der Praxis verwendet. Das Ziel der entwickelten Szenarien ist es, die Vorhersagbarkeit und Ungewissheit zukünftiger Entwicklungen zu verstehen, um besser darauf vorbereitet zu sein und somit strategische Entscheidungen zu treffen. Es wird von ehemaligen Managern bei Shell AG behauptet, dass die Verwendung von Szenarien einen erheblichen positiven Einfluss auf die Kreativität des Unternehmens bei der Suche nach neuen Geschäftsfeldern habe und zu großen finanziellen Erfolge führen könne [56]. Ein weiterer Einsatz von Szenarien im Energiebereich ist die Erstellung langfristiger Energieprognosen. Zwischenstaatliche Organisationen wie z.B. International Energy Agency oder Organization of the Petroleum Exporting Countries erstellen Energieprognosen, die Referenzfallprognosen für das Energiesystem der Welt darstellen [57, 58]. Dieser Vorhersageansatz gehört zu den „formalen“ Ansätzen und basiert auf computergestützte Modelle. Damit wird versucht, die wahrscheinliche Entwicklung des Energiesystems anhand der Fortsetzung aktueller sozialer, wirtschaftlicher und technologischer Trends und Politiken zu veranschaulichen. Solche Referenzszenarien können im Allgemeinen verwendet werden, um eine Ausgangsbasis bereitzustellen, mit der verschiedene Politiksznarien verglichen werden können. Damit kann die Entwicklung der globalen Energietrends analysiert werden, wenn Länder auf der ganzen Welt neue Politiken und Maßnahmen umsetzen. Nicht zuletzt werden Szenarien im Energiesektor von den Debatten über die Verknappung fossiler Energieressourcen und von den wachsenden Umweltproble-

men inspiriert, um „alternative Energiepfade“ zu planen [59]. Die ersten erstellten Energieszenarien stammen aus den 1960er Jahren und haben einen bedeutenden Beitrag dazu geleistet, den Fokus in der Energieplanung von einem „Vorhersagen und Bereitstellen“-Verfahren hin zur Einführung der Szenarioplanung zu verlagern [60]. Frühe Szenariostudien wurden genutzt, um eine Umstellung der staatlichen Energieplanung von einer rein angebotsorientierten Sichtweise hin zu einer Einbeziehung der Energienachfrage und eine Verlagerung des Fokus von fossilen Brennstoffen und Atomkraft auf erneuerbare Energiequellen vorzuschlagen [59].

Unsicherheiten über die Zukunft des Energiesystems sowie die in Szenariostudien im Fokus stehenden Diskussionen betreffen [55]:

- *Wirtschaftliche Entwicklung und Veränderungen in Gesellschaft und Lebensstil* - Wachstum der Energienachfrage
- *Energieressourcen* - fossile Brennstoffe und erneuerbare Energien
- *Technologischer Wandel* - neue Technologien und technologische Veränderungen hinsichtlich Kosten und Effizienz
- *Umweltauswirkungen und andere Risiken des Energieverbrauchs* - Auswirkungen des Energieverbrauchs auf die Umwelt, die menschliche Gesundheit und das Klima
- *Energieversorgungssicherheit und nationale Energieunabhängigkeit* - Abhängigkeit von Energieimporten und Nutzung einheimischer Energieträger
- *Gleichmäßigere Verteilung von Energiedienstleistungen*.

Unsicherheiten im Zusammenhang mit Energieprognosen sind in mehreren Studien dokumentiert, in denen Prognosen mit tatsächlichen Ereignissen verglichen wurden. Daraus ergibt sich die Tatsache, dass Prognosen häufig dazu tendieren, die Verfügbarkeit konventioneller fossiler Energieressourcen zu unterschätzen, während sie den Ölpreis und die Kostenreduktion von erneuerbaren Energietechnologien überschätzen. Prognosen stützen sich zudem oft auf Erwartungen an Lebensstilveränderungen und fokussieren sich auf das technisch Machbare statt auf das wirtschaftlich Konkurrernde. Darüber hinaus werden sie oft von Ereignissen, Trends und der Politik zum Zeitpunkt der Prognose beeinflusst, und konzentrieren sich auf Interessensgebiete der Personen oder Organisationen, die an der durchgeführten Studie teilgenommen haben. Folglich verlassen sich Prognosen oft auf einzelne technologische Durchbrüche und alternative Lebensstile, die als potenzielle Lösungen für verschiedene Probleme wie Treibhausgasemissionen (THG) und Ölverknappung angepriesen werden [55].

4 Technologie- und Umweltanalyse

Dieses Kapitel stellt die Resultate aus den durchgeführten PESTEL-, Stakeholder- und SWOT-Analysen dar.

4.1 PESTEL-Analyse

Das Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten PESTEL-Analyse ist das allgemeine Umfeld bzw. Makro-Umfeld der SSTES Systeme zu untersuchen, siehe Abbildung 2.5. Als Resultat dieser Analyse sollen sich die externen Faktoren, die einen Einfluss auf die Zukunft der SSTES Systeme haben können und für die Erstellung der Umfeldszenarien verwendet werden, ergeben.

4.1.1 Politische Rahmenbedingungen

Steigerung der Gebäudeenergieeffizienz: Die energie- und klimapolitischen Rahmenbedingungen in Österreich werden von der Europäischen Union festgelegt und müssen in einem nationalen Energie- und Klimaplan (NEKP) erfasst werden. In diesem Plan ist die Zieldimension “Die Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden” definiert, welche eine Verbesserung der Primärenergieintensität um 25-30% gegenüber 2015 anstrebt. Damit dieses Ziel erreicht wird, sollen folgende Maßnahmen im Gebäudesektor getroffen werden:

- 1) Im Zeitraum zwischen 2020 und 2030 wird eine Verdopplung der thermischen Sanierungsrate angestrebt. Dabei können umfassende Sanierungen auch in Teilschritten im Rahmen mehrjähriger Sanierungskonzepte erfolgen. Das Sanierungsprogramm wird durch Investitionszuschüsse, Finanzierungsmodellen sowie steuerliche Maßnahmen gefördert sein.
- 2) Die zweite Maßnahme stellt die Erhöhung des Anteils effizienter erneuerbarer Energieträger und Fernwärme und -kälte dar. In Neubaugebäuden dürfen ab 2020 keine fossilen Brennstoffe für Raumwärme, Warmwasser und Kühlung verwendet werden. Daher wird angestrebt, verfügbare Technologien wie Bauteilaktivierung und Warmwasserspeicher sowie Methoden wie die Nutzung von Gebäuden als Speicher zum Lastausgleich und zur Lastflexibilisierung zu implementieren [6].

Derzeit liegt die Sanierungsrate in Österreich bei 1,5%, das ist die Hälfte der im aktuellen Regierungsprogramm geplanten 3% [61].

CO₂-Bepreisung: In dem 2021 vorgestellten Steuerreformpaket der österreichischen Bundesregierung (“Ökosoziale Steuerreform”) wird mit der Bepreisung von CO₂ ein neues Werkzeug im Mix der wirtschaftspolitischen Instrumente verfügbar. Das sorgt dafür, dass Emissionszertifikate ab Juli 2022 für den CO₂-Ausstoß von Kraft- und Brennstoffen, vor allem für Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel, erworben werden müssen. Die für diese Zertifikate anfallenden Kosten werden zu einer Teuerung der Brennstoffe führen. Für die Bepreisung von CO₂ ist eine Abgabe vorgesehen, die im Juli 2022 mit 30 € pro Tonne CO₂ startet. Dieser Satz soll in

den Folgejahren bis 2025 auf 35 €, 45 € bzw. 55 € angehoben werden. Die CO₂-Bepreisung soll Anreize schaffen, mehr Energie zu sparen, mehr klimaschonende und erneuerbare Technologie zu nutzen [62].

Staatliche Förderung: Das Ziel einer staatlichen Förderung ist, eine finanzielle Unterstützung bei der Realisierung eines Projektes zu leisten. Dementsprechend wird einen wirtschaftlichen Anreiz zur Errichtung von saisonalen Energiespeichern, die sich derzeit ohne Förderung nicht innerhalb angemessener Zeit amortisieren, geschaffen. Ein Beispiel für eine staatliche Förderung in Österreich stellt die „Förderungsrichtlinie 2018 für saisonale Wärmespeicher mit Anergienetz in Wien“ dar. Anhand dieser Richtlinie können die Komponenten der BTES Systeme wie Erdsonden, Solarkollektoren und Wärmepumpen zur Temperaturerhöhung sowie Leistungen wie Tiefbohrungen, Umstellung auf klimarelevante Heizungssysteme und Prozesse bei der Planung und Beratung gefördert werden [63].

Raumplanung: Das Angebot an erneuerbaren Energiequellen und der damit oft einhergehende Bedarf an Speicherlösungen hat im Gegensatz zu den fossilen Möglichkeiten eine viel stärkere geografische Abhängigkeit sowie meist einen unmittelbaren Flächenbedarf und steht damit in direktem Zusammenhang mit der Raumplanung. Deshalb ist es von zentraler Bedeutung, auch die vorhandenen Potenziale erneuerbarer Energien im Rahmen der Ortsplanung zu berücksichtigen, deren Erschließung zu planen und so die Nutzung zu steuern [64].

Geopolitik: Die Geopolitik der Energie ist ein Treiber für den globalen Wohlstand und Sicherheit. Der politische Aspekt der Energie kommt in die öffentliche Aufmerksamkeit in Krisenzeiten, wenn instabile Ölmärkte die Preise nach oben treiben und die Volatilität langfristige Investitionspläne hindert. Die EU ist stark von importiertem Erdgas abhängig, was Russland zu einem wichtigen Lieferanten und Faktor in der Energiepolitik der EU macht und die Spannungen insbesondere zwischen Deutschland und den mitteleuropäischen Staaten erhöht [65]. Seit dem Überfall von Russland auf die Ukraine in Februar 2022 haben die Preise von fossilen Brennstoffen und von einigen Industriemetallen sprunghaft zugenommen. Im Zuge der EU-Sanktionen und des in Mai 2022 beschlossenen Öl-Embargos gegen den weltweit zweitgrößten Erdölexporteur Russland wird ein erheblicher Teil dieses fossilen Energieträgers in der Zukunft auf den europäischen Markt nicht zur Verfügung stehen [66]. Diese Entwicklung beweist, dass eine Energiediversifizierung der EU von entscheidender Bedeutung ist. Wenn eine politische Instabilität in der Zukunft für große Ölexporteure wie Saudi-Arabien, USA und Russland herrscht, kann der globale Energiemarkt schwer beeinträchtigt werden.

4.1.2 Gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Urbanisierung: Das Bevölkerungswachstum hat sich seit 1990 in Österreich stark beschleunigt. Das Wachstum konzentriert sich in erster Linie auf die Ballungsräume, während periphere ländliche Regionen zum Teil einen negativen Bevölkerungstrend aufweisen [6]. Bei der Urbanisierung in Österreich handelt es sich daher häufig um eine Suburbanisierung, d.h. Abwanderung von der Stadt auf die umliegenden Gebiete und Dörfer. Die regionalen Unterschiede in den Einwohnerzahlen in

österreichischen Bundesländern und Städten sind teilweise sehr groß [67].

Bevölkerungsstruktur: Die österreichische Bevölkerung wohnt in 4 Mio. Privathaushalten, von denen zwei von fünf nur aus einer einzigen Person bestehen [68]. In den letzten Jahren hat sich die Wohnsituation in Bezug auf der zur Verfügung stehenden Fläche verändert. Insgesamt hat die österreichische Bevölkerung heute mehr Wohnfläche zur Verfügung. In den vergangenen Jahren konnte ein stetiger Anstieg der Nutzungsfläche beobachtet werden. Im Jahr 2021 betrug die durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung $101,5 \text{ m}^2$ [67]. Die Stadt Wien stellt aufgrund des großen Anteils an Altbauwohnungen und den damit einhergehenden Einfluss auf das Wohnen eine Besonderheit in der Wohnsituation in Österreich dar. Der Anteil an Altbauwohnungen in Österreich beträgt im Schnitt rund 10 % und ist damit deutlich geringer als die 25 % in Wien [69].

Wohnkosten: Die Wohnkosten inklusive Energiekosten und Instandhaltungsgebühren können das Gesamthaushaltsbudget stark belasten. Insbesondere wenn Immobilienpreise und Mieten stark ansteigen, ist die Belastung für die Haushalte groß. In Österreich sind die Kosten für die Unterbringung seit 2007 kontinuierlich angestiegen. Besonders hinsichtlich der Qualitätsstandards haben sich die Ansprüche der Bevölkerung verändert, indem eine höhere Wohnqualität nachgefragt wird [67].

Technologieakzeptanz: Laut einer Studie von Deloitte aus dem Jahr 2021 liegt die generelle Akzeptanz in Österreich bei 73 % für die Errichtung von erneuerbaren Energieanlagen in (der Nähe) einer Gemeinde. 45 % der Befragten Eigenheimbesitzerinnen und -besitzer haben sich dafür entschieden, in einer erneuerbaren Energietechnologie für die Wärmeversorgung zu investieren. Die Unterstützung der Befragten für die klima- und energiepolitische Maßnahmen in Österreich ist hoch, was in dem Einbaustopp für Öl- und Gasheizungen widerspiegelt [70].

Trotz der hohen Akzeptanz der erneuerbaren Wärmeanlagen könnte die Errichtung von SSTES Systemen, analog der Windkraft [71], von einem sogenannten NIMBY-Effekt (*engl. Not in my backyard*) betroffen werden. Das heißt, ein Teil der Bevölkerung kann eine bestimmte regionale Infrastruktur befürworten und selbst nutzen wollen, aber deren Errichtung in der Nähe des eigenen Wohnorts ablehnen.

4.1.3 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Wirtschaftswachstum: Das Wirtschaftswachstum in Österreich bzw. das Bruttoinlandsprodukt (BIP) zeichnet sich hauptsächlich durch einen kontinuierlichen jährlichen Anstieg in den letzten 15 Jahren aus, wobei ein leichter Rückgang im Jahr 2008 aufgrund der weltweiten Wirtschaftskrise und im Jahr 2020 aufgrund der Corona Pandemie zu erkennen ist [72]. Stand 2021 ist das BIP trotz des pandemiebedingten Rückgangs um 4,5 % im Vergleich zum Vorjahr gestiegen und beträgt derzeit 403,4 Mrd. €, das entspricht einem Wert von 45.043 € pro Einwohner [73].

Energiepreise: Ein Maß für die Preisentwicklung der Treibstoff- und Energiepreise in Österreich stellt der Energiepreisindex (EPI) dar. Stand Februar 2022 ist EPI im Vergleich zum Februar 2021 um 27,4 % gestiegen, wobei die Energieträger Gas mit 65,3 % und Heizöl mit 48,9 % den höchsten Preisanstieg verzeichnen.

Zusätzlich sind die Preise von Fernwärme um 12,2 %, vom Strom um 14,9 %, vom Brennholz um 10,6 % und von Pellets um 15,6 % angestiegen [74].

Grundstückspreise: Ein weiterer wichtiger Faktor, der einen Einfluss auf die Entscheidung zur Errichtung eines SSTES Systems haben könnte, stellen die Grundstückspreise dar. Sie werden in Österreich hauptsächlich durch die Attraktivität der jeweiligen Region bestimmt. In städtischen Gebieten ist der Preis pro Quadratmeter Bauland im Durchschnitt weiter angestiegen. Laut der Statistik sind die Grundstückspreise in Wien und Tirol in 2021 besonders gestiegen, während diese in Kärnten gering gesunken sind. Auch in ländlichen Gebieten, wie Vorarlberg, sind die Grundstückspreise nach oben geklettert [75].

Energieimporte und -exporte: Die Importabhängigkeit der österreichischen Energieversorgung ist aufgrund der vergleichsweise geringen Vorkommen fossiler Energieträger höher als im europäischen Durchschnitt. Die Energieimporte in Österreich decken zu zwei Dritteln den Bruttoinlandsverbrauch, wobei in erster Linie Öl und fossiles Erdgas importiert werden [72]. Der größte Teil des 2020 importierten Öls in Österreich stammt aus Kasachstan (36,6 %), Irak (15,0 %), Russland (9,9 %) und Algerien (9,6 %) [76]. Das Erdgas wurde 2021 hauptsächlich aus Russland (80 %) geliefert [77]. Was die österreichischen Energieexporte von Mineralölprodukten betrifft, exportiert das Land am meisten Dieselkraftstoffe, Ottokraftstoffe und Heizöle überwiegend nach Ungarn, Slowenien, Deutschland und in die Slowakei [76].

4.1.4 Technologische Rahmenbedingungen

Wärmeversorgungsnetz: Fernwärme- und Nahwärmenetze bilden einen wichtigen Bestandteil des österreichischen Energiesystems. Zurzeit existieren 2400 Wärmenetze in Österreich [78]. Wurden im Jahr 2000 noch rund 477.000 Wohnungen mit Nah- und Fernwärme versorgt, so waren es mit Ende 2020 rund 1,1 Millionen Wohnungen. Die Leitungslänge für die Verteilung von Nah- und Fernwärme wurde seit dem Jahr 2000 verdoppelt und liegt aktuell bei rund 5.600 km [79]. Jede vierte Wohnung wird heute mit Fernwärme beheizt – mit steigender Tendenz – vor allem in den Ballungsräumen. Für einen wirtschaftlichen Betrieb benötigen Fernwärmenetze eine ausreichend hohe Wärmenachfrage, deshalb bieten sich diese Systeme in erster Linie zur umweltfreundlichen Wärmeversorgung im urbanen Raum an. Neben großen städtischen Netzen in Wien, Graz, Linz, Salzburg, St. Pölten, Klagenfurt und Wels existiert auch eine große Zahl an ländlichen Nahwärmenetzen, die über ganz Österreich verteilt sind [78].

Von den insgesamt 875 erhobenen Nah- und Fernwärmenetzen wurden in den letzten 20 Jahren in 572 Wärmenetzen Wärmespeicher als Flexibilitätselement installiert. Hinsichtlich der Wärmespeichertechnologie kamen nahezu ausschließlich Behälterwasserspeicher zum Einsatz. Die fünf größten Einzelspeicher, die zur Flexibilisierung des Wärmenetzes dienen, umfassen dabei Volumina von 50.000 m³ (Theiß), 34.500 m³ (Linz), 30.000 m³ (Salzburg), 20.000 m³ (Timelkam), sowie 2 mal 5.500 m³ (Wien). Unter Annahme von $\Delta T = 35K$ entspricht der Speicherbestand einer Kapazität von insgesamt 7,8 GWh_{th}. Die Neuinstallation

von Wärmespeichern steht zumeist in einem unmittelbaren Zusammenhang mit dem Neu- bzw. Ausbau von Wärmenetzen [79].

Trotz des stetigen Wachstums österreichischer Wärme- und Kältenetze hat sich in den letzten Jahren deren wirtschaftliche Perspektive reduziert. Ursachen hierfür sind die unsichere Preisentwicklung fossiler Energieträger, kombiniert mit der engen Verknüpfung mit dem europäischen Strommarkt [78]. Österreich verfügt bereits über große Technologiekompetenz im Bereich Strom- und Wärmespeicherung. Zahlreiche heimische Unternehmen von Forschung und Entwicklung, über Assembling und Engineering bis zum Maschinenbau beschäftigen sich mit Lösungen für die Energiespeicherung. Die Weiterentwicklung und Praxiserprobung der Speichertechnologien sollte in den kommenden Jahren noch forciert werden, um neue Einsatzbereiche wie Hochtemperatur- und Saisonspeicherung zu erschließen [79].

In den letzten fünf Jahren wurden auch die ersten Anergienetze errichtet, die BTES Systeme als saisonalen Speicher für Wärmepumpenanlagen verwenden. Derzeit sind drei Erdsondenfelder in Österreich in Betrieb, die als saisonaler Quellspeicher für Kompressionswärmepumpen über Niedertemperaturnetze in Versorgungslösungen für Quartiere eingesetzt werden. Jedes dieser Erdsondenfelder wird im Sommer über Abwärme aus den Raumkonditionierungsanlagen regeneriert. Die größte Anlage befindet sich im Wiener Quartier „Viertel Zwei“ und verfügt über rund 36,8 km installierte Erdsondenlänge [79].

Forschung und Innovation: Auf nationaler und internationaler Ebene werden zahlreiche neue Speichertechnologien und deren Anwendungsfelder erforscht, weiterentwickelt und in der Praxis demonstriert. Innovationen sind sowohl aus technischer als auch aus ökonomischer Hinsicht notwendig. Forschung und Entwicklung zielen auf die Reduzierung der Investitionskosten, eine längere Lebensdauer und höhere Effizienz, ein kompaktes Design sowie auf die höhere Sicherheit von Speichersystemen [79]. Ein bedeutendes bereits realisiertes Projekt in Österreich im Bereich Wärmespeicherung ist das „GigaTES“ - Projekt, das die Leistungsfähigkeit von saisonalen Großwärmespeichern wie PTES und TTES, deren Integration in Fernwärmenetze sowie neue Materialien und Baukonzepte untersucht [38]. Andere wichtige Projekte, entnommen aus der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) Datenbank, sind „SANBA“ (2021 abgeschlossen) zur Untersuchung und Simulation von Erdsondenfeldern zur geothermischen Energiespeicherung in Niedertemperaturwärme- und -kältenetzen sowie die bevorstehenden Projekte „ATES Vienna“ für den Zeitraum 2021-2024 zur Untersuchung von ATES Systemen und „Zweifeldspeicher“ für den Zeitraum 2021-2022 zur Untersuchung der Effizienzsteigerung saisonaler Energiespeicher für Heiz- und Kühlzwecke in Erdsondenfeldern - BTES Systeme.

Sektorenkopplung: Ein weiterer Treiber für SSTES ist die Sektorenkopplung, die bei der Elektrifizierung des Wärmesektors notwendig ist. Insbesondere spielt die Kopplung des Strom- und Wärmesektors eine wichtige Rolle [35]. Die Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonne unterliegt Schwankungen, die sich in Stromüber- oder unterproduktion ausdrücken. Zu den Zeiten, in denen zu viel Strom produziert wird, kann der überschüssige erneuerbare Strom

mit PtH-Anlagen direkt in Wärme umgewandelt oder in saisonalen thermischen Speichern gespeichert werden. In der Regel ist der Wärmebedarf in Österreich weitaus höher als der Strombedarf. Angesichts der hohen Effizienz von SSTES Systemen kann der Einsatz dieser Technologien wesentlich dazu beitragen, das Energiesystem zu dekarbonisieren. SSTES ist auch eine entscheidende Systemkomponente für den effektiven Einsatz von Technologien wie Wärmepumpen. SSTES Systeme können eine Größenreduktion sowie einen effizienten Volllastbetrieb von Wärmepumpen zu geringen Kosten ermöglichen [80].

Konkurrierende Technologien: Es gibt Wettbewerbstechnologien, die einen direkten Einfluss auf die Zukunft von SSTES Systemen haben könnten. Die erste Technologie stellen die latenten Wärmespeicher dar. Im Vergleich zu den SSTES Systemen kann der LHS in einem kleinen Temperaturbereich rund um den Phasenwechsel große Wärmemengen speichern. Diese Fähigkeit ermöglicht dem LHS, eine hohe Energiedichte bis zu 85 kWh/m^3 und eine hohe Effizienz bis zu 90 % bei Verwendung von Hochtemperatur-PCM zu erreichen [80]. Ein weiterer Vorteil ist, dass der LHS im Hochtemperaturbereich bzw. über $100 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden kann. Der Nachteil dieser Technologie ist, dass sie sich noch in einer Demonstrationsphase (TRL 5-6) befindet. Eine Herausforderung dabei stellen die PCM dar, die derzeit sehr intensiv erforscht werden. Eine Ausnahme sind die Eisspeicher im Niedertemperaturbereich, die derzeit kommerziell verfügbar (TRL 7-9) sind [80]. Den zweiten Konkurrenten stellen die thermochemischen Wärmespeicher dar, die eine höhere Energiedichte als SHS und LHS aufweisen. Die Energiedichte beträgt zwischen $800 - 1000 \text{ kWh/m}^3$. Nachteilig dabei ist, dass der THS sich noch im Entwicklungsstadium (TRL 3-4) befindet [80]. Was die Kosten der thermischen Energiespeicherung betrifft, können sich der THS sowie der LHS derzeit nicht über den Preis mit SSTES Systemen konkurrieren. Die LCOH von LHS sind am höchsten - bis zu 380 €/MWh . Die LCOH von THS betragen 240 €/MWh . Um diese Speichertechnologien wirtschaftlich attraktiv zu machen, müssen die LCOH von beiden um jeweils 60–80 % gesenkt werden [3].

Energiegemeinschaften: Eine Energiegemeinschaft ist der Zusammenschluss von mindestens zwei Teilnehmern zur gemeinsamen Produktion und Verwertung von Energie. Mit dem im Sommer 2021 beschlossenen Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG) werden die sogenannten Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften (EEG) eingeführt, die Energie (Strom, Wärme oder Gas) aus erneuerbaren Quellen erzeugen, speichern, verbrauchen und verkaufen dürfen. EEGs nutzen die Anlagen des Netzbetreibers, deswegen müssen sie immer innerhalb des Konzessionsgebiets eines einzelnen Netzbetreibers angesiedelt werden. Mitgliedern von EEGs können Privat- oder Rechtspersonen, Gemeinden, lokale Behörden sowie Klein- und Mittelbetriebe sein. Die Mitglieder erzielen wirtschaftliche Vorteile, indem sie selbst produzierten Strom und Wärme innerhalb der Gemeinschaft verkaufen oder beziehen. EEGs können dazu beitragen, dass der Ausbau der regenerativen Energien deutlich vorangetrieben sowie der Import fossiler Energieträger verringert wird [81].

4.1.5 Ökologisch-geographische Rahmenbedingungen

Klimawandel: In Österreich ist die Durchschnittstemperatur seit 1880 um knapp 2 °C gestiegen, was im Vergleich zu dem globalen Anstieg von 0,85 °C mehr als doppelt so viel ist. Unter der Annahme von einem mittleren bis starken Anstieg der THG-Konzentrationen wird in einem Szenario prognostiziert, dass die Durchschnittstemperatur in Österreich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts um 1.4 °C gegenüber dem heutigen Temperaturniveau ansteigen wird [82]. Die Prognose einer solchen Temperaturänderung wird in der Zukunft eine Herausforderung besonders für urbane Gebiete darstellen. Die im Rahmen des Klimawandels ansteigenden Temperaturen werden schlussendlich zu einem geringeren Heizbedarf und zu einem höheren Kühlbedarf der Gebäude führen.

Treibhausgas-Emissionen: Nach aktuellsten Zahlen des Umweltbundesamtes sind THG-Emissionen in Österreich von 2018 auf 2019 um 1,5 % auf 79,8 Mio. t CO₂ gestiegen. Der langfristige Trend zeigt noch, dass die THG-Emissionen 2019 um 1,8 % höher als 1990 sind. Das heißt, dass keine Reduktion des THG-Ausstoßes in den letzten drei Jahrzehnten geschafft wurde [83].

Geologische und Hydrologische Bedingungen: Die Entscheidung für ein bestimmtes Speicherkonzept hängt stark von den örtlichen Randbedingungen ab, die durch die geologischen und hydrologischen Bedingungen des jeweiligen Standorts gegeben sind. Oberirdische Speicher wie TTES sind weniger ortsabhängig im Vergleich zu unterirdischen Speicher wie PTES, ATES und BTES. Aus diesem Grund ist eine hydrogeologische Untersuchung für die unterirdischen Speicher erforderlich. Eine Untersuchung kann die Stratigraphie, die Lage und Drift der Grundwasserspiegel, die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens, die Fließgeschwindigkeit und die Richtung der Grundwasserströmungen verdeutlichen. Darüber hinaus muss ein behördliches Genehmigungsverfahren frühzeitig im Projektverlauf eingeleitet werden. Die Bedingungen für den Bau eines Speichers sind für jeden Speichertyp unterschiedlich [39].

4.1.6 Rechtliche Rahmenbedingungen

Rechtliche Erdwärmennutzung: Die rechtliche Grundlage für die Nutzung der Erdwärme stellt in Österreich das Wasserrechtsgesetz (WRG 1959) dar. Eine thermische Grundwassernutzung ist nach dem Bewilligungsverfahren (§103 WRG 1959) genehmigungspflichtig. Erdwärmesonden sind im Allgemeinen bewilligungsfrei, eine Genehmigung im Anzeigeverfahren (§114 WRG 1959) ist nur unter bestimmten Voraussetzungen notwendig. Diese Voraussetzungen umfassen das Vorhandensein artesisch gespannter Grundwasserkörper oder Wasserschutzgebiete [84]. Gemäß den in § 30 und 30c des Wasserrechtsgesetzes (WRG 1959) genannten Zielen ist insbesondere das Grundwasser sowie das Quellwasser so reinzuhalten, dass es als Trinkwasser verwendet werden kann, und so zu schützen, zu verbessern und zu sanieren, dass eine Verschlechterung des jeweiligen Zustandes verhindert wird [85].

4.2 Stakeholder-Analyse

Die Einbeziehung von Stakeholdern ist ein Kernelement vieler Techniken zur Szenarioplanung. Die Literatur zu diesem Thema ist umfangreich und hat dokumentiert, dass die Einbeziehung von Interessengruppen in solche Prozesse entscheidend ist, um eine Auswirkung auf die tatsächliche Entscheidungsfindung sicherzustellen und positive gesellschaftliche Ergebnisse zu erzielen [86].

Das Mikro-Umfeld einer Technologie umfasst den Industriesektor, in welchem Stakeholder aus unterschiedlichen Bereichen die Entwicklung oder den Einsatz von SSTES Systemen beeinflussen können, vgl. Abbildung 2.5. Das Unterscheidungskriterium gegenüber der globalen Umwelt bzw. dem Makro-Umfeld besteht darin, dass die Einflussfaktoren des Industriesektors zumindest bedingt gestaltet werden können [7].

Im Folgenden werden die Resultate aus der Stakeholder-Analyse dargestellt, wobei die wichtigsten Stakeholder identifiziert und in einzelnen Gruppen eingeteilt sowie mittels einer Einfluss-Interesse-Matrix nach ihrem Bezug auf SSTES Systeme bewertet wurden. Die Stakeholder-Bewertung ist relevant für die weitere Einbeziehung der Schlüsselakteure im Prozess der Szenarienentwicklung.

4.2.1 Stakeholder-Identifikation

Technologische Stakeholder

Forschung und Wissenschaft arbeiten an der Entwicklung und Verbesserung von SSTES Systemen. Ihr Ziel ist neue Kenntnisse auf Basis wissenschaftlicher Methoden zu erwerben sowie innovatives technisches Know-how für die Industrie bereitzustellen.

Hersteller versuchen einen Gewinn durch die Produktion zu realisieren und gleichzeitig eine hohe Qualität zu garantieren. Sie sind sehr ambitioniert und glauben viel an ihr Speichersystem. Sie haben die Erwartung, dass ihr SSTES System als die technische Lösung ausgewählt und eingesetzt wird.

Installateure sind zuständig für die richtige Installation der Speicheranlagen. Sie müssen sicherstellen, dass der Speicher funktioniert und falls technische Probleme auftreten, dass diese rechtzeitig behoben werden.

Sozio-politische Stakeholder

Ingenieur- und Planungsbüros informieren Hauseigentümer und Immobilienbesitzer über SSTES Technologielösungen und leisten Hilfe bei deren Auswahl. Diese Stakeholder bevorzugen Technologien, die standardisiert sind und die geringste Systemkomplexität (wie z.B. BTES oder PTES) aufweisen, weil ihre Arbeit gewissen Zeit- und Budgetrestriktionen unterliegt.

Energielieferanten und -dienstleister sorgen für die Energieversorgung mit SSTES Systemen. Ihre Akzeptanz drückt sich im sozial-politischen Aspekt der erneuerbaren Energie bzw. der SSTES Systemen aus.

Politische Akteure verfolgen die Ziele der Umstellung des Energiesystems und

der Dekarbonisierung der Energieversorgung. Sie können als aktive Unterstützer von Speichertechnologien bezeichnet werden. Diese Stakeholder treffen politische Entscheidungen bezüglich der Energiewirtschaft, Vorschriften und Steuerungsinstrumente, die die SSTES Systeme direkt beeinflussen. Sie schaffen auch die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen für die Implementation von SSTES Systemen.

Öffentliche Verwaltung ist zuständig für überregionale oder regionale Umsetzung der Gesetzgebung sowie für die Genehmigungsverfahren von SSTES Systemen. Sie implementiert SSTES bezogene Vorschriften und Steuerungsinstrumente (z.B. Baugenehmigungen) auf verschiedenen Bundesebenen.

Förderorganisationen ermöglichen eine Finanzierung von Forschungs- und Innovationsprojekten und helfen bei der Abfederung des Forschungsrisikos. Dabei werden Pilot- und Demonstrationsprojekte für SSTES Systeme gefördert, damit die Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten der Speicher besser untersucht sowie eine Infrastruktur von Geschäften geschaffen werden können.

Wirtschaftliche Stakeholder

Private Heimbewohner bilden den Bedarf und die Nachfrage nach SSTES Systemen sowie tragen zu deren Marktakzeptanz bei. Sie können aktiv in neue Speichersysteme investieren. Aus diesem Grund werden sie als aktive Unterstützer von SSTES bezeichnet. Private Heimbewohner haben auch unterschiedliche Erfordernisse an den Speichersystemen, die ihren energetischen Bedarf decken und zusätzlich Kostenvorteile mitbringen sollen.

Immobilienunternehmen besitzen und investieren in große Immobilienprojekte. Wie die privaten Heimbewohner sind diese Stakeholder aktive Investoren in Speichersystemen. Sie haben Interesse daran, energieeffiziente Gebäude zur Verfügung zu stellen und erwarten, dass Speichersysteme wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen.

Mieter akzeptieren die SSTES Systeme passiv und weisen im Regelfall keine Widerstände auf. Sie interessieren sich hauptsächlich dafür, ob sich die Nutzung von Speichern in ihren Wohnkosten bzw. Betriebskosten niederschlägt.

Grundbesitzer können private Grundbesitzer oder Gemeinden sein. Sie können ihre Fläche für den Speicherbau entweder verkaufen, oder verpachten. Damit haben die Grundbesitzer einen Einfluss auf die Investitionskosten von Speichern. Diese Stakeholdergruppe hat auch Interesse an der Raumplanung und zwar, ob ihr Land nach der Installation des Speichers für andere Zwecke nutzbar sein kann.

4.2.2 Stakeholder-Bewertung

Anhand der in Kapitel 2.3 beschriebenen Methodik zur Stakeholder-Bewertung wurden das Interesse an SSTES und der Einfluss auf SSTES der unterschiedlichen Stakeholder analysiert. Die Bewertung erfolgte im Rahmen des durchgeführten Experteninterviews [12]. Hierzu wurde die Expertin gebeten, den Einfluss und das Interesse der Stakeholder zu bewerten. Die Abbildung 4.1 stellt die Ergebnisse dar.

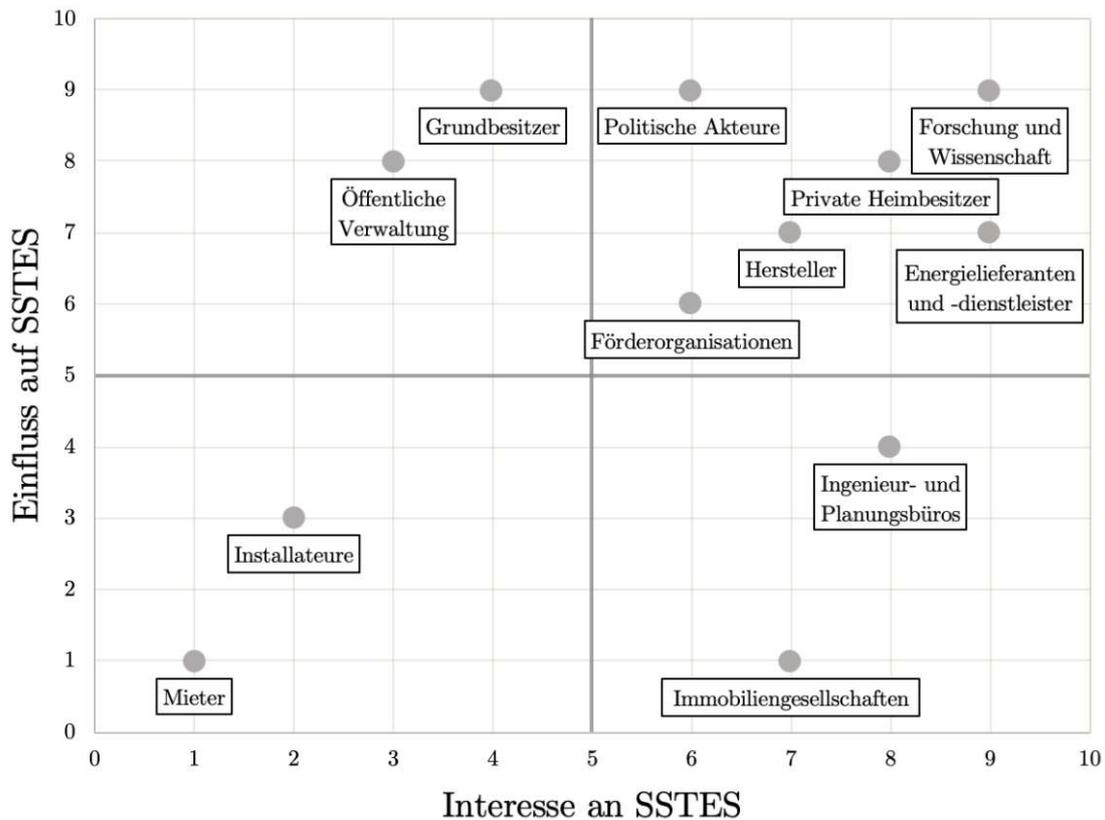


Abbildung 4.1: Bewertung des Interesses und des Einflusses von Stakeholdern auf sensible saisonale thermische Energiespeicher, *eigene Darstellung*

Die Resultate zeigen, dass zu der Gruppe der Schlüssel-Stakeholder, vgl. Abbildung 2.2, die ein hohes Interesse und einen hohen Einfluss aufweisen, die folgenden Gruppen gehören: die Forschung und Wissenschaft, die privaten Heimbewohner, die Energielieferanten und -dienstleister, die politischen Akteure, die Hersteller sowie die Förderorganisationen. Dementsprechend stellen diese Stakeholder die höchste Priorität dar, wenn es um die Entwicklung von SSTES Technologien sowie den Einsatz von relevanten Projekten geht. Beim Umgang mit dieser Gruppe wird empfohlen, eine Erreichung von Projektmeilensteinen proaktiv zu melden und sich um einen möglichen persönlichen Kontakt zu bemühen. Zu der Gruppe der Stakeholder, die zufrieden gehalten werden müssen, zählen die öffentliche Verwaltung und die Grundbesitzer. Beim Umgang mit diesen Stakeholdern, wird es empfohlen, ihr Bedenken im Projekt zu berücksichtigen und sich auf Gegenargumente vorzubereiten. Zur Gruppe der Stakeholder, die über den aktuellsten Projektstand zu informieren sind, gehören die Ingenieur- und Planungsbüros und die Immobiliengesellschaften. Bei dieser Gruppe kann eine aktive Zusammenarbeit gefordert sowie Kommentare und Einwände ernst genommen werden. Zur letzten Gruppe gehören die Installateure und die Mieter, mit denen es nach Bedarf offen und objektiv kommuniziert werden soll.

4.3 SWOT-Analyse

Im Bereich des Energiemanagements wird die SWOT-Analyse standardmäßig verwendet, um die Energiesituation einer einzelnen Region oder eines einzelnen Systems zu analysieren. Im Allgemeinen besteht die Analyse aus internen und externen Bewertungen. Die interne Bewertung zeigt die Stärken und Schwächen einer Technologie und die externe Bewertung zeigt die Chancen und Risiken einer Technologie auf [15].

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine SWOT-Analyse für die verschiedenen SSTES Systeme durchgeführt. In der folgenden Tabelle 4.1 sind die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der Systeme dargestellt.

TTES	
Stärken	Chancen
Hohe Energiedichte 60 – 80 kWh/m ³ (Wasser)	Integration in Fernwärmenetze
Hohe Speichereffizienz bis zu 90% (bezogen auf thermischen Verlusten)	Zunahme der Energiepreise
Thermische Schichtung	Autarkie (Solarkollektoren)
Spitzenlast ausgleichen	Sektorenkopplung
Wartung/Reparatur	Lastflexibilisierung (als Pufferspeicher)
Schwächen	Risiken
Hoher Platzbedarf	Raumplanung (Oberflächennutzung, Sichtbarkeit)
Hochskalierung (< 100.000 m ³) aufgrund hydrostatischer Kräfte	Soziale Akzeptanz
Hohe Investitionskosten	Konkurrierende Technologien
Visuelle Eigenschaften (sichtbar)	Geologische Bedingungen
Technische Sicherheit (Leckagegefahr)	End-of-life (Rezyklieren)
PTES	
Stärken	Chancen
Hohe Energiedichte 60 – 80 kWh/m ³ (Wasser)	Integration in Fernwärmenetze
Niedrige Investitionskosten für große Projekte	Zunahme der Energiepreise
Hochskalierung (nahezu unbegrenzte Größe)	Autarkie (Solarkollektoren)
Thermische Schichtung	Sektorenkopplung
Selbsttragende Abdeckung (Kies-Wasser)	Reduktion der Investitionskosten durch Hochskalierung
	Steigerung der Lebenserwartung (neues Liner-Material)

Schwächen	Risiken
Mittlere Energiedichte 30 – 50 kWh/m ³ (Kies-Wasser)	Raumplanung (Oberflächennutzung, Sichtbarkeit)
Mittlere Speichereffizienz bis zu 80% (bezogen auf thermische Verluste)	Soziale Akzeptanz
Mittlere Lade-/Entladekapazität (Kies-Wasser)	Konkurrierende Technologien
Komplizierte und teure Abdeckung (PTES mit Wasser)	Geologische und Hydrologische Bedingungen
Begrenzte Freiheit bei der Konstruktion (Neigungswinkel)	End-of-life (Rezyklieren)
Hoher Platzbedarf	
Schwierige Wartung/Reparatur	
Technische Sicherheit (Leckagegefahr)	
Niedrige Lebenserwartung bis 20 Jahren (PE-Liner-Material)	

BTES	
Stärken	Chancen
Niedrige Baukosten	Integration in Anergienetze
Doppelte Verwendung	Zunahme der Energiepreise
Leicht Erweiterbar	Autarkie (Solarkollektoren)
Kein Platzbedarf	Sektorenkopplung
Visuelle Eigenschaften (unsichtbar)	Steigender Kühlbedarf (Doppelte Verwendung)
Effizienter Einsatz im Niedertemperaturbereich	Dezentrale Wärmesysteme - Energiegemeinschaften
	Raumplanung (Oberflächennutzung)

Schwächen	Risiken
Geringe Energiedichte 15 – 30 kWh/m ³ (Erde)	Soziale Akzeptanz
Geringe Speichereffizienz bis zu 60% (bezogen auf thermischen Verlusten)	Konkurrierende Technologien
Niedrige Lade-/Entladekapazität (Wärmepumpe erforderlich)	Geologische und Hydrologische Bedingungen
Zeit bis zum Erreichen der Betriebsbedingungen (5 Jahren)	

ATES	
Stärken	Chancen
Niedrige Baukosten bei oberflächennahen Speichern	Integration in Fernwärmenetze
Doppelte Verwendung	Zunahme der Energiepreise
Kein Platzbedarf	Autarkie (Solarkollektoren)

Visuelle Eigenschaften (unsichtbar)	Sektorenkopplung
Effizienter Einsatz im Niedertemperaturbereich	Steigender Kühlbedarf (Doppelte Verwendung von zwei Aquiferen)
	Raumplanung (Oberflächennutzung)
Schwächen	Risiken
Mittlere Energiedichte 30 – 40 kWh/m ³ (Sand-Wasser)	Soziale Akzeptanz
Geringe Speichereffizienz bis zu 50% (bezogen auf thermische Verlusten)	Konkurrierende Technologien
Hohe Bohrkosten bei tiefen Speichern	Geologische und Hydrologische Bedingungen
Aufwendiges Genehmigungsverfahren	Investitionsrisiko der Bohrungen
Wartung/Reparatur	

Tabelle 4.1: SWOT Analyse von Tankspeicher, Erdbeckenspeicher, Bohrlochwärmespeicher und Aquiferwärmespeicher, *Quelle: [36, 37, 40, 3, 39, 38] und basierend auf in dieser Arbeit erlangten Erkenntnissen*

Um die Gesamtleistung der einzelnen SSTES Systeme zu zeigen und ein klares Verständnis über ihre Stärken und Schwächen im Vergleich zu verschaffen, sind diese in Abbildung 4.2 dargestellt. Das Netzdiagramm 4.2 a) zeigt die Werte der einzelnen SSTES Systeme für sechs quantitative Merkmale, während ihre Werte für die neun qualitativen Merkmale auf dem Netzdiagramm 4.2 b) zu sehen sind. Für beide Netzdiagramme gilt, dass je besser ein Merkmal bewertet wird, desto positiver sich dies auf die Gesamtleistung der jeweiligen Speichertechnologie auswirkt.

Aus dem Netzdiagramm 4.2 a) ist ersichtlich, dass sowohl TTES als auch PTES eine ausgeglichene Gesamtleistung als BTES und ATES in den untersuchten quantitativen Merkmalen zeigen und größere Bereiche in der Matrix abdecken. Die LCOH von PTES sind fünfmal weniger als TTES, aber die Lebensdauer von PTES ist am niedrigsten. Im Gegensatz dazu zeigt das Netzdiagramm 4.2 b), dass die ATES und BTES Systeme größere Bereiche der qualitativen Merkmale abdecken und in mehreren Anwendungsfällen eingesetzt werden können, wobei sie nur in zwei Kategorien (“Spitzenlast ausgleichen” und “geologische und hydrologische Bedingungen”) den TTES und PTES Systemen unterlegen.

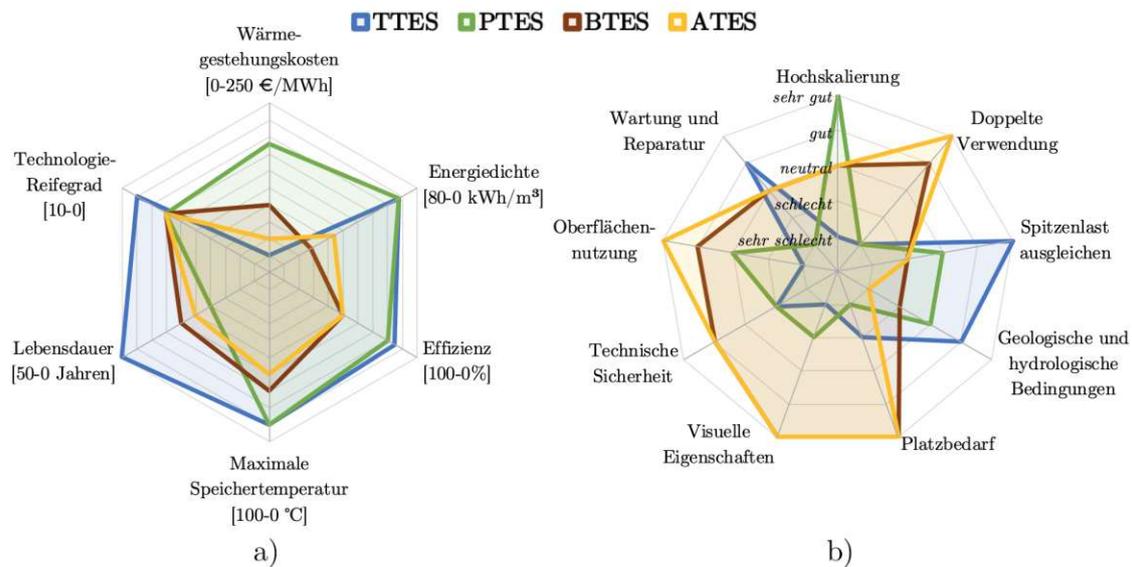


Abbildung 4.2: a) Quantitative Bewertung und b) qualitative Bewertung der sensiblen saisonalen thermischen Energiespeicher, *Quelle: [36, 37, 40, 3, 39, 38] und basierend auf in dieser Arbeit erlangten Erkenntnissen*

Ausgehend von der SWOT-Analyse in Tabelle 4.1 ergeben sich einige wichtige Chancen und Risiken, die sich im Allgemeinen auf alle SSTES Systeme beziehen und im Folgenden detailliert beschrieben werden.

Chancen

- Energiepreise:** Neben den Investitionskosten bestimmen die Energiepreise im Allgemeinen die wirtschaftliche Attraktivität von Energiespeichern. Im Sommer 2022 war die Weltwirtschaft verschiedenen schweren Belastungen ausgesetzt. Stark steigende Preise sind ein weltweites Phänomen, dessen Ursachen nicht zuletzt in der Pandemie und dem Ukraine-Krieg liegen. Die Pandemie treibt die Inflation schon seit dem vergangenen Sommer, weil sie einerseits Teile des Angebots von Gütern und Dienstleistungen blockiert hat und andererseits staatliche Krisenprogramme zur Stützung der privaten Einkommen die Nachfrage befeuert haben. So wird der Anfang Juni von der EU verabschiedete Teil-Boykott russischen Erdöls dazu führen, dass Russland in den kommenden Quartalen deutlich weniger Öl exportieren kann. Der Preis für Erdöl (Sorte Brent) ist Anfang Juni auf 117 \$ pro Barrel gestiegen, er liegt damit um 60 % höher als vor Jahresfrist [87]. Was den Erdgaspreis betrifft, hat dieser im Sommer 2022 noch stärker zugenommen. Die Erdgaspreise in Europa erreichen mittlerweile mehr als das Zehnfache ihres langjährigen Durchschnitts für diese Jahreszeit. Im Juli 2022 betrug der durchschnittliche Preis von Erdgas am Spotmarkt in Europa 51,3 \$/MMBTU oder 172,8 €/MWh [88]. Als Folge treiben die Preise von fossilen Energieträgern die Strom- sowie die Wärmepreise in die Höhe. Obwohl diese Entwicklung als

negativ von der Gesellschaft betrachtet wird, kann dies aus wirtschaftlicher Perspektive als eine Chance für die Speicher- bzw. für die SSTES Systeme angesehen werden. Einerseits steigt die wirtschaftliche Attraktivität von Speichern, weil sich die Rückzahlungsperioden verkürzen, andererseits hat die Bevölkerung einen höheren Anreiz zum Energiesparen und dementsprechend steigt die soziale Akzeptanz von Speichern.

- **Autarkie:** Unter Autarkie in Gebäuden versteht man im Allgemeinen die Selbstversorgung mit elektrischer Energie und Wärme. Bei der autarken Wärmeversorgung stehen drei Aspekte in unmittelbarem Zusammenhang: der Wärmebedarf im Gebäude, die Wärmeerzeugung durch das Gebäude und die Speicherung von Wärme innerhalb oder außerhalb des Gebäudes, die die Erzeugung und den Verbrauch von Wärme entkoppelt. Dadurch ist die Möglichkeit einer Speicherung von Solarthermie in Wasser oder in Erdwärmespeichern für einen hohen Autarkiegrad wesentlich. Dazu gehört unmittelbar ein intelligentes Speichermanagement, um einen hohen Speicherwirkungsgrad zu erzielen [89].
- **Sektorenkopplung:** In der Zukunft werden die drei Hauptsektoren Wärme, Strom und Mobilität miteinander gekoppelt sein. Diese Umwandlung des Energiesystems stellt eine Chance für SSTES Systeme dar, welche die solarthermische und geothermische Energie sowie die überschüssige thermische Energie aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) speichern können. Darüber hinaus können die saisonalen Schwankungen des aus erneuerbaren Quellen produzierten Stroms ausgeglichen werden, indem die überschüssige elektrische Energie aus Wind oder Sonne mittels PtH-Anlagen in Wärme umgewandelt und nachfolgend in SSTES Systemen gespeichert wird.
- **Integration in Fernwärmenetze:** Die Fernwärmenetze befinden sich derzeit in einem Umwandlungsprozess, wobei ihre Entwicklung nach Effizienzsteigerung und Senkung der Vorlauftemperaturen ausgerichtet ist. In der Zukunft sollen neben (biomassebefeuerten) KWK-Anlagen unter anderem Großwärmepumpen eine wichtige Rolle einnehmen, woraus sich eine starke Kopplung mit dem Elektrizitätssektor ergibt. Durch die Kombination von Strom und Wärme liefernden KWK-Anlagen, Wärmepumpen und Wärmespeichern sollen Fernwärmesysteme der 4. Generation zudem viel Flexibilität für Energiesysteme mit einem hohen Anteil variabler erneuerbarer Energie bieten und somit deren schwankende Energielieferung ausgleichen [90]. Zukünftig können Wärmenetze durch die Einbindung von flexibel gesteuerten Großwärmepumpen oder von Elektrokesseln einen zusätzlichen Beitrag zur Flexibilisierung des Energiesystems leisten. Wärmespeicher sollen zudem Flexibilität für Energiesysteme mit hohem Anteil variabler erneuerbarer Energien wie Windenergie und Solarenergie bieten und somit deren schwankende Energielieferung ausgleichen. Derartige Systeme, bei denen KWK-Anlagen, Wärmepumpen und solare Fernwärme kombiniert werden, sind bereits in Dänemark in einigen Kommunen vorhanden und werden seit einiger Zeit um große Wärmespeicher mit über 100.000 m^3 Fassungsvermögen erweitert, so-

dass je nach vorherrschenden Wetterbedingungen die passende Technologie eingesetzt werden kann [33].

- **Integration in Anergienetze:** Eine Möglichkeit zur thermischen Vernetzung von mehreren Gebäuden bieten die sogenannten Niedertemperatur- oder Anergienetze, bei denen große Erdsondenfelder als saisonale Speicher bzw. BTES Systeme eingesetzt werden. Diese werden von dezentralen Wärmepumpen über ein wassergeführtes, erdverlegtes Netz als Quelle genutzt und stellen Wärme oder Kälte auf einem nutzbaren Temperaturniveau zur Verfügung [91].
- **Economies-of-scale:** Mit zunehmendem technologischem Reifegrad und Skaleneffekten von SSTES Systemen sowie von den begleitenden Komponenten, wie Solarkollektoren und Wärmepumpen, erhöht sich das Potential für den Masseneinsatz dieser Technologien. Typischerweise nehmen die spezifischen Investitionskosten mit einem größeren Speichervolumen der SSTES Systeme ab, vgl. Abbildung 3.8.

Risiken:

- **Raumplanung:** Die örtliche Abhängigkeit und der Flächenbedarf von SSTES stellen eine Herausforderung für die Raumplanung dar. Damit kann der Einsatz von oberirdischen Speichern wie TTES oder PTES (angenommen keine Oberflächennutzung) in dicht besiedelten Regionen oder Bergregionen, wo in der Regel weniger Platz für die Energieraumplanung zur Verfügung steht, besonders schwierig sein.
- **Konkurrierende Technologien:** Die anderen Arten von thermischer Energiespeicherung - latente und thermochemische Speicher, sind vielversprechende Technologien, die eine höhere Energiedichte als SSTES Systeme und hohe Effizienz aufweisen. Allerdings können sich diese Technologien momentan nicht über die Kosten mit SSTES Systemen konkurrieren. Derzeit werden zahlreiche Forschungs- und Demonstrationsprojekte bezüglich dieser Speichertechnologien durchgeführt, welche sich auf die Verbesserung der Systemleistung sowie auf die Reduktion der Kosten konzentrieren. Dementsprechend können diese Speichertechnologien eine Konkurrenz sowie ein potentielles Risiko für SSTES Systeme in der Zukunft darstellen.
- **Soziale Akzeptanz:** Während sich der Anteil erneuerbarer Energien in vielen EU-Ländern erhöht, wird zunehmend erkannt, dass die gesellschaftliche Akzeptanz ein einschränkender Faktor sein kann. Analog der Windenergie, die vor allem wegen ihrer visuellen Wirkung auf Landschaften ein Gegenstand kontroverser Debatten geworden ist [92], oder große Staudämme, die eine Auswirkung auf lokale Gemeinschaften haben oder zur Veränderungen in der Hydrologie und Sedimenttransport sowie zu grenzüberschreitenden Konflikte in Bezug auf Wassernutzung und -verfügbarkeit führen können [93], kann die soziale Akzeptanz eine Barriere bzw. ein Risiko für SSTES darstellen. Mögliche Risiken, die mit der sozialen Akzeptanz verbunden sein

könnten, sind die visuellen Eigenschaften von oberirdischen Speichern (TTES und PTES) oder die Beeinträchtigung des Grundwasserflusses und die Erhöhung der durchschnittlichen Bodentemperatur von unterirdischen Speichern (BTES und ATES), vgl. Kapitel 3.4.

- **Technologietransfer:** Unter Technologietransfer wird die zielgerichtete Übertragung von technologischem und technologiebezogenem Know-how zwischen Partnern (Individuen, Institutionen, Organisationen und Unternehmen) verstanden [94]. Der Transferprozess bezieht sich darauf, den Einsatz und die Nutzung einer Technologie zu verstehen und an den lokalen Bedingungen anzupassen [95]. In der Praxis muss ein erfolgreicher Technologietransfer unterschiedliche Barrieren überwinden. Diese können den Aufbau lokaler Kompetenzen, d.h. Austausch von Informationen und Stärkung der technischen Kompetenzen der Arbeitskräfte, die Schaffung eines gesunden Geschäftsumfelds sowie die Entwicklung innovativer Finanzierungsmethoden umfassen [96]. Dementsprechend ist es bei der Einführung der SSTES Systeme wichtig, das technologische Wissen und Know-how best möglich zu übertragen und alle Stakeholder in diesem Prozess miteinzubeziehen, um ihre Anforderungen und Interesse an der Technologie zu verstehen.

5 Szenarien

Ausgehend von der Szenario-Management Methodik, vgl. Abbildung 2.4, werden in diesem Kapitel die Szenarientwicklung sowie die Szenarieninterpretation und -bewertung erläutert. Der gesamte Prozess erfolgt durch die Nutzung der *Szenario-Software*.

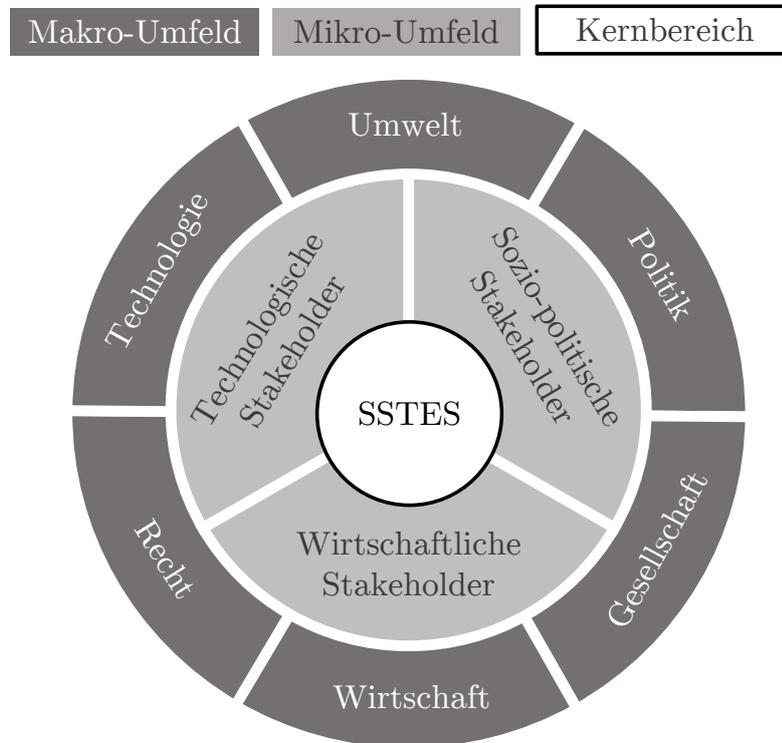
5.1 Szenario-Vorbereitung

In einem ersten Schritt wurde das Gestaltungsfeld der Szenarien definiert. Die zu entwickelnden Szenarien beziehen sich auf die vier unterschiedlichen SSTES Systeme (TTES, PTES, BTES, ATES), die in Kapitel 3.3 erläutert sind. Der regionale Fokus wurde auf Österreich gesetzt. Als Zeithorizont wurden 18 Jahre ab dem Basisjahr 2022 gewählt, weil Österreich bis 2040 als Ziel eine Klimaneutralität festgelegt hat [83]. Die Szenarien wurden als Umfeldszenarien entwickelt, d.h. sie beziehen sich auf die Veränderungen der externen Einflussgrößen im Bereich der Speichertechnologien. Als Anwendungsbereich bzw. Skala der SSTES Systeme wurde die Wärme- und Kältelieferung für mehrere Wohngebäude bzw. Quartiere ausgewählt.

5.2 Szenariofeld-Analyse

5.2.1 Systematische Gliederung des Szenariofeldes

Im nächsten Schritt der Szenarientwicklung wurden die Schlüsselfaktoren festgelegt, mit denen sich das Szenariofeld hinreichend beschreiben lässt. Bereits nach einem ersten Brainstorming im Rahmen des Szenario-Prozesses haben sich mehr als 60 Einflussfaktoren ergeben, die einen mehr oder minder großen Einfluss auf die SSTES Systeme haben. Durch eine konsequente Anwendung der PESTEL- und Stakeholder-Analyse, vgl. Kapitel 4.1 und 4.2, sowie nach einer Kombination und zielgerichteter Verfeinerung wurden die Einflussfaktoren auf 30 reduziert und systematisch gegliedert, siehe Abbildung 5.1. Die identifizierten Einflussfaktoren wurden von Fachexperten im Rahmen der durchgeführten Interviews, vgl. Kapitel 2.4, als umfassend und einflussreich für die zukünftige Nutzung der SSTES Systeme bestätigt. Die Einflussfaktoren wurden schließlich auch in einem Katalog zusammengestellt, siehe Anhang A. In diesem Katalog wurden ihre Dimensionen (Unsicherheiten), Teilaspekte sowie Trends verzeichnet.



Technologische Stakeholder	Politik	Technologie
1. Forschung und Wissenschaft	11. CO ₂ -Bepreisung	23. Wärmeversorgungsnetz
2. Hersteller	12. Steigerung der Gebäudeenergieeffizienz	24. Wärmeerzeugung
3. Installateure	13. Staatliche Förderung	25. Sektorenkopplung
Sozio-politische Stakeholder	14. Raumplanung	26. Konkurrierende Technologien
4. Ingenieur- und Planungsbüros	15. Geopolitik	27. Energiegemeinschaften
5. Energielieferanten- und dienstleister	Gesellschaft	Umwelt
6. Politische Akteure	16. Bevölkerungsstruktur und Urbanisierung	28. Klimawandel und Treibhausgas-Emissionen
7. Öffentliche Verwaltung	17. Technologieakzeptanz	29. Geologische und Hydrologische Bedingungen
Wirtschaftliche Stakeholder	18. Wohnkosten	Recht
8. Immobilienbesitzer	Wirtschaft	30. Rechtliche Erdwärmenutzung
9. Mieter	19. Wärmegestehungskosten	
10. Grundbesitzer	20. Wirtschaftswachstum	
	21. Inflation	
	22. Energieimporte- und exporte	

Abbildung 5.1: Systematische Gliederung des Szenariofeldes in Einflussbereiche, eigene Darstellung

5.2.2 Wechselwirkungsanalyse

Zur Auswahl der Schlüsselfaktoren für die Szenarientwicklung wurde eine Wechselwirkungsanalyse durchgeführt, vgl. Kapitel 2.6. Die 30 Einflussfaktoren wurden in die Software *Szenario-Manager* in eine Wechselwirkungsmatrix eingetragen. Dann wurden die direkten Beziehungen und Beeinflussungen zwischen den Faktoren bewertet, was insgesamt 870 Wechselwirkungen ergab, siehe Anhang B. Somit bildeten sich für jeden Einflussfaktor eine Aktivsumme und Passivsumme. Die Resultate wurden in einem Aktivität-Passivität-Diagramm dargestellt, siehe Abbildung 5.2. Daraus wurden 15 Schlüsselfaktoren für die nachfolgende Szenarien-Bildung ausgewählt und in 3 Gruppen sortiert - Hebelkräfte, Systemknoten und Systemindikatoren. Die Auswahl der Schlüsselfaktoren wurde im Rahmen der durchgeführten Interviews diskutiert und sich als sinnvoll für die weitere Szenarientwicklung bestätigt.

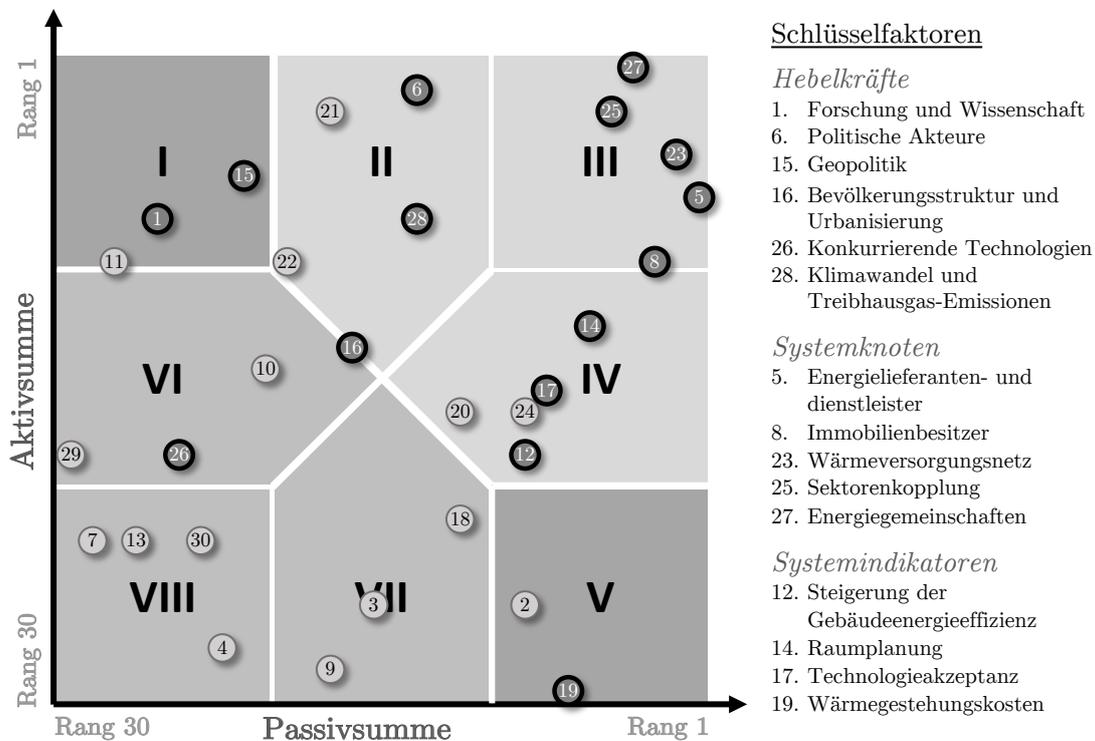


Abbildung 5.2: Darstellung der Resultate aus der Wechselwirkungsmatrix, *eigene Darstellung*

Die Hebelkräfte sind die proaktiven Faktoren, die einen starken Einfluss auf die anderen Faktoren ausüben und Innovationen für SSTES Systeme vorantreiben können. Die Systemknoten sind die interaktiven Faktoren, die einen großen Einfluss auf alle anderen Faktoren ausüben, aber gleichzeitig auch eine starke Rückwirkung aus dem System erfahren. Die Systemindikatoren sind die reaktiven Faktoren, die primär durch alle anderen Faktoren beeinflusst werden und sich schnell verändern können.

5.3 Entwicklung der Zukunftsprojektionen

In einem nächsten Schritt wurden mögliche zukünftige Zustände jedes Schlüsselfaktors ermittelt und in Form von Zukunftsprojektionen beschrieben. Für die Entwicklung der Projektionen wurden eine bis zwei Schlüsseldimensionen aus dem Faktorenkatalog, siehe Anhang A, für den jeweiligen Schlüsselfaktor ausgewählt und anhand der beschriebenen Methode im Unterkapitel 2.6 die Projektionen entwickelt, vgl. Abbildung 2.8. Für eindimensionale Faktoren wurden zwei oder drei Projektionen und für mehrdimensionale Faktoren vier Projektionen zusammengestellt. Der genaue Prozess der Projektionserstellung wird im Anhang C demonstriert. Die getroffenen Annahmen werden durch eine umfassende Beschreibung der Schlüsselfaktoren und eine Diskussion im Rahmen der Experteninterviews unterstützt, vgl. Kapitel 4.1 und 4.2.

Als Resultat haben sich insgesamt 52 Zukunftsprojektionen ergeben. Die vollständige Liste wird in Tabelle 5.1 dargestellt.

Schlüsselfaktoren	Projektionen	
Wärmegestehungs- kosten	1A	Abnahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme
	1B	Abnahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme
	1C	Zunahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme
	1D	Zunahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme
Forschung und Wissenschaft	2A	Erfolgreicher Technologie- und Wissenstransfer von SSTES Technologien - Entwicklung von hocheffizienter Innovation bei SSTES Systemen
	2C	Mangelhafter Technologie- und Wissenstransfer von SSTES Technologien - Langsame Entwicklung von Innovation
Energieförderer und -dienstleister	3A	Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch fossile Energieträger in dichtbesiedelten Regionen
	3B	Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch alternative Energieträger in dichtbesiedelten Regionen
	3C	Wärmeversorgung primär durch dezentrale fossile Heizsysteme in allen Regionen
	3D	Wärmeversorgung primär durch dezentrale alternativ betriebene Heizsysteme in allen Regionen
Politische Akteure	4A	Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors trotz verbesserter Nachhaltigkeitspolitik
	4B	Erreichte Klimaneutralität durch verbesserte Nachhaltigkeitspolitik
	4C	Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors und keine verbesserte Nachhaltigkeitspolitik
	4D	Erreichte Klimaneutralität bei keiner Änderung der Nachhaltigkeitspolitik
Immobilienbesitzer	5A	Hohes Interesse an Speichertechnologien
	5B	Moderates Interesse an Speichertechnologien
	5C	Geringes Interesse an Speichertechnologien
Steigerung der Gebäudeenergie- effizienz	6A	Hohe Sanierungsrate - deutlich über 1,5 % pro Jahr
	6B	Kontinuierliche Sanierungsrate von 1,5 % pro Jahr
	6C	Geringe Sanierungsrate - deutlich unter 1,5 % pro Jahr
Raumplanung	7A	Starke Landnutzungskonflikte
	7B	Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Zunahme der Grundstückspreise
	7C	Mangel an verfügbarem Platz für die Energieinfrastruktur
	7D	Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Abnahme der Grundstückspreise
Geopolitik	8A	Geopolitische Stabilität - Zuverlässige globale Energieversorgung
	8B	Geopolitische Konflikte - Globale Lieferketten und Energieversorgung unter Druck
Bevölkerungs- struktur und Urbanisierung	9A	Zunahme der Urbanisierung und Abnahme des aktuellen Wärmebedarfs
	9B	Zunahme der Urbanisierung und Zunahme des aktuellen Wärmebedarfs
	9C	Suburbanisierung und Abnahme des aktuellen Wärmebedarfs
	9D	Suburbanisierung und Zunahme des aktuellen Wärmebedarfs
Technologie- akzeptanz	10A	Zunahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systemen
	10B	Konstante soziale Akzeptanz von SSTES Systemen
	10C	Abnahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systemen
Wärme- versorgungsnetz	11A	Effizienzsteigerung von bestehenden Fernwärmenetzen durch verbesserte Wärmedämmung
	11B	Integration von hocheffizienten Hochtemperatur-Wärmepumpen in sanierten Altbaugebäuden
	11C	Keine Effizienzverbesserung der Fernwärmenetze - Status quo
	11D	Durchsetzen von Anergienetzen in der Wärmeversorgungsinfrastruktur
Sektorenkopplung	12A	Durchsetzen von Power-to-Gas-Anlagen: Wasserstoff und Methan als Hauptenergieträger für den Wärmesektor
	12B	Durchsetzen von Power-to-Heat-Anlagen: Hocheffiziente Wärmepumpen decken primär den Wärmebedarf
	12C	Renaissance der Kernenergie
	12D	Schwache Kopplung des Strom- und Wärmesektors bei primär volatiler Stromerzeugung
Konkurrierende Technologien	13A	Erhebliche Effizienzsteigerung der latenten und thermochemischen Energiespeicher
	13B	Technologischer Durchbruch hinsichtlich Effizienz und Kosten bei den latenten und thermochemischen Energiespeichern
	13C	Keine Entwicklung der latenten und thermochemischen Energiespeicher
	13D	Erhebliche Kostensenkung der latenten und thermochemischen Energiespeicher
Energie- gemeinschaften	14A	Stark geförderte rein ökologisch orientierte Energiegemeinschaften
	14B	Große Anzahl an sowohl ökologisch als auch gewinnorientierten Energiegemeinschaften
	14C	Energiegemeinschaften sind unattraktiv
	14D	Geringe Anzahl an ertragsorientierten Energiegemeinschaften
Klimawandel und Treibhausgas - Emissionen	15A	Geringe Erderwärmung bis auf 1,5 ° C
	15B	Moderate Erderwärmung zwischen 1,5 und 2,0 ° C
	15C	Hohe Erderwärmung über 2,0 ° C

Tabelle 5.1: Liste der Projektionen von den festgelegten Schlüsselfaktoren

5.4 Szenarien-Bildung

5.4.1 Konsistenzanalyse

Mithilfe einer Konsistenzmatrix wurden paarweise Konflikte und Synergien zwischen den Zukunftsprojektionen verschiedener Schlüsselfaktoren analysiert und durch einen Konsistenzwert beschrieben. Die festgelegten Projektionen aus der Tabelle 5.1 wurden in der *Szenario-Manager* Software in eine Matrix eingetragen und ihre gegenseitige Konsistenz bewertet, siehe Anhang D. Den paarweisen Kombinationen mit keiner direkten Wechselbeziehung zwischen den betrachteten Projektionen wurde ein Konsistenzwert von 1 zugeordnet. Dies wurde mehrmals im Laufe der Arbeit sorgfältig überprüft, damit sich keine inkonsistenten bzw. widersprüchlichen Szenarien ergeben. Der Grund dafür ist, dass eine totale Konsistenz keine Kombination der Projektionen in einem Szenario erlaubt, vgl. Kapitel 2.6. Von den insgesamt 52 ermittelten Zukunftsprojektionen betragen die eingetragenen Bewertungen in der Konsistenzmatrix 1258.

5.4.2 Clusteranalyse

Nach der Konsistenzbewertung der einzelnen Projektionspaare wurde die *Szenario-Software* benutzt, um alle möglichen Gesamtkombinationen hinsichtlich ihrer Widerspruchsfreiheit zu überprüfen. Es wurde ein Wert von 7 des Mindestranges (Heap) ausgewählt. Die Einstellung dieses Wertes wird am Ende dieses Kapitels erklärt. Anhand der Software wurden insgesamt 356 hochkonsistente Projektionsbündel mit einem Konsistenzwert von 356 bis 398 und einem Inkonsistenzwert von 1 bis 11 aussortiert.

Mit Hilfe des sich daraus ergebenden Scree-Diagramms kann die Anzahl der Szenarien festgelegt werden, siehe Abbildung 5.3. Das Diagramm zeigt, dass sich der Informationsverlust mit einer Reduktion der Szenarioanzahl erhöht. Der Informationsverlust ist definiert als das Verhältnis zwischen der Anzahl der verlorenen Projektionen bei Zusammenfassung der Projektionsbündeln (Clustering) und der Anzahl der gesamten 52 Projektionen.

Obwohl die Wahl von einem Szenario für die Strategieformulierung praktisch wäre, würden sich keine alternativen Entwicklungen der Zukunft ergeben, vgl. Abbildung 3.10 - Umfeldszenarien. Zwei Szenarien basieren in der Regel auf zwei Extremsituationen (optimistische und pessimistische Szenarien), die im Rahmen der Bewertung schwer zu handhaben sind. Eine Anzahl von 3 Szenarien wird standardmäßig in wissenschaftlichen Szenariostudien genutzt und von den Wissenschaftlern als eine geeignete Szenarioanzahl empfohlen [4]. Darüber hinaus reduziert eine angemessene Szenarioanzahl den Aufwand bei der anschließenden Anwendung der Szenarien und erleichtert deren Kommunikation [19]. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit die Entscheidung getroffen, sich mit drei Rohszenarien auseinanderzusetzen und diese im Folgenden zu interpretieren.

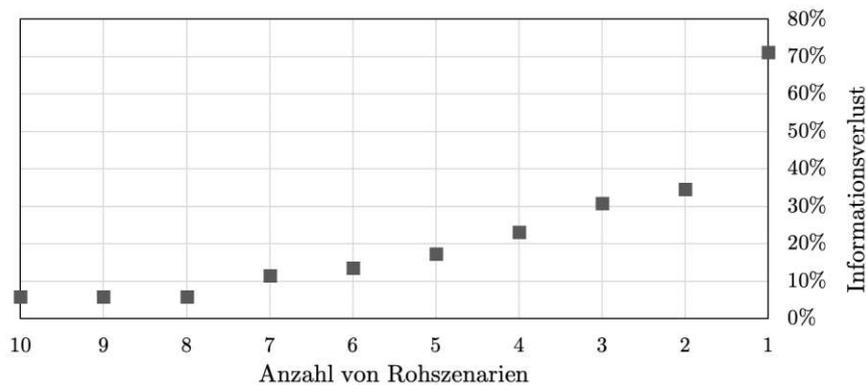


Abbildung 5.3: Scree Diagramm zur Bestimmung geeigneter Szenarioanzahl anhand eines prozentualen Informationsverlustes an Projektionen

Dementsprechend wurde der Wert der Szenarioanzahl auf 3 in der *Szenario-Software* festgelegt. Damit wurden die Projektionsbündel mittels der Clustering-Methode in drei teilweise unterschiedlichen Rohszenarien zusammengefasst, siehe Abbildung 5.4. Um den Inhalt eines Szenarios zu beschreiben, wurde die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Projektionen n_p für jeden Schlüsselfaktor innerhalb des Clusters betrachtet. Als Ergebnis liegt für jeden Schlüsselfaktor die Beschreibung der prozentualen Projektionsanteile vor. Auf der Grundlage der prozentualen Verteilungen können anschließend Aussagen über die in den Szenarien relevanten Entwicklungen getroffen werden. Nach der Methodik, vgl. Kapitel 2.6, wurden die eindeutigen Ausprägungen (über 70%) der Projektionen für die nachfolgenden Szenariomentwicklung ausgewählt. Eine Ausnahme ist die Projektion 12C in Rohszenario 1, die ein disruptives Ereignis darstellt, und schwierig in dem Szenario kombinierbar ist. Somit wurde sie durch 12D ersetzt und im Kapitel 7.3 erläutert. Falls zwei Projektionen eines Schlüsselfaktors als charakteristisch (zwischen 25% und 70%) in einem Szenario vorkommen, wurde folgende Annahme getroffen. Die Projektion mit dem höheren prozentualen Anteil, die nicht in einem anderen Szenario vorkommt, wurde ausgewählt.

Unter Einhaltung der erläuterten Regeln sowie der beschriebenen Annahme wurden die finalen Szenarien erstellt und in Abbildung 5.5 dargestellt. Unter dem jeweiligen Szenario befindet sich die entsprechende Projektion des Schlüsselfaktors. Wenn eine Projektion in zwei Szenarien gleichzeitig vorkommt, wird diese in einer gemeinsamen Zelle dargestellt.

Schlüsselfaktor	Projektion	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3	
		n _p [-]	n _p [%]	n _p [-]	n _p [%]	n _p [-]	n _p [%]
Wärmegestehungskosten	1A	17	100%	0	0%	11	3%
	1B	0	0%	0	0%	13	4%
	1C	0	0%	2	11%	29	9%
	1D	0	0%	17	89%	267	83%
Forschung und Wissenschaft	2A	0	0%	19	100%	307	96%
	2C	17	100%	0	0%	13	4%
Energielieferanten und -dienstleister	3A	5	29%	0	0%	4	1%
	3B	0	0%	0	0%	30	9%
	3C	12	71%	0	0%	0	0%
	3D	0	0%	19	100%	286	89%
Politische Akteure	4A	0	0%	0	0%	12	4%
	4B	0	0%	0	0%	287	90%
	4C	17	100%	19	100%	0	0%
	4D	0	0%	0	0%	21	7%
Immobilienbesitzer	5A	0	0%	19	100%	289	90%
	5B	0	0%	0	0%	19	6%
	5C	17	100%	0	0%	12	4%
Steigerung der Gebäudeenergieeffizienz	6A	0	0%	15	79%	296	93%
	6B	0	0%	2	11%	16	5%
	6C	17	100%	2	11%	8	3%
Raumplanung	7A	9	53%	0	0%	13	4%
	7B	0	0%	0	0%	14	4%
	7C	8	47%	0	0%	8	3%
	7D	0	0%	19	100%	285	89%
Geopolitik	8A	17	100%	0	0%	164	51%
	8B	0	0%	19	100%	156	49%
Bevölkerungs-struktur und Urbanisierung	9A	0	0%	1	5%	79	25%
	9B	10	59%	1	5%	15	5%
	9C	2	12%	8	42%	163	51%
	9D	5	29%	9	47%	63	20%
Technologieakzeptanz	10A	0	0%	19	100%	287	90%
	10B	0	0%	0	0%	24	8%
	10C	17	100%	0	0%	9	3%
Wärmeversorgungsnetz	11A	0	0%	0	0%	10	3%
	11B	0	0%	3	16%	32	10%
	11C	17	100%	0	0%	12	4%
	11D	0	0%	16	84%	266	83%
Sektorenkopplung	12A	0	0%	0	0%	20	6%
	12B	0	0%	19	100%	284	89%
	12C	14	82%	0	0%	8	3%
	12D	3	18%	0	0%	8	3%
Konkurrierende Technologien	13A	0	0%	12	63%	122	38%
	13B	7	41%	3	16%	117	37%
	13C	10	59%	2	11%	22	7%
	13D	0	0%	2	11%	59	18%
Energiegemeinschaften	14A	0	0%	19	100%	10	3%
	14B	0	0%	0	0%	294	92%
	14C	17	100%	0	0%	8	3%
	14D	0	0%	0	0%	8	3%
Klimawandel and Treibhausgas - Emissionen	15A	0	0%	0	0%	304	95%
	15B	0	0%	19	100%	9	3%
	15C	17	100%	0	0%	7	2%

100 % Charakteristische Ausprägung des Szenarios
> 70% Eindeutige Ausprägung des Szenarios
> 25% Alternative Ausprägung des Szenarios

Abbildung 5.4: Darstellung der Ausprägungen der Rohszenarien

Schlüsselfaktoren	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Wärmegestehungs-kosten	Abnahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme	Zunahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme	
Forschung und Wissenschaft	Mangelhafter Technologie- und Wissenstransfer von SSTES Technologien - Langsame Entwicklung von Innovation	Erfolgreicher Technologie- und Wissenstransfer von SSTES Technologien - Entwicklung von hocheffizienter Innovation bei SSTES Systemen	
Energielieferanten und -dienstleister	Wärmeversorgung primär durch dezentrale fossile Heizsysteme in allen Regionen	Wärmeversorgung primär durch dezentrale alternativ betriebene Heizsysteme in allen Regionen	
Politische Akteure	Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors und keine verbesserte Nachhaltigkeitspolitik		Erreichte Klimaneutralität durch verbesserte Nachhaltigkeitspolitik
Immobilienbesitzer	Geringes Interesse an Speichertechnologien	Hohes Interesse an Speichertechnologien	
Steigerung der Gebäude-energieeffizienz	Geringe Sanierungsrate - deutlich unter 1,5 % pro Jahr	Hohe Sanierungsrate - deutlich über 1,5 % pro Jahr	
Raumplanung	Starke Landnutzungskonflikte	Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Abnahme der Grundstückspreise	
Geopolitik	Geopolitische Stabilität - Zuverlässige globale Energieversorgung	Geopolitische Konflikte - Globale Lieferketten und Energieversorgung unter Druck	Geopolitische Stabilität - Zuverlässige globale Energieversorgung
Bevölkerungsstruktur und Urbanisierung	Zunahme der Urbanisierung und Zunahme des aktuellen Wärmebedarfs	Suburbanisierung und Zunahme des aktuellen Wärmebedarfs	Suburbanisierung und Abnahme des aktuellen Wärmebedarfs
Technologie-akzeptanz	Abnahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systemen	Zunahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systemen	
Wärme-versorgungsnetz	Keine Effizienzverbesserung der Fernwärmenetze - Status quo	Durchsetzen von Anergienetzen in der Wärmeversorgungsinfrastruktur	
Sektorenkopplung	Schwache Kopplung des Strom- und Wärmesektors bei primär volatiler Stromerzeugung	Durchsetzen von Power-to-Heat-Anlagen: Hocheffiziente Wärmepumpen decken primär den Wärmebedarf	
Konkurrierende Technologien	Keine Entwicklung der latenten und thermochemischen Energiespeicher	Erhebliche Effizienzsteigerung der latenten und thermochemischen Energiespeicher	Technologischer Durchbruch hinsichtlich Effizienz und Kosten bei den latenten und thermochemischen Energiespeichern
Energie-gemeinschaften	Energiegemeinschaften sind unattraktiv	Stark geförderte rein ökologisch orientierte Energiegemeinschaften	Große Anzahl an sowohl ökologisch als auch gewinnorientierten Energiegemeinschaften
Klimawandel and Treibhausgas - Emissionen	Hohe Erderwärmung über 2,0 °C	Moderate Erderwärmung zwischen 1,5 und 2,0 °C	Geringe Erderwärmung bis auf 1,5 °C

Abbildung 5.5: Drei Rohszenarien zur Beschreibung der Entwicklung der Schlüsselfaktoren bezüglich SSTES Systeme

Sensitivitätsanalyse der Clusteranalyse

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Sensitivitätsanalyse bzgl. der Einstellung des Mindestranges (Heap) in der *Szenario-Software* durchgeführt, um seinen Einfluss auf das Clustering der Projektionen festzustellen, vgl. Kapitel 2.8. Verschiedene Werte des Mindestranges von 3 bis zu 8 wurden eingestellt, siehe Anhang F. Damit ergibt sich eine unterschiedliche Anzahl an hochkonsistenten Projektionsbündeln, die in Rohszenarien geclustert werden. Laut dem Handbuch zur *Szenario-Software* liegt die Zahl der Projektionsbündel in der Praxis zwischen 100 und 400 [20].

Anhand der Sensitivitätsanalyse konnte der folgende Zusammenhang festgestellt werden. Bei einer Einstellung des Mindestranges (Heap) auf 3, 4 und 5 wird eine Abweichung um maximal 40 % bei den Projektionen betrachtet, siehe Projektion 13A im Anhang F. Bei einer Einstellung des Mindestranges auf 6, 7 und 8 zeigt sich, dass eine hohe Konsistenz zwischen den Rohszenarien besteht und die Abweichungen maximal 5 % betragen. Damit kann schlussgefolgert werden, dass bei einer Erhöhung des Mindestranges und bei einer Anzahl von bis zu 400 Projektionsbündeln, die Rohszenarien konsistenter werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit beschlossen, den Mindestrang (Heap) auf 7 einzustellen, vgl. Kapitel 5.4.

5.5 Szenarien-Interpretation

Eine Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von Szenarien ist, dass die Ziel- oder Nutzergruppe die Inhalte der Zukunftsbilder versteht. Daher werden die inhaltlich skizzierten Szenarien in einer für die späteren Zielgruppen geeignete Form kommunizierbar gemacht [19]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine formelle Beschreibung der Szenarien durchgeführt. Jedem Szenario wurde eine treffende Überschrift, welche die gesamte Entwicklungsrichtung des Szenarios beschreibt, zugeordnet und im Folgenden anhand der Projektionsentwicklungen in Abbildung 5.5 beschrieben. Dabei werden das Rohszenario 1 als „*Business-as-usual*“, das Rohszenario 2 als „*Status-quo*“ und das Rohszenario 3 als „*Transformation*“ benannt.

5.5.1 Multidimensionale Skalierung

Um die Vorstellung über die Szenarien zu erleichtern, wurde die Methode der multidimensionalen Skalierung verwendet, vgl. Kapitel 2.6. Die verschiedenen Projektionsbündel wurden anhand der *Szenario-Software* in einer Grafik dargestellt, siehe Abbildung 5.6, die die Distanz zwischen den einzelnen Bündeln darstellt. Diese Distanz wird mittels der Anzahl der ungleichen Projektionen bei einer Gegenüberstellung einzelner Bündel gemessen. In der Abbildung stellt jeder Kreis ein Projektionsbündel dar. Ähnliche Bündel liegen möglichst dicht beieinander und sich stark unterscheidende Bündel sind möglichst weit voneinander entfernt.

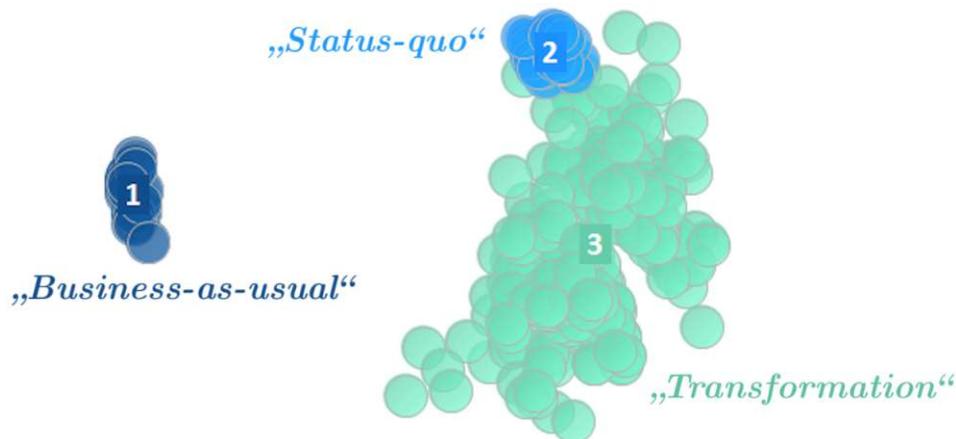


Abbildung 5.6: Räumliche Beziehungen und Clustering von Projektionsbündeln zu den drei Rohszenarien

5.5.2 Szenarien-Beschreibung

Szenario: „Transformation“

Nach dem erfolgreichen Inkrafttreten des Erneuerbaren-Wärme-Gesetzes 2022 und seiner konsequenten Einhaltung über die Jahre wird die Wärme für Heiz- und Kühlzwecken in 2040 primär ohne den Einsatz von fossilen Brennstoffen bereitgestellt [97]. Die Einbeziehung von Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekten in die Energiepreisbildung, wie die CO₂-Steuer, hat darin resultiert, dass die Energiepreise im Vergleich zu 2022 weiter angestiegen, wobei diese schließlich auf einem konstant hohen Niveau über die Jahre geblieben sind. Die Erhöhung der Energiekosten hat einerseits zu einem verstärkten Anreiz zur Energieeinsparung geführt, andererseits hat sie das Interesse der Immobilienbesitzer an Energiespeichern gesteigert. Unter diesen Umständen hat die Forschung und Wissenschaft einen Innovations Schub bekommen und der Technologietransfer-Prozess von Energiespeichern wurde beschleunigt. Zahlreiche Demonstrationsprojekte von SSTES Systemen wurden durchgeführt. Das gesammelte Know-how für den Speicherbau sowie die enge Kooperation zwischen der Wissenschaft und der Industrie haben zu einer Reduktion ihrer Investitionskosten geführt. In der gleichen Zeit hat die intensive Forschung im Bereich der thermischen Energiespeicherung neue Erkenntnisse über die Phasenwechselmaterialien in LHS sowie über Silicagel und Zeolithe in THS gewonnen. Somit hat sich die thermische Instabilität von LHS und THS verbessert [3]. Die Phase der Forschung und Demonstration beider Technologien wurde überwunden und diese sind jetzt mit reduzierten Investitionskosten im Gebäudebereich kommerziell verfügbar [80].

Energieeffiziente Raum- und Siedlungsstrukturen ermöglichen funktionsgemischte, maßvoll verdichtete Städte und Regionen, die energieeffiziente Lebensstile und Wirtschaftsweisen ermöglichen und besonders günstig mit erneuerbaren Energieträgern versorgt werden können. Bei einer 100%-igen erneuerbaren Stromerzeugung ist der Stromsektor mit dem Wärmesektor durch hocheffiziente Wärmepumpen, welche die meist verwendeten Heizungssysteme in allen Regionen darstellen, sehr gut gekoppelt.

Eine Suburbanisierung der Städte hat die Wärmeversorgung über die Jahre primär dezentralisiert. Somit konnte sich das Konzept der Anergienetze durchsetzen. Neben den zahlreichen auf den Dächern installierten PV-Modulen in den Energiegemeinschaften finden die Solarkollektoren eine Anwendung, um die benötigte Wärme für Heizzwecken zu erzeugen oder überschüssige Wärme in saisonalen Speichern einzuspeisen. Somit haben sich Prosumer-Geschäftsmodelle entwickelt, wobei die Verbraucher in bi-direktionalen Anergienetze sowohl Wärme beziehen als auch liefern können.

Die geopolitischen Konflikte aus dem Anfang der 20er Jahre sind Geschichte und der normale Energiehandel sowie die Materiallieferketten konnten wiederhergestellt werden. Der erfolgreiche Einsatz von den diversen nachhaltigen Energiemaßnahmen im Neubau und die hohe thermische Sanierungsrate der Altbauten hat dazu geführt, den Wärmebedarf im Gebäudebereich im Vergleich zu den Niveaus aus dem Jahr 2022 zu reduzieren. Dies hat dazu beigetragen, den Klima-

wandel unter Kontrolle zu halten, wobei die Erderwärmung in einem angemessenen Tempo über die Jahre angestiegen ist und die Grenze von 1,5 °C nicht überschritten wurde. Damit haben es die politischen Akteure geschafft, ihre verbesserte Energie- und Umweltpolitik erfolgreich umzusetzen und eine Dekarbonisierung des Wärmesektors in 2040 zu erreichen.

Szenario: „*Business-as-usual*“

Die geopolitischen Konflikte aus dem Anfang der 20er Jahren wurden relativ schnell gelöst. Nach der initial entstandenen Energiekrise kehrte die Situation schnell in den Zustand wie davor zurück. Die Preise der fossilen Brennstoffe sind auf ihrem Ursprungsniveau gesunken und über die Jahre stabil geblieben, was die Anwendung dieser Energieressourcen aus Kostengründen erneut attraktiv machte. Dies hat in einem insgesamt stabilen und niedrigen Energiepreis resultiert. Somit hatte die Bevölkerung keinen Anreiz zum Energiesparen, was auch in einer geringen thermischen Sanierungsrate resultierte. Daher ist der Wärmebedarf der Haushalte im Vergleich zu 2022 höher geworden. Gleichzeitig ist das Interesse der Immobilienbesitzer an thermischen Energiespeichern gering geblieben. Unter diesen Umständen leidet die Forschung und Entwicklung von SSTES Systemen. Aufgrund mangelndem Interesses der Öffentlichkeit sowie der Hersteller ist es schwierig, Innovationen für effiziente SSTES Systeme zu implementieren, wodurch die Investitionskosten auch nicht reduziert werden konnten. Gleichzeitig wurden auch keine signifikanten Fortschritte in der Entwicklung der konkurrierenden Technologien LHS und THS realisiert.

Vielmehr werden Entscheidungen in Bezug auf die Wärme- und Kälteversorgung preisgetrieben. Effiziente SSTES Systeme, für deren Einsatz hohe Investitionskosten erforderlich wären, setzen sich gegen die bekannten und etablierten Wärmeversorgungskonzepte nicht durch. Die Wärmeversorgung erfolgt in allen Regionen primär durch dezentrale fossile Heizsysteme, da Anreize für die Immobilienbesitzer zu nachhaltigen und energiesparenden Konzepten fehlen.

Da der Flächenanspruch der erneuerbaren Stromerzeugung mittels Photovoltaik- und Windparks aufgrund mangelnder Innovationen in diesem Bereich konstant hoch geblieben ist, ist eine langfristige Flächenkonkurrenz mit der Landwirtschaft entstanden. Dies hat zu ausgeprägten Landnutzungskonflikten geführt, die auch den Ausbau der nachhaltigen Wärmeversorgung verhindern und einen starken negativen Einfluss auf die soziale Akzeptanz von SSTES Systemen ausüben. Gleichzeitig sind der Strom- und Wärmesektor bei einer primär volatilen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen schwach gekoppelt.

Im Jahr 2040 stehen die Chancen gering, den aufgrund des Klimawandels gestellten Herausforderungen angemessen zu begegnen, da sich die Struktur der Energieversorgung 2040 im Vergleich zu 2022 kaum verändert hat. Die fossilen Brennstoffe haben weiterhin einen hohen Marktanteil und weder in der Gesellschaft noch in der Politik ist ein Nachhaltigkeitsbewusstsein verbreitet, was dazu geführt hat, dass der Klimawandel außer Kontrolle geraten ist und der globale Temperaturanstieg die Grenze von 1,5 °C weit überschritten hat.

Szenario: „*Status-quo*“

Die im Jahr 2022 begonnenen geopolitischen Konflikte haben sich weiter über die nächsten Jahren ausgebreitet. Die dadurch hervorgerufene Energiekrise in Europa hat sich verschärft, was zu einem weiteren Anstieg der Energiepreise geführt hat. Initial musste der Fokus auf der Aufrechterhaltung der Energieversorgung gelegt werden, worunter die Nachhaltigkeitsaspekte in der Energiepolitik leiden mussten. Nachdem die erste Krisenphase überwunden wurde, haben die Regierung sowie die nationalen Energielieferanten die ursprünglich geplanten Maßnahmen getroffen, um das Energieversorgungssystem energieflexibler zu gestalten und eine höhere Energieeffizienz im Wohnbereich zu erreichen. Angesichts der hohen Wärmekosten hat sich ein Anreiz in der Bevölkerung zum Energiesparen ergeben, was zu einem Anstieg der thermischen Sanierungsrate von Altbauten und zu energieeffizienten Neubauten geführt hat. Die Einführung von Energieeffizienzmaßnahmen hat den Bedarf an Energiespeichern im Wärmesektor gesteigert. Dies hat Market-Pull-Mechanismen für Speichertechnologien entschlüsselt, wobei sich die Forschung und Entwicklung auf die derzeitigen kommerziell verfügbaren und kostengünstigsten Wärmespeichern konzentriert hat. Unter diesen Umständen hat sich der Technologietransfer der SSTES Systeme beschleunigt. Die gemeinsame Kooperation zwischen den Wissenschaftlern und der Industrie hat zu Innovationen bei den SSTES Systemen geführt, wodurch sich ihre Investitionskosten reduziert haben. Neue Baukonzepte und technisch sichere SSTES Systeme haben einen positiven Einfluss auf die soziale Akzeptanz dieser Speicher ausgeübt. Die im Hintergrund gebliebenen LHS und THS haben auch Entwicklungsschritte verzeichnet, indem Probleme in Bezug auf ihre thermische Stabilität beseitigt und hohe Effizienzgrade erreicht wurden, sich aber aufgrund hoher Investitionskosten im Gebäudebereich nicht durchgesetzt haben.

Aufgrund des begrenzten Zugangs zu fossilen Energieträgern (wie z.B. Erdgas) und der gestiegenen Energiepreise sind nachhaltige Energieversorgungskonzepte und alternative Energieträger verstärkt in den Fokus gerückt. Durch die zunehmenden Suburbanisierung hat sich die Wärmeversorgung bei einem gleichzeitig erhöhten Wärmebedarf dezentralisiert. Viele Anergienetze wurden zugebaut, in denen hocheffiziente mit erneuerbarem Strom getriebene Wärmepumpen in Kombination mit saisonalen Speichern Wärme und Kälte für die Wohngebäude zur Verfügung stellen.

Aufgrund der geopolitischen Konflikte sowie der erschwerten und langsam sukzessiven Entwicklung der nachhaltigen Wärmeversorgung hat der Temperaturanstieg das zuvor gelegte Ziel von 1,5 °C überschritten, der Klimawandel ist aber in angemessenen Grenzen geblieben. Insgesamt hat sich die Dekarbonisierung des Wärmesektors verzögert.

5.6 Szenarien-Bewertung

Bis hierhin wurden alle Szenarien als gleichwertig erachtet. Um die Szenarien hinsichtlich ihrer Nähe zur Gegenwart bzw. zu der Ist-Situation sowie zur erwarteten und gewünschten Zukunft zu interpretieren, wurde im Rahmen der Arbeit eine detaillierte Szenario-Bewertung durchgeführt, vgl. Kapitel 2.6.

Der vorbereitete Fragebogen, siehe Anhang E, wurde an den interviewten Experten nach dem Interview geschickt. Von den insgesamt sechs interviewten Experten, haben zwei Experte des Fragebogens ausgefüllt. Die Daten aus den ausgefüllten Fragebögen wurden analysiert, indem der Mittelwert der Bewertungen ermittelt wurde und die einzelnen Projektionsbewertungen für das jeweilige Szenario summiert wurden. Die Resultate sind in einem Säulendiagramm dargestellt, siehe Abbildung 5.7.

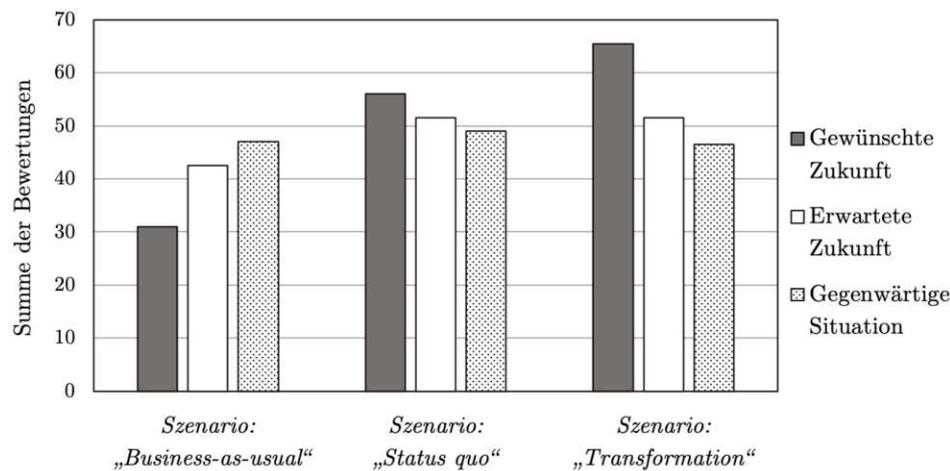


Abbildung 5.7: Resultate aus der Bewertung der Szenarien

Auf dem ersten Blick kann festgestellt werden, dass sich alle Bewertenden weitgehend zum Wunschbild einig waren. Das Szenario „Transformation“ stellt die primär gewünschte Zukunft dar und weist ein fast doppelt so hohes Resultat als das Szenario „Business-as-usual“ auf. Ein besonderes Ergebnis lieferte die Befragung nach der erwarteten Zukunft im Jahr 2040. Hier zeigt sich, dass diesbezüglich derzeit eine große Ungewissheit herrscht, da die Szenarien „Business-as-usual“ und „Transformation“ ein gleiches Ergebnis liefern. Zusätzlich kann durch einen Vergleich der gewünschten und erwarteten Zukunft festgestellt werden, dass eine große Differenz zwischen dem Erwartungsbild und dem Wunschbild besteht. Dieses Ergebnis spricht für eine kritische Zukunftssicht und eine pessimistische Einstellung [19]. Letztlich zeigte sich bei der Bewertung der Nähe der Szenarien zur jetzigen Situation, dass das Szenario „Status quo“ der Gegenwart entspricht.

6 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die Wirtschaftlichkeit einer Technologie spielt eine wichtige Rolle für ihre Attraktivität und hat somit einen großen Einfluss auf ihre Nachfrage und ihr Investitionsinteresse. Aus diesem Grund stellt die Wirtschaftlichkeitsberechnung neben der Szenarienentwicklung einen wesentlichen Aspekt der Analyse von Einsatzmöglichkeiten neuer Technologien dar. In diesem Kapitel wird der Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Wärmegestehungskosten der vier SSTES Systeme anhand einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Ein Referenzfall stellt die Basis für den Kostenvergleich dar.

6.1 Referenzfall

Als Referenzsystem wurde ein Wohnkomplex ausgewählt, das 1000 *MWh* seines jährlichen Heizbedarfs durch ein saisonales Speichersystem abzudecken hat. Für die Bereitstellung der erforderlichen Wärmemenge stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Die erste Möglichkeit stellt ein Nahwärmenetz mit einer Vorlauf- und Rücklauf-temperatur von 90-40 °C dar, in dem ein TTES oder PTES System eingesetzt wird. Die Alternative ist ein Anergienetz mit einer Großwärmepumpe, in dem ein BTES oder ATES System mit einer Vorlauf- und Rücklauf-temperatur von 35-5 °C betrieben wird.

Die Tabelle 6.1 stellt die technischen Eigenschaften der verschiedenen Speichersystemen dar, wobei die entnommene Wärmemenge Q_{ab} der einzelnen Speicher dem benötigten Heizbedarf des Wohnkomplexes entspricht. Um Q_{ab} zu berechnen, wird die Energiedichte E_D des jeweiligen Speichers bei einer Temperaturdifferenz $\Delta T = 50 \text{ K}$ (TTES und PTES) und $\Delta T = 30 \text{ K}$ (BTES und ATES) mittels den Gleichungen (3) und (4) berechnet, vgl. Kapitel 3.4. Für die TTES und PTES Systeme, die Wasser als Speichermedium verwenden, beträgt die volumetrische Wärmekapazität $c_v = \rho_w c_{p,w} = 4,19 \text{ MJ/m}^3\text{K}$. Für die volumetrische Wärmekapazität vom BTES System mit dem Speichermedium Erde wird ein durchschnittlicher Wert von $c_v = 2,2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ und vom ATES System mit dem Speichermedium Sand-Wasser einen Wert von $c_v = 2,8 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ anhand der Literatur ausgewählt [41, 42]. Durch Einsetzen der Energiedichte E_D und das Volumen V des Speichers in Gleichung (2) wird die zugeführte Energie Q_{zu} berechnet. Abschließend wird die abgeführte Wärmemenge Q_{ab} des jeweiligen Speichers mittels Gleichung (5) berechnet. Für die Effizienzwerte η_S und die Lebensdauer P der Speicher werden durchschnittliche Werten aus bereits realisierten Projekten verwendet [3], vgl. Tabelle 3.1. Eine Annahme ist, dass die Speicher ihre vollständige Effizienz bereits im ersten Jahr erreichen. Eine Ausnahme stellt das BTES System dar, das seine maximale Effizienz von 50 % erst nach 5 Jahren erreicht, wobei sich diese stufenweise um 10 % pro Jahr erhöht [98]. Eine weitere Annahme für den Referenzfall ist, dass die Speicher nur einmal pro Jahr entleert werden, d.h. der Speicherzyklus beträgt eins.

	ΔT [K]	c_v [MJ/m ³ K]	E_D [kWh/m ³]	V [m ³]	Q_{zu} [MWh]	η_S [%]	Q_{ab} [MWh]
TTES	50	4,19	58,2	20.220	1177	85	1000
PTES	50	4,19	58,2	21.480	1250	80	1000
BTES	30	2,2	18,3	109.150	2000	50	1000
ATES	30	2,8	23,3	85.800	2000	50	1000

Tabelle 6.1: Technische Eigenschaften der SSTES Systeme für den Referenzfall

Die Wärmegestehungskosten LCOH werden mit Gleichung (7) berechnet, wobei die Systemgrenze nur den Speicher umfasst [3]. Für den Referenzfall werden keine Subventionen S_0 für die Speicher betrachtet. Der Zinssatz r wird auf 3% festgelegt. Die spezifischen Investitionskosten C_{inv} werden aus realisierten Projekten übernommen [3] und bleiben im Laufe der Studie konstant. Die jährlichen Betriebs- und Wartungskosten C_t betragen 1% von den Investitionskosten [3]. Zuletzt wird auch die Rückzahlungsdauer P_R mittels der Gleichung (8) berechnet, d.h. in wie vielen Jahren zahlt sich die Investition in den Speichern aus, vgl. Kapitel 3.4. Für einen Vergleichswert zur Berechnung von P_R wird ein Wärmepreis Stand 2022 von 104 €/MWh verwendet [99]. Dadurch kann der Wohnkomplex bei einer gespeicherten Energiemenge von 1000 MWh pro Jahr eine jährliche Kosteneinsparung von 104.000 € realisieren. In Tabelle 6.2 sind die ökonomischen Ergebnisse für den Referenzfall dargestellt.

	C_{inv} [€/m ³]	I_0 [€]	C_t [€/Jahr]	P [Jahre]	$LCOH$ [€/MWh]	P_R [Jahre]
TTES	150	3.033.000	30.330	35	171,4	> 35
PTES	60	1.288.800	12.888	20	99,5	20
BTES	15	1.637.250	16.373	25	123,8	> 25
ATES	20	1.716.000	17.160	20	132,6	> 20

Tabelle 6.2: Wirtschaftliche Eigenschaften der SSTES Systeme für den Referenzfall

6.2 Einfluss der Lebensdauer

Wenn sich in einem Szenario die technischen Eigenschaften der Speicher verbessern, z.B. durch die Forschung und Entwicklung von neuen mehr korrosions- und temperaturbeständigen Materialien sowie durch den Einsatz von neuen Baumethoden, kann die Lebensdauer der SSTES Systeme verlängert werden. Somit können die LCOH gesenkt werden. In Abbildung 6.1 ist der Einfluss der Lebensdauer ΔP bei einer stufenweisen Erhöhung um 5 Jahre auf die LCOH dargestellt. Das Diagramm zeigt exponentiell fallende LCOH bei einer Erhöhung der Lebensdauer der SSTES Systeme. Die größte LCOH Reduktion verzeichnen die PTES und ATES

Systeme mit 31%, gefolgt vom BTES System mit 27,3% und vom TTES System mit 16,2% bei einer Lebensdauererhöhung jedes Speichers um 20 Jahre. Die ausführlichen Daten für dieses Diagramm sowie für die nachfolgenden Diagramme in diesem Kapitel sind im Anhang G zu finden.

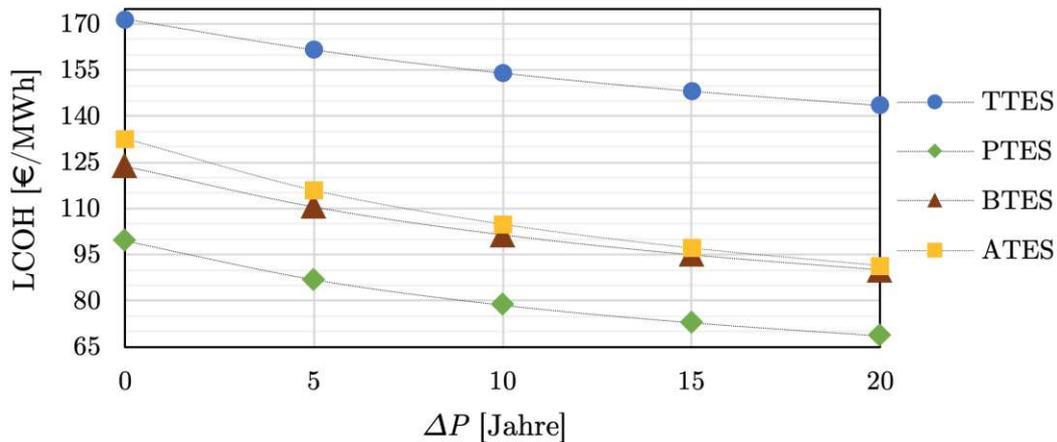


Abbildung 6.1: Einfluss der Lebensdauererhöhung auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall

6.3 Einfluss der Effizienz

Wenn in der Zukunft die TTES und PTES Systeme besser gedämmt sowie neue Methoden für eine vollständige thermische Dämmung der nur im oberen Bereich gedämmten BTES Systeme sowie der nicht gedämmten ATES Systeme entwickelt werden, können diese die Speichereffizienz verbessern. Somit werden die Speicher- verluste verringert. In Abbildung 6.2 ist die Änderung der LCOH bei einer stufen- weisen Verbesserung der thermischen Effizienz von jedem SSTES System darge- stellt. In diesem Fall verzeichnen die BTES und ATES Systeme die größte Reduk- tion der LCOH mit 16,7%, gefolgt vom PTES System mit 11,1% und vom TTES System mit 10,6% bei einer Effizienzverbesserung $\Delta\eta_S$ von 10% und konstanten Investitionskosten.

Bei einer Erhöhung der Effizienz steigt die abgegebene Wärmemenge Q_{ab} . Aus diesem Grund wurde das Volumen der SSTES Systeme angepasst, sodass die abgegebene Wärmemenge dem jährlichen Heizbedarf des Wohnkomplexes von 1000 MWh entspricht, um eine Überdimensionierung des Systems zu vermeiden. Die Volumenänderung ist Abbildung 6.3 zu entnehmen. Es wurde festgestellt, dass eine Volumenreduktion direkt proportional zu der LCOH Reduktion ist. Dement- sprechend reduziert sich das Volumen V der BTES und ATES Systeme um 16,7%, gefolgt vom PTES System mit 11,1% und vom TTES System mit 10,6% bei eine Effizienzverbesserung $\Delta\eta_S$ von 10%.

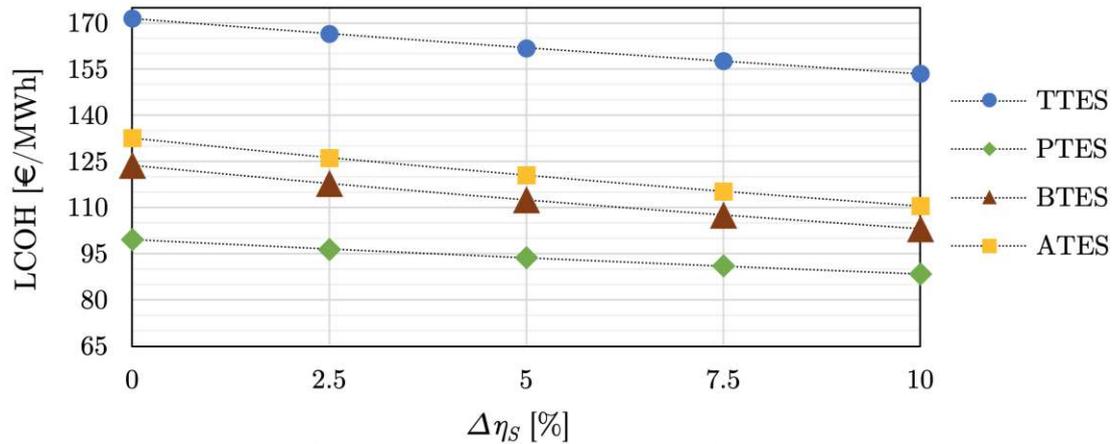


Abbildung 6.2: Einfluss der Effizienzerhöhung auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall

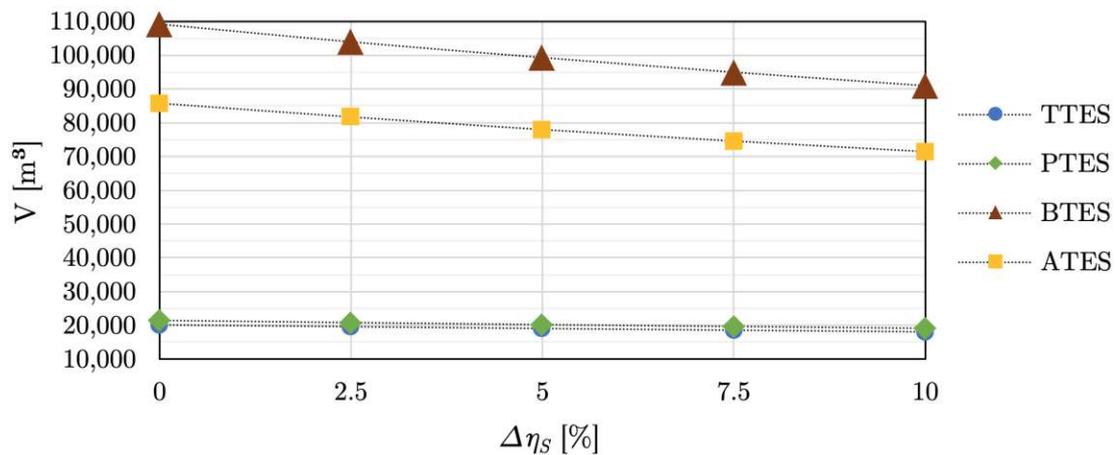


Abbildung 6.3: Einfluss der Effizienzerhöhung auf das Speichervolumen im Vergleich zum Referenzfall

6.4 Einfluss des Zinssatzes

Eine Investition ist dadurch gekennzeichnet, dass der Investierende finanzielle Mittel einsetzt, um sein Vermögen zu vermehren. Dafür können eigene finanzielle Mittel (Eigenkapital) verwendet, oder ein Kredit aufgenommen werden (Fremdkapital). Steckt das eigene Kapital in der Investition, so entgeht dem Investor zeitgleich der mögliche Zinsertrag aus einer Geldanlage mit vergleichbarem Risiko bei einer Bank [27].

In diesem Unterkapitel wird untersucht, wie sich der Zinssatz auf die LCOH auswirkt. Die Abbildung 6.4 stellt die Änderung der LCOH in Abhängigkeit vom Zinssatz dar. Daraus lässt sich feststellen, dass die LCOH mit einer Reduktion des Zinssatzes sinken. Wenn der Zinssatz auf 1% (im Vergleich zum Zinssatz in Referenzfall von 3%) eingestellt wird, beträgt die LCOH Reduktion 22% für das TTES System, 19,6% für BTES System und 15,3 % für die PTES und ATES

Systeme. Wenn der Zinssatz auf 5% ansteigt, verzeichnen das TTES System eine LCOH Erhöhung um 25,7%, das BTES System um 22,9% und die PTES und ATES Systeme um 16,9 % im Vergleich zum Referenzfall.

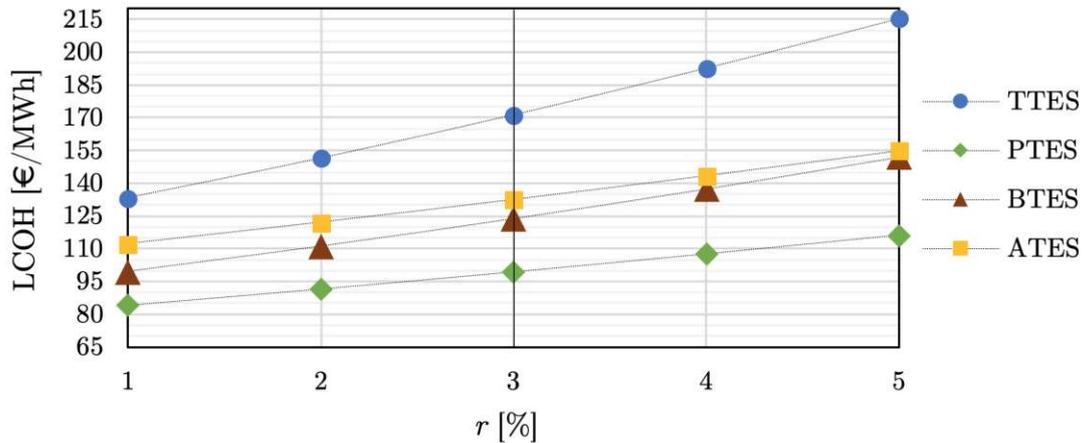


Abbildung 6.4: Einfluss der Erhöhung des Zinssatzes auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall

6.5 Einfluss des Wärmepreises

Die Rückzahlungsperiode bzw. die Amortisationszeit einer Investition misst das Risiko, welches ein Investor eingeht. Anhand der Rückzahlungsperiode kann festgestellt werden, wie schnell die kumulierten Rückflüsse aus der eingesparten Energie die Anfangsinvestition übersteigen können [27].

Stand dem aktuellen Wärmepreis C_{FW} von 104 €/MWh [99], den ein Wohnkomplex bei keiner Verwendung von thermischen Energiespeichern zahlen würde, kann nur eine Investition in einem PTES System wirtschaftlich günstig sein, vgl. Tabelle 6.2. Aus diesem Grund wird hier untersucht, wie sich die Rückzahlungsperiode der SSTES Systeme bei einer prozentualen Erhöhung des Wärmepreises ändert, siehe Abbildung 6.5. Anhand dieses Diagramms kann festgestellt werden, dass die Rückzahlungsdauer bei einer jährlichen Erhöhung des Wärmepreises exponentiell sinkt. Bei einer jährlichen Erhöhung von 20% verzeichnet das PTES System die schnellste Rückzahlungsdauer von 8 Jahren, gefolgt vom ATES System mit 9 Jahren, BTES System mit 10 Jahren und TTES System mit 12 Jahren.

Wenn der Wärmepreis aber in einem Szenario im Vergleich zum Referenzfall sinkt, würde dies bedeuten, dass es für keine der SSTES Systeme eine Rückzahlung der Investition möglich wäre.

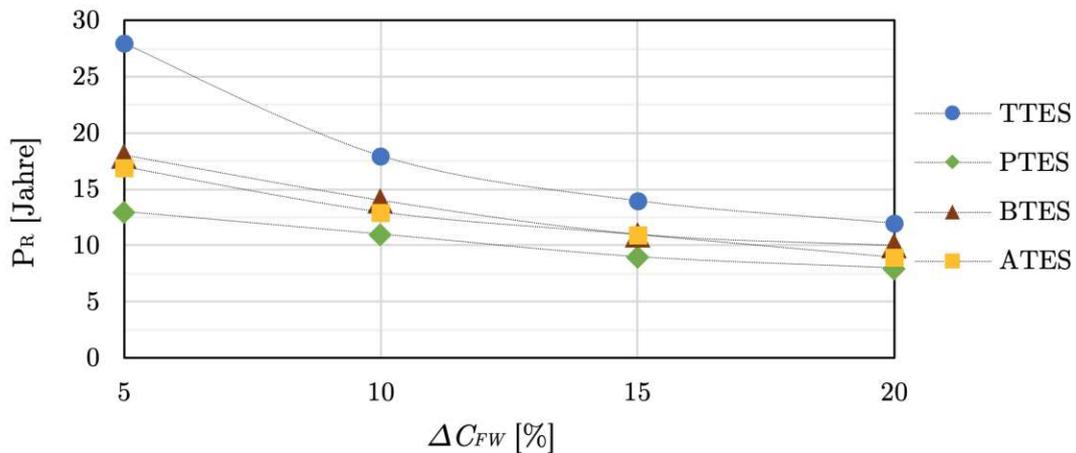


Abbildung 6.5: Einfluss der jährlichen Erhöhung des Wärmepreises auf die Rückzahlungsperiode im Vergleich zum Referenzfall

6.6 Einfluss der spezifischen Investitionskosten und der Subvention

Im Laufe der Studie wurde festgestellt, dass die spezifischen Investitionskosten direkt proportional zu den LCOH stehen. Das heißt, dass eine Reduktion der spezifischen Investitionskosten zu einer gleichen Reduktion der LCOH führen würde, siehe Abbildung 6.6.

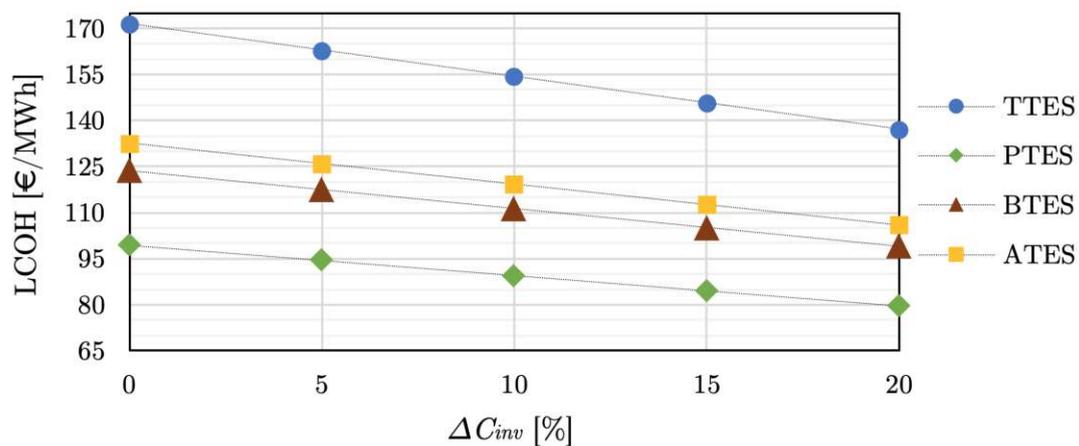


Abbildung 6.6: Einfluss der Reduktion der spezifischen Investitionskosten von den Speichern auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall

Ein weiterer Einfluss auf den LCOH wird durch die Anwendung von Subventionen und staatliche Förderungen für SSTES Systeme ausgeübt. Ihre Erhöhung ist auch direkt proportional zur Reduktion der LCOH.

7 Diskussion und Ausblick

7.1 Stellenwert der Szenariotechnik

Die im Rahmen dieser Arbeit genutzte Methodik zur Szenarienentwicklung *Szenario-Management* ist keine Simulationstechnik, sondern ein Ansatz zur Zusammenführung von Zukunftswissen. Diese Methodik ist ein Werkzeug zum Komplexitätsmanagement, indem die komplette Menge an erworbenen Kenntnissen über die saisonale Energiespeicherung im Laufe der Arbeit zusammengefasst werden kann und die entstandenen Unsicherheiten in eine Reihe plausibler Zukünfte beschrieben werden können. Die Methodik basiert auf den Ansatz des Systemdenkens und ermöglicht ein besseres Verständnis, wie die Bestandteile eines Systems miteinander in Beziehung stehen und wie Systeme im Laufe der Zeit und im Kontext größerer Systeme funktionieren. Sie bietet den Vorteil, nicht quantifizierbare Einflussfaktoren wie die soziale Akzeptanz von oder Innovationen in SSTES Systemen, die durch keine Gleichungen beschrieben werden können, in Szenarien zusammenzuführen und so ein vollständiges Szenariobild zu bekommen.

Eine Limitation der angewendeten Methodik stellen die eingeschränkten Validierungsmöglichkeiten der erarbeiteten Szenarien dar. Im Vergleich zu Simulationstechniken, deren Ergebnisse mit physischen Modellen durch Experimente validiert werden können, können die mittels der Szenariotechnik erstellten Szenarien nur nach ihrer Wahrscheinlichkeit bewertet werden. Die Szenarioerstellung ist kein einmaliges Projekt, sondern ein kontinuierlicher Prozess. Einmal entwickelte Szenarien, welche einen längeren Zeitraum umfassen, lassen sich über mehrere Jahre anwenden und gegebenenfalls adaptieren. Kurz- und mittelfristige Umfeldveränderungen können dann in einer jeweils aktualisierten Szenario-Bewertung berücksichtigt werden. Nicht zuletzt ist das *Szenario-Management* kein allumfassendes Werkzeug, sondern ein wissenschaftliches Tool, das mit anderen Instrumenten wie beispielsweise dem Roadmapping oder der Technologiefrüherkennung verknüpft werden kann [100].

7.2 Chancen und Gefahren für die SSTES Systeme aus den entwickelten Szenarien

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Umfeldszenarien erstellt, die die Entwicklung unterschiedlicher Einflussfaktoren beschreiben. Bei einer Änderung des Umfeldes können verschiedene Auswirkungen auftreten, die Konsequenzen für die SSTES Systeme haben können. Positiv eingeschätzte Auswirkungen werden als Chancen und negativ eingeschätzte Auswirkungen als Gefahren bezeichnet. Aus den Chancen und Gefahren ergeben sich Handlungsoptionen, wie die SSTES Systeme entwickelt und besser eingesetzt werden können, um diese auf das Auftreten eines Szenarios vorzubereiten.

Aus dem Szenario „*Transformation*“ ergibt sich für die Speicher die allgemeine Chance, dass die Energiepreise aufgrund der Einbeziehung von Umweltaspekten bei der Preisbildung wie z.B. CO₂-Bepreisung in der Zukunft weiter steigen

werden. Obwohl das für die Gesellschaft und die Wirtschaft eine unerwünschte Entwicklung ist, stellt dies eine hervorragende Möglichkeit für die Speichertechnologie dar, da es die Rückzahlungsdauer der SSTES Systeme verkürzen und diese wirtschaftlich attraktiver machen würde. Besonders wichtig ist eine solche Entwicklung für die kostenintensiven TTES Systeme, die dadurch schnell die anderen Systeme bzgl. der Rückzahlungsdauer aufholen können, vgl. Kapitel 6.5. In diesem Szenario ergibt sich eine weitere Chance im Bezug auf die Dezentralisierung der Wärmeversorgung, da sich SSTES Systeme in nach einer Autarkie strebenden Energiegemeinschaften gut einsetzen lassen. In Städten und dicht bebauten Gebieten sind die BTES und ATES Systeme besonders geeignet, da sie fast komplett unterirdisch gebaut werden und somit nur eine sehr geringe Landnutzung erfordern. Da diese aber von den örtlichen und hydrologischen Bedingungen stark abhängig sind, ist es notwendig eine intensive Forschung über ihre möglichen Einsatzorte durchzuführen und mit der entsprechenden Raumplanung abzustimmen. Im Gegensatz dazu sind die flächenintensiven TTES und PTES Systeme bei einer Dezentralisierung der Wärmeversorgung in den ländlichen Gebieten besonders geeignet, weil der benötigte Flächenbedarf für den Speicher und für die Solarkollektoren sichergestellt werden kann.

Im Szenario „*Transformation*“ kann auch eine Gefahr für SSTES erkannt werden. Durch die intensive Forschung und Entwicklung der platzsparenden und im Hochtemperaturbereich einsetzbaren latenten oder thermochemischen Wärmespeicher können ihre technische Probleme wie thermische Instabilität und niedrige Wärmeübertragungsraten erheblich verbessert werden. Zusätzlich können ihre Investitionskosten durch den Einsatz von innovativen günstigeren Speichermaterialien gesenkt werden. Aus diesem Grund ist für die SSTES Systeme nicht nur wichtig, den Stand der Technik erfolgreich aufzubauen und einzusetzen, sondern gleichzeitig in ihrer Forschung und Entwicklung zu investieren. Somit können ihre Investitionskosten wie z.B. bei Steigerung ihrer Lebensdauer, ihrer Effizienz und auch durch staatliche ausgeschüttete Förderungen (Subventionen) noch weiter gesenkt werden, vgl. Kapitel 6.

Ein großer Teil der im Szenario „*Status quo*“ sich ergebenden Chancen und Gefahren überschneiden sich mit diesen aus dem Szenario „*Transformation*“. Eine nennenswerte Gefahr im Szenario „*Status quo*“ ist die Verbreitung der jetzigen oder weiteren möglichen geopolitischen Konflikte, die nicht nur die Sicherheit der Energielieferungen und somit die Energiepreise, sondern auch die Materiallieferketten beeinträchtigen können. Daher ist es wichtig, dass alle notwendigen Materialien und Komponenten für den Bau und für den Betrieb der SSTES Systeme wie Pumpen und Dämmstoffe für TTES und PTES oder Wärmepumpen für ATES und BTES Systeme unabhängig von internationalen Lieferketten zu besorgen und somit lokal verfügbar sind. Auf diese Weise wird im Fall eines Schadens eine schnelle Wartung und keine Beeinträchtigung des Betriebes der Speicher sichergestellt.

Im Szenario „*Business-as-usual*“ kann trotz der primär negativen Auswirkungen der Umstände eine Chance gefunden werden. Die Klimaänderung würde einen katastrophalen Effekt auf die Umwelt, wie wir sie heute kennen, haben. Die

steigenden Temperaturen werden den Kühlbedarf der Wohngebäude erhöhen. Die SSTES Systeme, die aktuell sowohl Heizen im Winter als auch Kühlen im Sommer ermöglichen, stellen die BTES und ATES Systeme dar, vgl. Abbildung 3.9. Aus diesem Grund ist es notwendig, neue Nutzungsmethoden für TTES und PTES Systeme zu entwickeln, wie z.B. den Einsatz von Wärmepumpen oder die gleichzeitige Nutzung von zwei Speichern, die den doppelten Einsatz dieser Speicher ermöglichen.

Ein großes Risiko im Szenario „*Business-as-usual*“ stellt die Raumplanung dar. Wenn diese in der Zukunft nicht ausreichend auf die nachhaltige Wärmeversorgung ausgerichtet wird und eine Flächenkonkurrenz zwischen den nachhaltigen Technologien zur Wärmeerzeugung und der Landwirtschaft entsteht, würde dies den Einsatz der oberirdischen TTES Systeme und der teilweise oberirdischen PTES Systeme beeinträchtigen. Daher ist es notwendig, neue Baukonzepte dieser Speicher zu entwickeln und erfolgreich einzusetzen. Zum Beispiel können die TTES Systeme vollständig im Boden vergraben werden [40]. Für die PTES Systeme wäre es wichtig, dass ihre Abdeckung eine Begehrbarkeit erlaubt. Dafür können selbsttragende Konstruktionen oder schwimmende Abdeckungen verwendet werden [38]. Nicht zuletzt ist es wichtig, dass diese neue Baukonzepte die Kosten der Speicher nicht steigern, um diese konkurrenzfähig zu anderen thermischen Energiespeichern zu halten.

7.3 Disruptive Ereignisse

Wildcards sind zukünftige Entwicklungen oder Ereignisse, die sich durch eine relativ geringe Eintrittswahrscheinlichkeit auszeichnen, aber potenziell weitreichende Konsequenzen für den Einsatz einer Technologie oder für die Stakeholder haben können [19]. Im Laufe der Szenario-Entwicklung wurden einige Projektionen entwickelt, die ein hohes disruptives Potenzial für die Zukunft der SSTES Systeme haben können und schwierig in einem Szenario kombinierbar wären. Im Folgenden werden diese diskutiert.

Im Zuge der zukünftigen Sektorenkopplung ist eine stabile Stromerzeugung eine wichtige Voraussetzung für die Bereitstellung der benötigten Energie für die Wärmepumpen. Eine Alternative zu der erneuerbaren volatilen Stromerzeugung stellt die Kernenergie dar. Sie ist seit vielen Jahren ein polarisierendes Diskussions-thema in der österreichischen Öffentlichkeit. Auch wenn die Erzeugung der Atomenergie in Österreich im Atomsperrgesetz verboten ist, hat sie einen Anteil von 11% am importierten Strom [101], welcher in den letzten 15 Jahren tendenziell höher als der exportierte Anteil ist [72]. In Europa gibt es insgesamt 171 Kernkraftwerke mit einer kumulierten elektrischen Kapazität von 154 GW im Betrieb. Derzeit befinden sich in Europa 12 Kernkraftwerke im Bau mit einer geplanten Kapazität von insgesamt 12 GW [102]. Seit dem Ausbruch des geopolitischen Konflikts zwischen Russland und Ukraine ist die Atomkraft in Europa wieder in den Fokus gerückt, da sie eine Option für die Sicherstellung der Stromerzeugung für den Kontinent darstellt. Obwohl sie in Österreich eine geringe soziale Akzeptanz aufgrund

ihrer Sicherheitsprobleme genießt, können mittels Atomkraft enorme Mengen an elektrischer Energie hergestellt werden, die auch keinen saisonalen Schwankungen unterliegen. Falls es in der Zukunft zu einer Renaissance der Atomkraft kommt, kann dies in einem niedrigeren Bedarf an thermischer Energiespeicherung resultieren.

Ein weiterer wichtiger Konkurrent, der als saisonaler Speicher genutzt werden kann und somit die Nachfrage nach thermischer Energiespeicherung bzw. nach SSTES Systemen negativ beeinflussen kann, stellt der Wasserstoff dar. Wasserstoff hat den höchsten massenspezifischen Energiegehalt unter allen üblichen Kraftstoffen - 120 MJ/kg oder 33 kWh/kg (etwa dreimal mehr als Benzin), aber den niedrigsten volumetrischen Energiegehalt mit einem Wert zwischen $0,7 \text{ kWh/l}$ (bei $p = 350 \text{ bar}$) und $2,2 \text{ kWh/l}$ (im flüssigen Aggregatzustand) - etwa viermal weniger als Benzin [103]. Neue Herstellungsverfahren werden derzeit intensiv erforscht, um primär seine Kosten zu reduzieren und seinen Einsatz in der Wärmebereitstellung nachzuweisen. Auf lange Sicht kann eine Wasserstoff-Infrastruktur für die Speicherung von Energie und für den Transport von fluktuierend eingespeisten oder in entfernten Regionen gewonnenen erneuerbaren Energien aufgebaut werden [104]. Der Wasserstoff findet bereits einen Einsatz in der energieintensiven Stahlindustrie. Ein Beispiel dafür sind die erfolgreichen Tests in dem Stahlwerk von ThyssenKrupp in Duisburg, wo die benötigten 200 kg Kohlenstaub für die Produktion von 1000 kg Roheisen vollständig durch Wasserstoff ersetzt wurden [105]. Analog dem Einsatz des Wasserstoffs in der Stahlproduktion kann er auch für die Wärmebereitstellung im Wohnbereich verwendet werden und einen wichtigen Energiespeicher in der Zukunft darstellen. Mittels geeigneter politischer Instrumente kann seine Nachfrage in der Zukunft gesteigert werden. Das Erneuerbare-Wärme-Gesetz sieht zum Beispiel vor, dass ab 2023 in Österreich in Neubauten keine zentralen oder dezentralen fossil betriebenen Heizungen mehr errichtet werden dürfen [97]. Somit müssen neue alternative Brennstoffe für die Wärmebereitstellung zum Einsatz kommen.

7.4 Diskussion über die Stakeholder

Wie im Kapitel 2.3 beschrieben, sind die Stakeholder Organisationen oder Individuen, die eine Technologie beeinflussen oder von einer Technologie beeinflusst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die wichtigsten Stakeholder in Bezug auf die SSTES Systeme analysiert und nach ihrem Einfluss und nach ihrem Interesse an diesen Technologien bewertet. Die Stakeholder wurden auch im Rahmen der Szenarienentwicklung als Einflussfaktoren, die im Mikro-Umfeld der SSTES Technologien agieren, einbezogen. Im Zuge der Szenario-Beschreibung haben sich unterschiedliche Chancen und Gefahren für die Stakeholder ergeben. Ein wirkungsvoller Ansatz ist die Ermittlung und Beschreibung von "Gewinnern" und "Verlierern" [19].

Aus dem Szenario „Transformation“ ergibt sich die Chance für Montagefirmen und die Ingenieur- und Planungsbüros, dass sie aufgrund des erfolgreichen Einsatzes von SSTES Systemen sowie der gleichzeitigen Entwicklung von LHS und THS

mehr Aufträge für die Planung und Installation von thermischen Energiespeichern bekommen werden. Gleichzeitig würde die Gruppe der Hersteller von Speichern auch von einer ähnlichen Entwicklung der Umstände profitieren. Sie müssen aber ihre Produktionsmethoden an die in diesem Szenario steigenden Energiepreisen anpassen, um konkurrenzfähig zu bleiben. Steigende Energiepreise würden sich auch auf die Immobilienbesitzer sowie auf die Mieter auswirken, die aber durch eine steigende thermische Sanierungsrate ihre Kosten für den Wärmeverbrauch im Gleichgewicht halten könnten. Eine Beherrschung des Klimawandels würde auch eine positive Entwicklung für die politischen Akteure bedeuten, die somit das gesetzte Ziel zur Dekarbonisierung des Wärmesektors bis zum Jahr 2040 erreichen könnten.

Angesichts der Entwicklung der geopolitischen Situation im Szenario „*Status quo*“ würde diese einen negativen Einfluss auf die Hersteller und Errichter haben, welche die Lieferung oder die Beschaffung der erforderlichen Komponenten zum Errichten von SSTES Systemen wie Dämmstoffe, Pumpen und Wärmepumpen erschwert. Von einem begrenzten Zugang zu fossilen Energieträgern würden nur diejenigen Energielieferanten profitieren, die bereits alternative und erneuerbare Energieträger verwenden. Eine verschärfte Energiekrise in Europa könnte somit einen Schub zu weiteren Innovationen bei der Forschung und Entwicklung von thermischen Energiespeichern geben.

Trotz der negativen Entwicklung des Klimawandels und der somit steigenden Temperaturen im Szenario „*Business-as-usual*“ ergibt sich die Chance für Hersteller und Montagefirmen von BTES und ATES Systemen, deren Nachfrage aufgrund ihrer gleichzeitigen Anwendung sowohl für Heizen als auch zum Kühlen steigen werden. In diesem Szenario ergibt sich ein Risiko für die Grundbesitzer bzw. für die Landwirtschaft, da eine Flächenkonkurrenz mit den oberirdischen TTES und PTES Systemen entstehen kann. Abgesehen von der Flächenkonkurrenz kann die Landwirtschaft von den unterirdischen BTES Systemen dadurch profitieren, indem die abgegebene Wärme an der Erdoberfläche für die Heizung von Gewächshäusern gleichzeitig verwendet werden kann [106].

7.5 Diskussion der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde eine Sensitivitätsanalyse der Wärmegestehungskosten durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Einflussfaktoren wie spezifische Investitionskosten sowie Subventionen direkt proportional zu den LCOH sind. Die übrigen untersuchten Einflussfaktoren stehen in keinem linearen Zusammenhang mit den LCOH. Von den speicherspezifischen Faktoren wie die Lebensdauer und die Effizienz, hat die Lebensdauer einen stärkeren Einfluss auf die Reduktion der LCOH. Auf der anderen Seite bietet die Effizienzsteigerung eines Speichers den Vorteil, dass sich das Speichervolumen bei einem konstanten Wärmebedarf reduziert. Dies ist ein wichtiger Aspekt, wenn in der Zukunft mehr platzsparende oberirdische Speicher wie TTES oder PTES Systeme nachgefragt werden. Von den untersuchten externen Einflussfaktoren führt die Erhöhung des

Zinssatzes zu höheren LCOH. Der Zinssatz ist besonders wichtig aus der Sicht der Investoren in SSTES Systemen. Ein niedriger Zinssatz steigert die Rentabilität einer SSTES Anlage und umgekehrt. Nicht zuletzt wurde der Einfluss der eingesparten Energie auf die Rückzahlungsdauer der Speicher untersucht. Als Vergleichswert wurde einen Wärmepreis von 104 €/MWh genutzt [99]. Es wurde festgestellt, dass nur die Investition in das PTES System bei auf dem aktuellen Niveau konstanten Wärmepreisen in der Zukunft rentabel sein kann. Durch die Steigerung des Wärmepreises um nur 5% pro Jahr würden alle SSTES Systeme eine Rentabilität verzeichnen. Das größte Potential für eine Reduktion der Rückzahlungsdauer würde das TTES System mit 67% bei einer jährlichen Wärmepreiserhöhung um 20% zeigen.

7.6 Ausblick

Um den Prozess der Erstellung von explorativen Umfeldszenarien für die SSTES Systeme weiter zu optimieren, sollten mehr Experten und Stakeholder während der Szenarioentwicklung involviert werden. Zusätzlich können andere in dieser Arbeit dargestellten Einflussfaktoren einbezogen werden, um neue Szenarien mittels der Konsistenz- und Clusteranalyse zu entwickeln. Dadurch können neue Umfeldszenarien zu weiteren interessanten Erkenntnissen führen.

Angesichts der in diesem Kapitel diskutierten Handlungsoptionen für die Speicher können spezifische Strategieszenarien für die Entwicklung oder für den geeigneten Einsatz der SSTES Systeme erarbeitet werden, vgl. Abbildung 3.10.

Ausgehend von der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnung kann der Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Wärmegestehungskosten sowie auf die Rückzahlungsdauer der Speicher nicht nur isoliert, sondern auch der Effekt von ihrer Kombination miteinander auf Basis eines Szenarios untersucht werden.

8 Schlussfolgerung

SSTES stellen eine Schlüsseltechnologie dar, die den Wärmebedarf im Winter in einer Kombination mit erneuerbaren Energieträgern abdecken kann. In dieser Arbeit wird ein Überblick über die vier SSTES Grundtechnologien: TTES, PTES, BTES und ATES gegeben. Mit TTES können hohe Temperaturen bis zu 90 °C gespeichert und hohe thermische Effizienzgrade bis zu 90% aufgrund vollständiger Dämmung erreicht werden. Nachteilig dabei sind die sehr hohen Investitionskosten im Vergleich zu den anderen Speichern. Diese sind zum Beispiel dreimal höher als die von PTES. Zusätzlich begrenzen die hohen einwirkenden hydrostatischen Kräfte auf die Wände des oberirdischen TTES seine Baugröße. PTES ist der kostengünstigste Speicher, dieser weist aber den höchsten Platzbedarf auf. Zusätzlich ist seine Lebensdauer im Hochtemperaturbereich limitiert und die Abdeckung von den derzeit existierenden Anlagen ist nicht begehbar. BTES hat sich in den letzten Jahren schnell entwickelt. Er zeichnet sich durch seine unterirdische Bauweise aus, wodurch seine Deckfläche für andere Zwecke verwendet werden kann. BTES kann aber nur an Orten mit geeigneten geologischen Bedingungen gebaut werden. Eine weitere Limitation stellt die Dauer bis zum Erreichen der vollständigen Betriebsbedingungen dar, da diese im Durchschnitt 5 Jahre beträgt. ATES wird unterirdisch gebaut und erfordert geeignete hydrogeologische Bedingungen, da sie einen starken Einfluss auf die Systemleistung haben. Bei der Planung von ATES ist auch besonders auf länderspezifische regulatorische Anforderungen zu achten. BTES und ATES können sowohl zu Heiz- als auch zu Kühlzwecken eingesetzt werden und bieten ein großes Speichervolumen an. Ihre Energiedichte ist bis zu dreimal geringer als diese von TTES und PTES.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei mögliche explorative Umfeldszenarien: „*Transformation*“, „*Status quo*“ und „*Business-as-usual*“ basierend auf die Szenario-Management Methodik entwickelt. Für die Entwicklung wurden eine umfassende Literaturrecherche, PESTEL- und Stakeholder-Analyse sowie sechs Experteninterviews durchgeführt. Die Szenarien beziehen sich auf Österreich für das Jahr 2040 und berücksichtigen heimische sowie europäische Tendenzen in Bezug auf die Wärmeversorgung. Die Szenarien können zur Unterstützung von strategischen Entscheidungen für die Entwicklung von SSTES Technologien und zur Aufdeckung von Möglichkeiten ihrer Anwendung dienen. Die Ergebnisse zeigen, dass der zukünftige Einsatz von SSTES Technologien stark mit technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen innerhalb des wirtschaftlichen und politischen Ökosystems der Branche verknüpft ist. Das Szenario „*Transformation*“ ist gemäß den befragten Experten das begehrteste Szenario und stellt hervorragende Chancen für SSTES in Bezug auf ihren Einsatz dar. Das Szenario „*Status quo*“ geht von einer Verlängerung der verschärften Energiesituation Stand 2022 aus und deckt eine steigende Attraktivität der allgemeinen Energiespeicherung auf. Das Szenario „*Business-as-usual*“ zeichnet sich im Gegensatz dazu mit einer negativen Tendenz in Richtung Rückzug auf die alten Wärmeversorgungskonzepte mit fossilen Brennstoffen aus und stellt einen weiteren Entwicklungsbedarf der SS-

TES Technologien dar. Für jedes Szenario wurden Chancen und Gefahren für die unterschiedlichen SSTES Technologien erläutert und Handlungsoptionen für ihre Entwicklung und ihren Einsatz aufgezeigt.

Im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde der Einfluss speicherbezogener sowie externer Einflussfaktoren auf die wirtschaftliche Attraktivität der Speicher untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass PTES die kürzesten Rückzahlungsperioden und TTES das höchste Potential zur Reduktion ihrer Rückzahlungsperioden aufweisen, vorausgesetzt, dass die Wärmepreise weiterhin jährlich ansteigen. Durch eine Effizienzsteigerung mittels neuer Dämmungsverfahren aller SSTES Technologien können ihre LCOH sowie gleichzeitig ihr Volumen bei gleicher Energieeinspeisung reduziert werden, wobei BTES und ATES das größte Reduktionspotential diesbezüglich aufweisen. Einen weiteren erheblichen Einfluss auf die LCOH Senkung können die Investitionskosten sowie staatliche Förderungen für thermische Energiespeicher haben.

Die Entwicklung einer Anlage für saisonale sensible thermische Energiespeicherung ist von zahlreichen externen Faktoren und Akteuren abhängig, die in einem komplexen Verhältnis zueinander stehen. Die Anwendung der Szenario-Management Methodik ermöglicht das Verständnis dieser Wechselwirkungen und verschafft einen kompletten Überblick über dieses System. Dies erleichtert den Planungsprozess und untermauert somit die Schlüsselrolle des Szenario-Managements im Einsatz von aufkommenden Technologien im Energiesektor.

Literaturverzeichnis

- [1] Emiliano Borri, Gabriel Zsembinski, and Luisa F. Cabeza. Recent developments of thermal energy storage applications in the built environment: A bibliometric analysis and systematic review. *Applied Thermal Engineering*, 189:116666, 2021.
- [2] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Die österreichische Klima- und Energiestrategie. https://www.bundeskanzleramt.gv.at/dam/jcr:903d5cf5-c3ac-47b6-871c-c83eae34b273/20_18_beilagen_nb.pdf, 2018 (abgerufen am 01-07-2022).
- [3] Tianrun Yang, Wen Liu, Gert Jan Kramer, and Qie Sun. Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139:110732, 2021.
- [4] Muhammad Amer, Tugrul U. Daim, and Antonie Jetter. A review of scenario planning. *Futures*, 46:23–40, 2013.
- [5] Wien Energie. Energieverbrauch Österreichs. <https://positionen.wienenergie.at/grafiken/energieverbrauch-oesterreich/>, 2022 (abgerufen am 06-07-2022).
- [6] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich. https://www.bundeskanzleramt.gv.at/dam/jcr:92712077-cc05-48e0-b775-928d166a0c8a/24_16_klimaplan_NB.pdf, 2019 (abgerufen am 29-04-2022).
- [7] Liane Buchholz. *Strategisches Controlling*. Springer, 2013.
- [8] T Versteeg, MJ Baumann, M Weil, and AB Moniz. Exploring emerging battery technology for grid-connected energy storage with constructive technology assessment. *Technological Forecasting and Social Change*, 115:99–110, 2017.
- [9] Pernille Eskerod, Martina Huemann, and Grant Savage. Project stakeholder management—past and present. *Project management journal*, 46(6):6–14, 2015.
- [10] Zsuzsa Varvasovszky and Ruairi Brugha. A stakeholder analysis. *Health policy and planning*, 15(3):338–345, 2000.
- [11] Gerry Johnson, Kevan Scholes, and Richard Whittington. *Exploring corporate strategy: Text and cases*. Pearson education, 2008.
- [12] Interview mit Dr. Ann-Kathrin Hess - Forschungswissenschaftlerin für Nachhaltigkeit in INTERFACE (D.Dimov, Interviewer), 28-04-2022.
- [13] Interface. Sociotechnological Breakthrough of Thermal Energy Storage – a new Approach of Constructive Technology Assessment (SOTES). <https://www.interface-pol.ch/projekt/sociotechnological-breakthrough-of-thermal-energy-storage-a-new-approach-of-constructive-technology-assessment-sotes>, 2022 (abgerufen am 02-11-2022).
- [14] John W. Creswell. *Educational research: Planning, conducting, and evaluating quantitative research*. Prentice Hall, 2002.
- [15] Wei-Ming Chen, Hana Kim, and Hideka Yamaguchi. Renewable energy in eastern Asia: Renewable energy policy review and comparative SWOT analysis for promoting renewable energy in Japan, South Korea, and Taiwan. *Energy Policy*, 74:319–329, 2014.
- [16] Christian Homburg, Sabine Kuester, and Harley Krohmer. *Marketing management*. Springer, 2009.
- [17] Sascha Klappert and G Schuh. *Technologiemanagement - Handbuch Produktion und Management 2*. Springer Berlin, Heidelberg, 2011.

- [18] Jürgen Gausemeier, Roman Dumitrescu, Tomas Pfänder, Daniel Steffen, and Frank Thielemann. *Innovationen für die Märkte von morgen: strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2018.
- [19] Alexander Fink and Andreas Siebe. *Szenario-Management: von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen*. Campus Verlag, 2016.
- [20] Scenario Management International AG. *Szenario-Manager Handbuch*. Paderborn, 2019.
- [21] Theo J.B.M. Postma and Franz Liebl. How to improve scenario analysis as a strategic management tool? *Technological Forecasting and Social Change*, 72(2):161–173, 2005.
- [22] Klaus Backhaus, Bernd Erichson, Rolf Weiber, and Wulff Plinke. Clusteranalyse. In *Multivariate Analysemethoden*, pages 453–516. Springer, 2016.
- [23] Fionn Murtagh and Pedro Contreras. Algorithms for hierarchical clustering: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(1):86–97, 2012.
- [24] Robert R. Sokal. A statistical method for evaluating systematic relationships. *Univ. Kansas, Sci. Bull.*, 38:1409–1438, 1958.
- [25] Andreas Leschnik. *Visuelle Wahrnehmung*. Springer, 2020.
- [26] Ingwer Borg and Patrick JF Groenen. *Modern multidimensional scaling: Theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [27] Juliane Bränzel. Wirtschaftlichkeitsberechnung. In *Energiemanagement*, pages 235–281. Springer, 2015.
- [28] Michael Kausche. Sensitivitätsanalyse. In *Wirtschaftlichkeit schwimmender Offshore Windenergieanlagen*, pages 71–78. Springer, 2018.
- [29] Elisa Papadis and George Tsatsaronis. Challenges in the decarbonization of the energy sector. *Energy*, 205:118025, 2020.
- [30] Gianfranco Guidati and Charles Sothill. Fighting climate change in the energy sector—a holistic view. *Energy Procedia*, 114:7550–7563, 2017.
- [31] Joanna Maćkowiak-Pandera. Der wichtigste Teil der Wende. *Heinrich Böll Stiftung*, 2018.
- [32] Gianfranco Guidati. Scenarios for the future energy systems in Switzerland and the role of energy storage. <https://www.hslu.ch/-/media/campus/common/files/issuu-pdf/ta/ta-forschung/forschung/sstes-2021/1-sstes21-guidati-jasm-scenarios-for-the-furutre-energy-systems.pdf?la=de-ch>, 2020 (abgerufen am 07-07-2022).
- [33] Michael Sterner and Ingo Stadler. *Energiespeicher-Bedarf, Technologien, Integration*. Springer-Verlag, 2014.
- [34] Kavendra A. Thakare and A.G. Bhave. Review on latent heat storage and problems associated with phase change materials. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(10):176–182, 2015.
- [35] Anna Kallert, Eric Lamvers, and Jae Yu Young. Thermische Energiespeicher für Quartiere. *Deutsche Energie-Agentur*, 2021.
- [36] Abdulrahman Dahash, Fabian Ochs, Michele Bianchi Janetti, and Wolfgang Streicher. 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, 2019.
- [37] Harry Mahon, Dominic O’Connor, Daniel Friedrich, and Ben Hughes. A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops. *Energy*, 239:122207, 2022.

- [38] Wim van Helden et al. Saisonale Speicher zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien für Distrikte. https://gigates.at/images/Appendix17_publishable_report_graphically_designed_DE.pdf, 2021 (abgerufen am 08-07-2022).
- [39] Dirk Mangold and L. Deschaintre. Seasonal Thermal Energy Storage: Report on state of the art and necessary further R+D. *IEA SHC Task*, 45, 2015.
- [40] Stan de Groot. Economic and thermal performance of Ecovatt and comparable thermal energy technologies. https://www.ecovatt.eu/wp-content/uploads/2020/06/20200609-Ecovatt_comparison_Final_ENG-gecomprimeerd.pdf, 2020 (abgerufen am 12-10-2022).
- [41] S Gehlin. Borehole thermal energy storage. *Advances in ground-source heat pump systems*, pages 295–327, 2016.
- [42] Stijn Beernink, Martin Bloemendal, Rob Kleinlugtenbelt, and Niels Hartog. Maximizing the use of aquifer thermal energy storage systems in urban areas: effects on individual system primary energy use and overall GHG emissions. *Applied Energy*, 311:118587, 2022.
- [43] Yoann Louvet, Stephan Fischer, and Simon Furbo. Guideline for levelized cost of heat (LCOH) calculations for solar thermal applications. <https://task54.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/A01-Info-Sheet--LCOH-for-Solar-Thermal-Applications.pdf>, 2017 (abgerufen am 10-10-2022).
- [44] Johannes Goeke. *Gebäude als thermischer Energiespeicher*. Springer, 2021.
- [45] Anders Juhl Kallesøe, Thomas Vangkilde-Pedersen, and Luca Guglielmetti. HEATSTORE Underground Thermal Energy Storage (UTES)–state-of-the-art, example cases and lessons learned. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:157363>, 2017 (abgerufen am 10-10-2022).
- [46] Ottmar Edenhofer, Ramon Pichs-Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Matschoss, Susanne Kadner, Timm Zwickel, Patrick Eickemeier, Gerrit Hansen, and Steffen Schlömer. IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. *Cambridge University Press, UK*, 2011.
- [47] Franz Zach, Susanna Erker, and Gernot Stoeglehner. Factors influencing the environmental and economic feasibility of district heating systems—a perspective from integrated spatial and energy planning. *Energy, Sustainability and Society*, 9(1):1–20, 2019.
- [48] Michel Haller and Florian Ruesch. Saisonale Wärmespeicher – Stand der Technik und Ausblick. *Forum Energiespeicher Schweiz*, 2019.
- [49] Aaro Anttila. Techno-economic comparison of thermal energy storage solutions for decarbonizing heat in Espoo by 2025. Master thesis, Aalto University, 2021.
- [50] Theodor Zillner, Hannes Bauer, Elvira Lutter, Hannes Warmuth, Edith Haslinger, and Gregor Götzl. FTI-Roadmap Geothermie. *BMK*, 2022.
- [51] Interview mit Dr. Wim van Helden - Leiter des Bereichs Technologieentwicklung in AEE INTEC (D.Dimov, Interviewer), 06-05-2022.
- [52] Gerhard Bayer, Bianca Pfeffer, Gregor Götzl, Martin Fuchluger, Stefan Hoyer, Robert Kalasek, Thomas Brus, and Johannes Zeininger. Projektbericht EnergieUrban - Stufe 1. https://www.oegut.at/downloads/pdf/anergie-urban_projektbericht_2020.pdf?m=1598275909, 2020 (abgerufen am 21-08-2022).
- [53] FFG Projektdatenbank. Aquifer Thermal Energy Storage Vienna. <https://projekte.ffg.at/projekt/3849155/pdf>, 2021 (abgerufen am 21-08-2022).
- [54] Lena Börjeson, Mattias Höjer, Karl-Henrik Dreborg, Tomas Ekvall, and Göran Finnveden. Scenario types and techniques: towards a user’s guide. *Futures*, 38(7):723–739, 2006.

- [55] Stefan Kruger Nielsen and Kenneth Karlsson. Energy scenarios: a review of methods, uses and suggestions for improvement. *International Journal of Global Energy Issues*, 27(3):302–322, 2007.
- [56] A. De Geus. Planning as learning. *Harvard business review*, pages 70–74, 1988.
- [57] International Energy Agency. World Energy Outlook 2021. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021/executive-summary>, 2021 (abgerufen am 02-09-2022).
- [58] Mohammad Sanusi Barkindo et al. World Oil Outlook 2045. *Organization of the Petroleum Exporting Countries*, 2021.
- [59] Amory B Lovins and Charles H Percy. Soft energy paths: Toward a durable peace. *Journal of Legislation*, 5:189.
- [60] Atle Midttun and Thomas Baumgartner. Negotiating energy futures the politics of energy forecasting. *Energy Policy*, 14(3):219–241, 1986.
- [61] Wirtschaftskammer Österreich. Politik und Wirtschaft fordern Anreize für Gebäudesanierung. <https://news.wko.at/news/oesterreich/Politik---Wirtschaft-fordern-Anreize-fuer-Gebaeudesanieru.html>, 2021 (abgerufen am 21-08-2022).
- [62] Angela Köppl, Stefan Schleicher, and Margit Schratzenstaller. CO2-Bepreisung in der Steuerreform 2022/2024. *Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung*, 2021.
- [63] Stadt Wien. Förderungsrichtlinie 2018 für saisonale Wärmespeicher mit Anergie-netz in Wien. <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/ahs-info/pdf/foerderrichtlinie-waermespeicher.pdf>, 2021 (abgerufen am 29-04-2022).
- [64] Stefan Brändle, Michel Haller, Luca Baldini, and Matthias Schlegel. Zu jeder Raumplanung gehört auch eine Energierichtplanung. *Forum Energiespeicher Schweiz*, 2022.
- [65] Carlos Pascual and Evie Zambetakis. The geopolitics of energy. *Energy Security: Economics, Politics, Strategies, and Implications*, pages 9–35, 2010.
- [66] Klaus Weyerstrass, Ines Fortin, Daniela Grozea-Helmenstein, and Sebastian P. Koch. Von der Pandemie zur Energiekrise–Wirtschaft und Politik im Dauerstress. Gemeinschaftsdiagnose Frühjahr 2022. *ifo Schnelldienst*, 75(05):58–63, 2022.
- [67] Benjamin Gschnell. Der Einfluss von gesellschaftlichen Veränderungen und demographischen Bedürfnissen auf das Wohnen in Österreich. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2019.
- [68] Eva Huber-Bachmann and Laura Bammer. Österreich: Zahlen - Daten - Fakten. *Statistik Austria*, 2022.
- [69] Katrin Schöber. Wohnen 2021 - Zahlen, Daten und Indikatoren der Wohnstatistik. *Statistik Austria*, 2022.
- [70] Deloitte. Erneuerbare Energien in Österreich - Der jährliche Stimmungsbarometer der österreichischen Bevölkerung zu erneuerbaren Energien. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/at/Documents/energy-resources/at-erneuerbare-energien-2022.pdf>, 2022 (abgerufen am 25-05-2022).
- [71] Marcel Hunziker, Annina Michel, and Matthias Buchecker. Landschaftsveränderungen durch erneuerbare Energien aus Sicht der Bevölkerung. *Forum für Wissen*, pages 43–49, 2014.
- [72] Bianca Zeller, Martin Baumann, and Herbert Tretter. Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten. *BMK*, 2021.

- [73] Johannes Chalupa. Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen 1995 - 2020. *Statistik Austria*, 2020.
- [74] Christoph Dolna-Gruber, Karina Knaus, and Lukas Zwieb. Stromgroßhandel - Preisentwicklung und wesentliche Einflussfaktoren. https://oesterreichsenergie.at/fileadmin/user_upload/Oesterreichs_Energie/Publicationsdatenbank/Studien/2022/AEA_Kurzanalyse_Stromgro%C3%9Fhandel_Update_vom_M%C3%A4rz_2022_v2.pdf, 2022 (abgerufen am 24-08-2022).
- [75] Hagen Luckert. Grundstückspreise in Österreich. <https://www.infina.at/ratgeber/grundstueckspreise-in-oesterreich-1/>, 2022 (abgerufen am 24-08-2022).
- [76] Hedwig Doloszeski. Branchenreport Mineralöl 2020/21. *Fachverband der Mineralölindustrie*, 2022.
- [77] Universität für Bodenkultur Wien. Energiemosaik Austria. <https://www.energiemosaik.at/>, 2021 (abgerufen am 01-07-2022).
- [78] RR Schmidt, R Tichler, C Amann, and I Schindler. F&E-Fahrplan Fernwärme und Fernkälte: Innovationen aus Österreich. *Wien: "Klima-und Energiefonds*, 2015.
- [79] Peter Biermayr et al. Energiespeicher in Österreich Marktentwicklung 2020. *BMK*, 2021.
- [80] Alessandra Salgado et al. Innovation outlook: Thermal energy storage. *International Renewable Energy Agency*, 2020.
- [81] Ena Dvorak et al. Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften. *Österreichische Koordinationsstelle für Energiegemeinschaften des Klima- und Energiefonds*, 2022.
- [82] H Kromp-Kolb, N Nakicenovic, A Pawloff, K Steinigner, and J Jäger. Austrian Assessment Report Climate Change 2014 (AAR14): Synopsis. Main Findings. *Austrian Academy of Sciences Press*, 2014.
- [83] Gerhard Scholz. Die Klima- und Energiestrategien der österreichischen Bundesländer. *Erneuerbare Energie Österreich*, 2021.
- [84] Erdwärme Wien. Rechtliche Grundlagen der Erdwärmennutzung in Österreich. <https://www.erdwaerme-wien.info/rechtliches/>, 2022 (abgerufen am 21-08-2022).
- [85] Edith Haslinger and Richard Niederbrucker. Erdwärme! voraus - Technologieleitfaden Erdwärme. *Magistrat der Stadt Wien*, 2017.
- [86] Per Dannemand Andersen, Meiken Hansen, and Cynthia Selin. Stakeholder inclusion in scenario planning—a review of european projects. *Technological Forecasting and Social Change*, 169:120802, 2021.
- [87] Andrej Drygalla, Franziska Exß, Katja Heinisch, Oliver Holtemöller, Martina Kämpfe, Boris Kozyrev, Axel Lindner, Isabella Müller, Alessandro Sardone, and Jan-Christopher Scherer. Krieg treibt Energiepreise: Hohe Inflation belastet Konjunktur. *Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung Halle (IWH)*, 10(2):36–65, 2022.
- [88] Statista Research Department. Durchschnittlicher Preis für Erdgas in Europa von Juli 2015 bis Juli 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1265554/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-erdgas-in-europa-monatlich/>, 2022 (abgerufen am 02-09-2022).
- [89] Johannes Goeke and Felix Krükel. Autarkie-Tendenzen der solarthermischen Selbstversorgung. *Bauphysik*, 39(2):114–120, 2017.
- [90] Henrik Lund, Sven Werner, Robin Wiltshire, Svend Svendsen, Jan Eric Thorsen, Frede Hvelplund, and Brian Vad Mathiesen. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68:1–11, 2014.

- [91] Florian Ruesch, Jakob Scherer, and Matthias Kolb. Erdreich als Speicher - große Anergienetze. *SIGES*, page 43, 2016.
- [92] Rolf Wüstenhagen, Maarten Wolsink, and Mary Jean Burer. Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy*, 35(5):2683–2691, 2007.
- [93] Christiane Zarfl, Jürgen Berlekamp, Fengzhi He, Sonja C Jähnig, William Darwall, and Klement Tockner. Future large hydropower dams impact global freshwater megafauna. *Scientific reports*, 9(1):1–10, 2019.
- [94] Dirk Meißner. Wissens- und Technologietransfer in nationalen Innovationssystemen. Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 2001.
- [95] Bert Metz, Ogunlade R Davidson, John K Turkson, Jan-Willem Martens, Sascha NM van Rooijen, and Laura van Wie McGrory. *Methodological and technological issues in technology transfer: a special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, 2000.
- [96] Stephen Peake. Technology without borders: case studies of successful technology transfer. *Organisation for Economic Cooperation and Development*, 2001.
- [97] Bundesministerium für Klimaschutz. Erneuerbare-Wärme-Gesetz. Ministerialentwurf betreffend Bundesgesetz zum Ausstieg aus der fossil betriebenen Wärmebereitstellung . https://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXVII/ME/ME_00212/index.shtml, 2022 (abgerufen am 29-09-2022).
- [98] Nora Catolico, Shemin Ge, and John McCartney. Numerical modeling of a soil-borehole thermal energy storage system. *Vadose Zone Journal*, 15, 01 2016.
- [99] Fernwärme Graz. Fernwärmepreise-gültig ab 1.4.2022. https://www.energie-graz.at/media/well-linked-media/egg-pdf/downloads_fernwarmer/sonstiges/preisblatt-fernwaerme.pdf, 2022 (abgerufen am 03-10-2022).
- [100] Alexander Fink and Quentin Ladetto. Die Zukunft der Raumfahrt und ihre Auswirkungen auf Sicherheit und militärische Operationen. https://deftech.ch/wp-content/uploads/2018/07/ScMI-Armasuisse_Zukunft-der-Raumfahrt_161216B.pdf, 2022 (abgerufen am 03-10-2022).
- [101] IG Windkraft. Strommkennzeichnung in Österreich. <https://www.igwindkraft.at/media.php?filename=download%3D%2F2020.12.03%2F1606984971071332.pdf&rn=20201203%20Stromkennzeichnung%20in%20%CC%88sterreich.pdf>, 2022 (abgerufen am 12-10-2022).
- [102] European Nuclear Society. Nuclear power plants in Europe . <https://www.euronuclear.org/glossary/nuclear-power-plants-in-europe/>, 2022 (abgerufen am 30-09-2022).
- [103] Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office. Hydrogen Storage. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>, 2022 (abgerufen am 05-10-2022).
- [104] Adolf, Jörg and Balzer, Christoph H and Louis, Jurgen and Schabla, Uwe and Fishedick, Manfred and Arnold, Karin and Pastowski, Andreas and Schüwer, Dietmar. Energie der Zukunft?: Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2. *Shell Deutschland Oil*, 2017.
- [105] Thyssenkrupp. Wasserstoff statt Kohle . <https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/newsroom/pressemitteilungen/wasserstoff-statt-kohle.html>, 2022 (abgerufen am 30-09-2022).
- [106] J Xu, Y Li, RZ Wang, and W Liu. Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. *Energy*, 67:63–73, 2014.

Tabellenverzeichnis

3.1	Vergleich von SSTES Systemen hinsichtlich Energiedichte, Speichereffizienz, Wärmegestehungskosten des gesamten Heizsystems, maximal speicherbarer Temperatur, Lebensdauer und Speichermedium	35
4.1	SWOT Analyse von Tankspeicher, Erdbeckenspeicher, Bohrlochwärmespeicher und Aquiferwärmespeicher	53
5.1	Liste der Projektionen von den festgelegten Schlüsselfaktoren	62
6.1	Technische Eigenschaften der SSTES Systeme für den Referenzfall	74
6.2	Wirtschaftliche Eigenschaften der SSTES Systeme für den Referenzfall	74
G.1	Änderung der Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall, wenn sich die Lebensdauer der Speicher um 5, 10, 15 oder 20 Jahre erhöht	104
G.2	Änderung der Wärmegestehungskosten und des Speichervolumens im Vergleich zum Referenzfall, wenn sich die Effizienz der Speicher um 2,5%, 5%, 7,5% oder 10 % erhöht	104
G.3	Änderung der Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall, wenn der Referenzzinssatz von 3% einen niedrigeren Wert von 1% oder 2% sowie einen höheren Wert von 4% oder 5% beträgt	105
G.4	Änderung der Rückzahlungsperiode im Vergleich zum Referenzfall, wenn sich der Wärmepreis jährlich um 5%, 10%, 15% oder 20 % erhöht	105

Abbildungsverzeichnis

2.1	Methodische Vorgehensweise im Rahmen der Diplomarbeit	3
2.2	Prinzip der Stakeholder Bewertung: Einfluss-Interesse-Matrix	5
2.3	Kombinierte SWOT-Matrix	8
2.4	Methodik des Szenario-Managements	9
2.5	Das Umfeld einer Technologie zur strategischen Analyse	10
2.6	Beispielhafte Wechselwirkungsanalyse zwischen unterschiedlichen Einflussfaktoren	12
2.7	Aktivität-Passivität-Diagramm	13
2.8	Projektionsentwicklungen auf Basis vom a) eindimensionalen Schlüsselfaktor, b) zweidimensionalen Schlüsselfaktor	14
2.9	Konsistenzmatrix zur Rohszenario-Bildung	15
2.10	a) Bildung von Projektionsbündel und b) Ermittlung des Konsistenzwertes von einem Projektionsbündeln	16
2.11	Beispielhafte Darstellung der Clusteranalyse (Zusammenfassung der Projektionsbündel) und des Scree-Diagramms	17
3.1	Sektorenkopplung und verschiedene Power-to-X-Technologien	21
3.2	Allgemeine Darstellung eines Energiesystems und der verwendeten Speichertechnologien	21
3.3	Übersicht über die verschiedenen Technologien zur Speicherung thermischer Energie	22

3.4	Unterschied in der gespeicherten Wärmemenge bei derselben Temperaturdifferenz zwischen sensiblen und latenten Wärmespeichern	23
3.5	Darstellung der Technologien zur saisonalen sensiblen thermischen Energiespeicherung: a) Tankspeicher (TTES), b) Erdbeckenspeicher (PTES), c) Bohrlochwärmespeicher (BTES) und d) Aquiferwärmespeicher (ATES)	24
3.6	Thermokline-Region, die heiße und kalte Wasserschichten voneinander trennt .	26
3.7	Wärmeverluste/Speicherkapazität-Verhältnis bezogen auf das Speichervolumen	28
3.8	Spezifische Investitionskosten von sensiblen saisonalen thermischen Energiespeichern vorhandener Projekte	31
3.9	Entscheidungsbaum für die Auswahl eines geeigneten sensiblen saisonalen thermischen Energiespeicher	34
3.10	Szenario-Typologie unterteilt in drei Kategorien und sechs Typen	38
4.1	Bewertung des Interesses und des Einflusses von Stakeholdern auf sensible saisonale thermische Energiespeicher	50
4.2	a) Quantitative Bewertung und b) qualitative Bewertung der sensiblen saisonalen thermischen Energiespeicher	54
5.1	Systematische Gliederung des Szenariofeldes in Einflussbereiche	59
5.2	Darstellung der Resultate aus der Wechselwirkungsmatrix	60
5.3	Scree Diagramm zur Bestimmung geeigneter Szenarioanzahl anhand eines prozentualen Informationsverlustes an Projektionen	64
5.4	Darstellung der Ausprägungen der Rohszenarien	65
5.5	Drei Rohszenarien zur Beschreibung der Entwicklung der Schlüsselfaktoren bezüglich SSTES Systeme	66
5.6	Räumliche Beziehungen und Clustering von Projektionsbündeln zu den drei Rohszenarien	68
5.7	Resultate aus der Bewertung der Szenarien	72
6.1	Einfluss der Lebensdauererhöhung auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall	75
6.2	Einfluss der Effizienzerhöhung auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall	76
6.3	Einfluss der Effizienzerhöhung auf das Speichervolumen im Vergleich zum Referenzfall	76
6.4	Einfluss der Erhöhung des Zinssatzes auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall	77
6.5	Einfluss der jährlichen Erhöhung des Wärmepreises auf die Rückzahlungsperiode im Vergleich zum Referenzfall	78
6.6	Einfluss der Reduktion der spezifischen Investitionskosten von den Speichern auf die Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall	78

Anhang

A Einflussfaktorenkatalog

Legende:

- Dimension (Unsicherheit)
- Dimensionsausprägung
- Trend

Technologische Stakeholder

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
1.	Forschung und Wissenschaft	→ Technologischer Fortschritt → Zusammenarbeit bzw. Kooperation zwischen der Forschung&Wissenschaft und der Industrie <ul style="list-style-type: none"> • Technologietransfer und technisches Know-how
2.	Hersteller	→ Wirtschaftliche Gewinne erzielen → Hohe Produktqualität leisten
3.	Installateure	→ Richtige Installation → Sicherstellung der Funktionsfähigkeit des Speichers → Rechtzeitige Behebung von technischen Problemen

Sozio-politische Stakeholder

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
4.	Ingenieur- und Planungsbüros	→ Informierung der Heimbewohner → Speicher mit der geringsten Komplexität bevorzugen → Zeit- und Budgetrestriktionen
5.	Energieförderer und -dienstleister	→ Zubau von Fernwärmenetzen → Zugang zu fossilen Energieträgern
6.	Politische Akteure	→ Dekarbonisierung der Energieversorgung → Rechtliche Rahmenbedingungen → Politische Entscheidungen im Einklang mit den europäischen Zielen
7.	Öffentliche Verwaltung	→ Genehmigungsverfahren <ul style="list-style-type: none"> • Dauer der Baugenehmigung → Kooperation und Zusammenarbeit zwischen einzelnen Bundesländern

Wirtschaftliche Stakeholder

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
8.	Immobilienbesitzer	→ Nachfrage nach Speichertechnologien → Energetischer Konsum und Bedarf → Wirtschaftliche Vorteile (Betriebskosten) → Akzeptanz der Speichertechnologie
9.	Mieter	→ Energetischer Konsum und Bedarf → Einfluss auf die Betriebskosten → Akzeptanz der Speichertechnologie
10.	Grundbesitzer	→ Verkaufen oder Verpachten des Landes → Einfluss auf die Investitionskosten → Einfluss auf die Raumplanung

Politik

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
11.	CO ₂ -Bepreisung	→ Anstieg der Treibstoffpreise → Besteuerung von nachhaltigen Kraftstoffen <ul style="list-style-type: none"> • Steuerbegünstigungen → Einführung von einem Emissionszertifikatehandelssystem → Senkung des Körperschaftsteuersatzes ➤ Jährlich steigende Preise der Emissionszertifikate bis 2025; Steigende Preise der Treibstoffe aufgrund CO ₂ -Bepreisung
12.	Steigerung der Gebäudeenergieeffizienz	→ Primärenergieintensität von Gebäuden verbessern → Thermische Sanierung von Gebäuden → Verwendung von Speichertechnologien und Bauteilkernaktivierung → Deckung des Wärme- und Kühlbedarfs neu errichteter Gebäuden weitestgehend ohne fossile Brennstoffe – jedenfalls ohne Öl <ul style="list-style-type: none"> • Sukzessive Verdrängung von fossilen Energieträgern ➤ Verdopplung der Sanierungsrate in der Periode 2020-2030; Keine Ölkessel im Neubau seit 2020
13.	Staatliche Förderung	→ Bundesweite Förderungsprogramme → Art der Förderung für Speicher <ul style="list-style-type: none"> • Zuschuss • Darlehen → Steuerliche Förderung im Gebäudesektor <ul style="list-style-type: none"> • Beim Ersatz eines fossilen Heizungssystems durch ein nachhaltiges Heizungssystem • Bei thermischer Gebäudesanierung
14.	Raumplanung	→ Baudichte von Fernwärme und Kältenetze → Ortsabhängigkeit der erneuerbaren Energiequellen und Speicher <ul style="list-style-type: none"> • Platzbedarf
15.	Geopolitik	→ Entwicklung der geopolitischen Konflikte → Einfluss auf die Energieversorgung <ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit wichtiger Energieressourcen und Zunahme der Energiepreise ➤ Geopolitisches Konflikt Russland-Ukraine

Gesellschaft

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
16.	Bevölkerungsstruktur und Urbanisierung	<ul style="list-style-type: none"> → Wohnfläche pro Person → Bevölkerungs- und Arbeitsplatzdichte <ul style="list-style-type: none"> • Energieverbrauch in privaten Haushalten und gewerblichen Gebäuden → Bevölkerungsanzahl <ul style="list-style-type: none"> • Anzahl an Haushalten → Demographischer Wandel → Bevölkerungsbewegung innerhalb der Städte <ul style="list-style-type: none"> • Konzentration des Bevölkerungswachstums im Stadtkern • Suburbanisierung - Abwanderung von der Stadt auf die umliegenden Gebiete und Dörfer ➤ Steigende Bevölkerungszahl und Wohnfläche pro Person ➤ Steigender Trend zum Wohnen im Stadtumland aufgrund der Corona Pandemie
17.	Technologieakzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> → Investitionsbereitschaft in einer erneuerbaren Wärmeversorgung → Soziale Akzeptanz der Speichertechnologien → Bewusstsein für den Klimawandel → Rolle der Medien <ul style="list-style-type: none"> • Informierung der Öffentlichkeit → Informations- und Bewusstseinsbildungsaktivitäten sowie Beratungen ➤ Anstieg des Anteils der Eigenheimbesitzerinnen und -besitzer, die bereits über eine erneuerbare Wärmeversorgung nachgedacht haben ➤ Hohe Akzeptanz der erneuerbaren Energie, starkes Bewusstsein in der Bevölkerung für die Auswirkungen des Klimawandels in Österreich ➤ Die Zustimmung in der Bevölkerung für einen Einbaustopp für neue Öl- und Gasheizungen deutlich zugenommen
18.	Wohnkosten	<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung der Betriebskosten <ul style="list-style-type: none"> • Energiekosten → Entwicklung der Immobilienkosten ➤ Kontinuierlicher jährlicher Anstieg der Wohnkosten in Österreich

Wirtschaft

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
19.	Wärmegestehungskosten	<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung der Energiepreise → Entwicklung der Investitionskosten der SSTES Systeme ➤ Steigende Energiepreise seit Anfang September 2021
20.	Wirtschaftswachstum	<ul style="list-style-type: none"> → Gewinnung neuer Investitionen in Speichertechnologien → Schaffung neuer Arbeitsplätze im Energiebereich
21.	Inflation	<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung der Zinsen → Entwicklung der Konsumpreise ➤ Stand März 2022 beträgt die Inflation 6,8% in Österreich
22.	Energieimporte und -exporte	<ul style="list-style-type: none"> → Energieimporte <ul style="list-style-type: none"> • Diversifikation und Versorgungssicherheit → Energieexporte <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung des Stromexports und des Kraftstoffexports ➤ Stand 2022: Voraussichtliches Embargo auf russisches Öl, Verringerung oder vollständiger Verzicht auf den Import des russischen Erdgases

Technologie

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
23.	Wärmeversorgungsnetz	<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung der Fernwärme- und Nahwärmenetze <ul style="list-style-type: none"> • Wärmenachfrage bzw. Wärmebedarf → Entwicklung der Anergienetze <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der Wärmepumpen
24.	Wärmeerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung der Wärmeerzeugung durch fossile Energieträger → Entwicklung der Wärmeerzeugung durch erneuerbare Energieträger → Entwicklung der Wärmeerzeugungsanlagen <ul style="list-style-type: none"> • Blockheizkraftwerke • Müllverbrennungsanlagen • Geothermie-Anlagen
25.	Sektorenkopplung	<ul style="list-style-type: none"> → Kopplung des Strom- und Wärmesektors (Power-to-Heat) <ul style="list-style-type: none"> • Umwandlung der Stromenergie in Wärme bei Strom-Überproduktion • Senkung des Energieverbrauches durch Kopplung → Entwicklung der Stromerzeugung <ul style="list-style-type: none"> • Volatilität
26.	Konkurrierende Technologien	<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung der Kosten und Effizienz von latenten Wärmespeichern → Entwicklung der Kosten und Effizienz von thermochemischen Wärmespeichern ➤ 2030 Prognose: Latente Wärmespeicher: Speichereffizienzpotential von (92%) erreicht, Senkung der Kosten und Erhöhung der Lebensdauer ➤ 2030 Prognose: Thermochemische Wärmespeicher: Änderung der Speichereffizienz unbekannt, Senkung der Kosten und Erhöhung der Lebensdauer
27.	Energiegemeinschaften	<ul style="list-style-type: none"> → Motivation zur Errichtung einer Energiegemeinschaft <ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftliches Nutzen: Gewinne oder Verluste erzielen → Entwicklung der Anzahl der Energiegemeinschaften → Dezentralisierung des Energiesystems <ul style="list-style-type: none"> • Consumer und Prosumer

Umwelt

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
28.	Klimawandel und Treibhausgas - Emissionen	<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung der Erderwärmung <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der Temperaturen • Entwicklung der Kühlnachfrage → Doppelte Anwendung von Speichern ➤ Kühlung wird immer mehr an Bedeutung gewinnen
29.	Geologische und Hydrologische Bedingungen	<ul style="list-style-type: none"> → Ortsabhängigkeit von Speichern → Möglichkeit zur Verwendung der Speicheroberfläche während des Betriebs

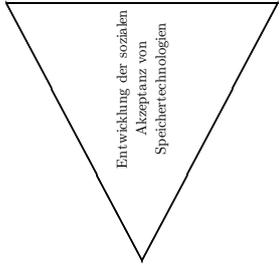
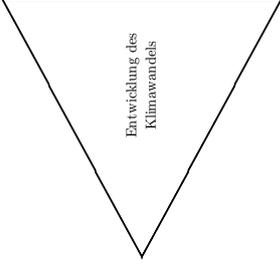
Recht

Nr.	Faktorname	Dimensionen (Dimensionsausprägung) / Trends
30.	Rechtliche Erdwärmenutzung	<ul style="list-style-type: none"> → Dauer des Genehmigungsprozesses → Thermische Grundwassernutzung → Erdwärmenutzung mit geschlossenen Systemen

Anmerkung: Eine vollständige Beschreibung der Einflussfaktoren ist in den Kapiteln 4.1 und 4.2 zu finden

C Projektionen

<p>Wärmegestehungskosten in 2040</p> <table border="1"> <tr> <td>Projektion 1A Abnahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme</td> <td>Projektion 1B Abnahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme</td> </tr> <tr> <td>Projektion 1C Zunahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme</td> <td>Projektion 1D Zunahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme</td> </tr> </table> <p>Konstant Entwicklung der Investitionskosten für SSTES Systeme</p> <p>Politische Akteure in 2040</p> <table border="1"> <tr> <td>Projektion 4A Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors trotz verbesserter Nachhaltigkeitspolitik</td> <td>Projektion 4B Erreichte Klimaneutralität durch verbesserte Nachhaltigkeitspolitik</td> </tr> <tr> <td>Projektion 4C Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors und keine verbesserte Nachhaltigkeitspolitik</td> <td>Projektion 4D Erreichte Klimaneutralität bei keiner Änderung der verbesserten Nachhaltigkeitspolitik</td> </tr> </table> <p>nicht erreicht Entwicklung der Dekarbonisierungsziele</p> <p>Raumplanung in 2040</p> <table border="1"> <tr> <td>Projektion 7A Starke Landnutzungskonflikte</td> <td>Projektion 7B Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Grundstückspreise</td> </tr> <tr> <td>Projektion 7C Mangel an verfügbarem Platz für die Energieinfrastruktur</td> <td>Projektion 7D Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Abnahme der Grundstückspreise</td> </tr> </table> <p>gering Entwicklung der Grundstückspreise</p> <p>Abnahme Verfügbarer Platz für die Energieinfrastruktur</p>	Projektion 1A Abnahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme	Projektion 1B Abnahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme	Projektion 1C Zunahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme	Projektion 1D Zunahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme	Projektion 4A Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors trotz verbesserter Nachhaltigkeitspolitik	Projektion 4B Erreichte Klimaneutralität durch verbesserte Nachhaltigkeitspolitik	Projektion 4C Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors und keine verbesserte Nachhaltigkeitspolitik	Projektion 4D Erreichte Klimaneutralität bei keiner Änderung der verbesserten Nachhaltigkeitspolitik	Projektion 7A Starke Landnutzungskonflikte	Projektion 7B Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Grundstückspreise	Projektion 7C Mangel an verfügbarem Platz für die Energieinfrastruktur	Projektion 7D Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Abnahme der Grundstückspreise	<p>Forschung und Wissenschaft</p> <p>Entwicklung des Technologietransfers von Speichertechnologien</p> <p>Projektion 2A Erfolgreicher Technologie- und Wissenstransfer von SSTES Technologien - Entwicklung von hocheffizienter Innovation bei SSTES Systemen</p> <p>Projektion 2B Mangelhafter Technologie- und Wissenstransfer von SSTES Technologien - Langsame Entwicklung von Innovation</p> <p>2040</p> <p>Immobilienbesitzer</p> <p>Entwicklung der Nachfrage nach SSTES Systeme im Gebäudebereich</p> <p>Projektion 5A Hohes Interesse an Speichertechnologien</p> <p>Projektion 5B Moderates Interesse an Speichertechnologien</p> <p>Projektion 5C Geringes Interesse an Speichertechnologien</p> <p>2040</p> <p>Geopolitik</p> <p>Entwicklung der Geopolitik</p> <p>2040</p>	<p>Energieeffizienten und -dienstleister in 2040</p> <table border="1"> <tr> <td>Projektion 3A Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch fossile Energieträger in dichtbesiedelten Regionen</td> <td>Projektion 3B Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch alternative Energieträger in dichtbesiedelten Regionen</td> </tr> <tr> <td>Projektion 3C Wärmeversorgung primär durch dezentrale fossile Heizsysteme in allen Regionen</td> <td>Projektion 3D Wärmeversorgung primär durch dezentrale alternativ betriebene Heizsysteme in allen Regionen</td> </tr> </table> <p>Zunahme von Fernwärmemetze gering</p> <p>hoch Zugang zu fossilen Energieträger</p> <p>gering</p> <p>Steuerung der Gebäudematerialeffizienz</p> <p>Entwicklung der Gebäudesanierung</p> <p>Projektion 6A Hohe Sanierungsrate - deutlich über 1,5 % pro Jahr</p> <p>Projektion 6B Kontinuierliche Sanierungsrate von 1,5 % pro Jahr</p> <p>Projektion 6C Geringe Sanierungsrate - deutlich unter 1,5 % pro Jahr</p> <p>2040</p>	Projektion 3A Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch fossile Energieträger in dichtbesiedelten Regionen	Projektion 3B Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch alternative Energieträger in dichtbesiedelten Regionen	Projektion 3C Wärmeversorgung primär durch dezentrale fossile Heizsysteme in allen Regionen	Projektion 3D Wärmeversorgung primär durch dezentrale alternativ betriebene Heizsysteme in allen Regionen
Projektion 1A Abnahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme	Projektion 1B Abnahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme																	
Projektion 1C Zunahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten der SSTES Systeme	Projektion 1D Zunahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme																	
Projektion 4A Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors trotz verbesserter Nachhaltigkeitspolitik	Projektion 4B Erreichte Klimaneutralität durch verbesserte Nachhaltigkeitspolitik																	
Projektion 4C Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors und keine verbesserte Nachhaltigkeitspolitik	Projektion 4D Erreichte Klimaneutralität bei keiner Änderung der verbesserten Nachhaltigkeitspolitik																	
Projektion 7A Starke Landnutzungskonflikte	Projektion 7B Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Grundstückspreise																	
Projektion 7C Mangel an verfügbarem Platz für die Energieinfrastruktur	Projektion 7D Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Abnahme der Grundstückspreise																	
Projektion 3A Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch fossile Energieträger in dichtbesiedelten Regionen	Projektion 3B Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch alternative Energieträger in dichtbesiedelten Regionen																	
Projektion 3C Wärmeversorgung primär durch dezentrale fossile Heizsysteme in allen Regionen	Projektion 3D Wärmeversorgung primär durch dezentrale alternativ betriebene Heizsysteme in allen Regionen																	
<p>Zunahme Entwicklung der Grundnutzungspreise</p> <p>Abnahme Entwicklung der Grundnutzungspreise</p>	<p>Zunahme Entwicklung der Urbanisierung</p> <p>Abnahme</p>	<p>jetzt</p> <p>2040</p> <p>jetzt</p> <p>2040</p>																
<p>Zunahme Entwicklung der Grundnutzungspreise</p> <p>Abnahme Entwicklung der Grundnutzungspreise</p>	<p>Zunahme Entwicklung der Urbanisierung</p> <p>Abnahme</p>	<p>jetzt</p> <p>2040</p> <p>jetzt</p> <p>2040</p>																

<p><u>Technologieakzeptanz</u></p>  <p>Projektion 10A Zunahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systeme Projektion 10B Konstante soziale Akzeptanz von SSTES Systeme Projektion 10C Abnahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systeme</p> <p>jetzt 2040</p>	<p><u>Wärmeversorgungsnetz</u></p> <p>Projektion 11A Effizienzsteigerung von bestehenden Fernwärmenetzen durch verbesserter Wärmedämmung Projektion 11B Integration von hocheffizienten Hochtemperatur-Wärmepumpen in sanierten Altbaugebäuden Projektion 11C Keine Effizienzverbesserung der Fernwärmenetze - Status quo Projektion 11D Durchsetzen von Anergienetzen in der Wärmeversorgungsinfrastruktur</p> <p>hoch Entwicklung der Wärmebedarfs gering</p> <p>Entwicklung der Anergienetze hoch</p>	<p><u>Sektorkopplung</u></p> <p>Projektion 12A Durchsetzen von Power-to-Heat-Anlagen: Wasserstoff und Methan als Hauptenergieträger für den Wärmesektor Projektion 12B Durchsetzen von Power-to-Heat-Anlagen: Hocheffiziente Wärmepumpen decken primär den Wärmebedarf Projektion 12C Renaissance der Kernenergie Projektion 12D Schwache Kopplung des Strom- und Wärmesektors bei primär volatiler Stromerzeugung</p> <p>hoch Entwicklung der Sektorkopplung gering</p> <p>primär stabil Entwicklung der Stromerzeugung primär volatil</p>			
<p><u>Konkurrierende Technologien</u></p> <p>Projektion 13A Erhebliche Effizienzsteigerung der latenten und thermochemischen Energiespeicher Projektion 13B Technologischer Durchbruch hinsichtlich Effizienz und Kosten bei den latenten und thermochemischen Energiespeicher Projektion 13C Keine Entwicklung der latenten und thermochemischen Energiespeicher Projektion 13D Erhebliche Kostensenkung der latenten und thermochemischen Energiespeicher</p> <p>hoch Entwicklung der Effizienz der konkurrierenden Technologien gering</p> <p>konstant Entwicklung der Kosten der konkurrierenden Technologien Abnahme</p>	<p><u>Energiegemeinschaften</u></p> <p>Projektion 14A Stark geförderte rein ökologisch orientierte Energiegemeinschaften Projektion 14B Große Anzahl an sowohl ökologisch als auch gewinnorientierten Energiegemeinschaften Projektion 14C Energiegemeinschaften sind unattraktiv Projektion 14D Geringe Anzahl an ertragsorientierten Energiegemeinschaften</p> <p>hoch Entwicklung der Anzahl von Energiegemeinschaften gering</p> <p>Motivation zur Errichtung einer Energiegemeinschaft hoch</p>	<p><u>Klimawandel und Treibhausgas - Emissionen</u></p>  <p>Projektion 15A Geringe Erderwärmung bis auf 1,5°C Projektion 15B Moderate Erderwärmung zwischen 1,5 und 2,0 °C Projektion 15C Starke Erderwärmung über 2,0 °C</p> <p>jetzt 2040</p>			

D Konsistenzmatrix

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version

Konsistenzmatrix		Wie konsistent ist die Projektion i (Zeile) mit der Projektion j (Spalte) ?																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		1A	1B	1C	1D	1E	1F	1G	1H	1I	1J	1K	1L	1M	1N	1O	1P	1Q	1R	1S	1T	1U	1V	1W	1X	1Y	1Z	1AA	1AB	1AC	1AD	1AE	1AF	1AG	1AH	1AI	1AJ	1AK	1AL	1AM	1AN	1AO	1AP	1AQ	1AR	1AS	1AT	1AU	1AV	1AW	1AX	1AY	1AZ	1BA	1BB	1BC	1BD	1BE	1BF	1BG	1BH	1BI	1BJ	1BK	1BL	1BM	1BN	1BO	1BP	1BQ	1BR	1BS	1BT	1BU	1BV	1BW	1BX	1BY	1BZ	1CA	1CB	1CC	1CD	1CE	1CF	1CG	1CH	1CI	1CJ	1CK	1CL	1CM	1CN	1CO	1CP	1CQ	1CR	1CS	1CT	1CU	1CV	1CW	1CX	1CY	1CZ	1DA	1DB	1DC	1DD	1DE	1DF	1DG	1DH	1DI	1DJ	1DK	1DL	1DM	1DN	1DO	1DP	1DQ	1DR	1DS	1DT	1DU	1DV	1DW	1DX	1DY	1DZ	1EA	1EB	1EC	1ED	1EE	1EF	1EG	1EH	1EI	1EJ	1EK	1EL	1EM	1EN	1EO	1EP	1EQ	1ER	1ES	1ET	1EU	1EV	1EW	1EX	1EY	1EZ	1FA	1FB	1FC	1FD	1FE	1FF	1FG	1FH	1FI	1FJ	1FK	1FL	1FM	1FN	1FO	1FP	1FQ	1FR	1FS	1FT	1FU	1FV	1FW	1FX	1FY	1FZ	1GA	1GB	1GC	1GD	1GE	1GF	1GG	1GH	1GI	1GJ	1GK	1GL	1GM	1GN	1GO	1GP	1GQ	1GR	1GS	1GT	1GU	1GV	1GW	1GX	1GY	1GZ	1HA	1HB	1HC	1HD	1HE	1HF	1HG	1HH	1HI	1HJ	1HK	1HL	1HM	1HN	1HO	1HP	1HQ	1HR	1HS	1HT	1HU	1HV	1HW	1HX	1HY	1HZ	1IA	1IB	1IC	1ID	1IE	1IF	1IG	1IH	1II	1IJ	1IK	1IL	1IM	1IN	1IO	1IP	1IQ	1IR	1IS	1IT	1IU	1IV	1IW	1IX	1IY	1IZ	1JA	1JB	1JC	1JD	1JE	1JF	1JG	1JH	1JI	1JJ	1JK	1JL	1JM	1JN	1JO	1JP	1JQ	1JR	1JS	1JT	1JU	1JV	1JW	1JX	1JY	1JZ	1KA	1KB	1KC	1KD	1KE	1KF	1KG	1KH	1KI	1KJ	1KK	1KL	1KM	1KN	1KO	1KP	1KQ	1KR	1KS	1KT	1KU	1KV	1KW	1KX	1KY	1KZ	1LA	1LB	1LC	1LD	1LE	1LF	1LG	1LH	1LI	1LJ	1LK	1LL	1LM	1LN	1LO	1LP	1LQ	1LR	1LS	1LT	1LU	1LV	1LW	1LX	1LY	1LZ	1MA	1MB	1MC	1MD	1ME	1MF	1MG	1MH	1MI	1MJ	1MK	1ML	1MN	1MO	1MP	1MQ	1MR	1MS	1MT	1MU	1MV	1MW	1MX	1MY	1MZ	1NA	1NB	1NC	1ND	1NE	1NF	1NG	1NH	1NI	1NJ	1NK	1NL	1NM	1NO	1NP	1NQ	1NR	1NS	1NT	1NU	1NV	1NW	1NX	1NY	1NZ	1OA	1OB	1OC	1OD	1OE	1OF	1OG	1OH	1OI	1OJ	1OK	1OL	1OM	1ON	1OO	1OP	1OQ	1OR	1OS	1OT	1OU	1OV	1OW	1OX	1OY	1OZ	1PA	1PB	1PC	1PD	1PE	1PF	1PG	1PH	1PI	1PJ	1PK	1PL	1PM	1PN	1PO	1PP	1PQ	1PR	1PS	1PT	1PU	1PV	1PW	1PX	1PY	1PZ	1QA	1QB	1QC	1QD	1QE	1QF	1QG	1QH	1QI	1QJ	1QK	1QL	1QM	1QN	1QO	1QP	1QQ	1QR	1QS	1QT	1QU	1QV	1QW	1QX	1QY	1QZ	1RA	1RB	1RC	1RD	1RE	1RF	1RG	1RH	1RI	1RJ	1RK	1RL	1RM	1RN	1RO	1RP	1RQ	1RR	1RS	1RT	1RU	1RV	1RW	1RX	1RY	1RZ	1SA	1SB	1SC	1SD	1SE	1SF	1SG	1SH	1SI	1SJ	1SK	1SL	1SM	1SN	1SO	1SP	1SQ	1SR	1SS	1ST	1SU	1SV	1SW	1SX	1SY	1SZ	1TA	1TB	1TC	1TD	1TE	1TF	1TG	1TH	1TI	1TJ	1TK	1TL	1TM	1TN	1TO	1TP	1TQ	1TR	1TS	1TT	1TU	1TV	1TW	1TX	1TY	1TZ	1UA	1UB	1UC	1UD	1UE	1UF	1UG	1UH	1UI	1UJ	1UK	1UL	1UM	1UN	1UO	1UP	1UQ	1UR	1US	1UT	1UU	1UV	1UW	1UX	1UY	1UZ	1VA	1VB	1VC	1VD	1VE	1VF	1VG	1VH	1VI	1VJ	1VK	1VL	1VM	1VN	1VO	1VP	1VQ	1VR	1VS	1VT	1VU	1VV	1VW	1VX	1VY	1VZ	1WA	1WB	1WC	1WD	1WE	1WF	1WG	1WH	1WI	1WJ	1WK	1WL	1WM	1WN	1WO	1WP	1WQ	1WR	1WS	1WT	1WU	1WV	1WW	1WX	1WY	1WZ	1XA	1XB	1XC	1XD	1XE	1XF	1XG	1XH	1XI	1XJ	1XK	1XL	1XM	1XN	1XO	1XP	1XQ	1XR	1XS	1XT	1XU	1XV	1XW	1XX	1XY	1XZ	1YA	1YB	1YC	1YD	1YE	1YF	1YG	1YH	1YI	1YJ	1YK	1YL	1YM	1YN	1YO	1YP	1YQ	1YR	1YS	1YT	1YU	1YV	1YW	1YX	1YY	1YZ	1ZA	1ZB	1ZC	1ZD	1ZE	1ZF	1ZG	1ZH	1ZI	1ZJ	1ZK	1ZL	1ZM	1ZN	1ZO	1ZP	1ZQ	1ZR	1ZS	1ZT	1ZU	1ZV	1ZW	1ZX
Abnahme der Energiepreise mit hohen Investitionskosten der SSTES Systeme	Abnahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme	Abnahme der Energiepreise mit hohen Investitionskosten der SSTES Systeme	Zunahme der Energiepreise mit hohen Investitionskosten der SSTES Systeme	Zunahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten der SSTES Systeme	Erfolgreiche Technologie- und Wissensstrategie von SSTES Technologie - Entwicklung von hocheffizienter Innovation bei SSTES Systemen	Mangelsache Technologie- und Wissensstrategie von SSTES Technologie - Langsame Entwicklung von Innovation	Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch fossile Energieträger in dichtbesiedelten Regionen	Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch alternative Energieträger in dichtbesiedelten Regionen	Wärmeversorgung primär durch dezentrale fossile Heizsysteme in allen Regionen	Wärmeversorgung primär durch dezentrale alternative betriebene Heizsysteme in allen Regionen	Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors trotz verbesserter Nachhaltigkeitspolitik	Erreichte Klimaneutralität durch verbesserte Nachhaltigkeitspolitik	Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors und hohe verbesserter Nachhaltigkeitspolitik	Erreichte Klimaneutralität bei hoher Änderung der Nachhaltigkeitspolitik	Hohes Interesse an Speichertechnologien	Moderates Interesse an Speichertechnologien	Geringes Interesse an Speichertechnologien	Hohe Sektorkopplungsrate - deutlich über 1,5 % pro Jahr	Kontinuierliche Sektorkopplungsrate von 1,5 % pro Jahr	Geringe Sektorkopplungsrate - deutlich unter 1,5 % pro Jahr	Starke Landnutzungs Konflikte	Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Zunahme der Grundstückspreise	Mangel an verfügbarem Platz für die Energieinfrastruktur	Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Abnahme der Grundstückspreise	Geopolitische Stabilität - Zuverlässige globale Energieversorgung	Geopolitische Konflikte - Globale Lieferketten und Energieversorgung unter Druck	Zunahme der Urbanisierung und Abnahme des aktuellen Wärmebedarfs	Zunahme der Urbanisierung und Zunahme des aktuellen Wärmebedarfs	Substanzierung und Abnahme des aktuellen Wärmebedarfs	Substanzierung und Zunahme des aktuellen Wärmebedarfs	Zunahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systemen	Konstante soziale Akzeptanz von SSTES Systemen	Abnahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systemen	Effizienzsteigerung von bestehenden Fernwärmenetzen durch verbesserte Wärmedämmung	Integration von hocheffizienten Hochtemperatur-Wärmepumpen in anderen Altsiedlungsgebieten	Hohe Effizienzverbesserung der Fernwärmenetze - Status quo	Durchsetzen von Aneignern in der Wärmeversorgungsinfrastruktur	Durchsetzen von Power-to-Gas-Anliegen, Wasserstoff und Methan als Hauptenergieträger für den Wärmesektor	Durchsetzen von Power-to-Hydrogen-Hoheffiziente Wärmepumpen decken primär den Wärmebedarf	Renanzieren der Kernenergie	Scheitern der Kopplung des Strom- und Wärmesektors bei primär volatiler Stromerzeugung	Erhebliche Effizienzsteigerung der kalten und thermochemischen Energiespeicher	Technologischer Durchbruch hinsichtlich Effizienz und Kosten bei den kalten und thermochemischen Energiespeicher	Keine Entwicklung der kalten und thermochemischen Energiespeicher	Erhebliche Kostensteigerung der kalten und thermochemischen Energiespeicher	Starke gezielte rein ökologisch orientierte Energiegemeinschaften	Große Anzahl an sozial ökologisch als auch gemeinwohlorientierten Energiegemeinschaften	Energiegemeinschaften sind unattraktiv	Geringe Anzahl an sozial orientierten Energiegemeinschaften	Geringe Erdwärmeleistung bis auf 12 °C	Moderate Erdwärmeleistung zwischen 15 und 20 °C	Hohe Erdwärmeleistung über 20 °C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

Anmerkung: Selbständige Bewertung der Matrix basierend auf in dieser Arbeit erlangten Erkenntnissen

E Fragebogen

Umfrage zu der Zukunft von sensibler saisonaler thermischer Energiespeicherung (SSTES) bis zum Jahr 2040

Inwieweit stimmen die folgenden Zukunftsprojektionen mit der jetzigen, erwarteten und gewünschten Situation überein ?

Bitte füllen Sie Ihre Bewertung in den unten liegenden Zellen anhand folgender Skala von

Gewünschte Zukunft	Erwartete Zukunft	Gegenwärtige Situation
5 = Ideale Zukunft 4 = Gute Zukunft 3 = Neutrale Zukunft 2 = Negative Zukunft 1 = Katastrophale Zukunft	5 = Das ist die Zukunft 4 = Gut möglich 3 = Möglich 2 = Nicht gut denkbar 1 = Nahezu undenkbar	5 = Stimme vollständig zu 4 = Stimme zu 3 = Stimme weder zu noch lehne ab 2 = Stimme nicht zu 1 = Stimme überhaupt nicht zu

Schlüsselfaktor	Mögliche Entwicklungen (Zukunftsprojektionen) der Schlüsselfaktoren bis zum Jahr 2040			
Wärmegestehungskosten	1A Abnahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten für SSTES Technologien im Jahr 2040			
	1B Abnahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten für SSTES Technologien im Jahr 2040			
	1C Zunahme der Energiepreise mit konstanten Investitionskosten für SSTES Technologien im Jahr 2040			
	1D Zunahme der Energiepreise mit reduzierten Investitionskosten für SSTES Technologien im Jahr 2040			
Forschung und Wissenschaft	2A Erfolgreicher Technologie- und Wissenstransfer von SSTES Technologien - Entwicklung von hocheffizienter Innovation bei SSTES Systemen			
	2B Mangelhafter Technologie- und Wissenstransfer von SSTES Technologien - Langsame Entwicklung von Innovation			
Energielieferanten und -dienstleister	3A Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch fossile Energieträger in dichtbesiedelten Regionen im Jahr 2040			
	3B Zentralisierte Fernwärmeversorgung primär durch alternative Energieträger in dichtbesiedelten Regionen im Jahr 2040			
	3C Wärmeversorgung primär durch dezentrale fossile Heizsysteme in allen Regionen im Jahr 2040			
Politische Akteure	3D Wärmeversorgung primär durch dezentrale alternativ betriebene Heizsysteme in allen Regionen im Jahr 2040			
	4A Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors trotz verbesserter Nachhaltigkeitspolitik im Jahr 2040			
	4B Erreichte Klimaneutralität durch verbesserte Nachhaltigkeitspolitik im Jahr 2040			
	4C Verzögerte Dekarbonisierung des Wärmesektors und keine verbesserte Nachhaltigkeitspolitik im Jahr 2040			
Immobilienbesitzer	4D Erreichte Klimaneutralität bei keiner Änderung der Nachhaltigkeitspolitik im Jahr 2040			
	5A Hohes Interesse an Speichertechnologien im Jahr 2040			
	5B Moderates Interesse an Speichertechnologien im Jahr 2040			
Steigerung der Gebäudeenergieeffizienz	5C Geringes Interesse an Speichertechnologien im Jahr 2040			
	6A Hohe Sanierungsrate - deutlich über 1,5 % pro Jahr im Jahr 2040			
	6B Kontinuierliche Sanierungsrate von 1,5 % pro Jahr im Jahr 2040			
Raumplanung	6C Geringe Sanierungsrate - deutlich unter 1,5 % pro Jahr im Jahr 2040			
	7A Starke Landnutzungskonflikte im Jahr 2040			
	7B Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Zunahme der Grundstückspreise im Jahr 2040			
	7C Mangel an verfügbarem Platz für die Energieinfrastruktur im Jahr 2040			
Geopolitik	7D Günstige Raumplanung für die Energieinfrastruktur und Abnahme Grundstückspreise im Jahr 2040			
	8A Geopolitische Stabilität - Zuverlässige globale Energieversorgung im Jahr 2040			
	8B Geopolitische Konflikte - Globale Lieferketten und Energieversorgung unter Druck im Jahr 2040			
Bevölkerungsstruktur und Urbanisierung	9A Zunahme der Urbanisierung und Abnahme des aktuellen Wärmebedarfs im Jahr 2040			
	9B Zunahme der Urbanisierung und Zunahme des aktuellen Wärmebedarfs im Jahr 2040			
	9C Suburbanisierung und Abnahme des aktuellen Wärmebedarfs im Jahr 2040			
	9D Suburbanisierung und Zunahme des aktuellen Wärmebedarfs im Jahr 2040			
Technologieakzeptanz	10A Zunahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systemen im Jahr 2040			
	10B Konstante soziale Akzeptanz von SSTES Systemen im Jahr 2040			
	10C Abnahme der sozialen Akzeptanz von SSTES Systemen im Jahr 2040			
Wärmeversorgungsnetz	11A Effizienzsteigerung von bestehenden Fernwärmenetzen durch verbesserte Wärmedämmung im Jahr 2040			
	11B Integration von hocheffizienten Hochtemperatur-Wärmepumpen in sanierten Altbaugebäuden im Jahr 2040			
	11C Keine Effizienzverbesserung der Fernwärmenetze - Status quo im Jahr 2040			
	11D Durchsetzen von Anergienetzen in der Wärmeversorgungsinfrastruktur im Jahr 2040			
Sektorenkopplung	12A Durchsetzen von Power-to-Gas-Anlagen: Wasserstoff und Methan als Hauptenergieträger für den Wärmesektor im Jahr 2040			
	12B Durchsetzen von Power-to-Heat-Anlagen: Hocheffiziente Wärmepumpen decken primär den Wärmebedarf im Jahr 2040			
	12C Renaissance der Kernenergie im Jahr 2040			
Konkurrierende Technologien	12D Schwache Kopplung des Strom- und Wärmesektors bei primär volatiler Stromerzeugung im Jahr 2040			
	13A Erhebliche Effizienzsteigerung der latenten und thermochemischen Energiespeicher im Jahr 2040			
	13B Technologischer Durchbruch hinsichtlich Effizienz und Kosten bei den latenten und thermochemischen Energiespeichern im Jahr 2040			
	13C Keine Entwicklung der latenten und thermochemischen Energiespeicher im Jahr 2040			
Energiegemeinschaften	13D Erhebliche Kostensenkung der latenten und thermochemischen Energiespeicher im Jahr 2040			
	14A Stark geförderte rein ökologisch orientierte Energiegemeinschaften im Jahr 2040			
	14B Große Anzahl an sowohl ökologisch als auch gewinnorientierten Energiegemeinschaften im Jahr 2040			
	14C Energiegemeinschaften sind unattraktiv im Jahr 2040			
Klimawandel and Treibhausgas-Emissionen	14D Geringe Anzahl an ertragsorientierten Energiegemeinschaften im Jahr 2040			
	15A Geringe Erderwärmung bis auf 1,5 °C im Jahr 2040			
	15B Moderate Erderwärmung zwischen 1,5 und 2,0 °C im Jahr 2040			
	15C Hohe Erderwärmung über 2,0 °C im Jahr 2040			

Anmerkung: Der Fragebogen, der an die Experten geschickt wurde

F Sensitivitätsanalyse der Szenario-Technik

Einstellungen Anzahl von Projektionsbündel	Heap = 3 Bündel = 186			Heap = 4 Bündel = 203			Heap = 5 Bündel = 271			Heap = 6 Bündel = 301			Heap = 7 Bündel = 356			Heap = 8 Bündel = 401																					
	Schlüsselfaktor	Projektion	Szenario 1			Szenario 2			Szenario 3			Szenario 1			Szenario 2			Szenario 3																			
			n ₁ n ₂ n ₃ [%]																																		
Wärmegestehungskosten	1A	6	100%	0	0%	5	3%	9	100%	0	0%	9	5%	17	100%	0	0%	11	4%	17	100%	0	0%	11	4%	17	100%	0	0%	11	3%	17	100%	0	0%	16	4%
	1B	0	0%	0	0%	5	3%	0	0%	0	0%	9	5%	0	0%	0	0%	12	5%	0	0%	0	0%	13	5%	0	0%	0	0%	13	4%	0	0%	0	0%	18	5%
	1C	0	0%	0	0%	9	5%	0	0%	0	0%	9	5%	0	0%	0	0%	17	7%	0	0%	2	11%	24	9%	0	0%	2	11%	29	9%	0	0%	2	11%	32	9%
	1D	0	0%	5	100%	156	89%	0	0%	5	100%	162	86%	0	0%	4	100%	210	84%	0	0%	5	17	89%	217	82%	0	0%	17	89%	267	83%	0	0%	17	89%	299
Forschung und Wissenschaft	2A	0	0%	5	100%	164	94%	0	0%	5	100%	178	94%	0	0%	4	100%	237	95%	0	0%	19	100%	252	95%	0	0%	19	100%	307	96%	0	0%	19	100%	352	96%
	2B	6	100%	0	0%	11	6%	9	100%	0	0%	11	6%	17	100%	0	0%	13	5%	17	100%	0	0%	13	5%	17	100%	0	0%	13	4%	17	100%	0	0%	13	4%
	2C	0	0%	5	100%	164	94%	0	0%	5	100%	178	94%	0	0%	4	100%	237	95%	0	0%	19	100%	252	95%	0	0%	19	100%	307	96%	0	0%	19	100%	352	96%
Energieerzeuger und -dienstleister	3A	2	33%	0	0%	1	1%	5	56%	0	0%	4	2%	5	29%	4	100%	0	0%	5	29%	0	0%	4	2%	5	29%	0	0%	4	1%	5	29%	0	0%	4	1%
	3B	0	0%	0	0%	10	6%	0	0%	0	0%	10	5%	0	0%	0	0%	16	6%	0	0%	2	11%	16	6%	0	0%	0	0%	30	9%	0	0%	0	0%	30	8%
	3C	4	67%	0	0%	0	0%	4	44%	0	0%	0	0%	12	71%	0	0%	0	0%	12	71%	0	0%	0	0%	12	71%	0	0%	0	0%	12	71%	0	0%	0	0%
	3D	0	0%	5	100%	164	94%	0	0%	5	100%	175	93%	0	0%	0	0%	234	94%	0	0%	19	100%	245	92%	0	0%	19	100%	286	89%	0	0%	19	100%	331	91%
Politische Akteure	4A	0	0%	0	0%	9	5%	0	0%	0	0%	12	6%	0	0%	4	100%	8	3%	0	0%	0	0%	12	5%	0	0%	0	0%	12	4%	0	0%	0	0%	12	3%
	4B	0	0%	0	0%	147	84%	0	0%	0	0%	158	84%	0	0%	0	0%	218	87%	0	0%	0	0%	234	88%	0	0%	0	0%	287	90%	0	0%	0	0%	308	84%
	4C	6	100%	5	100%	0	0%	9	100%	5	100%	0	0%	17	100%	0	0%	5	2%	17	100%	19	100%	0	0%	17	100%	19	100%	0	0%	17	100%	19	100%	0	0%
	4D	0	0%	0	0%	19	11%	0	0%	0	0%	19	10%	0	0%	0	0%	19	8%	0	0%	0	0%	19	7%	0	0%	0	0%	21	7%	0	0%	0	0%	45	12%
Immobilienbesitzer	5A	0	0%	5	100%	164	94%	0	0%	5	100%	176	93%	0	0%	4	100%	224	90%	0	0%	19	100%	234	88%	0	0%	19	100%	280	90%	0	0%	19	100%	334	92%
	5B	0	0%	0	0%	7	4%	0	0%	0	0%	9	5%	0	0%	0	0%	14	6%	0	0%	2	11%	8	3%	0	0%	0	0%	19	6%	0	0%	0	0%	19	5%
	5C	6	100%	0	0%	4	2%	9	100%	0	0%	4	2%	17	100%	0	0%	12	5%	17	100%	0	0%	12	5%	17	100%	0	0%	12	4%	17	100%	0	0%	12	3%
Steigerung der Gebäudeenergieeffizienz	6A	0	0%	5	100%	163	93%	0	0%	5	100%	176	93%	0	0%	3	75%	236	91%	0	0%	15	75%	250	91%	0	0%	15	75%	296	93%	0	0%	15	79%	329	90%
	6B	0	0%	0	0%	5	3%	0	0%	0	0%	6	3%	0	0%	1	25%	7	3%	0	0%	2	11%	8	3%	0	0%	2	11%	16	5%	0	0%	2	11%	18	5%
	6C	6	100%	0	0%	7	4%	9	100%	0	0%	7	4%	17	100%	0	0%	7	3%	17	100%	2	11%	7	3%	17	100%	2	11%	8	3%	17	100%	2	11%	18	5%
Raumplanung	7A	2	33%	0	0%	3	2%	4	44%	0	0%	4	2%	9	53%	0	0%	13	3%	9	53%	0	0%	13	5%	9	53%	0	0%	13	4%	9	53%	0	0%	13	4%
	7B	0	0%	0	0%	4	2%	0	0%	0	0%	4	2%	0	0%	0	0%	14	6%	0	0%	0	0%	14	5%	0	0%	0	0%	14	4%	0	0%	0	0%	14	4%
	7C	4	67%	0	0%	8	5%	5	56%	0	0%	8	4%	8	47%	0	0%	8	3%	8	47%	0	0%	8	3%	8	47%	0	0%	8	4%	8	47%	0	0%	8	2%
	7D	0	0%	5	100%	160	91%	0	0%	5	100%	173	92%	0	0%	4	100%	215	86%	0	0%	19	100%	230	87%	0	0%	19	100%	285	89%	0	0%	19	100%	330	90%
Geopolitik	8A	6	100%	0	0%	84	48%	9	100%	0	0%	94	50%	17	100%	0	0%	131	52%	17	100%	0	0%	139	52%	17	100%	0	0%	164	51%	17	100%	0	0%	183	50%
	8B	0	0%	5	100%	91	52%	0	0%	5	100%	95	50%	0	0%	4	100%	119	48%	0	0%	19	100%	126	48%	0	0%	19	100%	156	49%	0	0%	19	100%	182	50%
Bevölkerungsstruktur und -banisierung	9A	0	0%	0	0%	31	18%	0	0%	0	0%	38	20%	0	0%	3	75%	53	21%	0	0%	1	5%	61	23%	0	0%	1	5%	79	25%	0	0%	1	5%	89	24%
	9B	4	67%	0	0%	5	3%	7	78%	0	0%	5	3%	10	59%	0	0%	7	3%	10	59%	1	5%	7	3%	10	59%	1	5%	15	5%	10	59%	1	5%	17	5%
	9C	0	0%	2	40%	111	63%	0	0%	2	40%	113	60%	2	12%	1	25%	144	58%	2	12%	8	42%	150	57%	2	12%	8	42%	163	51%	2	12%	8	42%	183	50%
	9D	2	33%	3	60%	28	16%	2	22%	3	60%	33	17%	5	29%	0	0%	46	18%	5	29%	9	47%	47	18%	5	29%	9	47%	63	20%	5	29%	9	47%	76	21%
Technologieakzeptanz	10A	0	0%	5	100%	163	93%	0	0%	5	100%	176	93%	0	0%	4	100%	223	89%	0	0%	19	100%	232	88%	0	0%	19	100%	287	90%	0	0%	19	100%	332	91%
	10B	0	0%	0	0%	8	5%	0	0%	0	0%	9	5%	0	0%	0	0%	18	7%	0	0%	0	0%	24	9%	0	0%	0	0%	24	8%	0	0%	0	0%	24	7%
	10C	6	100%	0	0%	4	2%	9	100%	0	0%	4	2%	17	100%	0	0%	9	4%	17	100%	0	0%	9	3%	17	100%	0	0%	9	3%	17	100%	0	0%	9	2%
Wärmeversorgungsnetz	11A	0	0%	0	0%	4	2%	0	0%	0	0%	4	2%	0	0%	0	0%	10	4%	0	0%	0	0%	10	4%	0	0%	0	0%	10	3%	0	0%	0	0%	10	3%
	11B	0	0%	1	20%	7	4%	0	0%	1	20%	10	5%	0	0%	4	100%	19	8%	0	0%	3	16%	22	8%	0	0%	3	16%	32	10%	0	0%	3	16%	36	10%
	11C	6	100%	0	0%	6	3%	9	100%	0	0%	6	3%	17	100%	0	0%	6	2%	17	100%	0	0%	6	2%	17	100%	0	0%	6	2%	17	100%	0	0%	6	2%
	11D	0	0%	4	80%	158	90%	0	0%	4	80%	169	89%	0	0%	0	0%	215	86%	0	0%	16	84%	227	86%	0	0%	16	84%	266	83%	0	0%	16	84%	307	84%
Sektorenkopplung	12A	0	0%	0	0%	6	3%	0	0%	0	0%	6	3%	0	0%	0	0%	6	2%	0	0%	0	0%	6	2%	0	0%	0	0%	20	6%	0	0%	0	0%	20	5%
	12B	0	0%	5	100%	159	91%	0	0%	5	100%	173	92%	0	0%	4	100%	230	92%	0	0																

G Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsberechnung

	ΔP [Jahre]	$LCOH$ [€/MWh]	$\Delta LCOH$ [%]	ΔP [Jahre]	$LCOH$ [€/MWh]	$\Delta LCOH$ [%]
TTES		161,5	5,8		154	10,2
PTES	5	86,9	12,7	10	78,6	21,0
BTES		110,5	10,7		101,4	18,1
ATES		115,8	12,6		104,8	20,9
	ΔP [Jahre]	$LCOH$ [€/MWh]	$\Delta LCOH$ [%]	ΔP [Jahre]	$LCOH$ [€/MWh]	$\Delta LCOH$ [%]
TTES		148,2	13,6		143,6	16,2
PTES	15	72,9	26,7	20	68,6	31,1
BTES		94,9	23,3		90	27,3
ATES		97,1	26,7		91,4	31,0

Tabelle G.1: Änderung der Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall, wenn sich die Lebensdauer der Speicher um 5, 10, 15 oder 20 Jahre erhöht

	$\Delta\eta_S$ [%]	$LCOH$ [€/MWh]	$\Delta LCOH$ [%]	ΔV [%]	$\Delta\eta_S$ [%]	$LCOH$ [€/MWh]	$\Delta LCOH$ [%]	ΔV [%]
TTES		166,5	2,9	2,9		161,9	5,6	5,6
PTES	2,5	96,5	3,0	3,0	5	93,7	5,9	5,9
BTES		117,9	4,8	4,8		112,5	9,1	9,1
ATES		126,2	4,8	4,7		120,5	9,1	9,1
	$\Delta\eta_S$ [%]	$LCOH$ [€/MWh]	$\Delta LCOH$ [%]	ΔV [%]	$\Delta\eta_S$ [%]	$LCOH$ [€/MWh]	$\Delta LCOH$ [%]	ΔV [%]
TTES		157,5	8,1	8,1		153,4	10,5	10,6
PTES	7,5	91,0	8,6	8,6	10	88,4	11,1	11,1
BTES		107,6	13,0	13,1		103,1	16,7	16,7
ATES		115,3	13,0	13,0		110,5	16,7	16,6

Tabelle G.2: Änderung der Wärmegestehungskosten und des Speichervolumens im Vergleich zum Referenzfall, wenn sich die Effizienz der Speicher um 2,5%, 5%, 7,5% oder 10 % erhöht

	r	$LCOH$	$\Delta LCOH$		r	$LCOH$	$\Delta LCOH$
	[%]	[€/MWh]	[%]		[%]	[€/MWh]	[%]
TTES		133,4	22,2			151,6	11,6
PTES	1	84,3	15,3	2		91,7	7,8
BTES		99,5	19,6			111,1	10,2
ATES		112,3	15,3			122,2	7,8
	r	$LCOH$	$\Delta LCOH$		r	$LCOH$	$\Delta LCOH$
	[%]	[€/MWh]	[%]		[%]	[€/MWh]	[%]
TTES		192,8	-12,4			215,5	-25,7
PTES	4	107,7	-8,2	5		116,3	-16,9
BTES		137,4	-11,0			152,1	-22,9
ATES		143,5	-8,2			154,9	-16,9

Tabelle G.3: Änderung der Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Referenzfall, wenn der Referenzzinssatz von 3% einen niedrigeren Wert von 1% oder 2% sowie einen höheren Wert von 4% oder 5% beträgt

	ΔC_{FW}	P_R	ΔP_R		ΔC_{FW}	P_R	ΔP_R
	[%]	[Jahre]	[%]		[%]	[Jahre]	[%]
TTES		28	20,0			18	48,6
PTES	5	13	35,0	10		11	45,0
BTES		18	28,0			14	44,0
ATES		17	15,0			13	35,0
	ΔC_{FW}	P_R	ΔP_R		ΔC_{FW}	P_R	ΔP_R
	[%]	[Jahre]	[%]		[%]	[Jahre]	[%]
TTES		14	60,0			12	65,7
PTES	15	9	55,0	20		8	60,0
BTES		11	56,0			10	60,0
ATES		11	45,0			9	55,0

Tabelle G.4: Änderung der Rückzahlungsperiode im Vergleich zum Referenzfall, wenn sich der Wärmepreis jährlich um 5%, 10%, 15% oder 20 % erhöht