

Neues wirtschaftliches Eisspeicherkonzept zur optimierten Wärmespeicherung durch Wärmepumpen und Windkraftspitzennutzung (Eisspeicher NEU)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 79/2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

DI Ernst HEIDUK, MEng. (HE Building Innovation GmbH)

Marlene SAYER, M.Sc., Univ.Prof. DI. Dr. Reinhard HAAS, Priv.-Doz. DI. Dr. Amela
AJANOVIC (TU-Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe (ESEA), Energy
Economics Group (EEG)

DI Helmut SCHÖBERL (Schöberl & Pöll GmbH, Bauphysik und Forschung)

Wien, 2025. Stand: März 2024

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	7
2	Abstract	9
3	Ausgangslage	11
	3.1. Motivation.....	11
	3.2. Zentrale Fragestellungen	13
	3.3. Situation der österreichischen Energieversorgung 2022/23	14
	3.4. Hintergrund und Literatur.....	20
	3.5. Entwicklungen und Tendenzen bei Gebäudeenergiekonzepten	23
	3.6. Entwicklungen und Tendenzen bei Wärmepumpen und Umweltwärmequellen	26
	3.6.1. Marktentwicklung in Österreich und Deutschland.....	26
	3.6.2. Ausgewählte technische Entwicklungen bei Wärmepumpen	28
	3.7. Entwicklungen und Tendenzen bei Eisspeichern.....	31
	3.8. Phasenwechselmaterialien	37
4	Möglichkeiten zur Optimierung von Eisspeichern	43
	4.1. Funktionelle Konzeption eines optimierten Eisspeichers.....	43
	4.1.1. Optimierung der Wärmeentnahme und Regenerationszyklen	43
	4.1.2. Eisspeicher-Regeneration im Erdreich durch Erdwärme.....	45
	4.1.3. Optionen für die Integration zusätzlicher Phasenwechselmaterialien in das Konzept Eisspeicher NEU	49
	4.2. Konzeption eines optimierten Eisspeichers.....	50
	4.2.1. Konstruktive Gestaltung eines Eisspeicherabsorbers um schnelle Gefrier- und Abtauvorgänge möglich zu machen.....	50
	4.2.2. Optionen für optimierte Oberflächenbeschichtungen der Eisspeicherabsorber.....	51
	4.2.3. Maßnahmen zur Reduktion des notwendigen Volumens des Eisspeichers NEU.....	53
	4.2.4. Zusammenfassung der Optimierungsmöglichkeiten.....	56
	4.3. Integration des Eisspeicher NEU in Gebäudeenergiekonzepte	58
5	Szenarien des zukünftigen Stromsystems	60
	5.1. Darstellung der Windstromspitzen	60
	5.2. Simulation des zukünftigen Stromsystems.....	62
	5.3. Eisspeicher zur Lastverteilung und Reduktion von Überschüssen	68
6	Wirtschaftliche Bewertung	73
	6.1. Methodisches Vorgehen	74
	6.1.1. Methode	74
	6.1.2. Kalkulationsdaten und Annahmen	78
	6.2. Ergebnisse	88

6.3. Sensitivitätsanalyse.....	94
6.3.1. Variation des Zinssatzes.....	95
6.3.2. Variation der Abschreibungsdauer.....	95
6.3.3. Variation der Investitionskosten	96
7 Emissionsreduktionen.....	98
8 Schlussfolgerungen.....	99
9 Ausblick und Empfehlungen.....	100
10 Literaturverzeichnis	101
11 Abbildungsverzeichnis	106
12 Tabellenverzeichnis	110

1 Kurzfassung

a. Ausgangssituation, Motivation und Forschungsfragen

Der Übergang zu erneuerbaren und nachhaltigen Energiesystemen stellt weltweit eine große Herausforderung dar, insbesondere in Europa, wo ehrgeizige Ziele zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Energiemix festgelegt wurden. Um einen hohen Anteil variabler erneuerbarer Energien erfolgreich zu integrieren, müssen Wege gefunden werden, um Angebot und Nachfrage auszugleichen, wobei Speichertechnologien eine entscheidende Rolle spielen. Die wirtschaftlich motivierte Auswahl, Netzstrom bei preiswerten Stundenpreisen zu beziehen und im Konzept Eisspeicher NEU thermisch zu nutzen, beinhaltet zukünftig auch die Nutzung von Windstromspitzen. Die steigende Verbreitung von Luft-Wasser-Wärmepumpen motiviert, nach Wegen für einen netzdienlichen Betrieb bei kühlen Außentemperaturen zu suchen.

Die folgenden Forschungsfragen stellen sich hierzu:

- Wie kann ein Eisspeicher die Effizienz von Wärmepumpen verbessern und effizienter und preisgünstiger werden?
- Wie kann ein Eisspeicherabsorber konstruktiv gestaltet werden, um schnelle Gefrier- und Abtauvorgänge möglich zu machen?
- Mit welchen optimierten Oberflächenbeschichtungen kann der Eisspeicherabsorber beschichtet werden?
- Welche Optionen bieten zusätzlich integrierte Phasenwechselmaterialien (PCM)?
- Wie kann ein Eisspeicherabsorber konstruktiv gestaltet werden, um möglichst kompakte Abmessungen möglich zu machen?
- Können durch den preisgesteuerten Betrieb eines Wärmepumpen-Eisspeichersystems Kosten und CO₂-Emissionen eingespart werden und wie kann die Integration von Wärmepumpen-Eisspeichersystemen im österreichischen Energiesystem bis 2050 dazu beitragen, die Abregelung erneuerbarer Energien zu minimieren?

b. Projekt-Inhalte und Zielsetzungen

Die Projektinhalte und die erweiterten Ziele sind:

- Weitgehende Nutzung vorhandener Komponenten, Technologien und Bauverfahren
- Erweiterungsmöglichkeit von konventionellen Wärmepumpenkonzepten
- Verkleinerung des Volumens und des Flächenbedarfs von Eisspeichern
- Dadurch Reduktion der Kosten im Vergleich zu konventionellen Eisspeichern gleicher Wärmeleistung
- Preisgesteuerte Optimierung des Wärmebedarfs und resultierend des Netzstrombedarfs bei Betrieb eines Wärmepumpen-Eisspeichersystems

c. Methodische Vorgehensweise

Für die Realisierbarkeit des Konzepts Eisspeicher NEU werden die besten verfügbaren Komponenten und Geräte identifiziert und mittels bestehender Forschungsergebnisse fehlende „Verbindungsstücke“ aufgezeigt. Basierend darauf wird die funktionale Konfiguration des neuen Systems dargestellt und eine realistische Einschätzung der Effizienzsteigerungen vorgenommen. Ökonomische Analysen umfassen die Untersuchung von Lastverschiebungseffekten mittels eines dynamischen Optimierungsmodells des Strommarkts. Es wird ein Bottom-up Energiemodell entwickelt, gefolgt von der Analyse dynamischer Energieszenarien zur Untersuchung der optimierten Einbindung erneuerbarer Energien und erforderlicher Speicherkapazitäten. Zudem werden

Stromkosten eines Einfamilienhaushalts analysiert, basierend auf Wetterdaten und dynamischen Strompreisen mit und ohne Eisspeicher.

d. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Umsetzung des Konzepts Eisspeicher NEU zeigt vielversprechende Möglichkeiten zur effizienten Nutzung von vorhandenen Komponenten und Technologien. Es ermöglicht die Erweiterung konventioneller Wärmepumpensysteme, reduziert Volumen und Flächenbedarf und senkt Kosten im Vergleich zu herkömmlichen Eisspeichern gleicher Leistung. Die Trennung des Wärme- und Strombedarfs während Zeiten hoher Stromnachfrage ermöglicht Flexibilität, insbesondere während kalter Winternächte oder Dunkelflaute durch die Nutzung von Wärme aus dem Erdreich.

Die Entwicklung des Eisspeicher NEU umfasst bivalente Betriebsweisen, vertikale metallische Wärmetauscherplatten, elektrisch beheizbare Beschichtungen, thermische Abkopplung nach oben und Ankopplung mit CO₂-Erdwärmerohren nach unten sowie die Integration von PCM-Kapseln zur Steigerung der Wärmespeicherkapazität. Die Regeneration des Eisspeicher NEU erfolgt einerseits über Außenluft-Absorber sowie direkt-elektrisch, was durch günstige Stundentarife bei Windstromspitzen ermöglicht werden soll.

Eine komplexe Simulation ist erforderlich, um thermische Effekte zu erfassen und um eine genaue Dimensionierung vorzunehmen. Das macht eine konkretere Dimensionierung und vor allem die Berechnung der notwendigen Tiefe des CO₂-Erdwärmerohrs derzeit noch nicht möglich. Daher ist derzeit auch eine Kostenkalkulation und die dynamische Simulation der Integration des Konzepts Eisspeicher NEU in Gebäudeenergiesysteme und Gebäudequartierssysteme noch nicht umsetzbar. Mittels Simulationen des zukünftigen Energiesystems zeigen sich positive Auswirkungen auf das Energiesystem, indem die Nutzung fossiler Kraftwerke reduziert und ungenutzter Stromüberschuss vermieden wird. Trotz vielversprechender Aspekte sind die Investitionskosten für konventionelle Wärmepumpen-Eisspeichersysteme basierend auf Kostenrecherchen aufgrund der zusätzlichen Anschaffungskosten höher als bei alleiniger Nutzung der Wärmepumpe, selbst bei dynamischer Optimierung nach Strompreisen. Die Zukunft solcher Systeme hängt von Faktoren wie Energie- und CO₂-Preisen ab. Ein Anstieg des CO₂-Preises könnte höhere Kosteneinsparungen ermöglichen. Die Studie zeigt, dass eine Beteiligung der Verbraucher:innen auf Haushaltsebene möglich ist und zu Energieeinsparungen führen kann. Ein dynamischer und marktwirtschaftlicher Rahmen ist daher unerlässlich, um Verbraucher:innen zu motivieren.

e. Ausblick

Eine Weiterentwicklung des Konzepts durch Erprobung eines Prototyps wäre sinnvoll und wünschenswert. Für die notwendige Erfassung und Simulation der komplexen thermischen Vorgänge und die Wahl geeigneter weiterer Projektpartner:innen ist es sinnvoll, die Ergebnisse weltweit laufender Forschungsprojekte abzuwarten.

2 Abstract

a. Initial situation, motivation and research question

The transition to renewable and sustainable energy systems poses a significant challenge globally, particularly in Europe, where ambitious goals have been set to increase the share of renewable energies in the energy mix. To successfully integrate a high proportion of variable renewable energies, ways must be found to balance supply and demand, with storage technologies playing a crucial role. The economically motivated selection of grid electricity at low hourly rates and its thermal utilization in the NEW Ice Storage concept also includes the future utilization of wind power peaks. The increasing prevalence of air-to-water heat pumps motivates the search for ways to operate them in a grid-friendly manner during lower outdoor temperatures.

The following research questions arise:

- How can an ice storage system improve the efficiency of heat pumps and become more efficient and cheaper?
- How can an ice storage absorber be designed to make rapid freezing and defrosting processes possible?
- What optimized surface coatings can the ice storage absorber be coated with?
- What options do additional integrated phase change materials (PCM) offer?
- How can an ice storage absorber be designed to make the dimensions as compact as possible?
- Can costs and CO₂ emissions be saved by the price-controlled operation of a heat pump ice storage system, and how can the integration of heat pump ice storage systems contribute to minimizing the curtailment of renewable energies in the Austrian energy system by 2050?

b. Project contents and objectives

- The project contents and extended objectives are as follows:
- Extensive utilization of existing components, technologies, and construction methods
- Possibility of expanding conventional heat pump concepts
- Reduction in volume and space requirements of ice storage systems
- Consequently reducing costs compared to conventional ice stores of the same heat output
- Price-controlled optimization of heat demand and resulting grid electricity demand when operating a heat pump ice storage system

c. Methodical procedure

For the feasibility of the NEW Ice Storage Concept, the best available components and devices are identified and missing "connecting pieces" are shown based on existing research results. Based on this, the functional configuration of the new system is presented, and a realistic assessment of efficiency improvements is made. Economic analyses include the investigation of load shifting effects using a dynamic optimization model of the electricity market. A bottom-up energy model is developed, followed by the analysis of dynamic energy scenarios to investigate optimised integration of renewable energies and storage capacities. In addition, electricity costs of a single-family household are analysed based on weather data and dynamic electricity prices, with and without ice storage.

d. Results and conclusions

The implementation of the NEW Ice Storage Concept shows promising possibilities for the efficient utilization of existing components and technologies. It enables the expansion of conventional heat pump systems, reduces volume and space requirements, and lowers costs compared to conventional ice stores of the same performance. The separation of heat and electricity demand during times of high electricity demand enables flexibility, especially during cold winter nights or periods of low wind.

The development of the NEW ice storage includes bivalent operating modes, vertical metallic heat exchanger plates, electrically heated coatings, thermal decoupling upwards and coupling with CO₂ geothermal pipes downwards, as well as the integration of PCM capsules to increase the heat storage capacity. The system is regenerated using both external air absorbers and direct electricity, which can be achieved using favourable hourly tariffs during wind power peaks.

A complex simulation is required to capture thermal effects and make accurate dimensioning. This currently makes a more concrete dimensioning and, above all, the calculation of the necessary depth of the CO₂ geothermal pipe not possible. Therefore, a cost calculation and the dynamic simulation of the integration of the NEW Ice Storage Concept into building energy systems and building district systems are currently not feasible.

Simulations of the future energy system show positive effects on the energy system by reducing the use of fossil power plants and avoiding unused surplus electricity. Despite promising aspects, the investment costs for conventional heat pump ice storage systems, based on cost research, are higher due to additional acquisition costs than when using the heat pump alone, even with dynamic optimization based on electricity prices. The future of such systems depends on factors such as energy costs and CO₂ prices. An increase in the CO₂ price could enable higher cost savings. The study shows that consumer involvement at the household level is possible and can lead to energy savings. Therefore, a dynamic and market-based framework is essential to motivate consumers.

e. Outlook

Further development of the concept by testing a prototype would be useful and desirable. For the necessary recording and simulation of the complex thermal processes and the selection of suitable additional project partners, it makes sense to wait for the results of research projects underway around the world.

3 Ausgangslage

3.1. Motivation

Der Übergang zu erneuerbaren und nachhaltigen Energiesystemen stellt weltweit eine große Herausforderung dar. Besonders in Europa ist dies von großer Bedeutung, wo mit dem "Clean Energy for All"-Paket ehrgeizige Ziele zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Energiemix festgelegt wurden. Um einen hohen Anteil variabler erneuerbarer Energien erfolgreich in das Energiesystem zu integrieren, müssen Wege gefunden werden, um Angebot und Nachfrage auszugleichen. Dabei spielen Speichertechnologien eine entscheidende Rolle, wie auch das Europäische Parlament in dessen EntschlieÙung über ein umfassendes europäisches Konzept für die Energiespeicherung betont hat. Laut dieser EntschlieÙung werden aufgrund des Anstiegs der Flexibilität vermehrt Energiespeicher benötigt (EU, 2020).

Insbesondere Österreich bietet ein interessantes Beispiel mit bereits rund 9 TWh Stromerzeugung aus variablen Quellen wie Wind und Sonne (ohne Wasserkraft) im Jahr 2020 (im Vergleich zu etwa 1,6 TWh im Jahr 2005) und einem ehrgeizigen Ziel von 100 % bilanziertem erneuerbarem Strom bis 2030 durch das "Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG)" (BMK, 2020). Hierbei spielt vor allem Windenergie eine große Rolle, da Windstrom im Vergleich zur Fotovoltaik vermehrt im Winter produziert wird. Nach einem Rückgang des Ausbaus in den vergangenen Jahren zeigt sich nun wieder ein Aufwärtstrend des jährlichen Zubaus, wie in Abbildung 1 dargestellt.

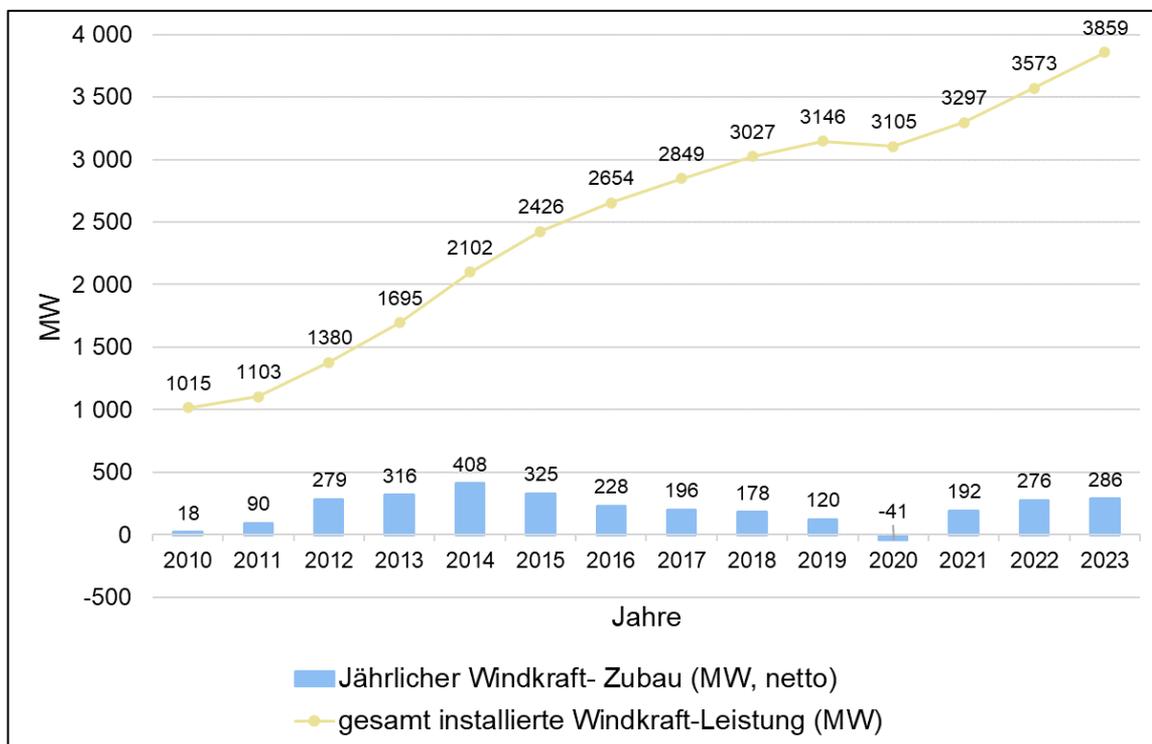


Abbildung 1: Windkraftleistung in Österreich (IG Windkraft, 2023); der jährliche Abbau wurde vom jährlichen Zubau abgezogen; 2023 stellt eine Prognose dar.

Durch den Ausbau der Windkraft gemäß den Zielen des EAG ist auch in Zukunft mit Windkraftüberschüssen zu rechnen. Diese könnten mittels Großspeicheranlagen gespeichert werden. Da diese Speicheranlagen (derzeit hauptsächlich Pumpspeicherkraftwerke) jedoch nicht unmittelbar an der Haupterzeugung liegen, ist es wichtig, auch Kleinspeicher auf Haushaltsebene miteinzubeziehen. Dadurch entstehen Abnehmer:innen in der Nähe der Windparks und können das Übertragungsnetz entlasten. Derzeit existieren bereits zahlreiche, vorwiegend batteriebetriebene Kleinspeicher. Diese optimieren jedoch gegenwärtig nur den Eigenverbrauch und können daher noch nicht dynamisch auf Erzeugungsspitzen außerhalb des Haushaltes reagieren.

Im Rahmen des "Clean Energy for All"-Pakets wurde festgelegt, dass alle Verbraucher:innen in der Lage sein sollen, auf Preissignale zu reagieren und den Verbrauch aktiv zu steuern. Dies wird durch dynamische Strompreisverträge und Preissignale ermöglicht, die die aktuellen Preise auf dem Spot- oder Day-Ahead-Markt widerspiegeln (European Commission, 2020a).

In Zukunft können Haushalte somit auf Preissignale reagieren und ihre Stromkosten durch mögliche Lastverschiebungen des Verbrauchs minimieren. Wie sich der Strompreis exemplarisch in jeder Stunde bei Windstromverfügbarkeit verhält, ist in Abbildung 2 dargestellt.

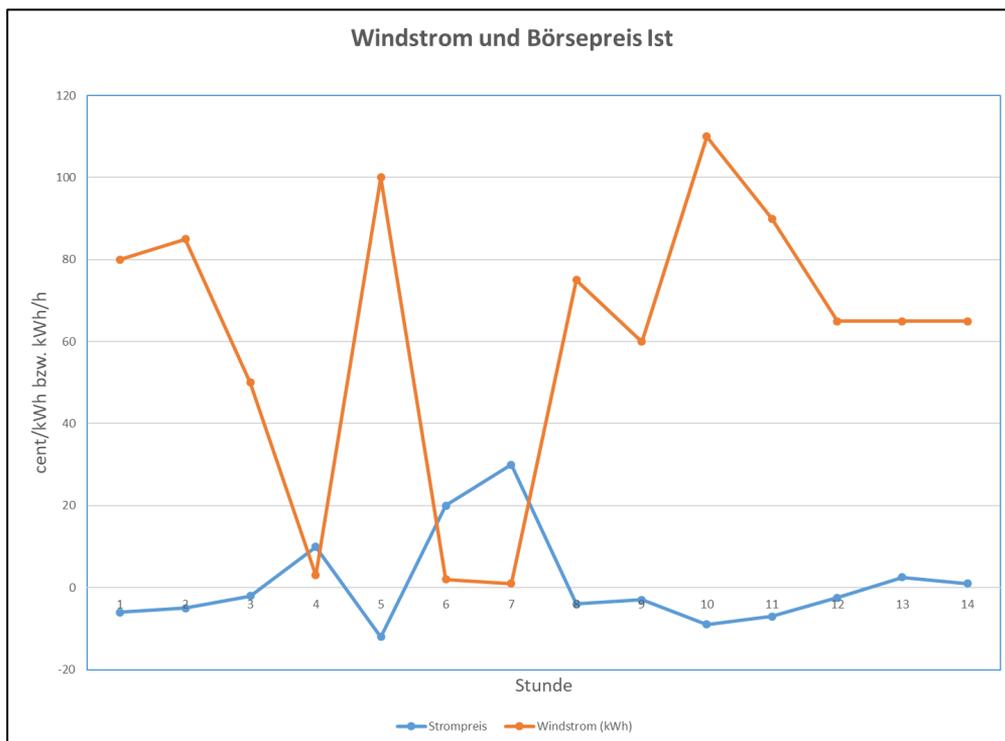


Abbildung 2: Windstromverfügbarkeit entlang der Strompreisverteilungskurve (Ist) (TU Wien, 2024)

Neben den bereits genannten Batteriespeichern bieten auch thermische Speicher aufgrund geringerer Kosten eine gute Möglichkeit zur Lastverschiebung. In dieser Analyse soll deshalb ein Wärmepumpen-Eisspeichersystem untersucht werden.

3.2. Zentrale Fragestellungen

Zentrale Fragestellungen:

- Wie kann ein Eisspeicher die Effizienz von Wärmepumpen verbessern?
- Wie kann ein Eisspeicher effizienter und preisgünstiger werden?
- Wie kann ein Eisspeicherabsorber konstruktiv gestaltet werden, um schnelle Gefrier- und Abtauvorgänge möglich zu machen?
- Mit welchen optimierten Oberflächenbeschichtungen kann der Eisspeicherabsorber beschichtet werden?
- Welche Industrieprodukte könnten direkt als Plattenwärmetauscher übernommen und genutzt werden?
- Wie kann ein Eisspeicherabsorber konstruktiv gestaltet werden, um möglichst kompakte Abmessungen möglich zu machen?
- Welche Aspekte sind mit der Nutzung von Windkraftspitzen verbunden?
- Welche wirtschaftlichen und technischen Aspekte ergibt die Nutzung dynamischer Strompreistarife?
- Wie könnten elektrochemische Kurzzeitspeicher (Stromspeicher) zur Optimierung des Systems beitragen?
- Welche Optionen bieten zusätzlich integrierte PCM (Phasenwechselmaterialien)?
- Besteht im österreichischen Energiesystem bis 2050 Potenzial zur Nutzung von Windspitzen und Minimierung der Abregelung bzw. von Überschüssen erneuerbarer Energien durch die Integration von Wärmepumpen-Eisspeichersystemen?
- Kann ein Haushalt tatsächlich nennenswerte Energiekosten durch den preisgesteuerten Betrieb eines Wärmepumpen-Eisspeichersystems einsparen, oder überwiegen die anfänglichen Investitionskosten des Speichers?
- Lassen sich durch die Implementierung von Wärmepumpen in Verbindung mit Eisspeichern Emissionsreduktionen erzielen?

3.3. Situation der österreichischen Energieversorgung 2022/23

Österreich ist trotz günstiger naturräumlicher Voraussetzungen aktuell nicht in der Lage, den gesamten erforderlichen Strombedarf im Land selbst zu produzieren. Je nach Wetterlage importiert Österreich etwa 5 - 15 % des Jahresverbrauchs (siehe Abbildung 3), vorwiegend aus Deutschland und Tschechien (siehe Abbildung 4). Ohne diese könnte der Verbrauch nicht abgedeckt und die Netzstabilität nicht aufrechterhalten werden.

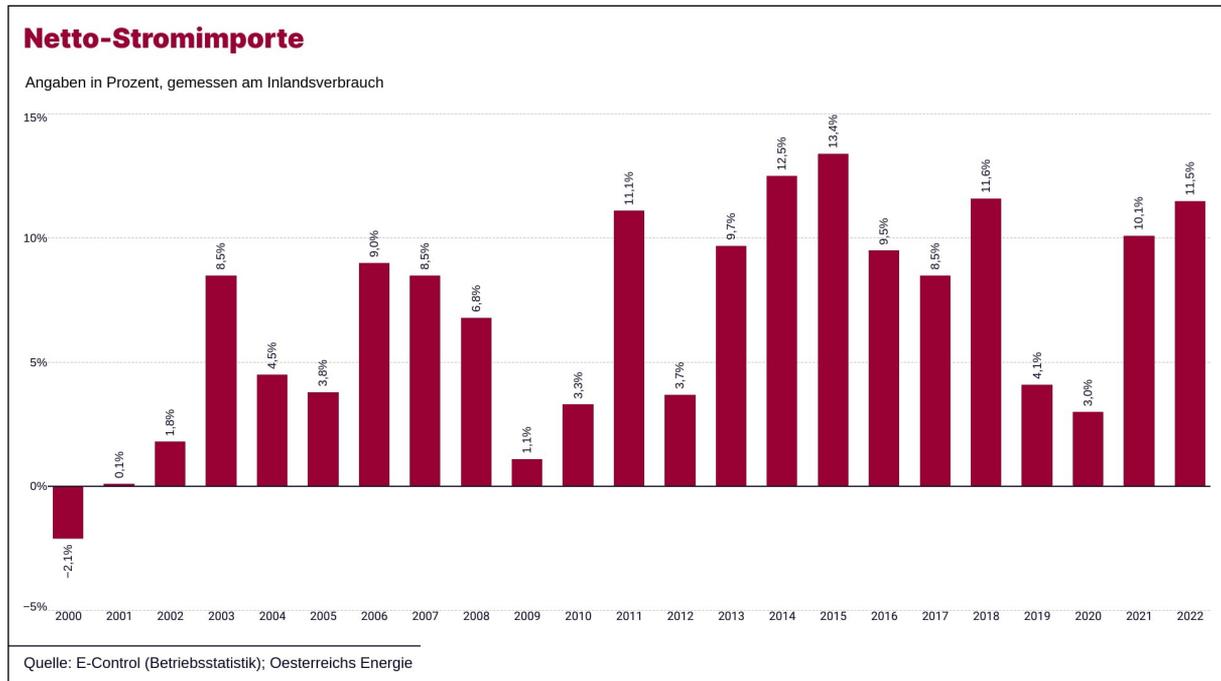


Abbildung 3: Nettostromimporte der letzten Jahre (E-Control, 2024a)

Österreich braucht gegenwärtig noch immer große Mengen an fossilem Erdgas zur Stromproduktion und für die Netzstabilität. Auch für die mittlere Zukunft ist eine Abhängigkeit von Erdgas und von Importen für die österreichische Stromerzeugung zu erwarten (Konrad et al., 2023).

Die erwünschte Veränderung des Mobilitätsbereichs hin zu elektrischen Antrieben bei Fahrzeugen sowie die Umstellung vieler industrieller Produktionsprozesse weg von fossilen Energieträgern hin zu strombetriebenen Produktionsprozessen führt gleichzeitig zu einem zunehmenden Strombedarf (siehe Abbildung 5).



Abbildung 4: Importe / Exporte aus / in jeweilige Nachbarstaaten (E-Control, 2024b)

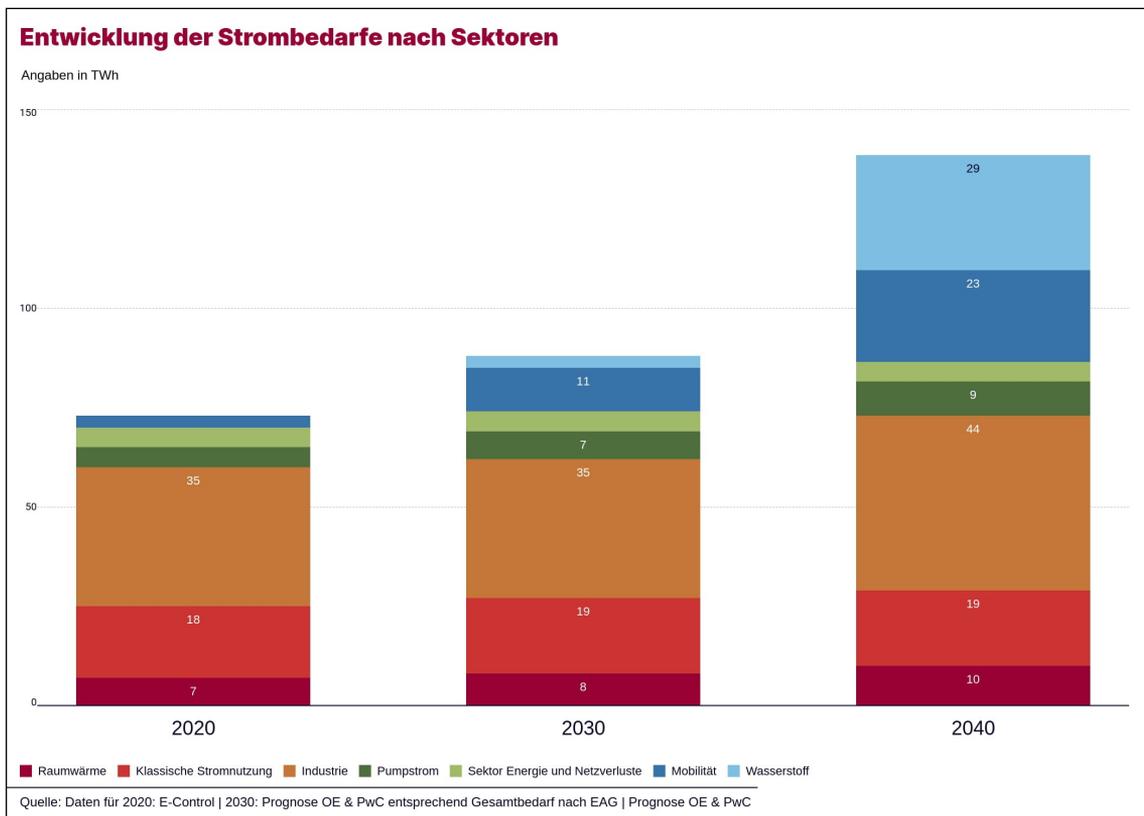


Abbildung 5: Entwicklung der Strombedarfe nach Sektoren (E-Control, 2024c)

Es gilt also, für den großen Bedarf die Stromproduktion stark auszubauen, dies mit erneuerbaren Energieträgern zu tun und gleichzeitig die Verteilnetze zu verstärken und weiter auszubauen. Für beides gibt es relevante Hemmnisse. Die Situation der österreichischen Stromerzeugung und -verteilung ist für die nächsten Jahrzehnte also sehr herausfordernd und es wäre förderlich, wenn Bereiche wie der Gebäudesektor netzdienlicher sein könnten als bisher.

Netzdienlich wäre der Gebäudesektor

- wenn der Strombedarf generell nicht zu- sondern abnehmen würde (Effizienzsteigerungen) und
- wenn Bedarfsspitzen des Gebäudesektors sich nicht mit Angebotslücken bei erneuerbaren Energien überlagern würden.

Die thermische Energieeffizienz nimmt im Neubaubereich zwar kontinuierlich zu, jedoch nicht so stark wie es technisch möglich und ökologisch sinnvoll wäre. Jedes neue nichtenergieautonome Gebäude stellt einen zusätzlichen Verbrauch dar. Die thermische Sanierung des Gebäudebestands ist teils sehr erfolgreich, in Summe wird die geforderte Sanierungsrate aber nicht erreicht. Das führt zu einem reduzierten Bedarf an thermischer Energie, der Bedarf an elektrischer Energie steigt jedoch weiter moderat an.

Auch im optimistischen Szenario der Österreichischen Energieagentur, „Ausstieg“ aus allen fossilen Energieträgern im Gebäudebereich bis 2040, nimmt der Strombedarf leicht zu (dunkelroter Bereich in Abbildung 6).

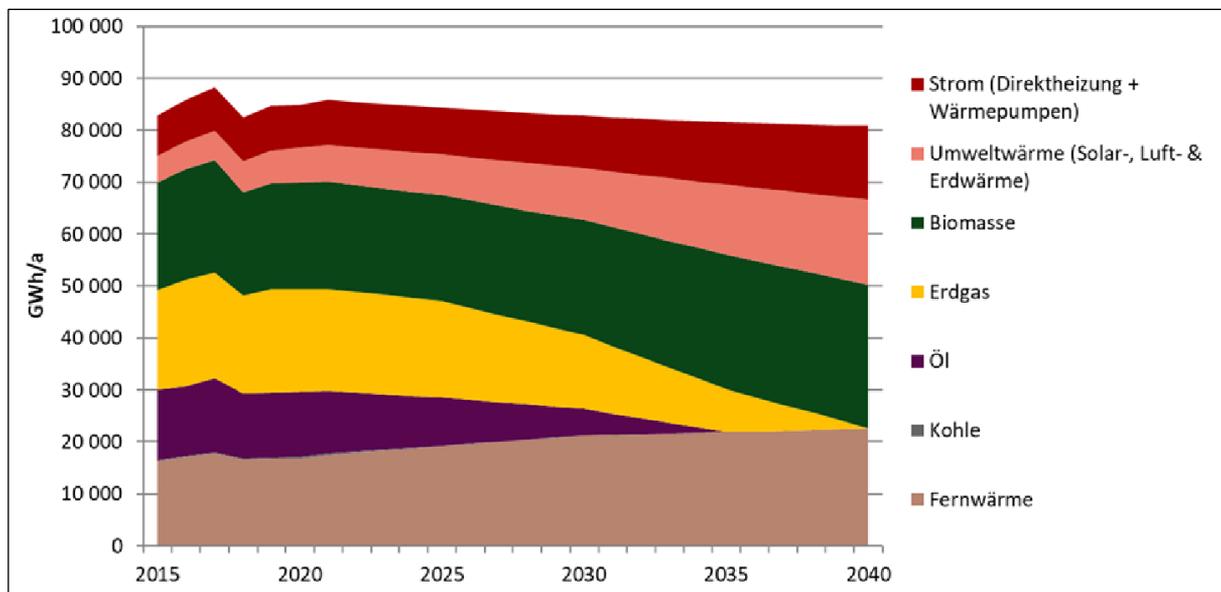


Abbildung 6: Endenergie Raumheizung, Klimaanlage & Warmwasser Szenario "Forcierter Ausstieg" für Österreich (Austrian Energy Agency, 2024a)

Diese Zunahme ergibt sich vor allem aus der vermehrten Anwendung von elektrisch betriebenen Wärmepumpen zur Nutzung von Umweltwärme. Für den Anteil der Umweltwärme (lachsfarbener Bereich) ist die prognostizierte Zunahme am stärksten.

Wie in Kapitel 3.6.1 gezeigt wird, sind mehr als 80 % der neu installierten Wärmepumpen Luft-Wasser-Wärmepumpen. Diese Geräte nutzen die Außenluft als Wärmequelle. Entsprechend sinkt deren Wirkungsgrad bei niedrigeren Außentemperaturen und damit steigt deren Strombedarf (Problem „kalte Dunkelflaute“).

2022 waren alle Energieträger durch den starken Preisanstieg geprägt, der 2023 wieder zurückging (siehe Abbildung 7). Es ist aber nicht anzunehmen, dass der laufende Preisrückgang wieder auf das Preisniveau von 2020 zurückgehen wird.

Es wurde auch sehr deutlich, dass gegenläufige Bedarfsspitzen und Angebotslücken bei erneuerbaren Energien sehr preistreibend wirken.

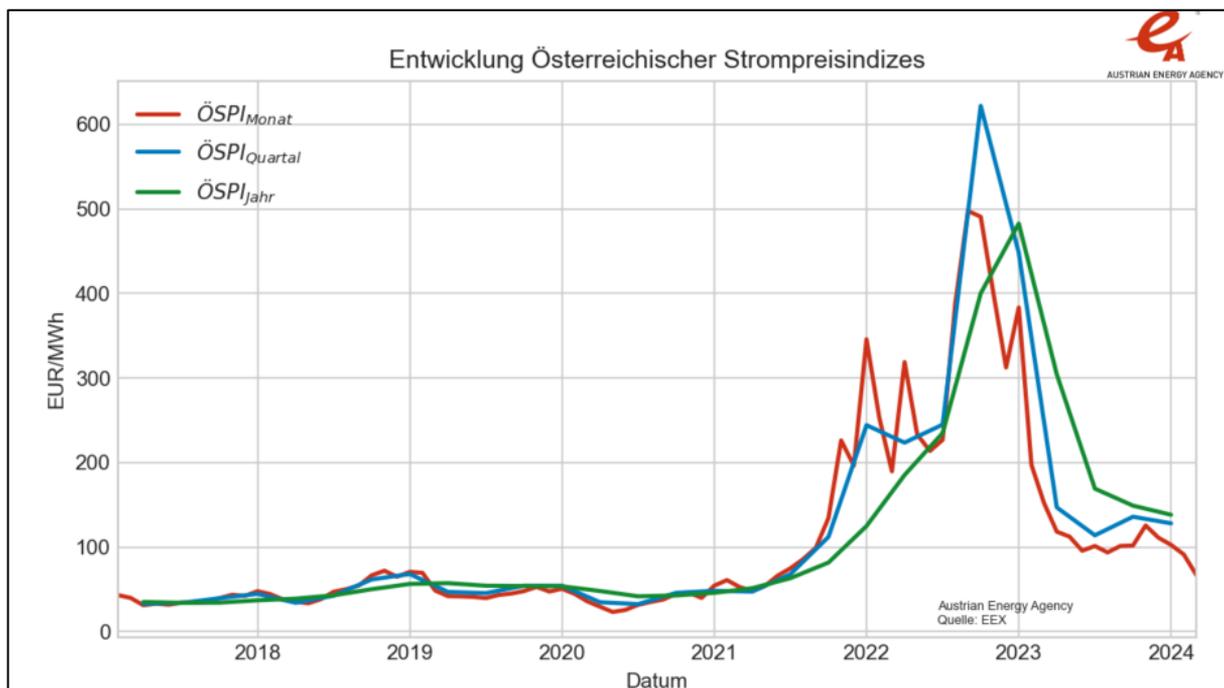


Abbildung 7: Österreichische Strompreisentwicklung (Austrian Energy Agency, 2024b)

Bedarfs- bzw. Nachfragespitzen werden durch das kurzfristige Hochfahren von Gaskraftwerken, die fossiles, in Österreich derzeit hauptsächlich russisches, Erdgas verbrennen, abgedeckt. Diese sind in Österreich die teuersten Stromproduzenten.

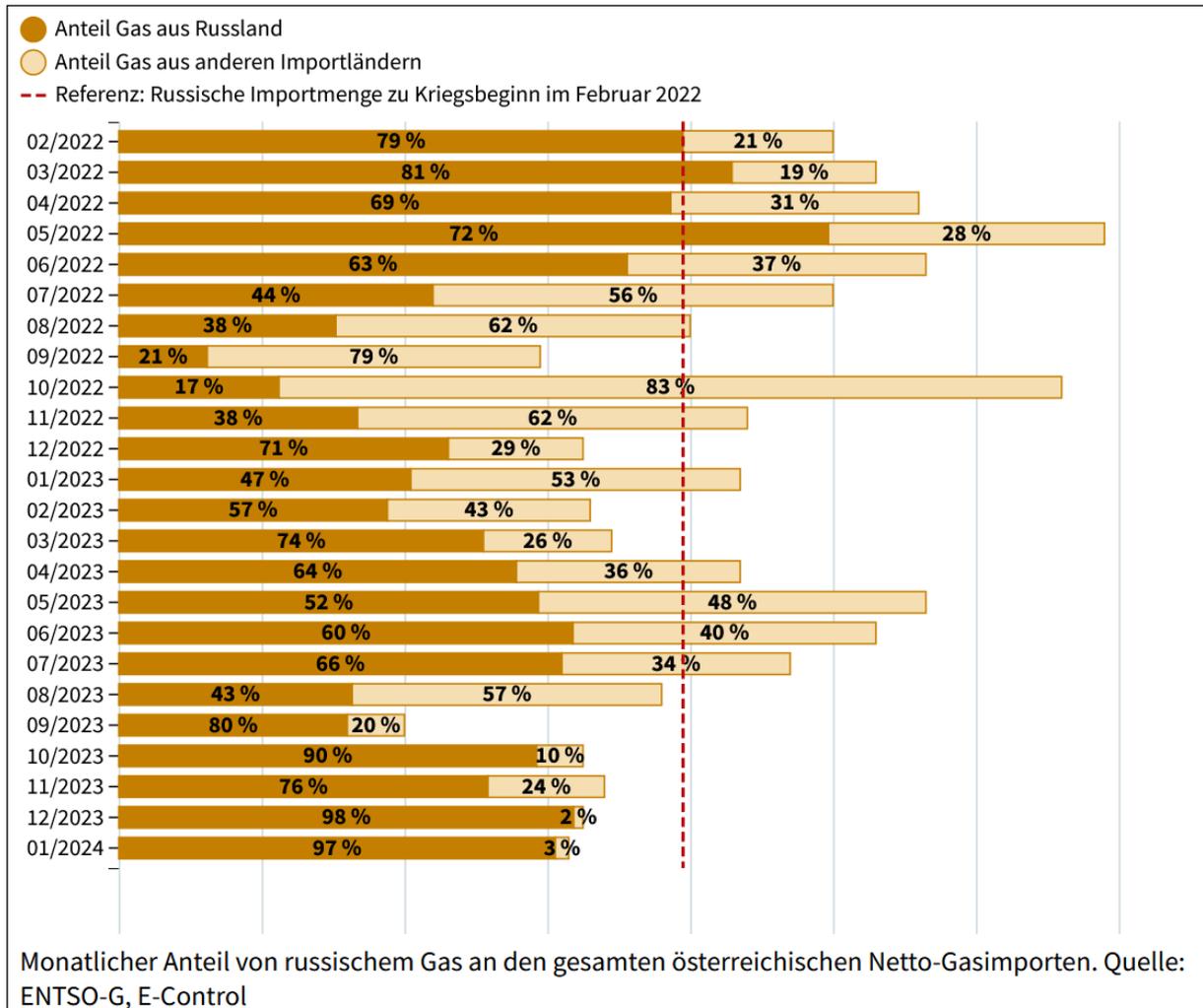


Abbildung 8: Anteil Gasimporte Russland vs. andere Importländer (E-Control, 2024d)

Die absolute Menge an importiertem russischem Gas ist zwar zurückgegangen, der Anteil am Gasmix ist jedoch weiterhin ungebrochen hoch (siehe Abbildung 8).

Durch die 2021 und 2022 stark gestiegenen Strompreise wurde das „Merit-Order“-Preisfindungsverfahren (siehe Abbildung 9) allgemein bekannt. Das teuerste noch notwendige Kraftwerk für die Abdeckung des Strombedarfs und der Netzstabilität bestimmt den Preis für alle Anbieter:innen.

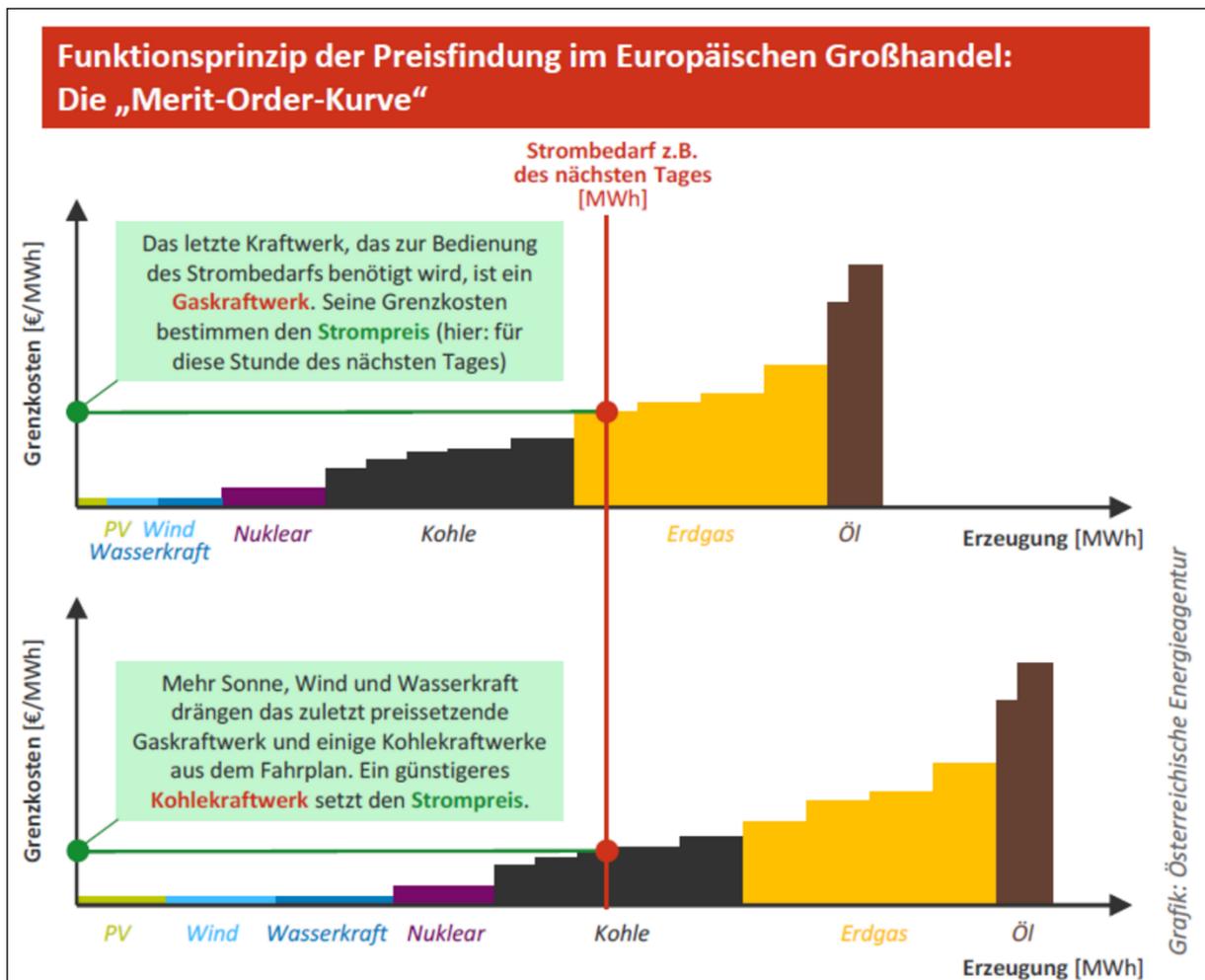


Abbildung 9: Prinzip der Merit-Order-Preisfindung (E-Control, 2024e)

Starke Nachfragespitzen verteuern daher die Strompreise. Maßnahmen zur Spitzenglättung sind daher ein äußerst wichtiger Schritt zur Kostendämpfung der Strompreise.

3.4. Hintergrund und Literatur

Wärmepumpen (WP) werden aufgrund ihrer Effizienz zunehmend zur Raumheizung von Gebäuden verwendet. Dies spiegelt sich auch in der Absatzentwicklung von WP in Österreich in Abbildung 10 wider.

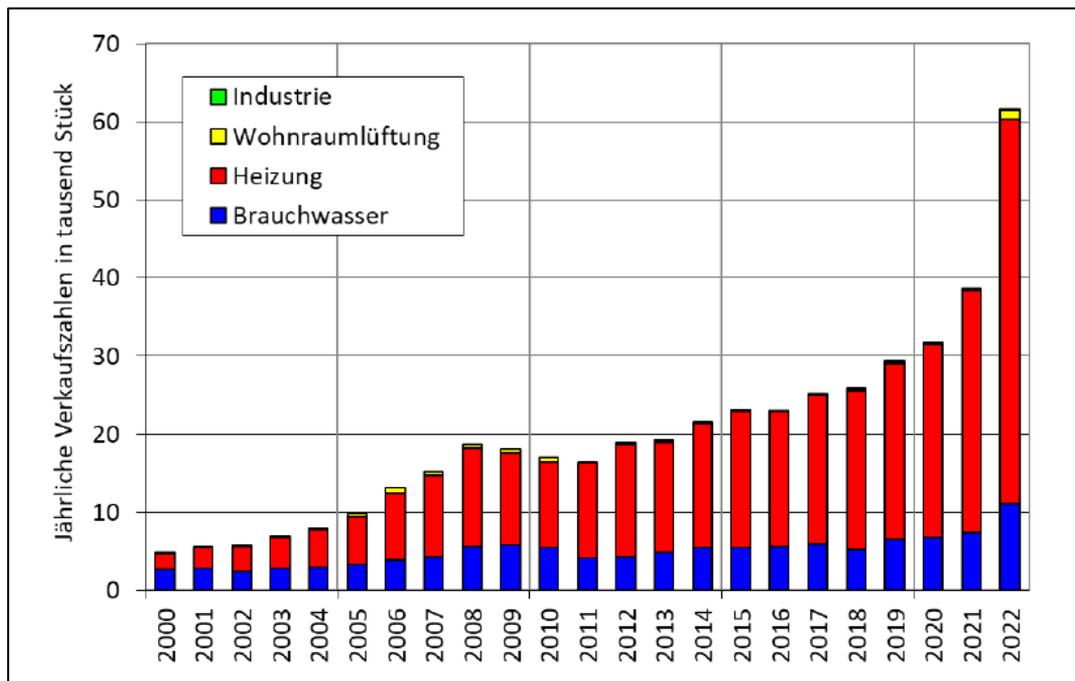


Abbildung 10: Absatzentwicklung von WP in Österreich (Biermayr et al., 2023a)

In der Literatur wird hinsichtlich WP auch zunehmend die Möglichkeit der Lastverschiebungen (Demand Response) im Gebäudebereich diskutiert. In (Katsman, 2020) werden Wärmepumpensysteme dahingehend untersucht. Die Arbeit dient dazu, eine Abschätzung der Flexibilitäten im österreichischen Stromsystem durch WP zu geben und die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zu evaluieren. Dazu wird das Open-Source-Energiesystemmodell Balmorel um „Demand-Response“ der WP erweitert. Ebenfalls mittels Balmorel werden in (Schöniger, 2023) WP Flexibilitäten untersucht. Es wird gezeigt, dass WP zur kurzfristigen Flexibilität im Strommarkt beitragen, während der saisonale Ausgleich von anderen Flexibilitätsmaßnahmen gedeckt werden muss. In (Suna et al., 2022) wird gezeigt, dass WP bis zu 10% der innerhalb eines Tages benötigten Flexibilitäten liefern können (stündliche Schwankungen innerhalb eines Tages, aggregiert über das ganze Jahr).

Für Deutschland wurde bezogen auf den zukünftigen Einfamilienhausbestand eine maximal verschiebbare Wärmepumpenlast durch die Aktivierung der baulichen thermischen Masse der Häuser von 57 GWh berechnet (Sperber et al., 2020). Diese ermöglicht es an einem kalten Wintertag maximal 300 GWh an elektrischer Energie abzugeben. In Österreich können maximal 19,7 GWh verschoben werden (Mascherbauer et al., 2022b). Die Studie von (Mascherbauer et al., 2022b) berechnet die Kosteneinsparungen unterschiedlicher Einfamilienhaustypen in Österreich, die durch die Verschiebung bei variablen Preissignalen entstehen können. Sie finden, dass höhere Dekarbonisierungsgrade, die zu höheren Strompreisen führen, den Anreiz zur Verlagerung elektrischer Lasten erhöhen.

Aus einzelner Haushaltsebene gesehen sind diese Kosteneinsparungen jedoch eher gering. Dies erfordert zusätzliche monetäre Anreize (Mascherbauer et al., 2022b). Das Modell wurde in (Mascherbauer et al., 2022a) erweitert und kommt zu dem Ergebnis, dass der Netzstromverbrauch um 7,4 % reduziert werden kann, indem die Gebäudemasse als Wärmespeicher genutzt wird.

Eine Möglichkeit, die Verschiebezeiten und auch die Effizienz der WP weiter zu erhöhen, bildet die Kopplung von WP mit thermischen Speichersystemen (Zhu et al., 2014). Einen Überblick über verschiedene Speichertechnologien wird in (AIT, 2018), Abbildung 11, gegeben.

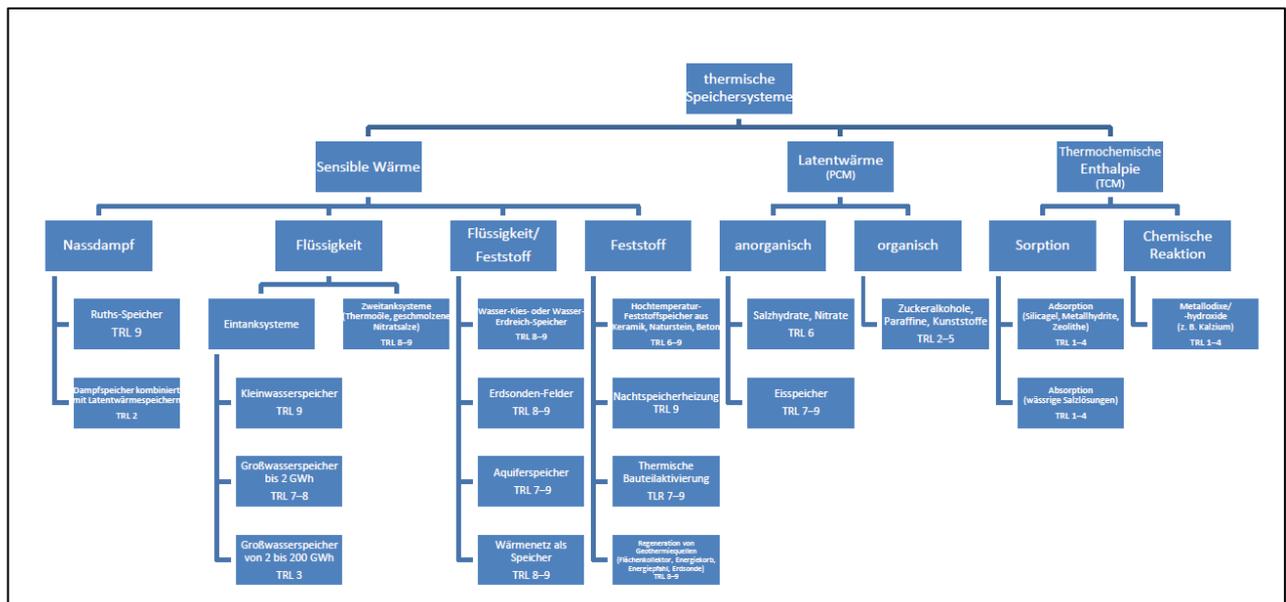


Abbildung 11: Speicherkonzepte und Beispiele mit Technologie-Reifegraden (TRL) aus (AIT, 2018)

Eine Möglichkeit dabei ist die anorganische Latentwärmespeicherung. Eine dazugehörige Speichertechnologie mit einem Technologie-Reifegrade von sieben bis neun ist der Eisspeicher. Dieser wird mit einer WP und einem Warmwasserspeicher gekoppelt und im Erdreich vergraben (Koppensteiner, 2023). Das Schema dazu ist in Abbildung 12 dargestellt.

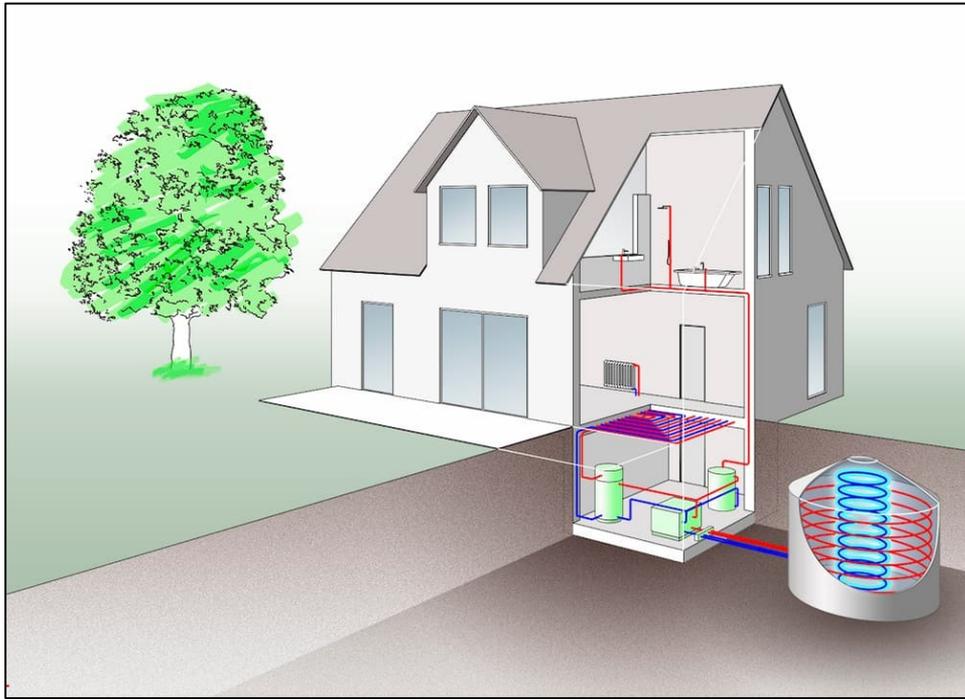


Abbildung 12: Schema eines Solar-Eisspeichers (Heizsparer, 2022)

Die Literatur beschäftigt sich bei Eisspeichern hauptsächlich mit den technischen Möglichkeiten. Bereits im Jahr 2007 wurde von Lambert (2007) eine Studie zur Auslegung einer solarbetriebenen Adsorptionswärmepumpe mit Eisspeichern veröffentlicht. Dabei wurde das Gesamtsystem modelliert und analysiert und Möglichkeiten zur Verbesserung der Leistungszahlen aufgezeigt (Lambert, 2007). Bei der Untersuchung von Eisspeichersystemen für Wohngebäude und sieben verschiedenen Wärmelasten wurde gezeigt, dass oft eine Jahresarbeitszahl vergleichbar mit der von Wärmepumpensystemen mit Erdsonden erreicht werden kann (Winteler et al., 2014).

Eisspeicher können auch zur Deckung des Kühlbedarfs von Gebäuden verwendet werden, was in (Sehar et al., 2012) untersucht wird. Die Ergebnisse zeigen, dass der Energieverbrauch von Kältemaschinen für Nicht-Speicher- und Eisspeichersysteme stark von den klimatischen Bedingungen abhängt. Klimazonen mit heißen Sommern sowie geringen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht weisen einen höheren Energieverbrauch für Kältemaschinen auf. Ebenfalls mit Kältemaschinen beschäftigen sich Song et al. (2018) und berechnen optimale Eisspeicherraten abhängig vom Strompreis.

Auf der Ebene eines Fernkältesystems werden in Chen et al. (2022) optimale intelligente Regelungsstrategie für die Wasser-Wärmepumpe in Verbindung mit einem Eisspeicher, unter Minimierung der Betriebskosten der Kühleinheit definiert. Dabei können 7-9,3 % der Betriebskosten eingespart werden (Chen et al., 2022). In Boulamanti et al. (2020) wird ein Eisspeichersystem gekoppelt mit einer Fotovoltaikanlage zur Maximierung der Eigenstromnutzung sowie der Steigerung der Kühleffizienz eines Supermarkts analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass bei korrekter Funktionsweise der Eisspeicher eine günstige und umweltfreundliche Alternative zum Batteriespeicher darstellt. Der absolute Eigenverbrauch konnte gesteigert und somit das Stromnetz entlastet werden. In dem untersuchten System konnte jedoch kein Nutzen des Eisspeichers bewiesen

werden. Vermutet wird dabei, dass die Kälteanlage bereits effizienter betrieben wurde als angenommen (Boulamanti et al., 2020).

Ebenfalls zur Kühlung mittels Eisspeichersystem führen Altuntas und Erdemir (2022) thermodynamische und wirtschaftliche Analysen in einem Bürogebäude in Istanbul, Türkei durch. Konkret wird dabei gezeigt, dass die jährlichen Betriebskosten der Klimaanlage mit Eisspeichersystem von 1,9 Millionen Türkische Lira auf 0,5 Millionen Türkische Lira gesenkt werden konnten. Die Amortisationszeit des integrierten Eisspeicher-Klimaanlagen- und Wärmepumpensystems wird mit 4,5 Jahren angegeben und stellt somit ein großes Potenzial zur Kostenreduktion, aber auch für einen umweltfreundlicheren Betrieb, dar.

3.5. Entwicklungen und Tendenzen bei Gebäudeenergiekonzepten

In Österreich unterliegen die gesetzlichen Vorgaben zur Wärmedämmung dem Baurecht und der Bauordnung des jeweiligen Bundeslandes. Diese werden über die OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz des Österreichischen Instituts für Bautechnik festgelegt.

Von der Bundesregierung wurde das Erneuerbare-Wärme-Gesetz beschlossen. Es trat mit 29.02.2024 in Kraft. Ab in Kraft treten dürfen in Neubauten in Österreich keine Gasheizungen mehr errichtet werden. Für bereits baubehördlich genehmigte und in Errichtung befindliche Gebäude gibt es Ausnahmen.

Laut der Anfang 2024 vom europäischen Parlament beschlossenen EU-Gebäuderichtlinie EPBD (der EU-Ratsbeschluss soll im April 2024 folgen) sollen:

- der Energieverbrauch von Wohngebäuden bis 2030 im Schnitt um 16 %
- und bis 2025 um 20 – 22 % fallen
- bis 2030 16% und bis 2033 26% der Nichtwohngebäude mit der schlechtesten Energieeffizienz saniert werden
- ab 2025 keine eigenständigen mit fossilen Brennstoffen betriebene Heizkessel mehr subventioniert werden
- bis 2040 keine mit fossilen Brennstoffen betriebenen Heizkessel im Einsatz sein

(Europäisches Parlament, 2024)

Die oben angeführten Regulierungen werden die Energiekonzepte für Neubaugebäude und Gebäudesanierungen in den nächsten Jahren prägen.

In Österreich sind laut Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) immer noch ca. 840.000 Gasheizungen, 500.000 Ölheizungen und 80.000 Heizungen mit Koks/Kohle in Betrieb (BMK, 2024). Viele der Gasheizungen davon sind Gasthermen in einzelnen Wohnungen, vorwiegend in Wien.

Für die Raumwärmebereitstellung in Gebäuden geht die Entwicklung hin zu Fernwärme und Umweltwärme, um fossile Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas bis 2040 ersetzen zu können. Dabei werden bei der Dekarbonisierung der Fernwärme häufig Großwärmepumpen zum Einsatz

kommen. Der Großteil aller Neubauten, insbesondere im Einfamilienhausbereich, wird derzeit mit Wärmepumpenheizungen ausgerüstet.

In der Stadt Wien gibt es dazu u.a. die Initiative "100 Projekte Raus aus Gas", wo durch beispielhafte Pilotprojekte eine Vielzahl von Wegen zur Umstellung demonstriert und verbreitet werden.

Schlechter gedämmte Gebäude mit Wärmepumpen (insbesondere mit Luft-Wasser-Wärmepumpen) haben einen schlechteren Gesamt-Wirkungsgrad (als solche mit Erdwärme oder Grundwasser als Wärmequelle) und verstärken wetterbedingte Nachfragespitzen.

Auch bei hocheffizienten Gebäuden mit Eigenstromproduktion durch PV-Anlagen entsteht in kalten Winternächten Bedarf an Netzstrom. Das in der „Langzeitevaluierung des Energieverbrauchs von 100 energieeffizienten Gebäuden in Österreich als repräsentativer Querschnitt österreichischer Leuchtturmobjekte, LZE 100“ ermittelte energieeffizienteste Mehrfamilienhaus Österreichs, das PassivhausPlus-MFH Unterstein in Langenegg, Vorarlberg hat im Durchschnitt eine Eigenversorgung von 55 %, diese sinkt aber von November bis Februar immer wieder gegen Null (siehe Abbildung 14).



Abbildung 13: Passivhaus Plus Unterstein, Langenegg (HK Architekten, 2024) (Fessler, 2013)

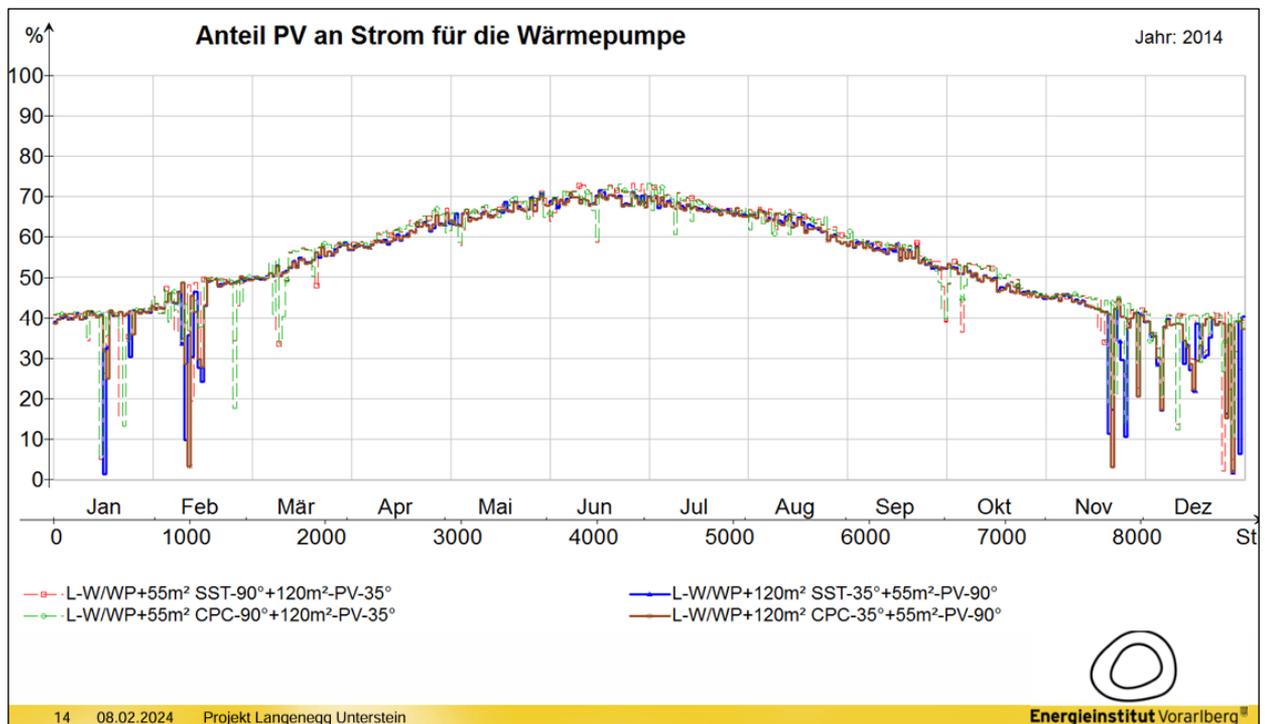


Abbildung 14: PV-Stromanteil für Wärmepumpe, PH MFH Unterstein (Energieinstitut Vorarlberg, 2024)

Selbst bei Plusenergie-Gebäudekonzepten mit voller Eigenstromversorgung im Sommer ist ohne saisonale Stromspeicherung Netzbezug im Winter notwendig.

Der von der EU geplante Umstieg von fossilen Heizungssystemen auf elektrisch betriebene Alternativen (Wärmepumpen) wird Netzbetreiber:innen vor neue Herausforderungen stellen. Vor allem die am häufigsten eingesetzten Luft-Wasser-Wärmepumpen werden besonders in kalten Winternächten große Lastspitzen verursachen. Selbst wenn diese in energieeffizienten Gebäuden zur Anwendung kommen, muss das Netz zur Bedarfsabdeckung im Winter genutzt werden. Auch vollelektrische Gebäude nutzen das Netz für Spitzenbedarfsabdeckung im Winter.

Deswegen ist davon auszugehen, dass die Strombedarfsspitzen aus dem Gebäudebereich (z.B. durch höheren Strombedarf von Luft-Wasser-Wärmepumpen in kalten Winternächten) in den nächsten 20 Jahren zunehmen werden.

3.6. Entwicklungen und Tendenzen bei Wärmepumpen und Umweltwärmequellen

3.6.1. Marktentwicklung in Österreich und Deutschland

Die Dominanz der Luft-Wasser-Wärmepumpe festigt sich (siehe Abbildung 15 und Abbildung 17). Der Anteil der Luft-Wasser-Wärmepumpen von im Jahr 2022 installierten Geräten steht in Österreich bei etwa 86 %.

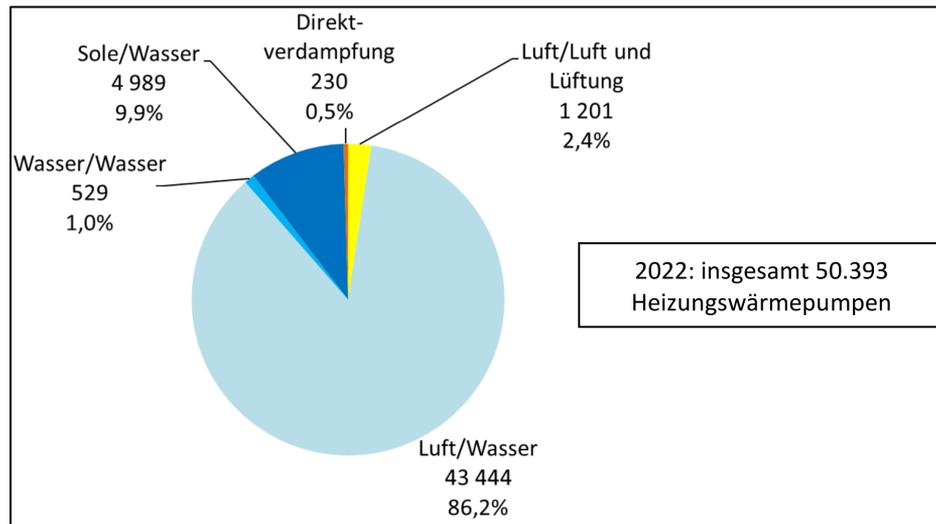


Abbildung 15: Marktanteile der Wärmequellsysteme am Inlandsmarkt 2022 (Biermayr et al., 2023b)

Im Bericht für die „Wärmepumpen Marktentwicklung 2022“ (Biermayr und Prem, 2023) wird zusammenfassend festgehalten:

- Die Wärmepumpe hat eine Schlüsselrolle in der Wärmewende
- Längerfristige Entwicklungen von Gebäude-Energieeffizienz und Kühlbedarf begünstigen die weitere Marktdiffusion
- Energiepolitische Herausforderung. Beibehaltung der Diffusionsraten unter wieder sinkenden Preisen fossiler Energie

Der Markt für die Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen in Österreich steigt seit Jahren kontinuierlich an. Im Jahr 2022 hat es einen Sprung nach oben gegeben (siehe Abbildung 16), der 2023 aufgrund von fallenden Energiepreisen, stark gestiegenen Baupreisen und Zinsen und der Ankündigung höherer Förderungen ab 2024 voraussichtlich kurzfristig unterbrochen wurde (Wärmepumpe Austria, 2023).

Der österreichische sowie der deutsche Markt weichen grundsätzlich nur wenig voneinander ab (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17). Daraus kann geschlossen werden, dass die national beobachteten Entwicklungen auch zumindest teilweise international zutreffen.

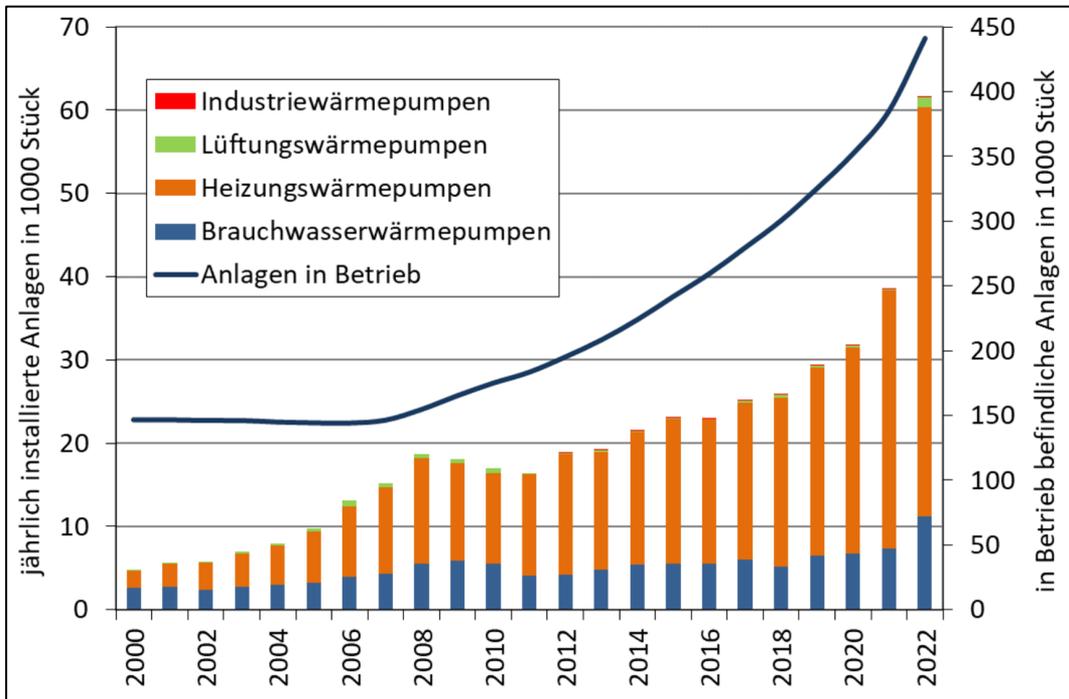


Abbildung 16: Die Marktentwicklung der Wärmepumpen in Österreich bis 2022 (Biermayr et al., 2023b)

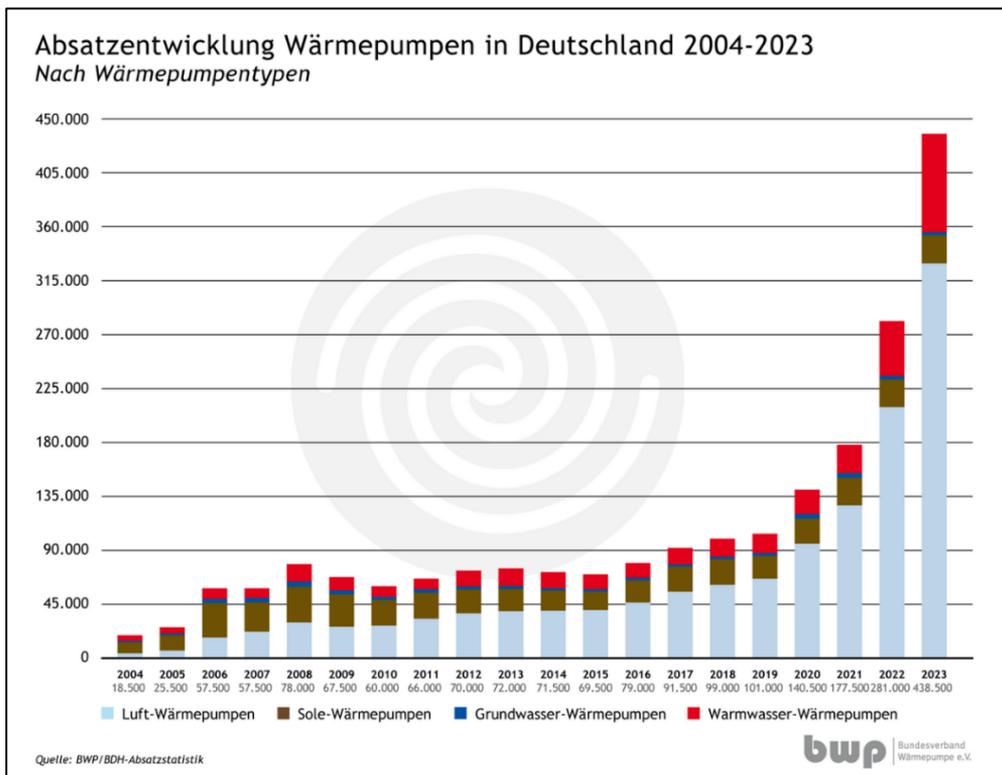


Abbildung 17: Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland (Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2024)

3.6.2. Ausgewählte technische Entwicklungen bei Wärmepumpen

Die Option Terra-Booster zur Effizienzsteigerung von Wärmepumpen:

Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen Splitgeräten und bei Sole-Wasser-Wärmepumpen kann auch eine externe „Weiche“ installiert werden. Diese Terra-Booster genannten Geräte sind geräte- und herstellerunabhängig und können mit jedem Wärmepumpen-Fabrikat kombiniert werden und so die Effizienz und Leistung im Heiz- und Kühlfall deutlich steigern. Wenn z.B. die Außenlufttemperatur in einen Bereich fällt, in dem die Arbeitszahl der Wärmepumpe sinkt, schalten diese Geräte auf die Erdwärmetauscher um, die eine höhere Temperatur bereitstellen können.

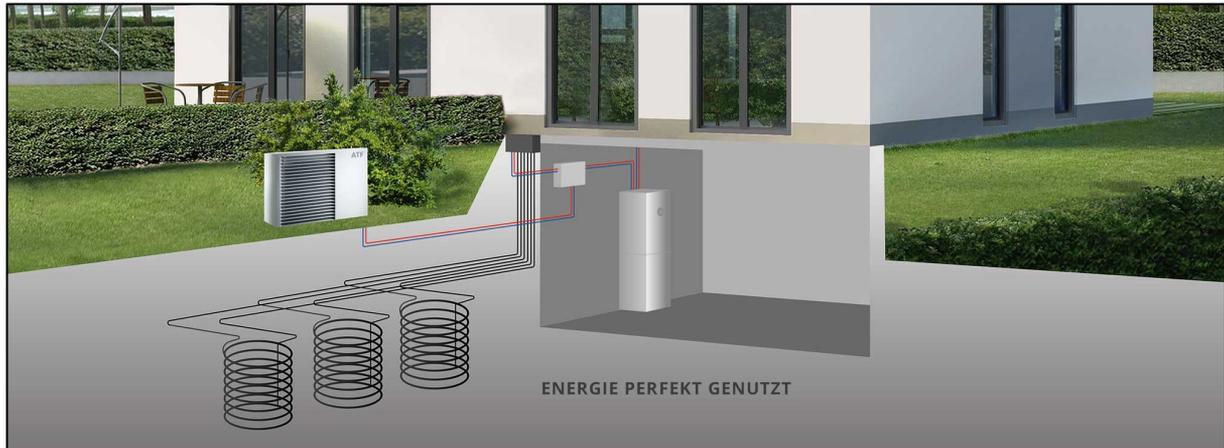


Abbildung 18: Konzept des Terra-Boosters (GEOPUNKT Bohrtechnik GmbH, 2024)

Durch die Nutzung von zwei unterschiedlichen Wärmequellen wird eine deutliche Verbesserung der Effizienz der Wärmepumpe erwartet. Ob sich dies in der Praxis bewahrheiten wird, steht aktuell noch offen.

Es wäre auch möglich, diese Steuerungseinheit mit dem Außengerät in das Konzept Eisspeicher NEU zu integrieren und diesen mit der Außenluft zu regenerieren.

Ein thematisch angrenzendes derzeit laufendes österreichisches Forschungsprojekt ist: „Hocheffiziente multivalente Wärmepumpenkonzepte zur thermischen Nutzung von Außenluft mit geothermischer Speicherung“, das im Auftrag von FFG und BMK durchgeführt wird und 2024 abgeschlossen werden soll (<https://projekte.ffg.at/projekt/4123873>).

Auch das Schweizer Forschungsprojekt „RenoSource – Mehrquellen-Wärmepumpensysteme für den Wärmeerzeugersersatz mit Erdwärmesonden zur Spitzenlastdeckung“ arbeitet an multivalenten Wärmepumpen-Konzepten. Dieses Projekt soll 2027 abgeschlossen werden.

Aktuelle technische Weiterentwicklungen bei Wärmepumpen:

Der Fokus vieler Hersteller liegt darauf

- Klimaschädliche Kältemittel zu ersetzen
- Die Effizienz der Wärmepumpen weiter zu steigern
- Die Lärmbelastung durch Luft-Wasser-Wärmepumpen zu reduzieren

Bei der Weiterentwicklung der Effizienz von Wärmepumpen liegen derzeit auch international zwei Tiroler Firmen voran. Die Firma LAMBDA Wärmepumpen produziert Monoblock Luft-Wasser-Wärmepumpen. Diese gibt es laut Herstellerangabe von 8 kW bis 20 kW und sie erreichen SCOP 35°C-Werte bis zu 5,73 (LAMBDA Wärmepumpen GmbH, 2024).

Die Kennwerte der Tiroler Firma Ovum GmbH für ihre Luft-Wasser-Wärmepumpe des Typs AirCube fallen noch etwas besser aus. Der Typ 312P erzielt laut Herstellerangabe ein SCOP 6,02 und 39,9 dB(A) Geräuschpegel. Kältemittel ist R290 Propan und auch dieses Gerät ist ein Monoblock (OVUM Wärmepumpen GmbH, 2024).

Trotz der hohen Effizienz von manchen Luftwärmepumpen kann der Kühlbetrieb mit Sole-Wasser bzw. Wasser-Wasser Wärmepumpen deutlich energiesparsamer durchgeführt werden, da hier das Erdreich bzw. das Grundwasser als Wärmesenke dient und nur Energie für die Umwälzpumpen benötigt wird.

Perspektive der Nutzung magnetokalorischer Effekte für Wärmepumpen

Alternativ zu den Kompressoren der klassischen Wärmepumpen soll bei dieser Technologie Wärme durch die Bewegung und Schaltung von magnetischen Feldern, die Nutzung einer thermischen Diode und das Heatpipe-Konzept zum Wärmetransport erfolgen. Diese Wärmepumpen werden geräuschlos sein und kein Kältemittel brauchen. Im derzeitigen Entwicklungsstand ist noch nicht klar, welche Effizienzsteigerung dieses Wärmepumpenkonzept erreichen kann.

Im deutschen Forschungs-Leitprojekt „ElKaWe“ arbeiten sechs Fraunhofer-Institute unter der Leitung des Fraunhofer IPM an der Entwicklung elektrokalorischer Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen. Elektrokalorische Systeme kommen laut Projektbeschreibung ohne teure Materialien und aufwändige Mechanik aus – ein Plus in puncto Kosten, Baugröße und Langzeitstabilität (Fraunhofer IPM, 2024a).

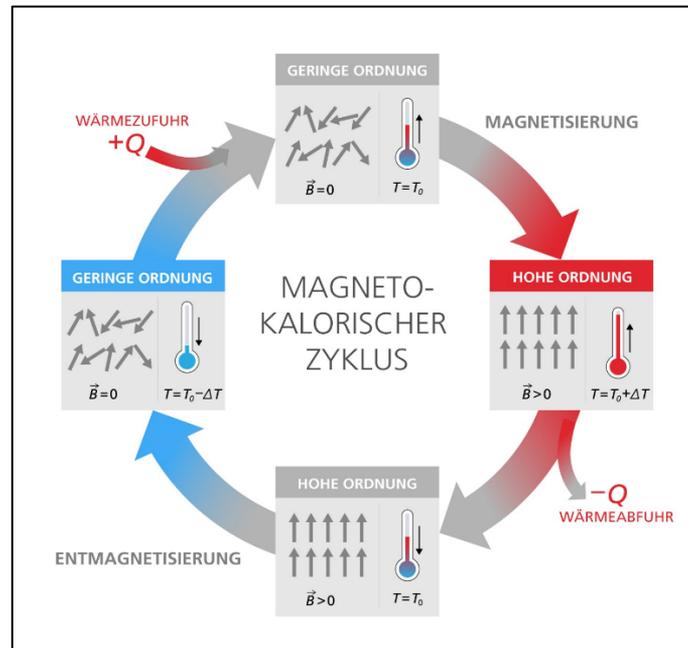


Abbildung 19: Der magneto-kalorische Zyklus (Fraunhofer IPM, 2024b)

Die magnetokalorische Kühlung basiert auf dem Heatpipe-Konzept. Die Wärme wird nach dem Prinzip einer thermischen Diode in nur eine Richtung „weitergeschoben“. Durch die im Magnetfeld erzeugte Wärme verdampft Flüssigkeit im magnetokalorischen (MK-)Material. Der Druck im Segment steigt. Das Überdruckventil öffnet sich, sodass Dampf in das Nachbarelement gelangt. Nach Abschalten des Magneten kühlt das MK-Material auf unter die Ausgangstemperatur ab. Der Dampfdruck sinkt. Es entsteht ein Unterdruck gegenüber dem vorangehenden Segment. Gasförmiges Fluid strömt nach, Wärme wird aus dem vorangehenden Segment aufgenommen (Fraunhofer IPM, 2024b).

3.7. Entwicklungen und Tendenzen bei Eisspeichern

Den Einbau, die Form und die Wärmetauscherrohre eines konventionellen Eisspeichers zeigen die nachfolgenden Bilder.



Abbildung 20: Das Ausheben der Grube für den 10 m³ fassenden Eisspeicher im oberbayrischen Landshut. (Bick, 2017; IKZ Haustechnik, 2017)



Abbildung 21: Einheben einer Betonzisterne / des Eisspeichers mit dem Autokran (hausinfo, 2022) (Isocal, 2022)



Abbildung 22: Betonzisterne (d = 3,2 m, h = 3,3 m) wird mittels Autokran in die fertige Grube gehoben (Bick, 2017; IKZ Haustechnik, 2017)

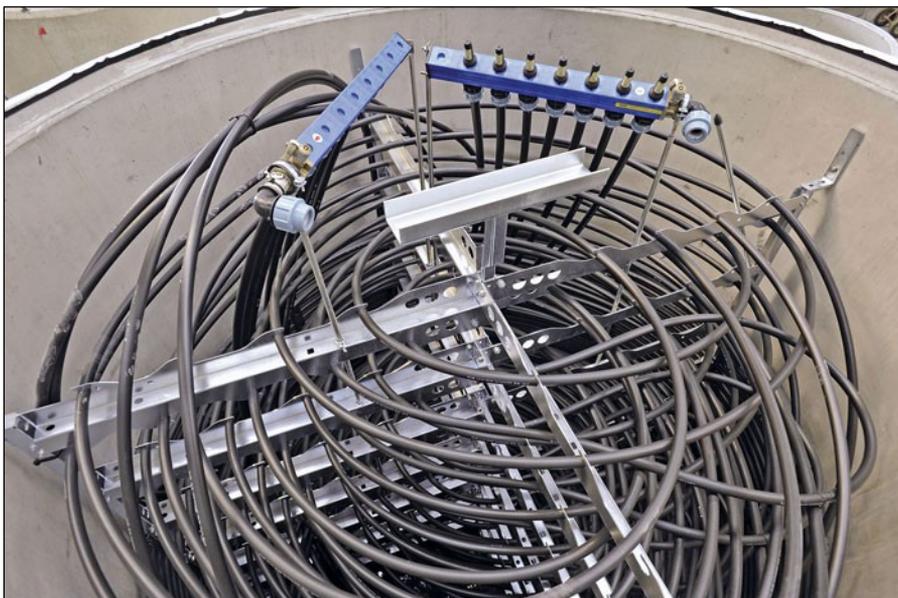


Abbildung 23: Spiralförmig angebrachte Rohrleitungen im Eisspeicher mit 2 Wärmetauschern (ein Regenerationsrohr & ein Entzugswärmetauscher) und Temperaturfühler im Zentrum (Bick, 2017; IKZ Haustechnik, 2017)

Dieser Eisspeicher ist relativ kompakt (ca. 3 m Durchmesser, Gesamthöhe ca. 4 m) und nutzt als Wärmetauscher die typischen Rohrbündel. In diesem Fall ist alles komplett vorgefertigt und kann mit dem Deckel geschlossen werden. Nachdem der Speicher mit Wasser gefüllt wurde, kann Wärme eingespeist oder entzogen werden.

Wenn Wärme über einen längeren Zeitraum ohne Unterbrechung entzogen wird, gefriert das gekühlte Wasser an den kalten Wärmetauscherrohren und bildet eine Ummantelung aus Eis. Wenn weiter latente Wärme entzogen wird, friert das Eis zu einem einzigen Eisblock zusammen.



Abbildung 24: Seitenansicht eines durchgefrorenen Eisspeichers (Viessmann GmbH, 2022) (Viessmann GmbH, 2024)

Bei der konventionellen Nutzung wird über den ganzen Winter mehr Wärme entzogen als vom umgebenden Erdreich nachfließen kann und es bildet sich ein massiver Eisblock. Wird keine Wärme mehr entzogen, taut die Erdwärme des umgebenden Erdreichs das Eis langsam wieder auf. Wenn der Eisblock im Sommer zur Kühlung genutzt wird oder wenn aktiv regeneriert wird, schmilzt er schneller.

Diskussion der Effizienz von Eisspeichern:

Die effiziente Nutzungsmöglichkeit der Erstarrungs- oder Kristallisationswärme wird von drei Aspekten direkt beeinflusst:

- Material des Wärmetauschers
- geometrische Form des Wärmetauschers
- Dicke der Eisschicht am Wärmetauscher

Die üblichste und am häufigsten gebaute Form von Eisspeichern nutzt Polyethylen-Rundrohre, die den gesamten Winter über Wärme entziehen. Üblicherweise bildet sich eine sehr dicke Eisschicht rund um das Rohr. Wie die Abbildung 25 zeigt, ist das der ineffizienteste Weg, um Kristallisationswärme zu nutzen.

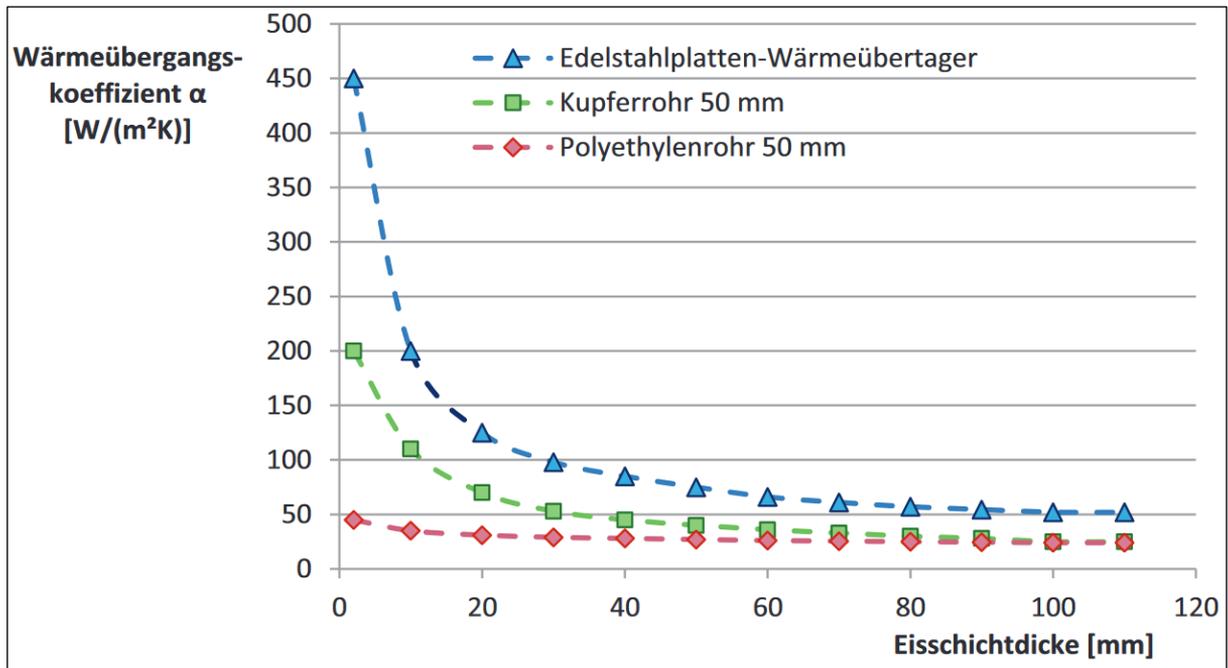


Abbildung 25: Darstellung der Wärmeübergangskoeffizienten von Edelstahl-Plattenwärmetauscher, Kupferrohren und PE-Rohren zum Wasser bzw. Eis (Goeke, 2021)

Abbildung 25 zeigt den Wärmeübergangskoeffizienten von verschiedenen Wärmetauscher-Bauweisen zu Wasser bzw. Eis; durch Form- und Materialwahl ergibt sich ein bedeutender Unterschied (bis zum neunfachen Wärmeübergangskoeffizienten).

Was außerdem aus Abbildung 25 hervorgeht, ist, wie schnell der Wärmeübergangskoeffizient - und damit der Wärmestrom - bei zunehmender Stärke des ummantelnden Eises abnimmt.

Die effiziente Nutzungsmöglichkeit der latenten Erstarrungs- oder Kristallisationswärme liegt also in den ersten Millimetern der Eisschichtbildung. Ab 20 mm Eisschichtdicke wird die Nutzung der Erstarrungswärme sehr ineffizient.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die mit PE-Rohren ausgeführten Eisspeicher energetisch sehr ineffizient sind.

Die Schweizer Firma SOLTOP Energie AG hat das erkannt und den Eisspeicher Icesol mit vertikal stehenden Plattenwärmetauschern entwickelt.

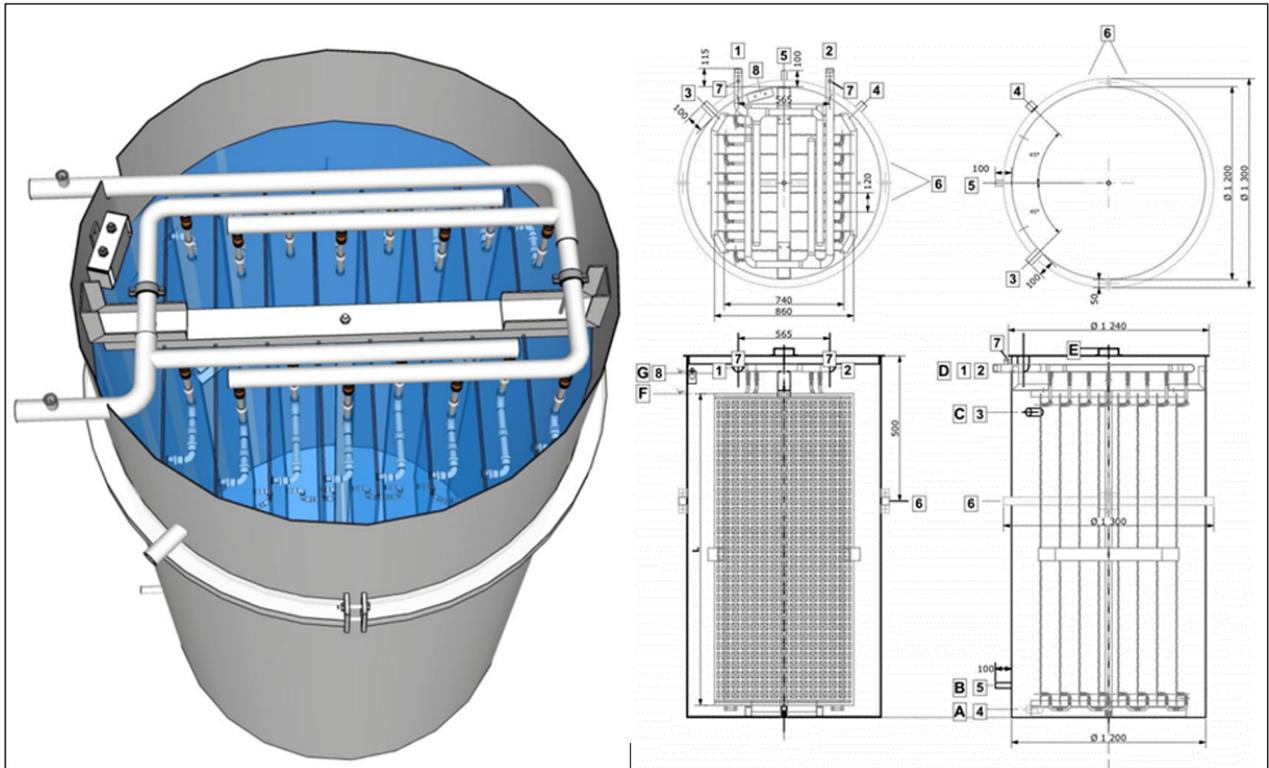


Abbildung 26: Icesol, vertikale Wärmetauscher-Platten in zylindrischem Eisspeicher (SOLTOP Energie AG, 2018)

Dieser Eisspeicher nutzt die Vorteile der vertikalen Plattenwärmetauscher aus Edelstahl, die hier in einem sehr engen Abstand von 10 cm zueinanderstehen. Dadurch haben die Wärmetauscher eine große Oberfläche und der Wassertank kann sehr kompakt (ca. 120 cm Innendurchmesser) gehalten werden. So kann er sehr schnell komplett durchfrieren und die gesamte Erstarrungswärme relativ effizient genutzt werden. In der dargestellten Form ist er nicht dafür konzipiert, im Erdreich vergraben zu werden. Hier muss zur Regeneration wieder über die Wärmetauscher Wärme zugeführt werden. Befände er sich im Erdreich, könnte er durch sein geringes Volumen und die in Relation große Oberfläche auch relativ rasch regeneriert bzw. aufgetaut werden.

Eine Weiterentwicklung ist es, die Wärmetauscher-Platten in einen größeren Behälter einzubauen und durch kurzzeitige Zufuhr von etwas wärmerem Wasser die gerade entstandenen und noch sehr dünnen Eisplatten wieder abzuschmelzen und in den Wasserbereich oberhalb der Plattenwärmetauscher aufschwimmen zu lassen. Bei vertikal stehenden Wärmetauscher-Platten genügt es, wenn sich beim Abtauvorgang eine dünne Wasserschicht zwischen Wärmetauscher-Platte und Eisschicht bildet, damit sie sich von der Wärmetauscher-Platte ablöst und durch das geringere spezifische Gewicht von Eis zur Wasseroberfläche aufschwimmt. So kann sehr schnell wieder mit der Vereisung der Wärmetauscher-Platten begonnen und latente Wärme/Erstarrungswärme entzogen werden.



Abbildung 27: Aufgeschwommene Eisplatten nach Abtauvorgang und neue Eisplatten im Entstehen an den Wärmetauscher-Platten (SOLTOP Energie AG, 2024)

3.8. Phasenwechselmaterialien

Neben Wasser, das seinen Phasenwechsel von flüssig zu fest bei 0°C hat, gibt es noch Paraffine und Salzhydrate, deren Erstarrungswärme in Heizsystemen nutzbar ist. Bei Paraffinen und Salzhydraten als Phase-Change-Material (PCM) kann die Phasenwechseltemperatur für eine gewünschte Temperatur „eingestellt“ werden.

Die potenziell für Eisspeicher nutzbaren Entwicklungen werden im folgenden Text dargestellt.

Beispielsweise bietet der deutsche Hersteller Rubitherm PCM mit Schmelztemperaturen von -21°C bis 90°C an.

Tabelle 1: Rubitherm PCM SP-SERIE, PCM mit hoher Dichte aus Wasser-Salz-Gemisches und Additiven (Auszug) (Rubitherm Technologies GmbH, 2024)

Produkt	Schmelzbereich	Speicherkapazität Ø
SP -7	-7 <-> -5°C	290 kJ/kg
SP 5_gel	2 <-> 7°C	155 kJ/kg
SP 7_gel	5 <-> 8°C	155 kJ/kg
SP 9_gel	10 <-> 11°C	155 kJ/kg
SP 11_gel	12 <-> 13°C	155 kJ/kg
SP 15_gel	15 <-> 17°C	160 kJ/kg
SP 21 EK	21 <-> 23°C	170 kJ/kg
SP 24 E	24 <-> 25°C	180 kJ/kg
SP 25 E2	24 <-> 26°C	180 kJ/kg
SP 26 E	25 <-> 27°C	180 kJ/kg
SP 29 Eu	29 <-> 31°C	200 kJ/kg
SP 31	31 <-> 33°C	210 kJ/kg
SP 50*	50 <-> 51°C	220 kJ/kg
SP 58*	56 <-> 59°C	250 kJ/kg
SP 70	67 <-> 73°C	150 kJ/kg
SP 90*	88 <-> 90°C	150 kJ/kg

Die Temperaturbereiche, die für Gebäudeheizung mittels Wärmepumpe geeignet sind, wurden hellblau hinterlegt. Jene, die für die Raumkühlung geeignet sind, wurden blau und solche, die für einen Warmwassertank geeignet sind, rot hinterlegt (siehe Tabelle 1).

Das Produkt SP 7_gel ist dabei mit dem Schmelzbereich zwischen 5 und 8°C für die Effizienzsteigerung von Wärmepumpen am interessantesten.

Im EU-Forschungsprojekt Hi-ThermCap (EU-Horizon 2020 Forschungsprojekt, das 2019 abgeschlossen wurde (<https://cordis.europa.eu/article/id/413246-phase-change-material-capsule-provides-greater-thermal-energy-storage/de>) wurde von der deutschen ESDA Technologie GmbH in Eisenberg/Thüringen eine form- und materialoptimierte Makroverkapselung aus Kunststoff entwickelt, die gefüllt mit Phasenwechselmaterial eine verbesserte latente thermische Energiespeicherung in Heiz- und Kühlsystemen ermöglicht.



Abbildung 28: HeatSel® mit Temperatur-Farben, im Warmwasser-Tank und zwei Größen (ESDA Technologie GmbH, 2019)

Die Makroverkapselungen gibt es in zwei Größen:

- Kleine HeatSel®: Durchmesser 180 mm, für Speicher von 300 - 2.000 Liter
- Große HeatSel®: Durchmesser 270 mm, für Speicher von 2.000 - 140.000 Liter

Laut Hersteller sind die Makroverkapselungen so konstruiert, dass neben einer großen Oberfläche gleichzeitig die PCM-Schichtdicken so geringgehalten werden, dass das gesamte PCM am Phasenwechselprozess teilnimmt und so eine effiziente Wärmeübertragung (schnelle Ladung und Entladung) auch bei sehr niedrigen Temperaturdifferenzen realisiert werden kann. Gleichzeitig ermöglicht die spezielle Formgebung vollflächig durchströmte Packungen (der übereinandergestapelten Makroverkapselungselemente) bei größtmöglicher Raumnutzung.

Folgendes Beispiel eines Anbieters für die Steigerung der Wärmespeicherkapazität pro Volumeneinheit bei Verwendung von PCM zeigt, dass der Tank bei gleicher Wärmekapazität von 8.000 Liter auf 2.000 Liter reduziert werden kann (-75 %).

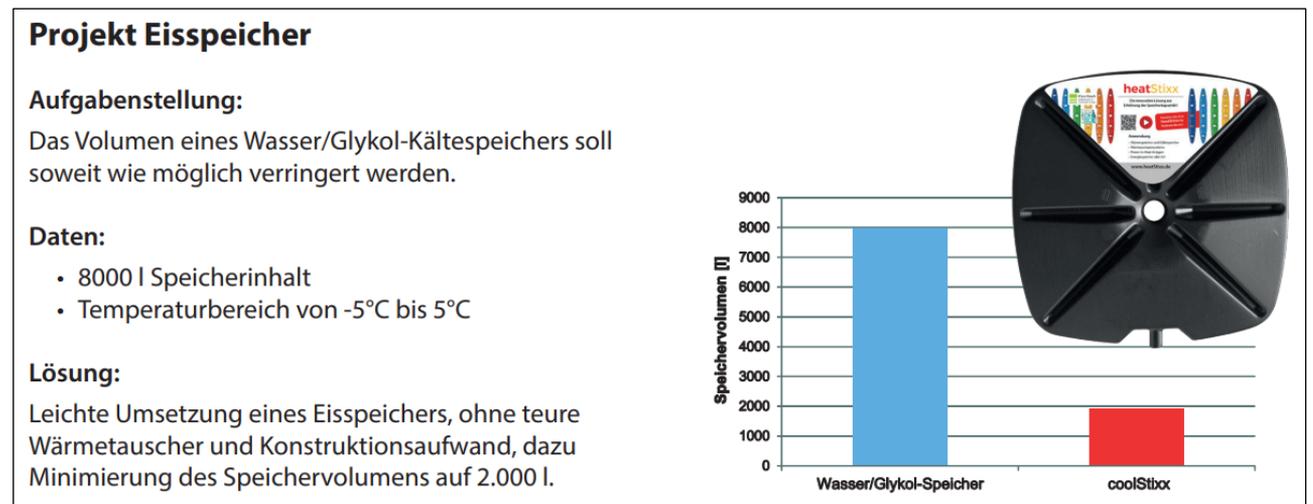


Abbildung 29: Volumenreduktion durch PCM-Kapseln (kraftBoxx GmbH, 2024)

PCM in Heatpipe-Anwendungen

Um Eisspeicher besser mit Erdwärme regenerieren zu können, könnten Heatpipes zum Einsatz kommen (siehe Kapitel 4.1.2).

Heatpipes in relevanten Dimensionen finden sich z.B. in Alaska, um den Permafrostboden unter Pipelines in gefrorenem Zustand zu halten (Heuer, 1979). Dieser würde sonst durch diverse Wärmeeinträge (Restwärme des Erdöls, Reibungswärme etc.) über die Stützelemente aufgetaut werden und dadurch seine Festigkeit verlieren. Hier sind Heatpipes seit den 1970ern wartungsfrei und ohne Antriebsenergie von außen in Betrieb.



Abbildung 30: Alaska Pipeline mit Heatpipes (*As permafros thaws, protecting infrastructure becomes more important, 2021*)

Es gibt einige verschiedene Bezeichnungen für dieses Prinzip

- Gravitationswärmerohr
- Thermosiphon-Wärmerohr
- Verdampfersonde mit Wärmeträgermittel CO₂
- Selbstzirkulierende CO₂ Erdsonde
- CO₂-Erdwärmesonde
- Zwei-Phasen-Thermosiphon mit Kohlendioxid (CO₂) als Arbeitsfluid

die aber alle das gleiche bedeuten.

In Abbildung 31, die die Einbindung in eine Wärmepumpenheizung zeigt, wird der Begriff „CO₂-Erdsonde“ genutzt.

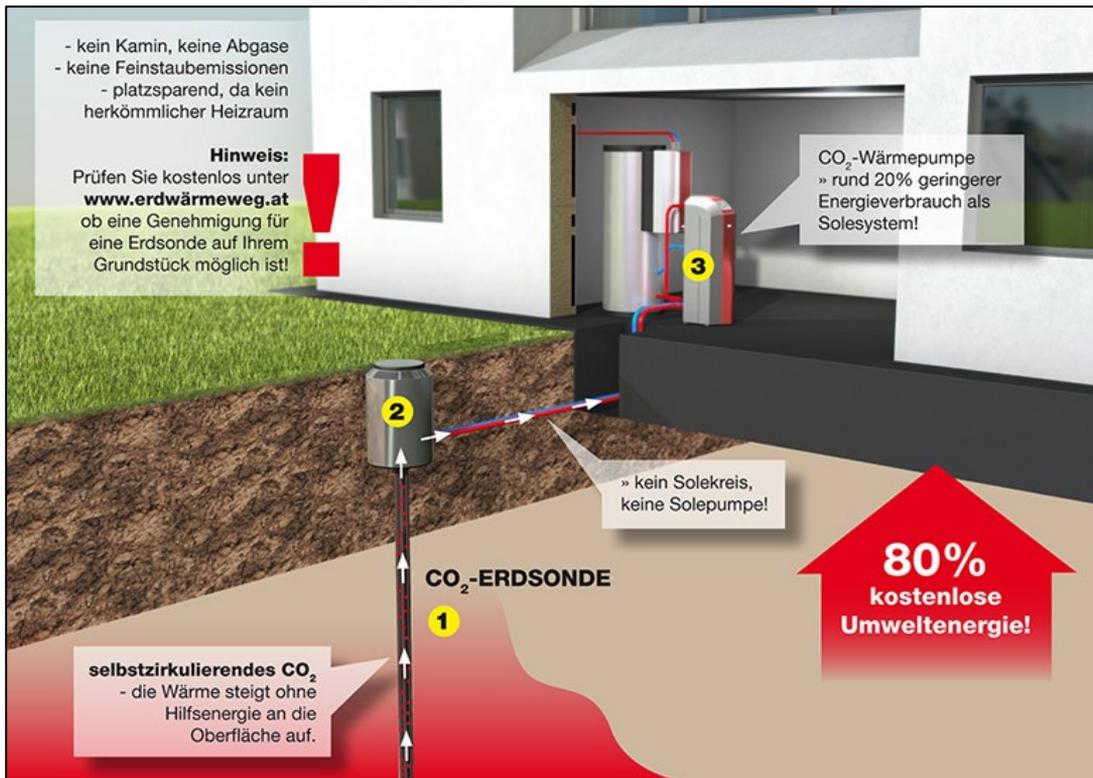


Abbildung 31: Schema der Einbindung eines Gravitationswärmerohrs in eine Wärmepumpenheizung (Meco, 2024)

Edelstahl-Spiralwellrohr als Erdwärmerohr (FKW-Patent)

Spiralgewelltes Edelstahlwellrohr:

Bei Einhaltung der dem Rohr infolge von D und L abhängigen

Der CO₂-Flüssigkeitsfilm läuft an der Innenwand des Wellrohres spiralig, geschützt durch die Wendel, hinab.

Flutgrenze und maximalen Entzugsleistung

Das Gas strömt im freien Querschnitt ohne Behinderung des Films aufwärts.

ergibt sich eine optimale Zirkulation des CO₂ im Rohr und eine

Hierdurch wird die maximale Wärme-Entzugsleistung aus der Erde erreicht.

rippenförmige Anbindung an die Verfüllmasse

Abbildung 32: Edelstahl-Spiralwellrohr als Erdwärmerohr (Kruse et al., 2011)



Abbildung 33: Oberes Ende des Erdwärmerohrs nach Einbringen in das Bohrloch (Kruse et al., 2011)

Diese Abbildung ist im Zuge eines Forschungsprojekts entstanden, bei dem der Druck- und Temperaturverlauf erfasst wurden. Daher werden zusätzlich zum Erdwärmerohr noch Kabel und dünne schwarze Rohre ins Bohrloch geführt. Im Normalfall gibt es nur das gewellte Edelstahlrohr.

Das Forschungsprojekt des Instituts für Thermodynamik der Universität Leibniz Hannover und des ITLR der Universität Stuttgart „Strömungsformen und Wärmeübergang in einer senkrechten Zweiphasen-Erdwärme-Wellrohrsonde“ (<https://www.ift.uni-hannover.de/de/forschung/waerme-und-stoffuebertragung/zweiphasen-erdwaerme-wellrohrsonde>) sowie das Projekt „CO₂-Erdwärmesonden zum Betrieb von Wärmepumpen“ (<https://www.ift.uni-hannover.de/de/forschung/waerme-und-stoffuebertragung/co2-erdwaermesonden-zum-betrieb-von-waermepumpen>) des Instituts für Thermodynamik der Universität Leibniz Hannover setzen sich mit dem Betrieb von CO₂ gefüllten Heatpipes auseinander.

4 Möglichkeiten zur Optimierung von Eisspeichern

4.1. Funktionelle Konzeption eines optimierten Eisspeichers

4.1.1. Optimierung der Wärmeentnahme und Regenerationszyklen

Zur Optimierung der Wärmeentnahme, also der Nutzung der Erstarrungswärme des Wassers im Eisspeicher durch die Wärmepumpe soll das entstehende Eis auf den Plattenwärmetauschern nicht dicker als maximal 20 mm werden. Sonst verschlechtern sich der Wärmeübergangskoeffizient (damit einhergehend der Wärmestrom) und die Effizienz des Konzepts sehr stark.

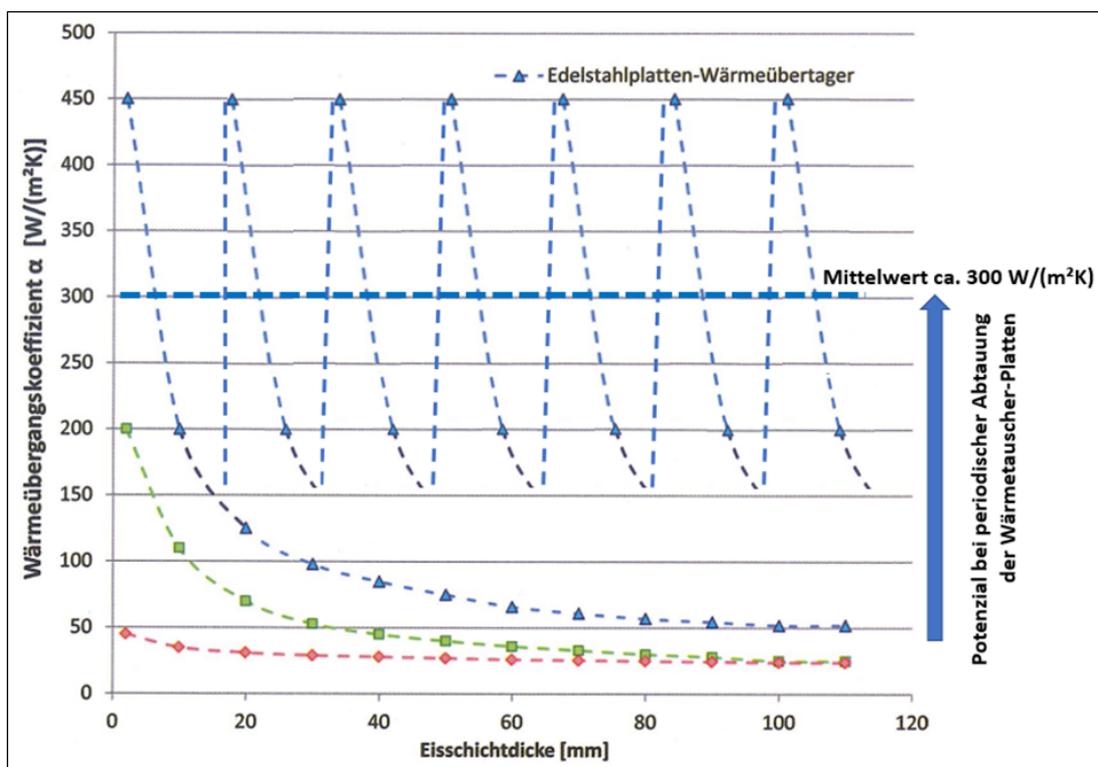


Abbildung 34: Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten von Edelstahl-Plattenwärmetauscher zu Wasser bei entstehender Eisschicht mit sechs Abtauvorgängen (bei ca. 4 Heizmonaten [~ 120 Tage] ca. alle 20 Tage) (Goeke, 2021)(Abbildung 25) + eigene Überarbeitung

In Abbildung 34 wurde grafisch ergänzt, wie sich regelmäßiges Abtauen der Eisschicht auswirken würde. Für den neu hinzugefügten Verlauf (schwankt zwischen 150 und 450 W/m²K) des Wärmeübergangskoeffizienten der Edelstahlplatten-Wärmeübertrager bildet die x-Achse nicht mehr die Dicke der Eisschicht ab, sondern die vergangene Zeit.

Zur Wärmeentnahme wird das in der Wärmepumpe zirkulierende Wasser, dem Glykol als Frostschutzmittel zugesetzt wurde, auf -3°C abgekühlt und durch die Wärmetauscher im Eisspeicher

geschickt. Dadurch gefriert das am Wärmetauscher anliegende Wasser zu Eis und die dabei auftretende Erstarrungswärme erwärmt das zirkulierende Wasser-Glykol-Gemisch auf -1°C . Diesen Temperaturhub von 2K nutzt die Wärmepumpe.

Beträgt die Dicke der sich bildenden Eisschicht mehr als 15 mm, kühlt die Wärmepumpe kurzfristig nicht mehr auf -3°C . Wenn die Temperatur der Wärmetauscherplatten auf 0°C oder $+1^{\circ}\text{C}$ ansteigt, bildet sich sehr schnell ein dünner Wasserfilm zwischen der Oberfläche der Wärmetauscher und der Eisschicht. Damit verschwindet die Haftung des Eises an der Metalloberfläche, die Eisplatte löst sich und schwimmt im umgebenden Wasser auf. Damit ist der Plattenwärmetauscher wieder eisfrei und kann erneut mit der Wärmeentnahme beginnen. Wenn für die aufgeschwommenen Eisplatten oberhalb der Wärmetauscherplatten genug Wasservolumen zur Verfügung steht und die Wassertemperatur über 0°C liegt, tauen diese schwimmenden Eisplatten wieder.

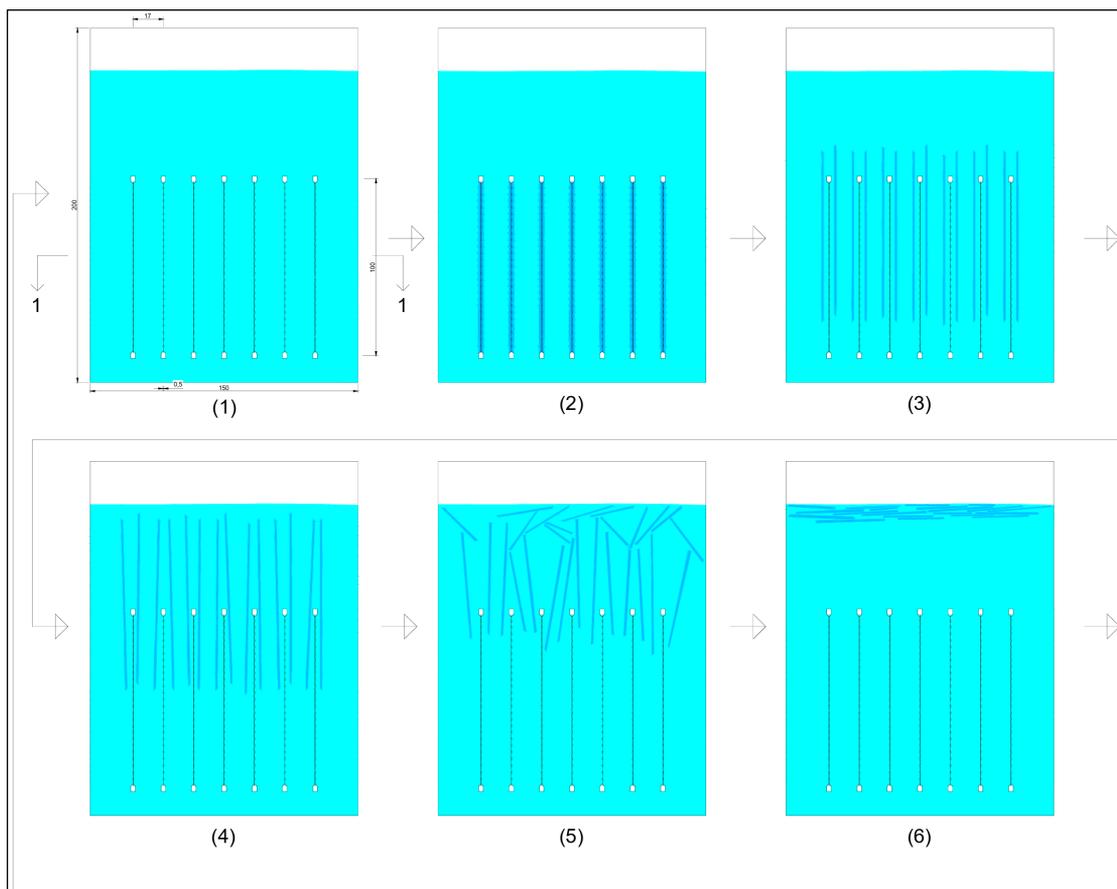


Abbildung 35: Ablauf der Eisbildung und des Abschmelzens der Eisplatten (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)

Das wichtigste konstruktive Kriterium ist dabei die rundumlaufende Kante der Wärmetauscher-Platten. Diese müssen mit einem wärmedämmenden Rahmen umschlossen werden (siehe weiße Elemente Abbildung 35). Diese sollen ein Zusammenfrieren der Eisplatten über die rundumlaufenden Kanten der Wärmetauscherelemente verhindern. Sind die Eisschichten auf beiden Seiten der Wärmetauscher-Platte am Plattenrand zusammengefroren, schwimmen die Eisplatten erst auf, wenn diese Verbindung geschmolzen oder gebrochen ist.

4.1.2. Eisspeicher-Regeneration im Erdreich durch Erdwärme

In Wien liegt die Jahresdurchschnittstemperatur bei ca. 12 - 13°C (siehe Abbildung 36). Dort ist im Erdreich in 4 m Tiefe mit einem Jahresminimum von ca. 7,5°C und einem Jahresdurchschnitt von ca. 11,5°C zu rechnen (siehe Abbildung 37), im alpinen Bereich mit tieferen Temperaturen (z.B. Lungau/Tamsweg 8°C). Ab 4 bis 5 m Tiefe ist im Erdreich die jahreszeitliche Temperaturschwankung allgemein sehr gering.

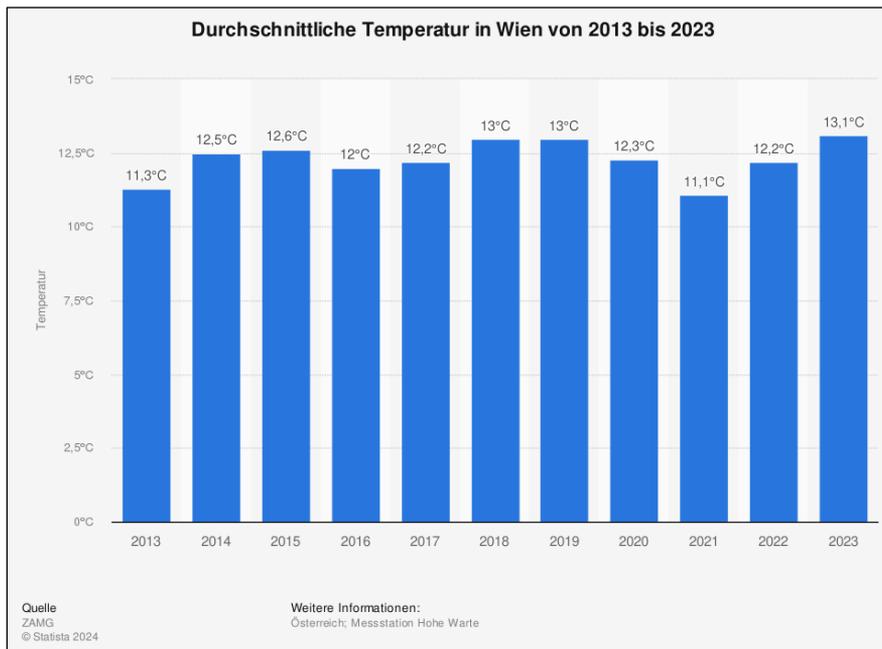


Abbildung 36: Durchschnittliche Temperatur in Wien (2013-2023) (ZAMG, 2024)

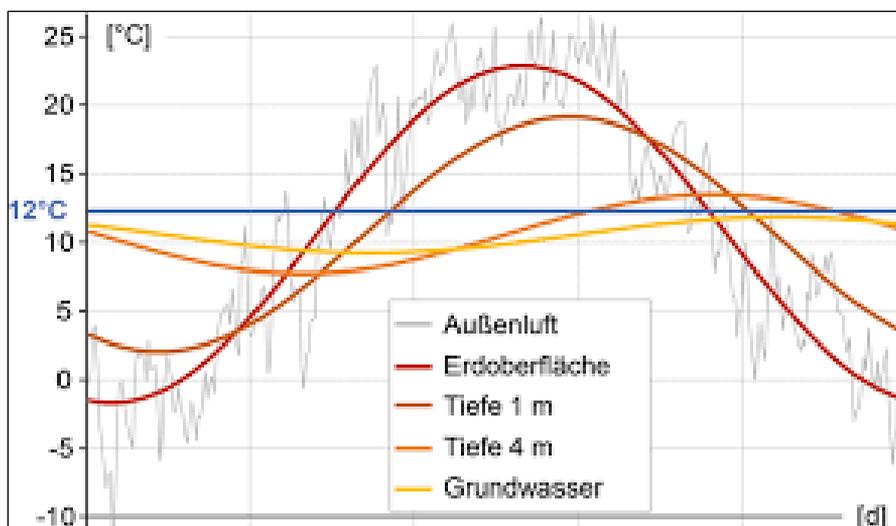


Abbildung 37: Jahrestemperaturverlauf Außenluft, Erdreich und Grundwasser (Gratzl et al., 2019)

Da der Eisspeicher-Wassertank mit einem Revisionsdeckel von oben zugänglich bleiben muss und die notwendigen Erdarbeiten minimiert werden sollen, sind die Oberkanten eben zur Außenumgebung.

Daher ist der Eisspeicher-Wassertank noch in der Zone der im Jahresverlauf nahe der Erdoberfläche stark schwankenden Bodentemperaturen.

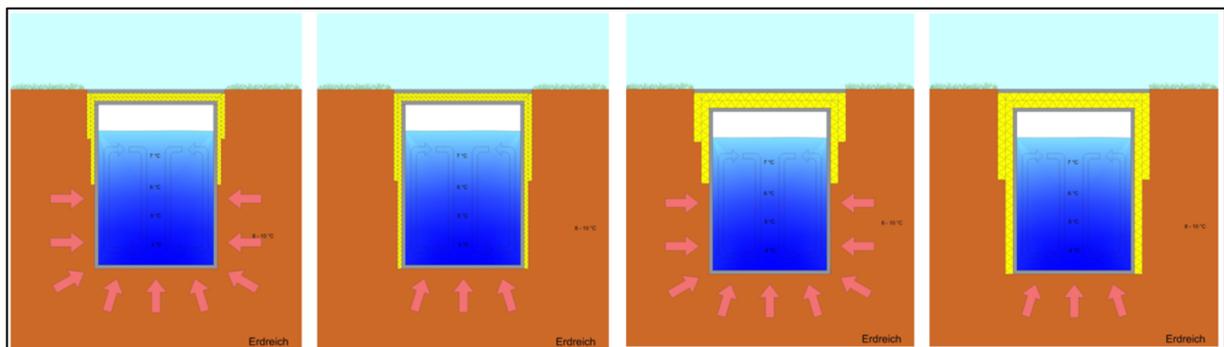


Abbildung 38: Optionen zur Minimierung des thermischen Austausches zur kalten Außenluft bzw. Erdoberfläche (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)

Den geringsten winterlichen Wärmeabfluss nach oben hat Variante 4 ganz rechts. Damit wird aber die Kontaktfläche für den Wärmeaustausch zum Erdreich sehr reduziert. Eine Verlängerung nach unten wäre aus thermischer Sicht sehr vorteilhaft. Je tiefer der Speichertank ins Erdreich reicht, umso mehr liegt er auch in der Tiefe, in der keine jahreszeitlichen Schwankungen mehr auftreten.

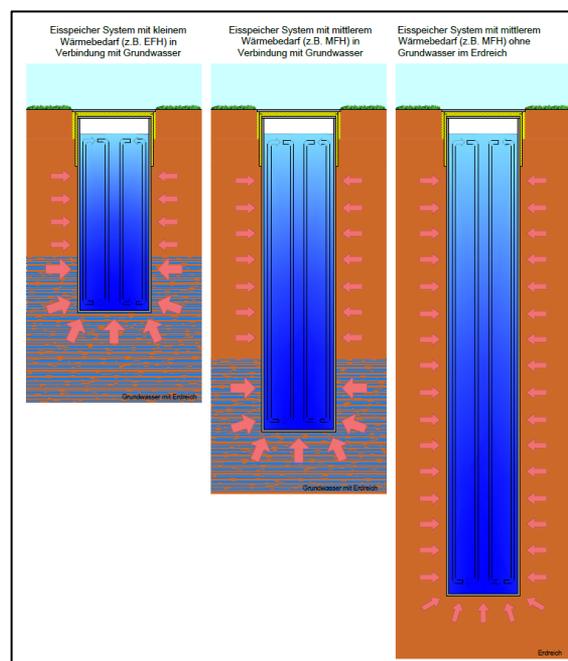


Abbildung 39: Verbesserung des Wärmestroms durch Verlängerung nach unten (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)

Eine Verlängerung nach unten würde mehr Kontaktfläche mit dem Erdreich ergeben und, wenn dadurch auch das Grundwasser erreicht wird, eine verstärkte Ankopplung an die Speichermasse Erdreich. Damit könnte die Wärmekapazität wesentlich gesteigert werden.

Da diese Verlängerung des Eisspeicher-Behälters nach unten den Aufwand für die Erdarbeiten bzw. Brunnenbauarbeiten stark anwachsen lässt, ist es fraglich, ob der dadurch entstehende Bauaufwand wirtschaftlich zu rechtfertigen ist.

Mit der ergänzenden Nutzung von Heatpipes kann der Erdbauaufwand klein gehalten und voraussichtlich ein ähnlicher Effekt (die thermische Ankopplung an das tiefer liegende Erdreich) erreicht werden.

Ein Heatpipe oder Wärmerohr ist eine Phasenwechselsonde und so ein vertikaler Wärmeüberträger, der unter Nutzung von Verdampfungswärme (latenter Wärme) eines Stoffes eine hohe Wärmestromdichte erlaubt. Auf kleiner Querschnittsfläche können so große Mengen Wärme (nach oben) transportiert werden. Unter Druck befindliches CO₂ ist hier ein sehr gut geeignetes Phasenwechsel-Material (PCM).

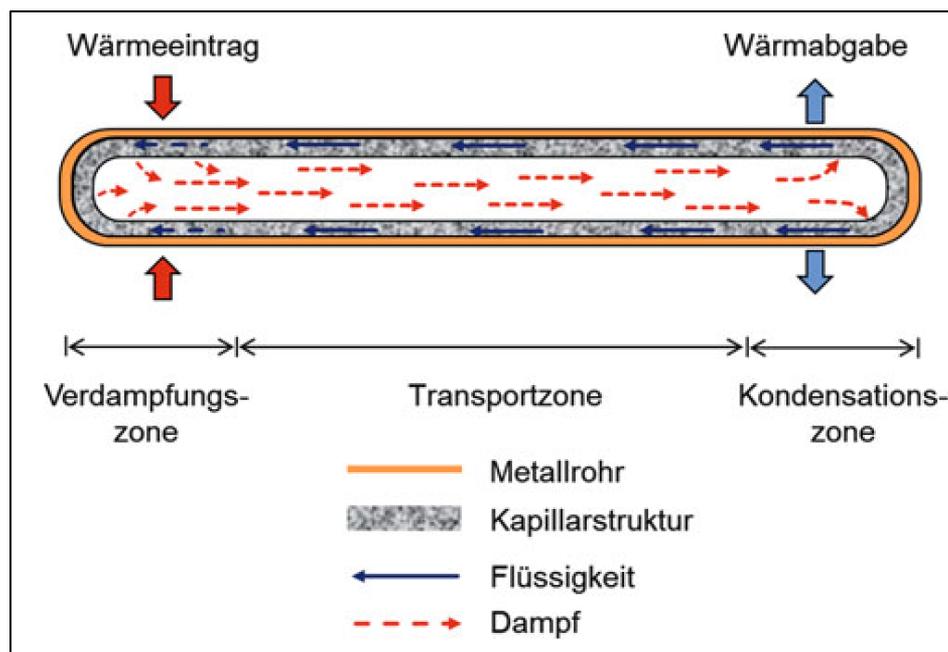


Abbildung 40: Funktionsweise Heatpipe (Giesinger, 2019)

Die folgenden Darstellungen zeigen, wie Heatpipes den Wärmetransport vom tieferen Erdreich zum Eisspeichertank verstärken können. Um den Bohraufwand für die Heatpipes gering zu halten, soll hier die Bohrung durch den Boden der bereits versetzten Hülle des Eisspeichers erfolgen. Dabei wären auch mehrere Bohrungen möglich. Durch die Wellstruktur des geplanten Wärmerohrs ist auch bei einem Gravitations-Wärmerohr eine Schrägstellung möglich.

Der Boden des Eisspeicher-Behälters ist nach Abschluss der Wärmerohr-Arbeiten abzudichten.

Welche Anzahl an Wärmerohren und welche Bohrtiefe möglich und sinnvoll ist, kann nur durch dynamische Simulationen ermittelt werden.

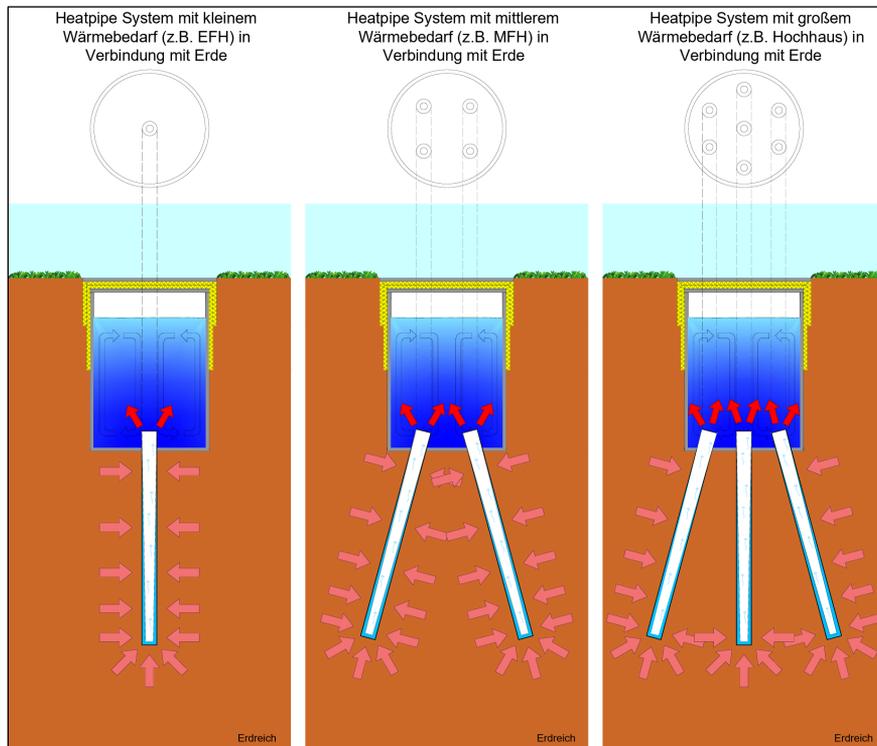


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Erdwärmenutzung durch Wärmerohre (weiße Elemente) (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)

Da die notwendige oder sinnvolle Dimensionierung derzeit nicht berechnet werden kann, ist auch eine Kostenabschätzung im Rahmen dieser Sondierung nicht möglich.

4.2. Konzeption eines optimierten Eisspeichers

4.2.1. Konstruktive Gestaltung eines Eisspeicherabsorbers um schnelle Gefrier- und Abtauvorgänge möglich zu machen

Durch eine mittige Unterteilung der Wärmetauscherplatten mit einem Streifen aus wärmedämmendem Material entstehen zwei getrennte und halbhohe Eisplatten. Dadurch kann auch die notwendige obere Überdeckung der vertikalen Wärmetauscherplatten mit Wasser auf die halbe Höhe der Wärmetauscherplatten begrenzt werden.

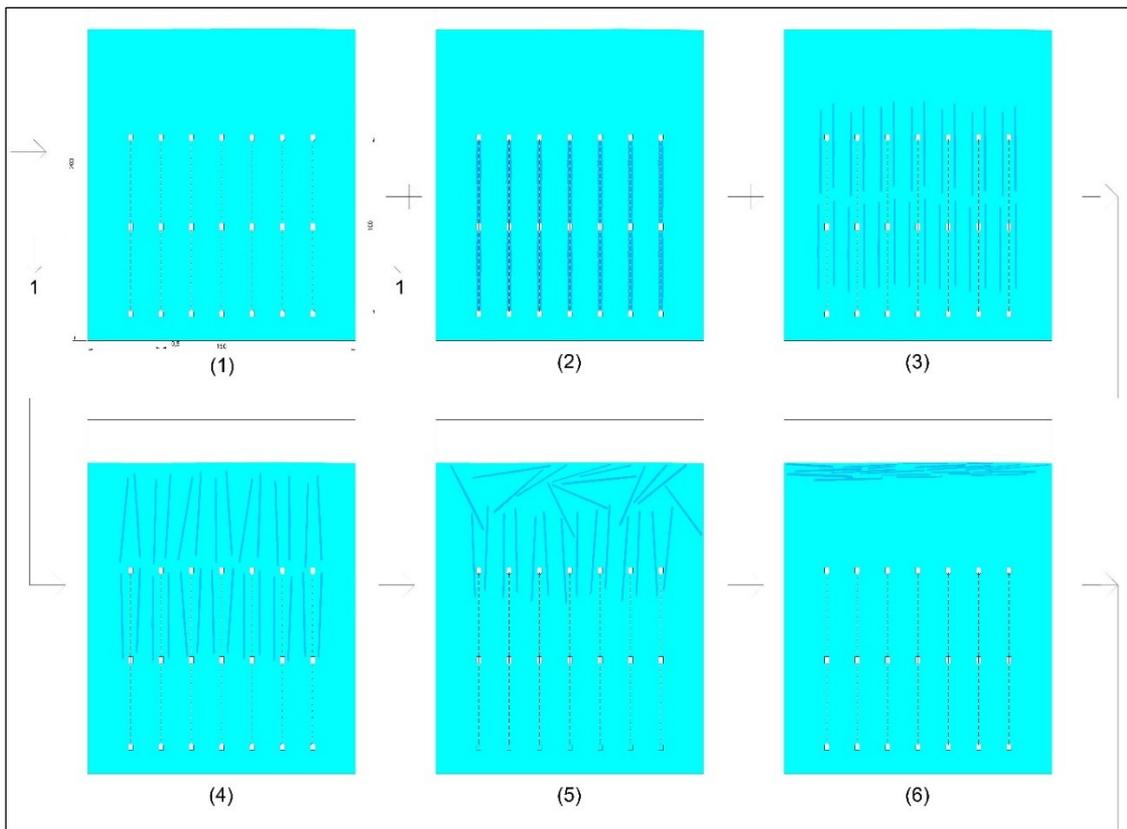


Abbildung 43: Illustrierter Abtau- und Aufschwimmvorgang der Eisplatten (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)

Bei kleineren Eisplattengrößen entsteht die Gefahr, dass sich die Eisplatten schon zwischen den Wärmetauscherplatten drehen und verkeilen könnten.

Bei häufig wiederholten Eisbildungszyklen (z.B. während Wärmebedarfsspitzen des Gebäudes) schmelzen die aufgeschwommenen Eisplatten langsamer als neue nachkommen. Dickere Schichten von aufgeschwommenen Eisplatten reduzieren die Bewegungshöhe aufschwimmender Eisplatten. Hier könnte eine Sensorik zur Erfassung und Optimierung des aktuellen Betriebszustands hilfreich sein.

Für das Ablösen der Eisplatten von den Wärmetauscherplatten ist die Bildung eines trennenden Wasserfilms durch das Erwärmen der Plattenoberfläche notwendig. Das wird bislang durch die kurzfristige Temperaturerhöhung der zirkulierenden Sole-Wärmeträgerflüssigkeit erreicht.

4.2.2. Optionen für optimierte Oberflächenbeschichtungen der Eisspeicherabsorber

Um das Anschmelzen der Eisplatten zu erreichen, kann eine elektrisch leitende Schicht angebracht werden, die sich bei Stromzufuhr erwärmt. Das kann ohne Änderung der zirkulierenden Soletemperatur parallel stattfinden. Das ergibt auch die Möglichkeit, jede einzelne Eisplattenfläche individuell kurz zu erwärmen und so das Abtauen und Aufschwimmen der Eisplatten einzeln und abgestuft nacheinander durchzuführen. So könnten auch schon sehr dünne Eisplatten von ca. 5 mm abgeschmolzen werden.

Dabei tritt auch eine Erwärmung des Metalls des Plattenwärmetauschers auf. Daher ist eine Steuerungstechnik notwendig, die diesen Vorgang so stromeffizient wie möglich erreicht.

Beim Schichtaufbau ist es notwendig, zuerst eine strom-isolierende Beschichtung auf den metallischen Plattenwärmetauscher bzw. -absorber aufzubringen.

Dann kann die elektrisch leitende Beschichtung aufgebracht werden. Dabei wären darin enthaltene Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT Carbon Nanotubes) sehr vielversprechend. Diese sind stark wärmeleitend und leiten elektrischen Strom besser als Kupfer.

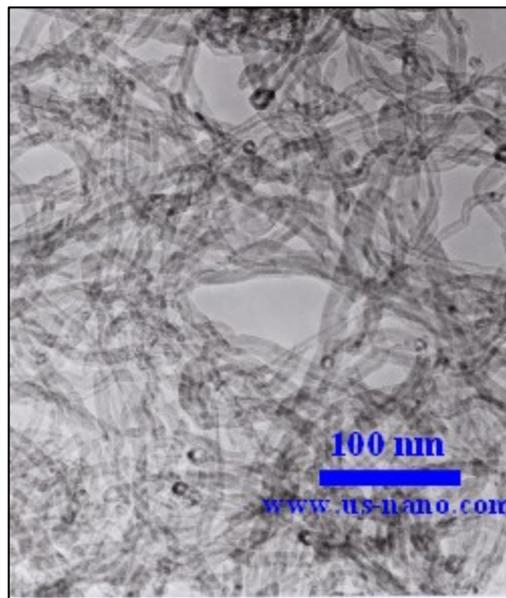


Abbildung 44: CNT Carbon Nanotubes in einer Beschichtung (US Research Nanomaterials, Inc, 2024)

Diese Schicht muss wieder von einer elektrisch nichtleitenden Deckschicht vor direktem Kontakt mit dem umgebenden Wasser abgedeckt werden.

Bei dünnen elektrisch leitenden Schichten kann auf bestehende Forschungsergebnisse zugegriffen und Kompetenzen von Spezialisten in Anspruch genommen werden. Beispielsweise forscht und entwickelt die österreichische Firma Attophotonics im Bereich der Nano-, Sensor- und Oberflächentechnik an dünnen Funktionsbeschichtungen im Nano-Bereich (RHP Group, 2024). Ein Teil der Forschungen sind Beschichtungen von Flugzeugflügeln, die von Vereisung freigehalten

werden sollen und im Vereisungsfall leicht wieder enteist werden können. Denkbar wäre eine Implementierung dieser Materialien im Konzept Eisspeicher NEU.

Neben den Wärmetauscherplatten aus Edelstahl (siehe Kapitel 3.7) wäre es auch möglich, Wärmetauscherplatten von Kühlschränken aus Aluminium zu verwenden. Weil Aluminium wesentlich stärker wärmeleitend ist (Edelstahl 10 – 20 W/mK, Aluminium 160 - 236 W/mK), reicht es, wenn die Sole nicht vollflächig, sondern nur in Kanälen den Wärmetauscher/Absorber durchströmt. Die folgende Abbildung zeigt diese Variante mit sehr dünner Eisschicht. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminium ist es wahrscheinlich sinnvoll, das Erwärmen gleichzeitig beidseitig durchzuführen.

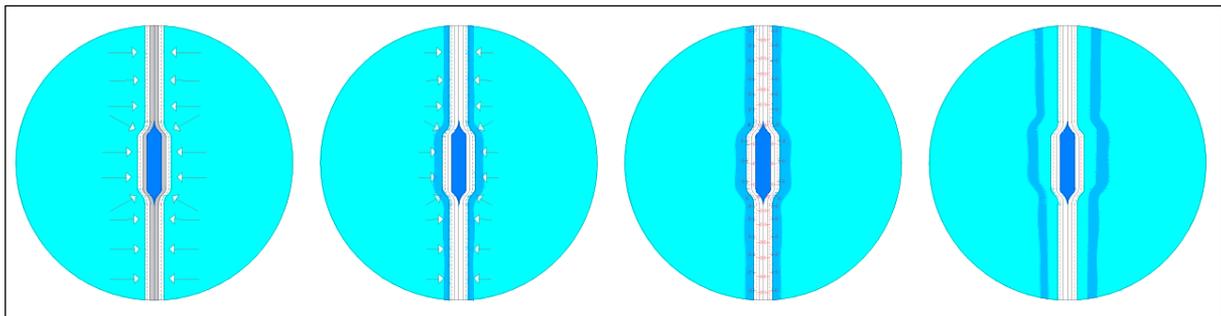


Abbildung 45: Ablauf des Wärmeentzugs, der Eisbildung und des Abschmelzens der Eisplatten an Wärmetauscherplatten (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)

Zusätzlich kann die Nanostruktur der Oberflächenbeschichtung noch von Relevanz sein. Wasserabstoßende hydrophobe Beschichtungen verzögern auch die Eisbildung am Wärmetauscher.

Ob Wasser bei 0°C friert, hängt von einigen Einflussfaktoren ab. Einige davon sind:

- Bewegungen im Wasser
- Elektromagnetische Felder
- Vorhandensein von Kristallisationskernen

Mit der gezielten Auswahl von Kristallisationskernen kann die Kristallisationstemperatur beeinflusst werden. Diese könnten dem Wasser zugesetzt werden oder die Oberfläche des Plattenwärmetauschers könnte wie Kristallisationskerne wirken. Diese Option ist von Interesse, weil sie auch die Vereisung gezielt an der Plattenwärmetauscher-Oberfläche auslösen würde. Derzeit ist aber keine derartige Nanobeschichtung bekannt. Sie müsste auch den auftretenden mechanischen Beanspruchungen langfristig standhalten können. Es gibt Forschung zum Thema Gefrierverzögerung auf nanoporösen mikrostrukturierten Oberflächen, weil es dafür viele wirtschaftlich relevante Anwendungen gibt. Selbstreinigung, Vereisungsschutz, Antibenetzungsbeschichtungen und Korrosionsbeständigkeit sind relevante Themen. Für das Gegenteil, die gezielte Förderung von Vereisung, konnte keine hilfreiche Technologie oder Forschung gefunden werden. Ideal wären Oberflächen, die bei Vereisungs- oder Enteisungszyklen auch von hydrophil auf hydrophob umschalten könnten.

4.2.3. Maßnahmen zur Reduktion des notwendigen Volumens des Eisspeichers NEU

Ziel des Projekts ist es, mit dem Konzept Eisspeicher NEU auch für sehr beengte Platzverhältnisse eine Wärmequelle für Wärmepumpen zusätzlich zur Außenluft anbieten zu können. Daher ist es sehr wichtig, die Abmessungen des Wasserbehälters des Eisspeichers NEU in der horizontalen Ebene zu minimieren.

Um fertige Industrieprodukte nutzen zu können, sollen Wasserrohre aus dem Tiefbau und der Abwasserentsorgung genutzt werden. Dafür können Produkte aus Hart-PVC und glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) genutzt werden. Dabei ist 3 m Länge eine marktverfügbare Standardlänge, weshalb die weitere Konzeption auf ein Rohr DN 1500 mm x 3000 mm ausgelegt wird. Es wären auch Pumpenkammern, für die es zusätzlich Fertigdeckel gibt, nutzbar.

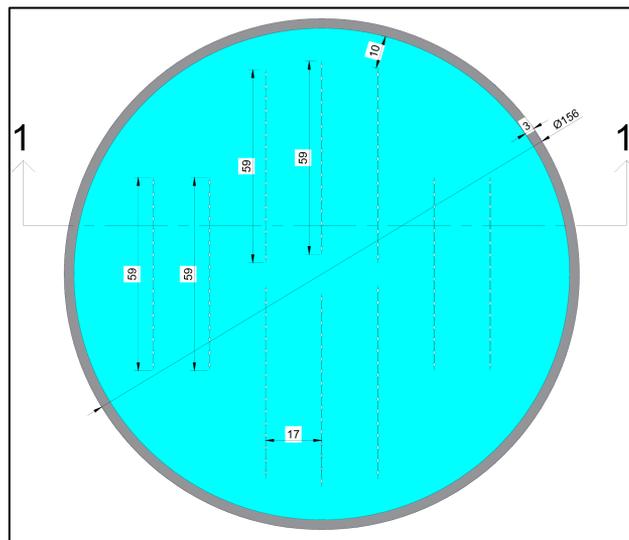


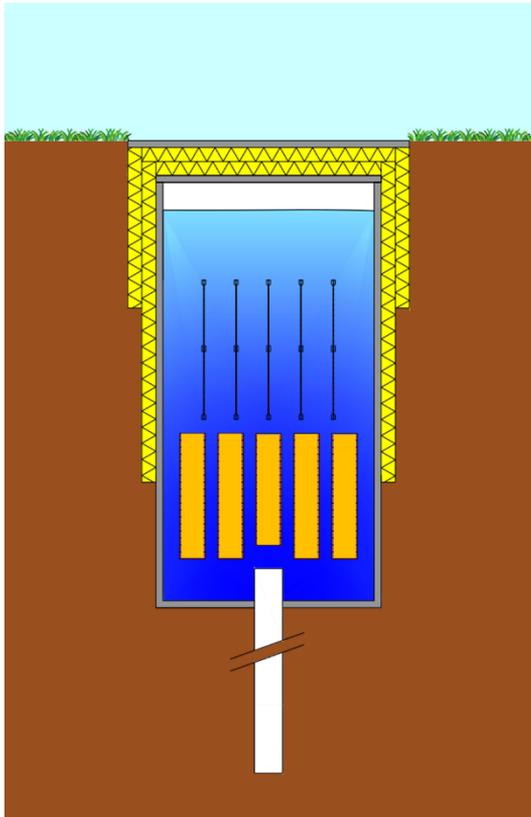
Abbildung 46: Beispiel für die Minimierung des Behälter-Durchmessers für Eisspeicher (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)

Für die Anordnung und Dichte der Wärmetauscherplatten ist der Abstand zwischen den Platten bzw. der Raum, der zum Aufschwimmen der Eisplatten gegeben sein muss, entscheidend. Hier wurde eine lichte Weite von 17 cm gewählt. Bei Abmessungen eines Platten-Wärmetauschers von 59 cm x 98 cm und 10 Stück ergeben sich 11,56 m² (0,59 x 0,98 x 2 x 10) Oberfläche für kurzfristige Vereisung.

Um keine Blockaden der aufschwimmenden Eisplatten durch Rohrverbindungen zu riskieren, sollten die Verbindungsrohre und die Anspeisung der Wärmetauscherplatten auf Höhe der Unterkanten der Wärmetauscherplatten erfolgen. Um Eisbildung an den Vor- und Rücklaufrohren zu verhindern, können Überlegungen angestellt werden, diese auch im Wasser wärmegeämmt bis zu den Anschlüssen der Wärmetauscherplatten zu führen.

Integration von PCM in den Eisspeicher-Behälter:

Die nachfolgende maßstäbliche Skizze des Längsschnitts durch den Eisspeicher NEU stellt die wesentlichen Komponenten in ihrer Anordnung dar. Die notwendigen Rohrleitungen sind nicht dargestellt.



- 20 cm Luftraum
- 50 cm Aufschwimm- und Schmelzzone
- 100 cm Wärmetauscherplatten
- 80 cm PCM
- Wärmeabgabekopf des CO₂-Erdwärmerohrs
- CO₂-Erdwärmerohr mit erforderlicher Länge (z.B. 20 m)

Abbildung 47: Maßstäbliche Skizze des Eisspeichers NEU ohne Darstellung der inneren Rohrleitungen (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)

In Kapitel 3.8 wurden als die optimale Form der Nutzung PCM-Kapseln angeführt. Eine sinnvolle Position im Behälter des Eisspeichers NEU befindet sich unterhalb der Wärmetauscherplatten.

Diese PCM-Produkte haben die vierfache Wärmespeicherkapazität des verdrängten Wassers. Es stehen 80 cm Höhe für PCM-Kapseln zur Verfügung. Unter der Annahme, dass das halbe Wasservolumen ersetzt werden kann, könnte so die thermisch wirksame Wärmespeicherkapazität des Wasserbehälters folgendermaßen erhöht werden:

Der Behälter mit Durchmesser 150 cm x 300 cm hat ein Volumen von ca. $(0,75^2 \times 3,14 = 1,413 \times 3,00 =) 4,24 \text{ m}^3$. Davon kann eine Höhe von 280 cm mit Wasser befüllt werden, was ca. $3,96 \text{ m}^3$ Wasser ohne Verdrängung durch Wärmetauscherplatten und PCM-Kapseln ergibt.

- In der obersten Ebene des Wassertanks bleiben ca. 20 cm Luft.
- Die zweite Ebene ist der Bewegungs- und Schmelzraum der Eisplatten mit ca. 50 cm Wasser.
- Die dritte Ebene ist der Bereich der Wärmetauscherplatten mit ca. 100 cm.
- Die vierte Ebene für PCM kann 80 cm hoch sein.
- Die unterste Ebene mit ca. 50 cm ist für die Einbindung des Erdwärmerohr-Kopfes vorgesehen.

Für den PCM-Bereich von 80 cm Höhe ($1,413 \text{ m}^2 \times 0,80 \text{ m} = 1,130 \text{ m}^3$) ergeben sich ($1,130 \text{ m}^3 \times 0,5 \times 5 =$) $2,83 \text{ m}^3$. Für den Wasserbereich (ohne PCM- und Luftbereich) ergibt das bei 2 m Höhe ($1,413 \text{ m}^2 \times 2,0 \text{ m} =$) $2,826 \text{ m}^3$. Das ergibt in Summe ($2,830 \text{ m}^3 + 2,826 \text{ m}^3$) $5,656 \text{ m}^3$. Thermisch stehen ca. $5,5 \text{ m}^3$ mit einer thermischen Ankopplung an das Erdreich mit ca. 12°C (in Ostösterreich) zur Verfügung.

Integration von Erdwärmerohren in den Eisspeicher-Behälter:

Die schon unter Kapitel 4.1.2 genannte Integration von CO_2 -Erdwärmerohren in den Eisspeicher NEU nutzt das dadurch erschlossene Erdwärmepotenzial thermisch im Behälter und kann dadurch sein Volumen geringhalten.

Solange die Wassertemperatur des Behälters im untersten Bereich nicht über 11°C steigt (Annahme 12°C Boden bzw. Grundwassertemperatur), gibt es eine Temperaturdifferenz und im CO_2 -Erdwärmerohr einen Wärmefluss ins Behälterwasser. Das garantiert, dass durch die thermische Zirkulation im Wasserbehälter oben schwimmende Eisplatten immer rasch aufgetaut werden können.

Wird durch Wärmeeintrag auch die unterste Wasserschicht auf über 11°C erwärmt, stoppt der Wärmefluss durch das Erdwärmerohr. In diesen Phasen kann sich das Erdreich rund um das untere Ende des wärmeentziehenden Erdwärmerohrs regenerieren.

Der Wärmeeintrag in den Behälter kann durch Solarkollektoren, Außenluft-Absorber oder durch Wärmeeintrag über die Wärmepumpe, die kostengünstige Stundenpreise von Strom nutzt, erfolgen. Als vierte Möglichkeit können Windstromspitzen direkt thermisch verwertet werden.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass es längstens alle 10 bis 14 Tage zu einem Wärmeeintrag kommt. Daher kann sich das Erdreich am unteren Ende des CO_2 -Erdwärmerohrs immer wieder ausreichend durch Wärmefluss aus dem Umraum thermisch regenerieren. Wenn sich das untere Ende des Erdwärmerohrs im Grundwasserbereich befindet, sind der stärkere Wärmefluss im Wasser und die häufig vorhandene leichte Strömung des Grundwassers noch vorteilhafter.

Dadurch kann das Volumen des Eisspeichers NEU in Relation zur Wärmespeicherkapazität sehr gering gehalten werden.

4.2.4. Zusammenfassung der Optimierungsmöglichkeiten

Bei konventionellen Eisspeichern beträgt die Vorlauftemperatur (von der Wärmepumpe kommend) etwa -3°C und der Rücklauf zur Wärmepumpe -1°C . Das sind 2K Temperaturspreizung, die für die Wärmepumpe nutzbar sind.

Das Ziel des Konzepts Eisspeicher NEU ist es, die Rücklauftemperatur von -1°C auf mindestens 5°C anzuheben. Das würde die Temperaturspreizung auf 8K anheben und damit vervierfachen.

Die erweiterten Ziele sind:

- Weitgehende Nutzung vorhandener Komponenten, Technologien und Bauverfahren
- Verkleinerung des Volumens und des Flächenbedarfs
- Dadurch Reduktion der Kosten im Vergleich zu konventionellen Eisspeichern mit gleicher Wärmeleistung
- Abkoppeln des Wärmebedarfs und des Netzstrombedarfs von Zeiten allgemein großer Stromnachfrage (Stichwort: kalte Winternacht bzw. kalte Dunkelflaute) und Verschiebung in Zeiten von großen Netzstromangebots.

Das soll durch die optimierte Entwicklung des Konzepts Eisspeicher NEU mit den folgenden Komponenten bzw. Schritten erreicht werden:

- Bivalenter Betrieb des Eisspeichers, Nutzung nur, wenn durch zu niedrige Außentemperatur der Luft-Wasser-Betrieb der WP nicht mehr effizient möglich ist.
- Vertikale metallische Wärmetauscherplatten für optimierten Wärmestrom
- Vielmalige Vereisung dünner Platten, die schnell wieder angetaut werden, aufschwimmen und geschmolzen werden.
- Oftmalige kurzzeitige Beheizung der Wärmetauscherplatten über elektrisch beheizbare Beschichtung
- Thermische Abkopplung des Eisspeicherbehälters nach oben und
- Thermische Kopplung des Eisspeicherbehälters mit CO_2 -Erdwärmerohren nach unten ins tiefere Erdreich
- Integration von PCM-Kapseln im unteren Bereich des Behälters zur Steigerung der Wärmespeicherkapazität
- Regeneration und Wärmespeicherung durch günstige Stundentarife bei Strom (z.B. bei Windstromspitzen)

Neben den genannten Komponenten und Funktionen sind als zentrale Elemente eine geeignete Überwachung der Temperaturen und Betriebszustände und eine intelligente Steuerungssoftware für einen optimierten Betrieb des Eisspeichers NEU notwendig.

Diese dynamischen Wechselwirkungen sind sehr komplex und würden eine entsprechende Entwicklungsarbeit erfordern. Wesentliche Grundlagen zur Simulation von CO₂-Erdwärmesonden sind aber erst in laufenden Forschungsprojekten (Universität Hannover) im Entstehen befindlich.

4.3. Integration des Eisspeicher NEU in Gebäudeenergiekonzepte

Die neuen Möglichkeiten dynamischer Strompreise, die in enger Wechselwirkung mit fluktuierenden erneuerbaren Energien stehen, bieten nun noch mehr Möglichkeiten, um auf Gebäudeseite beim Glätten von Netzspitzen mithelfen und dabei zusätzlich wirtschaftliche Vorteile nutzen zu können. Ähnliches gilt für die Nutzung von Strom aus PV-Produktionsspitzen, auch wenn diese in der Heizperiode evtl. seltener auftreten werden als Windstromspitzen.

Die Entwicklungen zeigen, dass es, ähnlich wie schon jetzt in Deutschland, auch in Österreich mehrere Versorger geben wird, die den Strom zu dynamisch wechselnden Stundentarifen anbieten werden. Damit ist es sinnvoll und wirtschaftlich interessant, Strom dann zu beziehen, wenn er besonders preisgünstig ist oder in Einzelfällen sogar einen negativen Preis hat.

Um dynamische Strompreise wirtschaftlich sinnvoll nutzen zu können, wird die Möglichkeit benötigt, Strom diskontinuierlich nutzen zu können und eine Regeltechnik, die das automatisiert tut. Dazu gibt es Software-Programme, die den Strombezug wirtschaftlich optimieren können und das Konzept Eisspeicher NEU ist für diskontinuierlichen Strombezug optimal geeignet.

Bei Tarifen mit stündlicher Preisanpassung kann z.B. nachts oder in besonders sonnigen oder windigen Stunden der Börsenpreis in den negativen Bereich rutschen. Dies bedeutet, dass Geräte, die in diesen Zeiträumen Strom verbrauchen, sogar unter Netznutzungsentgelten und Abgaben liegen können und Gewinne abwerfen. Tarife wie dieser können genutzt werden, um z.B. den Eisspeicher zu regenerieren.

Exemplarische Beispiele für niedrige Strompreise:

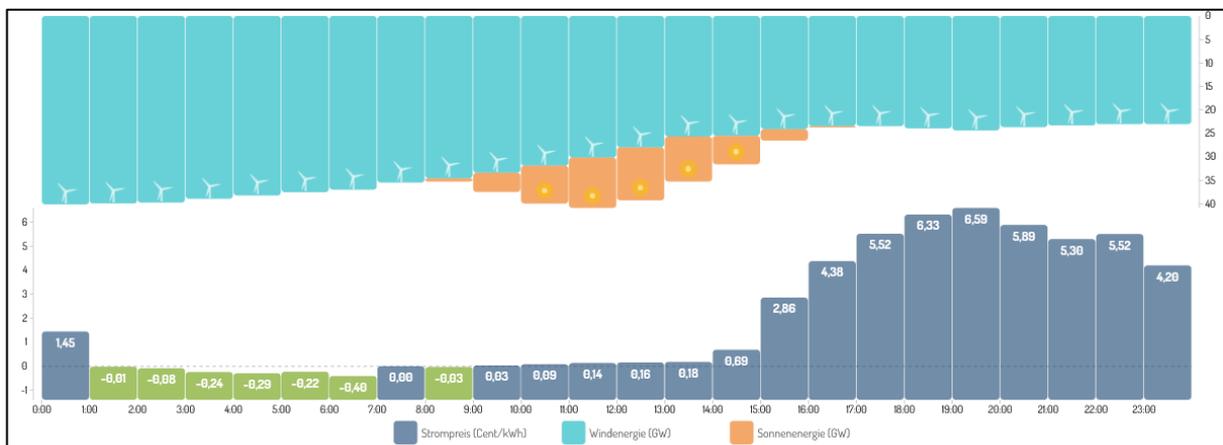


Abbildung 48: Angebotsspitze 1.1.2023 (Feiertag und entsprechend geringe Nachfrage) (awattar, 2024)

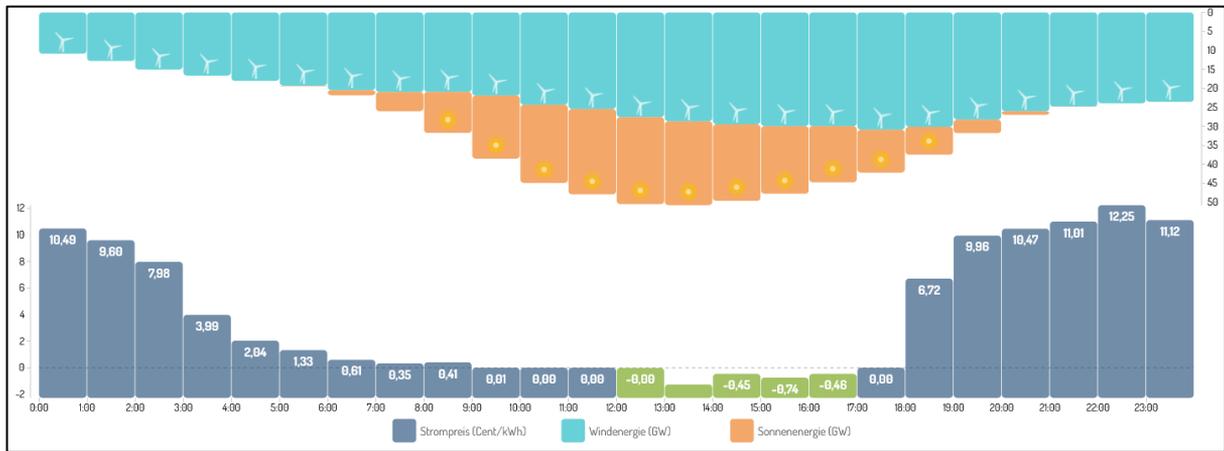


Abbildung 49: Angebotsspitze 23.7.2023 (Sonntag, geringe Nachfrage) (awattar, 2024)

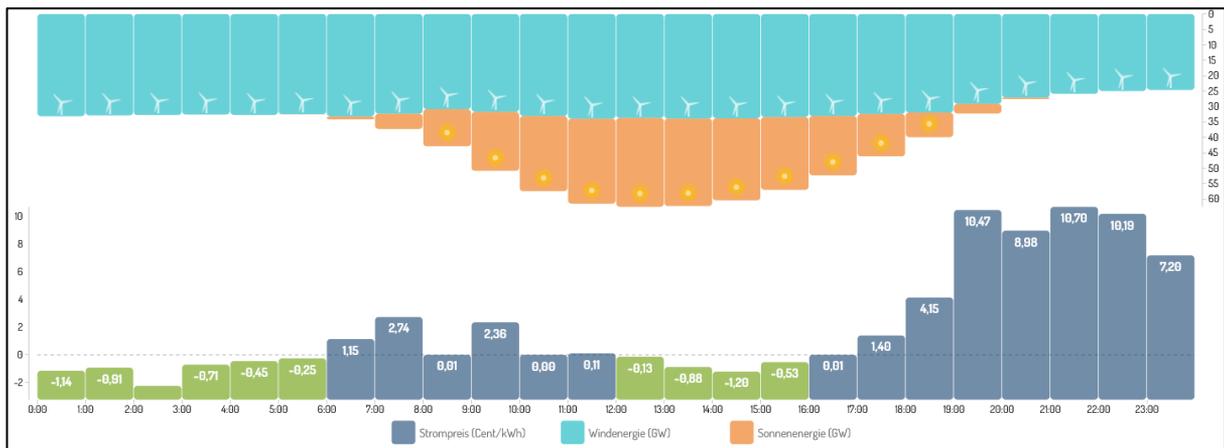


Abbildung 50: lange Angebotsspitze 8.8.2023, viel PV- und Windstrom, werktags (awattar, 2024)

Diese exemplarischen Strompreise zeigen, dass sie sehr schwer planbar sind aber dennoch regelmäßig genug auftreten um Temperaturerhebungen bei thermischen Speichermöglichkeiten in Gebäuden, wie im Konzept Eisspeicher NEU, vornehmen zu können.

5 Szenarien des zukünftigen Stromsystems

In diesem Kapitel werden mithilfe eines dynamischen Optimierungsmodells des österreichischen Strommarkts mögliche zukünftige Lastverschiebungseffekte von Wärmepumpen-Eisspeichersystemen analysiert. Dazu wird in einem ersten Schritt ein Bottom-up-Energiemodell auf stündlicher Basis auf der Grundlage historischer Daten und der bestehenden Energieinfrastruktur entwickelt. In einem zweiten Schritt werden dynamische Energieszenarien gezeigt, um verschiedene Ausbaustufen erneuerbarer Energien und Technologien sowie die erforderlichen Speicherkapazitäten und Flexibilitätsmaßnahmen zu untersuchen. Die beiden Modelle sind miteinander verbunden und tauschen Daten und Ergebnisse aus. Das erste Teilmodell simuliert das Stromsystem Österreichs mit dem entsprechenden stündlichen Angebot aller Energieträger und Lastprofilen für vordefinierte historische Zeitreihen eines hinterlegten Wetterjahrs und die entsprechende Energieinfrastruktur. Dieses Teilmodell kann jedes einzelne Jahr in Abhängigkeit von den Inputfaktoren und der Energieinfrastruktur modellieren. Es werden Faktoren, die den Strombedarf sowie den zukünftigen Heiz-/Kühlbedarf beeinflussen, wie die Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen, Wärmepumpen und Klimaanlageanlagen und deren Hauptmerkmale, gesammelt und in das Modell integriert. Mithilfe der Inputparameter und eines Lastprofilgenerators des AIT werden zusätzlich zur Gesamtstromnachfrage entsprechende Nachfrageprofile von Elektrofahrzeugen (AIT, 2023a) und Wärmepumpen (AIT, 2023b) erstellt. Die resultierenden stündlichen Lastprofile hängen dabei vom Fahr- und Ladeverhalten ab und beziehen Temperaturdaten für Heizung und Kühlung ein. Ein Teilaspekt des Modells spezifisch für diese Analyse ist die Optimierung der Wärmepumpen mittels Eisspeichersystems. Hier werden in einem separaten Optimierungsschritt basierend auf den technologischen Inputparameter der Speicher die Lastprofile der Wärmepumpen optimiert. Ziel dabei ist es, fossile Energie zu substituieren und eine vermehrte Integration von erneuerbaren Energien durch den optimierten Betrieb zu ermöglichen. Es werden jeweils die Ergebnisse mit und ohne Optimierung gezeigt, um den Einfluss der Eisspeicher zeigen zu können.

5.1. Darstellung der Windstromspitzen

In Abbildung 51 wird exemplarisch die gesamte Windenergie-Erzeugungsleistung für das Jahr 2030 eines erneuerbaren Ausbau-Szenarios dargestellt. Der Modellierung liegt dabei das Wetterjahr 2015 zugrunde. Wie sich die Erzeugung abhängig vom Wetter ändert, wird in Abbildung 52 gezeigt. Hier werden die Wetterjahre 2016 (links) und 2017 (rechts) einbezogen.

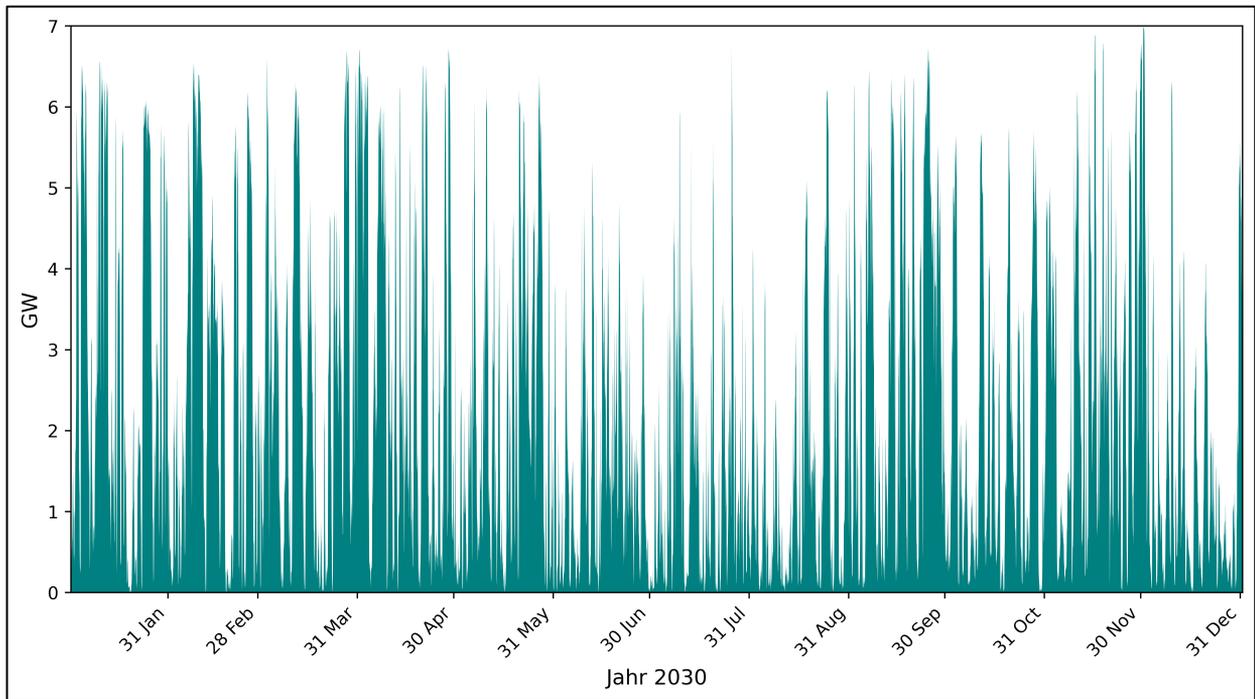


Abbildung 51: Gesamte Windenergie-Erzeugungsleistung für das Jahr 2030 (basierend auf Wetterjahr 2015)¹ (TU Wien, 2024)

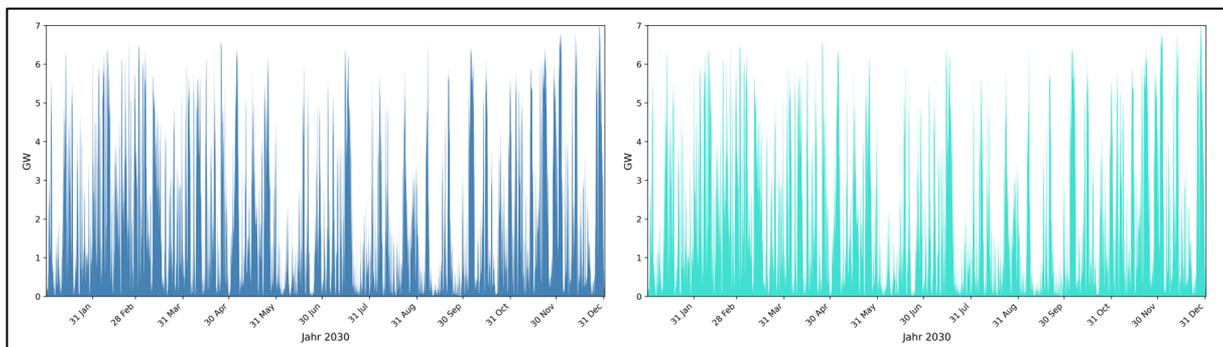


Abbildung 52: Unterschiede in der Windenergie-Erzeugungsleistung für das Jahr 2030 in Abhängigkeiten der Wetterjahre (basierend auf Wetterjahr 2016 – links und Wetterjahr 2017 – rechts) (TU Wien, 2024)

In Abbildung 53 wird eine Oktoberwoche (12.-19.) des oben genannten Szenarios gezeigt. Hier sind die Einflüsse des Wetters auf die jeweilige Erzeugung noch besser ersichtlicher.

¹ In dieser Studie wird nur mit Mittelwerten für Österreich gerechnet; unterschiedliche Standorte der Erzeugung wurden nicht berücksichtigt.

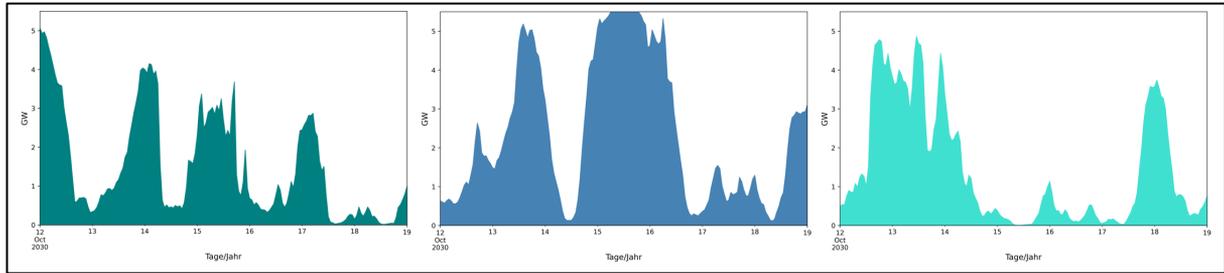


Abbildung 53: Windenergie-Erzeugungsleistung für das Jahr 2030 (basierend auf Wetterjahr 2015 (links), 2016 (Mitte), 2017 (rechts)) (TU Wien, 2024)

5.2. Simulation des zukünftigen Stromsystems

Zur Definition des zukünftigen erneuerbaren Ausbauszenarios bis 2050 werden die Eingangsdaten aus Tabelle 2 verwendet. Die Daten hierfür wurden mittels Literaturrecherche gesammelt.

Tabelle 2 Eingangsdaten Strommarktmodell

Parameter	Einheit	2030	2050	Quelle
Stromerzeugungskapazitäten:				
Laufwasserkraftwerke	GW _{el}	6,8	7	(Österreichisches Parlament, 2021; Platzenbecker et al., 2019)
Wind	GW _{el}	7	12	(Österreichisches Parlament, 2021; Platzenbecker et al., 2019)
Fotovoltaik (PV)	GW _{el}	12	22	(Österreichisches Parlament, 2021; Platzenbecker et al., 2019)
Gas – und Dampfkraftwerke ²	GW _{el}	4	1	(ENTSO-E, 2022)
Biomasse und Müll	GW _{el}	0,8	0,8	(ENTSO-E, 2022)
Stromnachfrage:				
Gesamt	TWh _{el}	73	83	(AURES, 2022; Haas et al., 2017)
Wärmepumpen	TWh _{el}	3,5	8,6	(AIT, 2023b; Suna et al., 2022)
Elektromobilität	TWh _{el}	3	10	(AIT, 2023a)
Speicher:				
Pumpspeicherleistung (turbinieren/pumpen)	GW _{el}	6/5,2	6/5,2	(ENTSO-E, 2022)
Maximaler Speicherstand Pumpspeicher	GWh _{el}	1732	1732	(ENTSO-E, 2022)

² Erdgas und Biomethan

Naturspeicherleistung	GW_{el}	2,5	2,5	(ENTSO-E, 2022)
Maximaler Speicherstand Naturspeicher	GWh_{el}	757	757	(ENTSO-E, 2022)
Ein- und Ausspeicherleistung Batterie	GW_{el}	0,5	3	(Porada et al., 2023)
Maximaler Speicherstand Batteriespeicher	GWh_{el}	1	6	Annahme
Sonstiges:				
Import/Export Kapazitäten	GW_{el}	6	6	Annahme

Tabelle 3 zeigt die Eingangsdaten der Lastprofile der Wärmepumpen. Der jährliche Stromverbrauch der jeweiligen Wärmepumpenkategorie ist in Abbildung 54 grafisch dargestellt.

Tabelle 3 Eingangsdaten zu Wärmepumpen detailliert (AIT, 2023b)³

Wärmepumpenkategorien	Energie (GWh_{th}/a)	Energie (GWh_{el}/a)	Max. Leistung (MW_{th})	Max. Leistung (MW_{el})	JAZ
2030:					
Heizung - Luft-Luft WP	123,9	45,5	57,8	35,3	2,72
Heizung - Luft-Wasser WP	3455,2	1169,4	1612,2	976,6	2,95
Heizung – geothermische WP	2412,1	576,4	1125,2	222,8	4,18
Hybrid-Wärmepumpen	2303,6	766,3	1074,8	299,4	3,01
Klimatisierung - Luft-Luft WP	12,1	3,2	20,6	6,2	3,75
Luft-Klimaanlagen - Luft-Wasser WP	631,6	164,8	1071,7	281,7	3,83
Luft-Klimaanlagen - Erdwärmepumpen	253,5	47,2	430,1	63,5	5,38
Sanitäres Wasser - Luft-Wasser WP	813,7	264,1	176,1	70,3	3,08
Sanitäres Wasser - Erdwärmepumpen	177,2	58,6	38,4	12,7	3,02
Industrie	2224,8	370,8	254	42,3	6
2050:					
Heizung - Luft-Luft WP	315,3	107,7	157,1	93,3	2,93
Heizung - Luft-Wasser WP	10073,6	3182,6	5017,2	2973,6	3,17
Heizung – geothermische WP	2371,6	518,2	1181,6	213,1	4,58

³ Daten für Wetterjahr 2015

Hybrid-Wärmepumpen	3357,8	1039,7	1672,4	429,8	3,23
Klimatisierung - Luft-Luft WP	37,1	9,4	63	18	3,93
Luft-Klimaanlagen - Luft-Wasser WP	1753,6	438,5	2975,6	749,6	4
Luft-Klimaanlagen - Erdwärmepumpen	302,8	54,1	513,7	72,9	5,59
Sanitäres Wasser - Luft-Wasser WP	2350	735,9	508,6	202,4	3,19
Sanitäres Wasser - Erdwärmepumpen	294,5	93	63,7	20,1	3,17
Industrie	12285	2457	1402,4	280,5	5

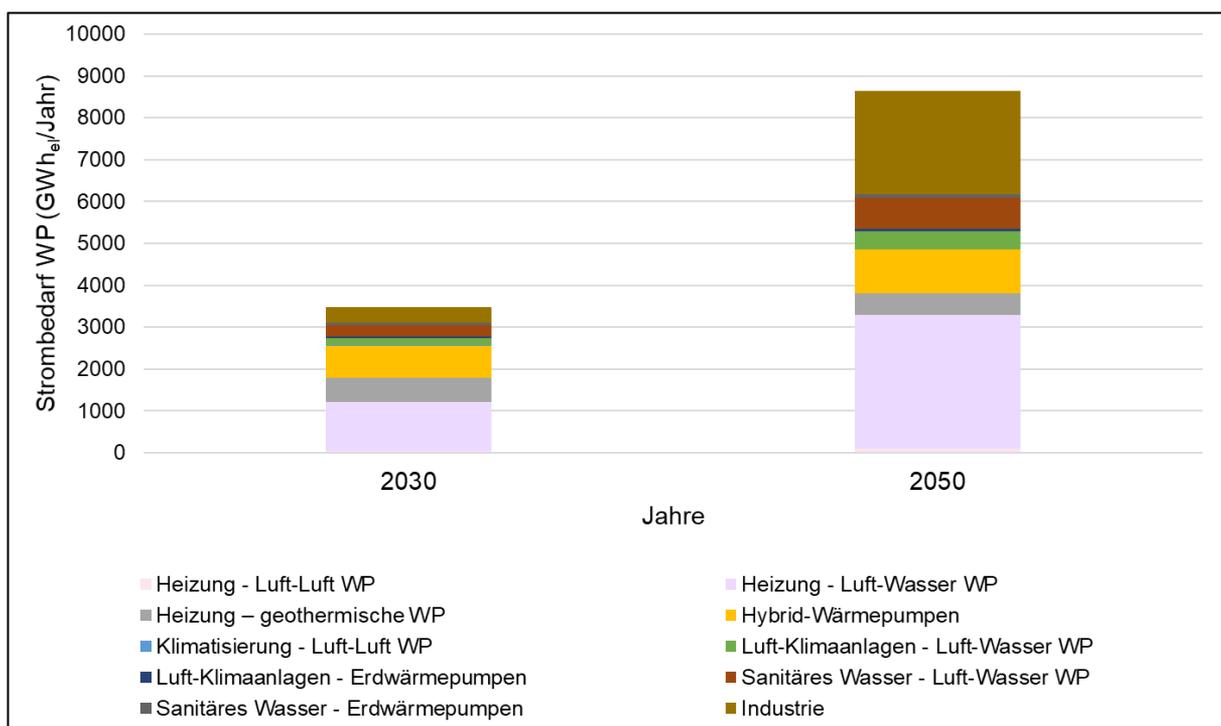


Abbildung 54: Stromverbrauch unterschiedlicher Wärmepumpenkategorien (AIT, 2023b)

Aufgrund der unterschiedlichen Profile der erneuerbaren Stromerzeugung und des Stromverbrauchs sind Szenarien des Stromsystems der Zukunft inklusive Speichermöglichkeiten wichtig. Die erneuerbare Erzeugung, die sich historisch vor allem aus Wasserkraft und in den letzten Jahren zunehmend aus Wind und PV, zusammensetzt ist volatil und deckt sich zumeist nicht mit der Stromnachfrage, siehe Abbildung 55. Die Lücke zwischen der Last und der Erzeugung wird Residuallast genannt.

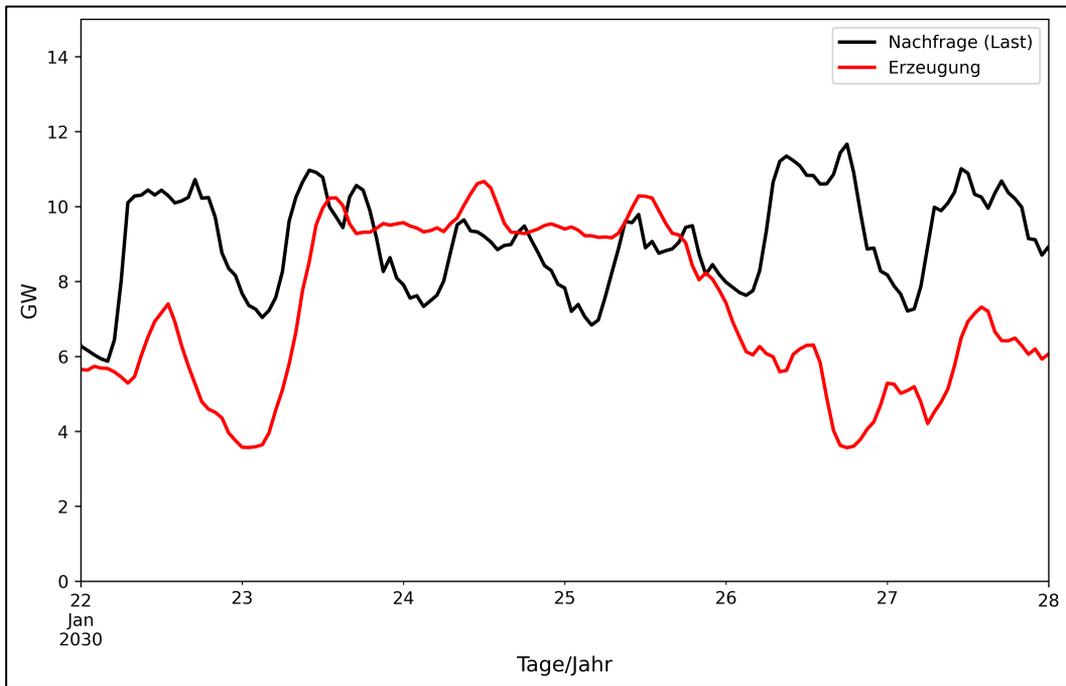


Abbildung 55: Verlauf der volatilen Stromerzeugung (Wasserkraft, Wind und PV) und der Nachfrage (Last) einer Winterwoche (22.-28.1.2030) (TU Wien, 2024)

Die Residuallast ist der Definition nach die Last abzüglich der nicht flexiblen Erzeugung. Das schließt auch Grundlastkraftwerke wie Atom- oder Kohlekraftwerke mit ein. In Abbildung 56 ist die Residuallast des oben gezeigten Ausschnittes dargestellt.

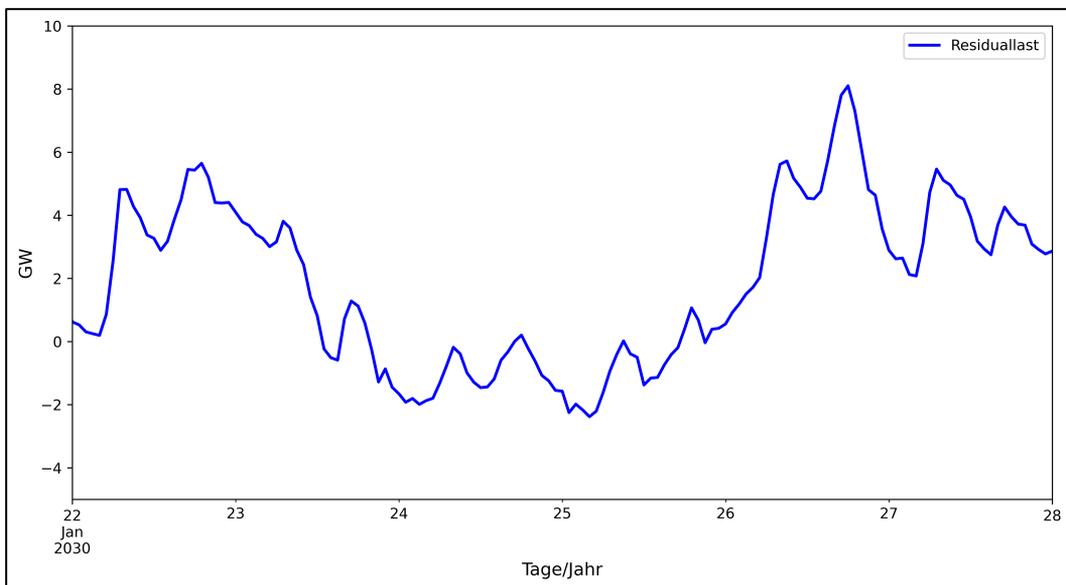


Abbildung 56: Residuallast einer Winterwoche (22.-28.1.2030) (TU Wien, 2024)

Wie sich die Volatilität auf Monatsbasis auswirkt, wird in Abbildung 57 gezeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass neben der kurzfristigen Flexibilität (aus Tagessicht) auch langfristige Flexibilitäten wichtig

sind, da die Stromaufbringung auch im Jahresverlauf schwankt. Die größten Strommengen werden im Sommer produziert. Hier sind die Erzeugungsmengen von PV und Laufwasser, sowie die natürlichen Zuflüsse am höchsten. Bei Windenergie hingegen sieht man, dass grundsätzlich im Winter mehr produziert wird.

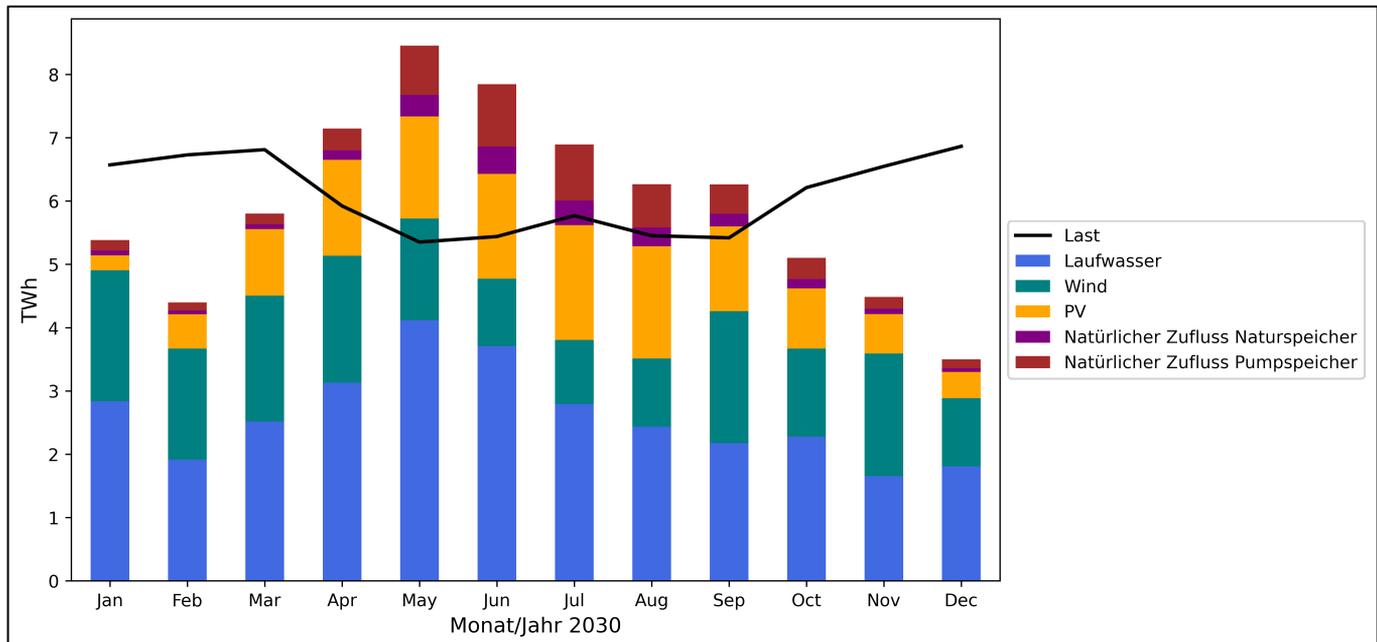


Abbildung 57: Erneuerbare Erzeugung und Last pro Monat im Jahr 2030 (TU Wien, 2024)

Die größeren Erzeugungsmengen von Wind im Winter sind auch deutlich in Abbildung 58: Auszug einer Winterwoche (1.2.-7.2.2030) zur Darstellung der erneuerbaren Erzeugung und der Last (Szenario Erneuerbare) zu sehen. Hier wird exemplarisch eine Winterwoche der Modellauswertung grafisch dargestellt, um die Unterschiede zwischen Winter und Sommer besser sehen zu können.

Als Vergleich ist in Abbildung 58 eine Sommerwoche dargestellt. Hier sind die Laufwasser und PV-Erzeugung um ein Vielfaches höher als im Winter.

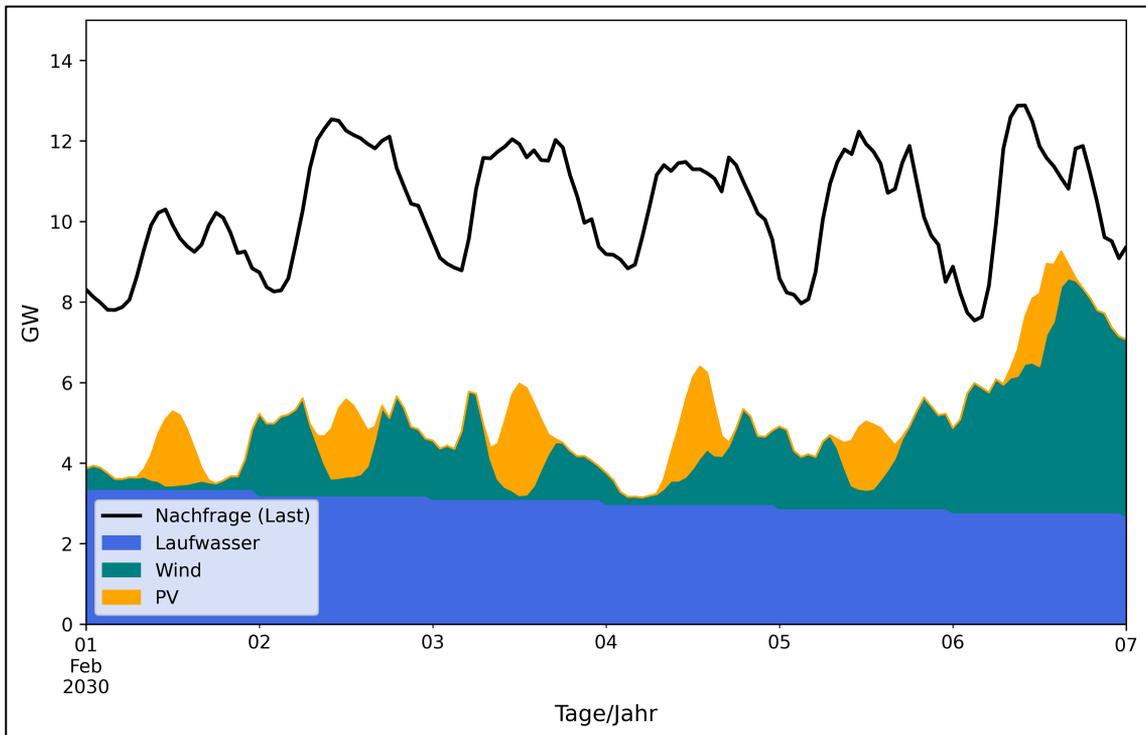


Abbildung 58: Auszug einer Winterwoche (1.2.-7.2.2030) zur Darstellung der erneuerbaren Erzeugung und der Last (Szenario Erneuerbare) (TU Wien, 2024)

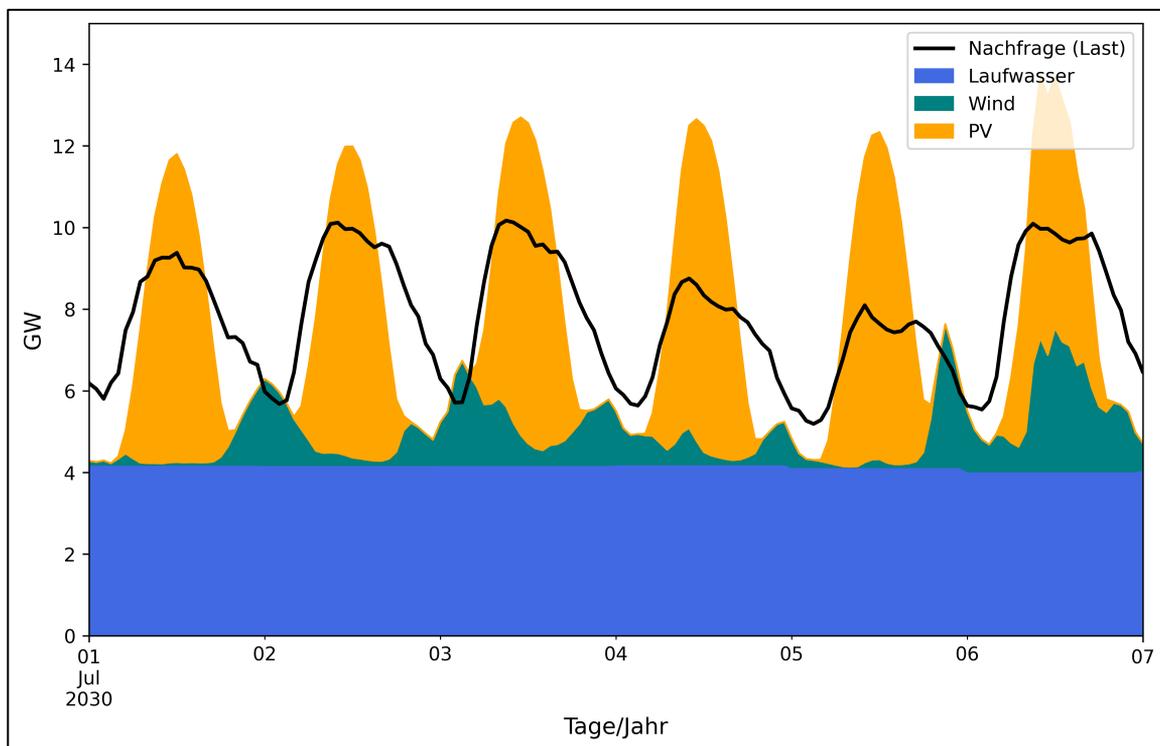


Abbildung 59: Auszug einer Sommerwoche (1.6.-7.6.2030) zur Darstellung der erneuerbaren Erzeugung und der Last (Szenario Erneuerbare) (TU Wien, 2024)

Im verwendeten Modell werden Durchschnittswerte der historischen Erzeugung eines hinterlegten Wetterjahres für PV und Wind verwendet. Diese werden um Effizienzsteigerungen berücksichtigt. Die hinterlegte Laufwassererzeugung sowie die natürlichen Zuflüsse der Natur- und Pumpspeicherbecken werden aus der Pan European Climatedatabase der ENTSO-E verwendet (ENTSO-E, 2022). Die hinterlegte Last bzw. Stromnachfrage wird für Wärmepumpen und Elektromobilität mittels Lastprofilgenerator des AIT auf Stundenbasis generiert und der restliche Anteil ebenfalls aus Durchschnittswerten der historischen Erzeugung skaliert (AIT, 2023b, 2023a). In Kapitel 5.1 wurde die Winderzeugung für drei hinterlegte Wetterjahre gezeigt. In der weiteren Analyse wird für alle Szenarien das Wetterjahr 2015 hinterlegt. Unterschiede hinsichtlich der Wetterjahre sind zu erwarten, es wäre jedoch zu umfangreich alle Eventualitäten im Rahmen dieser Analyse zu berücksichtigen.

Es wird dazu ein Szenario „Erneuerbare“ mit den Eingangsdaten aus Tabelle 3 definiert. Dieses wird jeweils für das Jahr 2030 und 2050 unter Berücksichtigung eines Lastprofils der Wärmepumpen mit – und ohne Eisspeicher ausgewertet. Im Szenario Erneuerbare mit Eisspeicher wird die Optimierung des Wärmepumpenlastprofils im Modell vorgeschaltet und es fließt somit in die weitergehende Modellierung das optimierte Gesamtlastprofil ein. Optimierte wird hinsichtlich geringster Gesamtstromkosten, also abhängig vom Strompreis bzw. Residuallast. Im Modell wird mit Mittelwerten für Gesamtösterreich gerechnet und Unterschiede hinsichtlich unterschiedlicher Standorte werden nicht berücksichtigt.

5.3. Eisspeicher zur Lastverteilung und Reduktion von Überschüssen

Um die Integration von Eisspeichern zur optimalen Verschiebung des Lastprofils von Wärmepumpen zu untersuchen, wurde einem Strommarktmodell eine Lastoptimierung vorgeschaltet. Damit wird es im Modell möglich, das Nachfrageprofil eines Teils der installierten Wärmepumpen unter vorgegebenen Parametern (wie Zeitdauer und Verschiebeleistung) zu optimieren. In Zeiten von hohen Strompreisen, also in Stunden mit geringer erneuerbarer Erzeugung wird die Nachfrage reduziert und in Stunden, in denen Überschussstrom verfügbar ist, wird in den Eisspeicher eingespeichert. Diese Optimierung erfolgt auf stündlicher Basis. Grafisch dargestellt sieht man Abbildung 60 den Unterschied zwischen dem Lastprofil Szenario Erneuerbare und dem optimierten Lastprofil mit Eisspeicher.

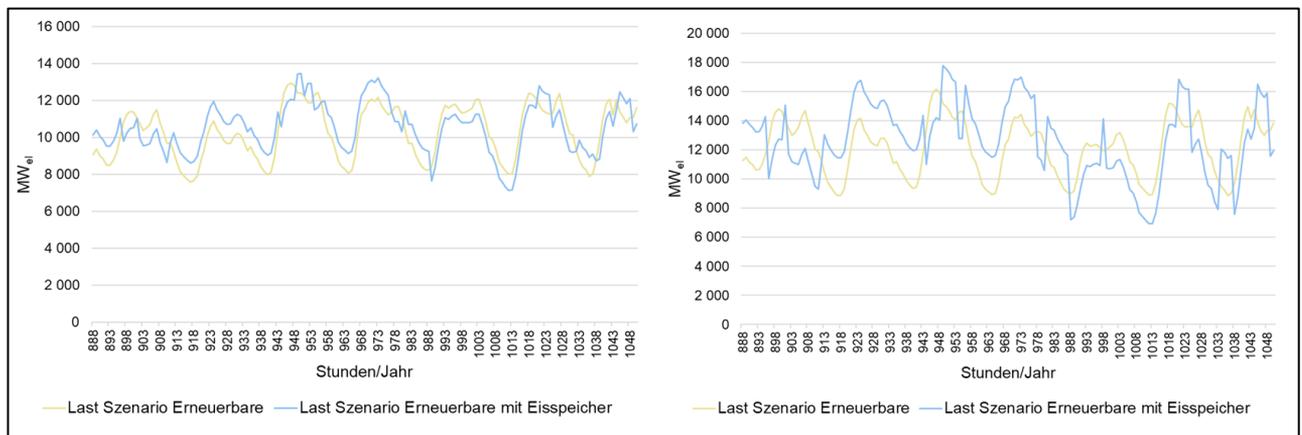


Abbildung 60: Unterschied zwischen dem Lastprofil Szenario Erneuerbare und dem optimierten Lastprofil mit Eisspeicher für die Jahre 2030 (links) und 2050 (rechts) (TU Wien, 2024)

Die geplante Stromnachfrage der WP wird durch die installierte Kapazität der Eisspeicher (Energienmenge und Einspeicherleistung) und das stündliche Nachfrageprofil definiert. Nach (Suna et al., 2022) sollen im Jahr 2030 ca. 650000 Wärmepumpen mit einem Gesamtjahresenergieverbrauch von über 3,5 TWh in Österreich installiert sein. Dies deckt sich auch mit dem verwendeten WP-Profil des AIT-Lastprofilgenerators, siehe Tabelle 3. Im AIT-Lastprofilgenerator wird davon ausgegangen, dass ca. 80% der installierten Wärmepumpenleistung Luftwärmepumpen sind. Es wird in dieser Analyse weiters davon ausgegangen, dass die Hälfte der Wärmepumpen flexibel steuerbar sein wird und ein Eisspeichersystem integriert wird. Das führt nach (Minder et al., 2014) zu einer Gesamteinspeicherleistung von 1039 MW_{el} und einer möglichen Speichermenge von 98660 MWh_{el} bezogen auf alle WP in Österreich. Für 2050 wird dies dann mit dem Faktor 2,5, das ist die Erhöhung des WP-Energiebedarfs von 3,5 TWh auf 8,6 TWh hochgerechnet und so in die Analyse einbezogen. Weitere Ausführungen zu Eisspeichern sind im Kapitel 4 zu finden.

In den folgenden Abbildungen wird jeweils eine Winter- und eine Sommerwoche im Szenario Erneuerbare 2030 (Abbildung 61), Szenario Erneuerbare 2030 mit Lastoptimierung durch WP-Eisspeichersysteme (Abbildung 62) gezeigt. Die beiden Varianten werden auch für das Jahr 2050 in Abbildung 63 und Abbildung 64 dargestellt.

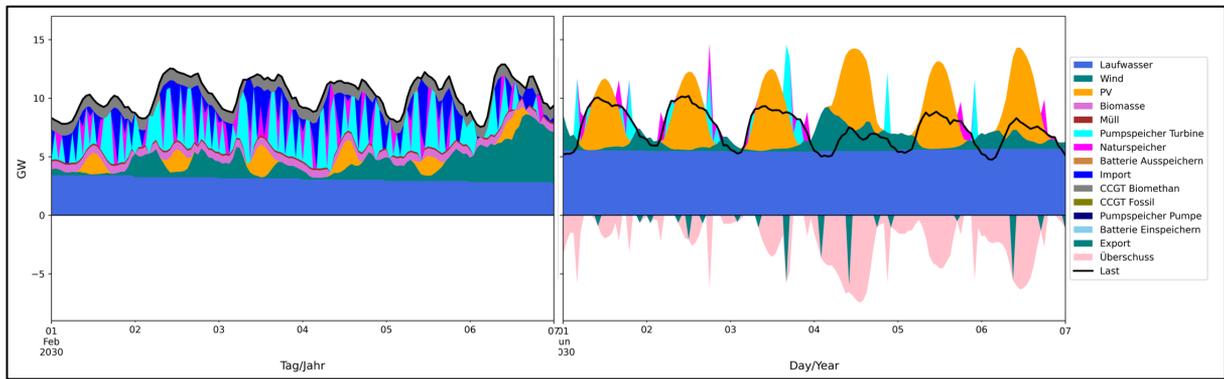


Abbildung 61: Ausschnitt einer Winter- (links) und einer Sommerwoche (rechts) im Szenario Erneuerbare 2030 (TU Wien, 2024)

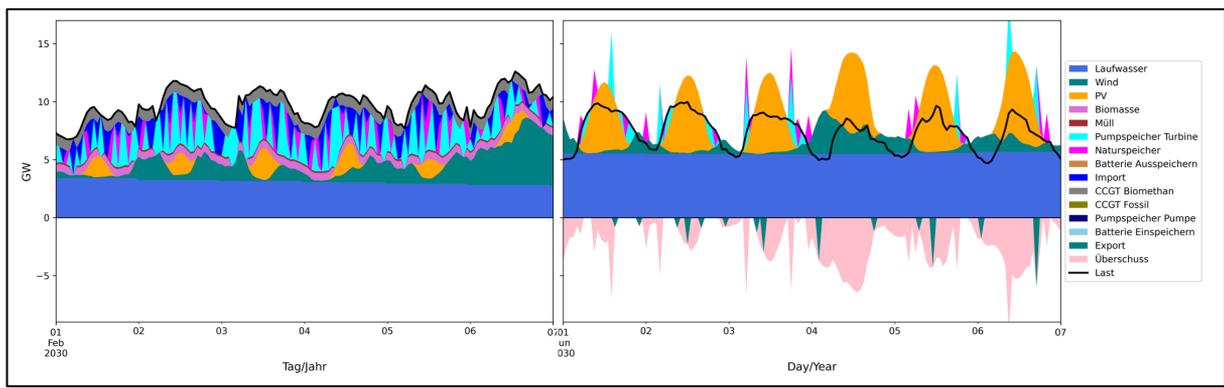


Abbildung 62: Ausschnitt einer Winter- (links) und einer Sommerwoche (rechts) im Szenario Erneuerbare 2030 mit Lastoptimierung durch WP-Eisspeichersysteme (TU Wien, 2024)

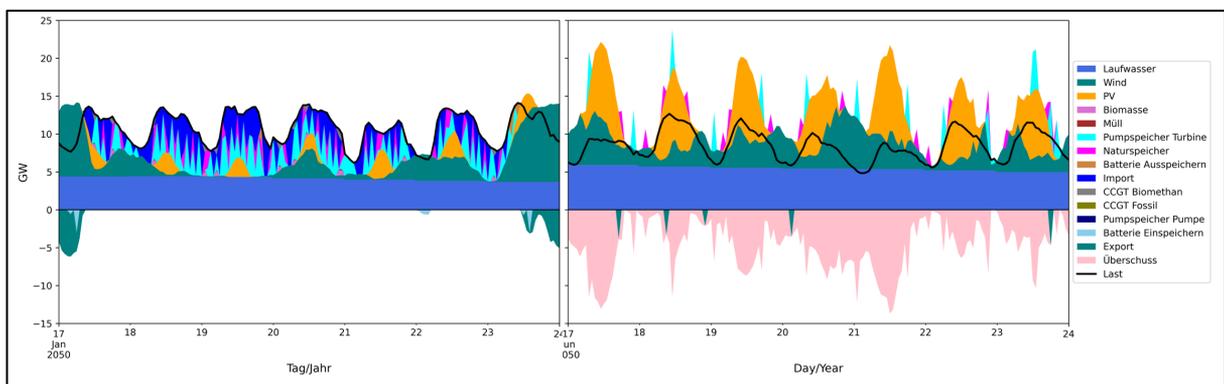


Abbildung 63: Ausschnitt einer Winter- (links) und einer Sommerwoche (rechts) im Szenario Erneuerbare 2050 (TU Wien, 2024)

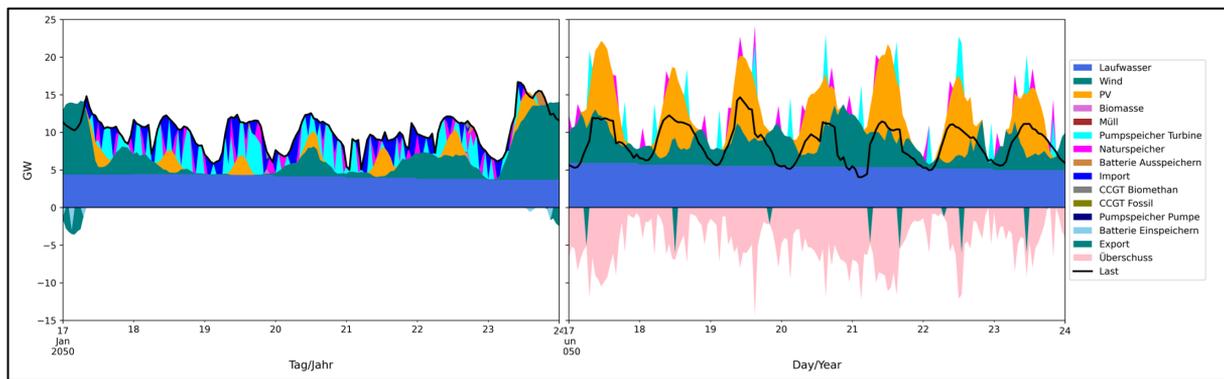


Abbildung 64: Ausschnitt einer Winter- (links) und einer Sommerwoche (rechts) im Szenario Erneuerbare 2050 mit Lastoptimierung durch WP-Eisspeichersysteme (TU Wien, 2024)

Die Verschiebung der Last (Nachfrage) ist in allen Abbildungen deutlich zu sehen. Speziell im Winter wird die Lastkurve in den Stunden mit einer höheren Winderzeugung nach oben verschoben. Im Sommer sieht man eine Reaktion auf die Erzeugungsspitzen der PV. Auch hier wird die Last entsprechend angepasst.

Die Modellergebnisse der wichtigsten Parameter sind in Tabelle 4 angeführt. Es ist deutlich zu sehen, dass im Jahr 2030 und auch 2050 die Überschussenergie durch die Maßnahme der Lastverschiebung Eisspeicher gesenkt werden kann. Im Jahr 2030 werden 8,62% der produzierten erneuerbaren Energie der Variable Überschuss zugeordnet. Sobald eine Optimierung mittels Eisspeicher erfolgt, geht dieser Wert auf 8,28% zurück. Im Jahr 2050 geht der Wert von 18,40% auf 17,75%.

Es ist hier auch anzumerken, dass sich diese Werte allgemein im höheren Bereich befinden, da zusätzliche Stromverbräuche wie zum Beispiel durch Wasserstoffproduktion in dieser Analyse nicht berücksichtigt wurden. Neben den Eisspeichern stehen im Modell erzeugungsseitig Pumpspeicher, Naturspeicher, Batterien, Biomasse, Müllverbrennung, Importe und Gas – und Dampfkraftwerke zur Bereitstellung von Flexibilitäten zur Verfügung.

Im Jahr 2050 wird davon ausgegangen, dass keine fossile Erzeugung im Stromsystem mehr zur Verfügung steht. Deshalb ist auch eine Reduktion der fossilen Erzeugung durch Eisspeicher nur im Jahr 2030 zu sehen. In diesem Jahr kann eine Reduktion von 2,65 TWh_{el} auf 2,51 TWh_{el} gezeigt werden.

Tabelle 4 Modellergebnisse des Szenarios Erneuerbare mit und ohne Lastoptimierung durch WP-Eisspeichersysteme im Jahr 2030 und 2050

Parameter	Einheit	Szenario Erneuerbare	Szenario Erneuerbare mit Eisspeicher
2030			
Last	TWh _{el}	73,07	73,34
Laufwasser	TWh _{el}	31,83	31,83
Wind	TWh _{el}	19,07	19,07
PV	TWh _{el}	13,53	13,53
Fossile Erzeugung ⁴	TWh _{el}	2,65	2,51
Überschuss	TWh _{el}	6,67	6,41
Überschuss	%	8,62	8,28
2050			
Last	TWh _{el}	82,82	83,59
Laufwasser	TWh _{el}	32,77	32,77
Wind	TWh _{el}	32,68	32,68
PV	TWh _{el}	24,80	24,80
Fossile Erzeugung	TWh _{el}	0	0
Überschuss	TWh _{el}	18,51	17,81
Überschuss	%	18,40	17,75

⁴ Hier werden lediglich die Stromerzeugungsmengen berücksichtigt. Die Effizienzen der Kraftwerke zur fossilen Erzeugung fließen in dieses Modell nicht ein.

6 Wirtschaftliche Bewertung

Im vorhergehenden Kapitel wurde ein Strommarktmodell für ganz Österreich analysiert. Dabei wurden die möglichen positiven Auswirkungen einer Lastverschiebung von WP mithilfe von Eisspeichern untersucht. Diese Lastverschiebung erfolgt von Stunden mit geringer erneuerbarer Erzeugung hin zu Stunden mit hoher erneuerbarer Erzeugung. In diesem Kapitel wird nun die Haushaltsebene betrachtet. Bei der individuellen Kaufentscheidung spielen neben ökologischen Gedanken, sowie anderen Aspekten wie Bekanntheitsgrad und Komfort meistens ökonomische Überlegungen eine große Rolle. Ziel der Analyse ist es deshalb aufzuzeigen, wie hoch die jährlichen Gesamtkosten (Investitions-, Wartungs- und Instandhaltungs- und Energiekosten) eines Wärmepumpen-Eisspeichersystems zur Bereitstellung von Raumheizung und Warmwasseraufbereitung eines Einfamilienhaushaltes sind. Die dabei betrachteten Komponenten werden in Abbildung 65: Darstellung des analysierten Eisspeicher-Wärmepumpensystems dargestellt.

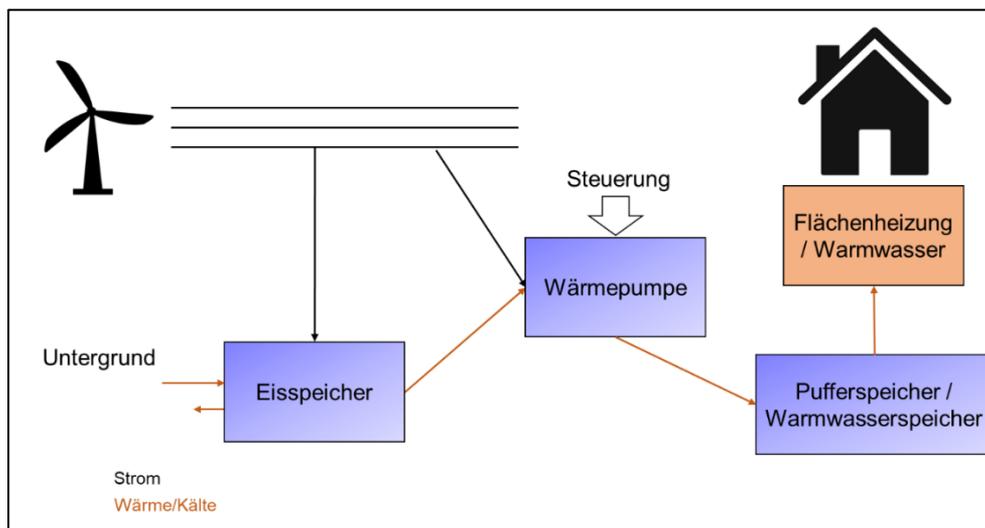


Abbildung 65: Darstellung des analysierten Eisspeicher-Wärmepumpensystems (TU Wien, 2024)

Der Einsatz eines Eisspeichers zur Kopplung einer WP wurde in der Literatur als Maßnahme zur Effizienzsteigerung belegt (Altuntas und Erdemir, 2022). In (Dott et al., 2016) wurde gezeigt, dass Luftwärmepumpen-Eisspeichersysteme gekoppelt mit einem Solarabsorber ähnliche Jahresarbeitszahlen wie Erdwärmepumpen erreichen können.

Aus diesem Grund wird der Fokus dieser Analyse auf die Optimierung der Energiekosten unter Annahme unterschiedlicher Strompreisszenarien (fix und dynamisch) durch Lastverschiebung des Strombedarfs der WP gelegt. Durch eine mögliche Lastverschiebung bei dynamischen Strompreisen werden auch die weitreichenden Effekte aus Kapitel 5 indirekt berücksichtigt, da niedrige Strompreise mit einem hohen Aufkommen an erneuerbarer Erzeugung korrelieren. Auf das Gesamtstromsystem bezogen kann es daher sinnvoll sein, in diesen Stunden zusätzlich Strom für den Eisspeicher zu beziehen. Die folgende Analyse zeigt, im ersten Teil, wie sich eine mögliche

Lastverschiebung auf die jährlichen Stromkosten auswirkt. Im zweiten Teil werden die jährlichen Gesamtkosten mittels Annuitätenmethode ermittelt.

6.1. Methodisches Vorgehen

6.1.1. Methode

Der erste Teil der Analyse basiert auf einem stündlichen Optimierungsmodell für einen Beispielhaushalt. Die Stromkosten der WP des repräsentativen Einfamilienhauses werden unter gegebenen Annahmen von Außentemperatur, Wärmebedarf und dynamischen Strompreisen unter Berücksichtigung von drei unterschiedlichen Wetterjahren minimiert. Dabei wird ein Vergleich zwischen drei Varianten, fixer Strompreis, dynamischer Strompreis und dynamischer Strompreis mit Eisspeicher aufgestellt, siehe Abbildung 66. In dieser schematischen Abbildung ist in Blau die von der WP verbrauchte Leistung über der Zeit dargestellt und in Gelb der jeweils hinterlegte Strompreis. Unter der ersten Variante wird davon ausgegangen, dass in jeder Stunde Strom zum gleichen Preis bezogen werden kann und sich somit das Verbrauchsprofil der WP nicht ändert. In Variante zwei wird ebenfalls das Verbrauchsprofil der WP nicht verändert, jedoch ein dynamischer Strompreis einbezogen. Eine Kostenoptimierung erfolgt dann unter Variante drei. Hier wird abhängig von den Stromkosten der Eisspeicher zur möglichen Lastverschiebung genutzt und bei hohen Preisen wird weniger (oder gar kein) Strom bezogen, bei niedrigen Preisen wird in den Eisspeicher eingespeichert und die WP in Vollaustattung betrieben (wenn notwendig).

Die dafür ausgelegten Parameter werden im Kapitel 6.1.2 dargelegt. Durch den Vergleich der drei Varianten kann eine mögliche Kosteneinsparung durch den Eisspeicher gezeigt werden. Durch den Einbezug von unterschiedlichen Wetterjahren, können auch Schwankungen in der erneuerbaren Erzeugung (abgebildet im Strompreis) und im Wärmebedarf gezeigt werden.

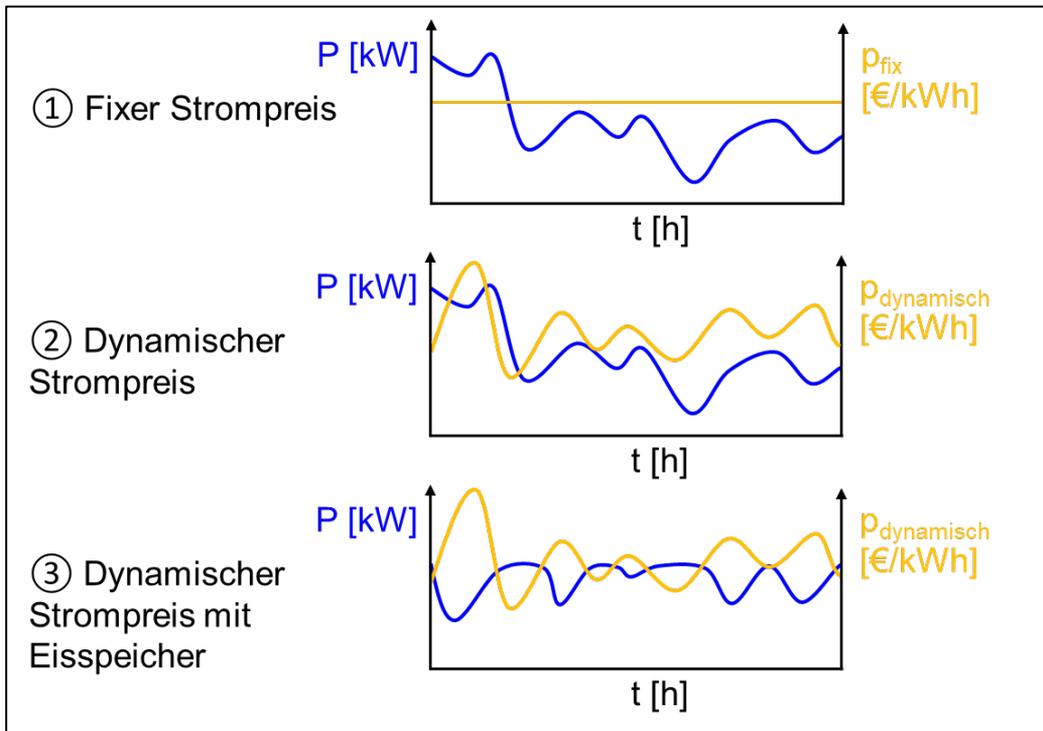


Abbildung 66: Varianten des Strombezugs der WP im Überblick (TU Wien, 2024)

Ein Optimierungsmodell wurde in Python entwickelt und mit dem Solver Gurobi gelöst. Die Zielfunktion ist gegeben als Minimierung der Energiekosten im Haushalt auf stündlicher Basis:

$$\min \sum_t^{8760} c_{ele,t} * P_{Netz,t} \quad (\text{€/h}) \quad (1)$$

mit

t Time

c_{ele} Stromkosten (€/kWh)

$P_{Netz,t}$ Netzstrombezug (kW)

In Gleichung (1) werden die Stromkosten angegeben. Der Netzstrombezug ist eine unabhängige Variable und wird mithilfe der Zielfunktion optimiert. Die wichtigsten Randbedingungen der Optimierung sind in Gleichung (2-9) skizziert.

$$P_{Netz,t} - P_{ES,in,t} + P_{ES,out,t} - D_t = 0 \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

$P_{ES,in,t}$ Ladeleistung Eisspeicher (kW)

$P_{ES,out,t}$ Entladeleistung Eisspeicher (kW)

D_t Strombedarf WP (kW)

$$E_{ES,t} - E_{ES,t-1} - P_{sto,in,t} * \eta_{ES,in} + \frac{P_{ES,out,t}}{\eta_{ES,out}} = 0 \quad (\text{kWh}) \quad (3)$$

E_{ES} Gespeicherte Energiemenge Eisspeicher (kWh)

η Effizienz

$$D_t \geq 0 \quad (4)$$

$$P_{Netz,t} \geq 0 \quad (5)$$

$$P_{ES,t} \geq 0 \quad (6)$$

$$P_{ES,in,t} - P_{ES,in}^{max} \leq 0 \quad (\text{kW}) \quad (7)$$

$$P_{ES,out,t} - (E_{ES,out}^{max}, E_{ES,t-1}) \leq 0 \quad (\text{kWh}) \quad (8)$$

$$E_{ES,t} - E_{ES}^{max} \leq 0 \quad (\text{kWh}) \quad (9)$$

Um eine mögliche Lastverschiebung der WP erreichen zu können, ist neben der Wärmepumpe auch die Investition in einen Speicher notwendig. Im Rahmen der Analyse wird hierfür ein Eisspeicher verwendet.

Wesentliche Kostenkomponenten sind dabei Investitionskosten bzw. kapitalgebundene Kosten mittels Annuitätenmethode (WP, Speicher, Installationskosten), betriebsgebundene Kosten (Wartung und Instandhaltungskosten) sowie verbrauchsgebundene Kosten (Stromkosten). Um alle genannten Kostenfaktoren berücksichtigen zu können, wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt, indem die Total Cost of Use (TCU) eines Wärmepumpensystems und eines Eisspeicher-Wärmepumpensystems miteinander verglichen werden. Die TCU beinhalten nicht nur die Investitionskosten, sondern betrachtet die Kostenstruktur der Gesamtsysteme über deren gesamte Lebenszeit. Der methodische Ansatz der TCU-Analyse beinhaltet einen Diskontierungssatz, die Gebrauchsdauer und den Zeitwert des Geldes. Es wird die Annuitätenmethode angewandt.

Eine Annuität ist eine Serie von gleichen jährlichen zukünftigen Kapitalflüssen. Um den Barwert (Zeitwert) einer Annuität zu bestimmen, wird der Annuitätenfaktor (Kapitalrückflussfaktor) (α) berechnet. Der Annuitätenfaktor ist der Kehrwert des Rentenbarwertfaktors und die jährlichen Belastungen aus diesen Gesamtinvestitionen umfassen (Haas et al., 2021):

- Abschreibungszeit (n)

- Zinssatz (r)
- Steuern
- Sach- und Haftpflichtversicherung (zum Nominalwert)

Dieser erfasst Abschreibungen und Zinsen als Prozentsatz der Investitionskosten:

$$\alpha = \frac{(1+r)^n \cdot r}{(1+r)^n - 1} \quad (10)$$

Die Annuität beschreibt die Investition als gleichmäßige jährliche Zahlung in Abhängigkeit von den Zinsen, Abschreibung und anfänglichen Investitionskosten ($IC_{0,i}$, in €). Abschreibung und Zinsen werden daher als Annuität bezeichnet und als konstante Zahlungen A betrachtet. Der Index i bezieht sich auf die Investitionskosten, abhängig vom System (mit oder ohne Eisspeicher), für das die Analyse durchgeführt wird:

$$A = IC_{0,i} \cdot \alpha \quad (\text{€/Jahr}) \quad (11)$$

Die gesamten Energiekosten ($C_{fuel,i}$, in €/Jahr) werden aus der Summe des stündlichen Strompreises ($c_{ele,t}$, in €/kWh) und dem jeweiligen Netzbezug ($P_{Netz,t}$, in kWh) berechnet.

$$C_{fuel,i} = \sum_t^{8760} c_{ele,t} * P_{Netz,t} \quad (\text{€/Jahr}) \quad (12)$$

Schließlich werden die TCU mithilfe der Annuität (A , in €/Jahr) und der Summe aller Wartungs- und Instandhaltungskosten ($C_{main,i}$, in €/Jahr) und Betriebskosten ($C_{fuel,i}$, in €/Jahr) berechnet:

$$TCU = A + C_{main,i} + C_{fuel,i} \quad (\text{€/Jahr}) \quad (13)$$

Das Gesamtverfahren inklusive der erwarteten Ergebnisse ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst.

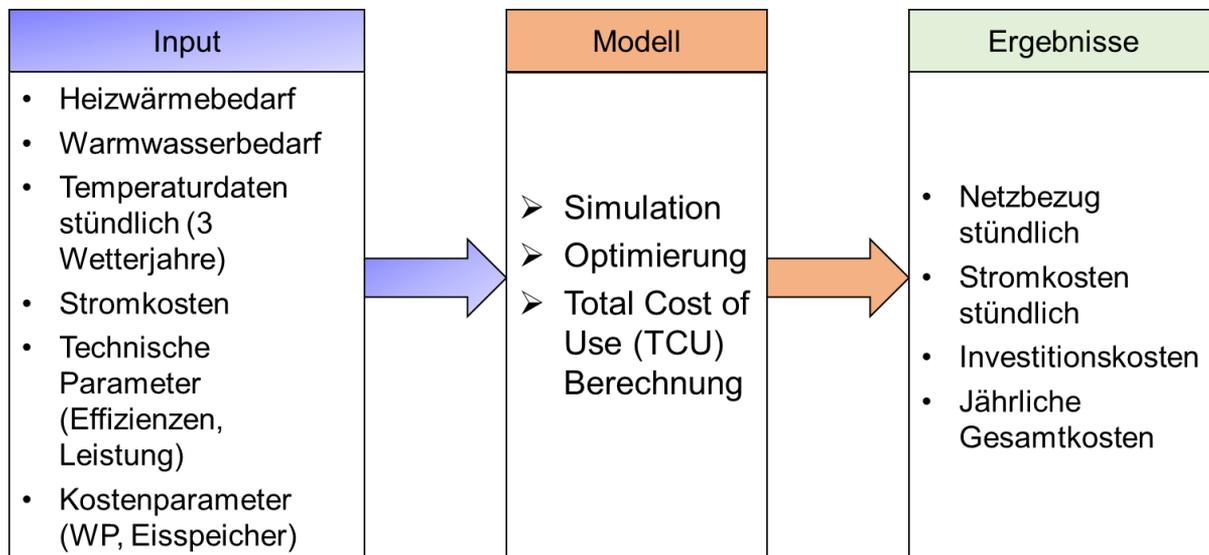


Abbildung 67: Gesamtaufbau des Modells (TU Wien, 2024)

6.1.2. Kalkulationsdaten und Annahmen

In diesem Kapitel werden nun die gesamten Ausgangsdaten für die folgende Wirtschaftlichkeitsrechnung zusammengefasst. Zunächst erfolgt in der folgenden Tabelle 5 die Ergebnisse einer Literaturrecherche der Investitionskosten eines Eisspeichers und die einer Luftwärmepumpe in Tabelle 6. Hier ist es wichtig festzuhalten, dass es in der Literatur kaum aktuelle und belastbare Zahlen der jeweiligen Investitionskosten gibt. Es ist auch manchmal nicht klar ersichtlich, ob sich die Angaben in der Literatur auf kW_{el} oder kW_{th} beziehen und fast nie auf welche Anlagengröße und weiters auf welches Jahr. Hier wird versucht, einen Überblick über die Bandbreite der Kostenannahmen unterschiedlicher Quellen zu geben.

Tabelle 5 Literaturrecherche zu Investitionskosten eines Eisspeichers

Kosten (€/Stück)	Kapazität	Zusätzliche Informationen	Quelle
10 000 - 15 000	n.a.	Einfamilienhaus	(Kühl, 2022)
8 000 - 10 000	78 kWh _{ele}		(Neumann, 2018)
6 000 - 7 000	10 m ³	zusätzlich 4 000 € für Erdarbeiten	(Heizsparer, 2022)
10 000	10 m ³	zusätzlich 1 100 € für Grabungsarbeiten	(Koppensteiner, 2023)
5 000 - 6 000		für eine etwa 7 kW große Sole-Wasser-Wärmepumpe; zusätzlich ca. 4 000 € für Erdarbeiten	(energie-experten, 2021)
31 000 ⁵	13.1 m ³	464 kWh _{th} ; 8 000 l Wasser; 1380 kg Leergewicht;	(Boulamanti et al., 2020)

⁵ 30 000 CHF (2018); Anmerkung von Boulamanti et al., 2020: „Der Eisspeicher würde heute weniger kosten, weil sich die Technologie bereits weiterentwickelt hat.“

Tabelle 6 Literaturrecherche zu Anschaffungskosten einer Luftwärmepumpe

Kosten (€/Stück)	Kapazität	Zusätzliche Informationen	Quelle
784	1 kW		(European Commission, 2020b)
14 000	n.a.	zusätzlich 7 000 € für Material, Peripherie und 7 500 € für Montage und Inbetriebnahme; 600-1500 € Wartungskosten/Jahr	(Enpal, 2023)
15 000 - 22 000	n.a.		(Heizsparer, 2023)
45 920	n.a.	Einfamilienhaus Bestand unsaniert; 665 € Wartungskosten/Jahr	(Pehnt, 2023)
28 620	n.a.	Einfamilienhaus Bestand; 495 € Wartungskosten/Jahr	(Pehnt, 2023)
23 820	n.a.	Einfamilienhaus Bestand saniert; 445 € Wartungskosten/Jahr	(Pehnt, 2023)

In Tabelle 7 sind die, für die weiterführenden Berechnung, verwendeten Kosten und technische Parameter des Eisspeicher-Wärmepumpensystems aufgeführt. Die angeführten Werte beziehen sich auf Recherchen in aktueller Literatur. Die angenommenen Investitionskosten sind weitgehend im Rahmen der vorangegangenen Kostenrecherche in der Literatur.

Tabelle 7 Eingangsdaten der TCU-Berechnung⁶

Parameter	Einheit		Quelle
Luftwärmepumpe:			
Investitionskosten	€/kW _{th}	784	(European Commission, 2020b)
Leistung	kW _{th}	11	Berechnung
Wartungs- und Instandhaltungskosten	€/Jahr	495	(Pehnt, 2023)
Lebensdauer	Jahre	25	(Koppensteiner, 2023)
Jahresarbeitszahl (ohne Eisspeicher)		2,56 -2,76	(AIT, 2018)
Eisspeicher:			
Investitionskosten	€/m ³	1000	(Koppensteiner, 2023)
Rohrleitungskosten	€/Speicher	200	(Koppensteiner, 2023)
Grabungsarbeiten	€/Speicher	1100	(Koppensteiner, 2023)
Wärmetauscher	€/Stück	160	(Koppensteiner, 2023)

⁶ Alle Kosten real, Preisbasis 2022

Wartungs- und Instandhaltungskosten	€/Jahr	50 ⁷	(Koppensteiner, 2023)
Wirkungsgrad		0,9	Annahme
Lebensdauer	Jahre	50	(Koppensteiner, 2023)
Volumen	m ³	10	(Minder et al., 2014)
Speicherkapazität	kWh _{th} /m ³	77 ⁸	(Minder et al., 2014)
Entladedauer	h	93,6 ⁹	(Minder et al., 2014)
Ladeeffizienz / Entladeeffizienz		1/0,9	(Minder et al., 2014)
Sonstiges:			
Pufferspeicher	€/Stück	1165	(Koppensteiner, 2023)
Warmwasserspeicher	€/Stück	899	(Koppensteiner, 2023)
Steuerung	€/Stück	400	(Koppensteiner, 2023)
Installationskosten	€/System	2500	(Koppensteiner, 2023)
Netzanschlussleistung	kW _{el}	9	Annahme
Stromkosten fix	€/kWh _{el}	0,23	(statista, 2023)
Zinssatz real		0,05	Annahme

Die Speichergröße wird mit 10 m³ angenommen (Minder et al., 2014). Die Lebenszeit des Eisspeichers ist in der Literatur nicht klar definiert. (Boulamanti et al., 2020) gehen von 15 Jahren aus, da zu dieser Zeit von einer Überarbeitung der Kälteanlage ausgegangen wird, merken jedoch an, dass die effektive Lebensdauer des Behälters 50 Jahre sein kann. In dieser Analyse wird deshalb nach (Koppensteiner, 2023) eine Lebensdauer von 50 Jahren angenommen. Zur Regeneration des Eisspeichers wird in dieser Analyse Netzstrom bezogen. Zusätzlich zur WP und zum Eisspeicher sollte noch ein Pufferspeicher zur Speicherung des Heizwassers, um die Taktzeiten der WP und somit die Lebensdauer zu verlängern und ein Warmwasserspeicher angeschafft werden (Koppensteiner, 2023). Diese Speicher sind jedoch nicht groß genug, um den Stromverbrauch von einer Stunde in die nächste zu verschieben (Katsman, 2020). Die Kosten dafür werden im Weiteren unter „Sonstige Kosten“ angeführt.

In den Investitionskosten des Eisspeichers sind die Kosten für den Speichertank, den Kältemittelkreislauf und die Isolierung inkludiert. Die Kosten für den notwendigen Wärmetauscher, die Rohrleitungen und die Steuereinheit werden separat angegeben und fließen ebenfalls in die Gesamtkosten mit ein. Die Wartungskosten beinhalten die Inspektion des Kältemittelkreislaufs, die Überprüfung der Dichtheit, die Reinigung des Wärmetauschers und die Überprüfung der Steuereinheit. Im Vergleich zu anderen Energiespeichern weisen diese einen geringeren

⁷ Drittel der Systemwartungskosten

⁸ 50% des Volumens vereist; laut Studie sind höhere Vereisungsgrade laut Hersteller möglich, wurden aber nicht untersucht

⁹ Bei 11 kW Heizleistung

Wartungsaufwand aufgrund der geringeren Anzahl an mechanischen Komponenten auf (Selfmade Energy, 2023).

Zur Analyse auf Haushaltsebene wird ein repräsentatives Einfamilienhaus ausgewählt. Dazu werden die Objektdaten und der daraus resultierende monatliche Heizwärmebedarf aus der ÖNORM B 8110-6-2 - Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6-2: Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf - Validierungsbeispiele für den Heizwärme- und Kühlbedarf für Gebäudetypen, der Ausgabe: 2023-10-01 herangezogen (Austrian Standards International, 2023). Die Objektdaten sind aus Tabelle 8 (Tabelle 1 der ÖNORM B 8110-6-2) ersichtlich. Die entsprechenden monatlichen Heizwärmebedarfswerte sind in Tabelle 9 angeführt. Der Warmwasserbedarf wird mit 12.5 kWh/(m²a) angenommen (Das ökoEnergiewelt, 2023).

Tabelle 8 Objektdaten eines repräsentativen Einfamilienhaus aus ÖNORM B 8110-6-2 (Austrian Standards International, 2023)

Objektdaten		
Objekt	Nutzung des Gebäudes	Einfamilienhaus
	Abmessungen ($L \times B \times H$)	12,00 m \times 8,00 m \times 6,00 m
Referenzklima	Normaußentemperatur	-13,00 °C
Standortklima	Klimaregion	Region alpine Zentrallage (ZA)
	Seehöhe	750 m
	Normaußentemperatur θ_{ne}	-13,40 °C
	Ort	Schladming
Angaben zu den Fensterflächen		
24,00 m ² Fensterfläche	Süd-orientiert	12,00 m ²
	Ost- und West-orientiert	je 4,80 m ²
	Nord-orientiert	2,40 m ²
	Bauweise	leicht
Angaben zur Lüftung		
Allgemein	Art der Lüftung	Fensterlüftung
	Nachtlüftung	Nachtlüftung vorhanden
	Befeuchtung	kein Befeuchter
	Sommerbypass	-
	Erdwärmetauscher	kein Erdwärmetauscher
Art der Konditionierung	Heizen	-
	Befeuchten	-
	Kühlen	-
	Entfeuchten	-
Volumenstrom	maximaler Volumenstrom	-
Grenztemperatur Zuluft	Heizfall	-
	Kühlfall	-
Angaben zu den Varianten		U-Wert W/(m ² · K)
Variante 1	oberste Geschoßdecke zu geschlossenem Dachraum (UOD)	0,15
	Außenwand (UAW)	0,26
	Fenster (UFE) und Gesamtenergiedurchlassgrad $g = 0,65$	1,10
	unterste Geschoßdecke zu geschlossener Garage (UKD)	0,49

Tabelle 9 Heizwärmebedarfswerte (HWB) (monatlich und jährlich) (Austrian Standards International, 2023)¹⁰ und Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung (WWWB) (Das ökoEnergieland, 2023)

Monat (kWh _{th} /M)	
Jänner	2551,49
Februar	1901,95
März	1460,38
April	736,88
Mai	157,22
Juni	0
Juli	0
August	0
September	93,05
Oktober	852,21
November	1681,14
Dezember	2339,64
Gesamt HWB (kWh _{th} /Jahr)	11773,96
Gesamt WWWB (kWh _{th} /Jahr)	2400,02
HWB kWh _{th} /(m ² · a)	61,32
WWWB kWh _{th} /(m ² · a)	12,5

Zur Strompreisanalyse wird ein stündliches Lastprofil des Einfamilienhauses erstellt. Dafür werden mit dem Lastprofilgenerator des Austrian Institute of Technolog (AIT) (AIT, 2023b) abhängig von den Temperaturdaten der Jahre 2015-2017 (Abbildung 68) (Pfenninger und Staffell, 2020), drei Lastprofile der stündlichen elektrischen Leistung von WP in Österreich erstellt. Im Lastprofilgenerator kann ein Profil für Luft-Luft-, Luft-Wasser-Wärmepumpen, geothermische und hybride WP zur Heizung und ein Profil für sanitäres Wasser mit Luft-Wasser WP erstellt werden (AIT, 2023b). Für diese Analyse wird jeweils das Lastprofil für Luft-Wasser WP für Heizen und Warmwasser verwendet.

¹⁰ Für diese Analyse wird Fall 1 verwendet; Bilanzierung gemäß ÖNORM H 5050-1:2019, Abschnitt 6.2.5; monatlicher Heizwärmebedarf mit realem Transmissionsleitwert, Realausstattung und Referenzklimabedingungen, in kWh/M

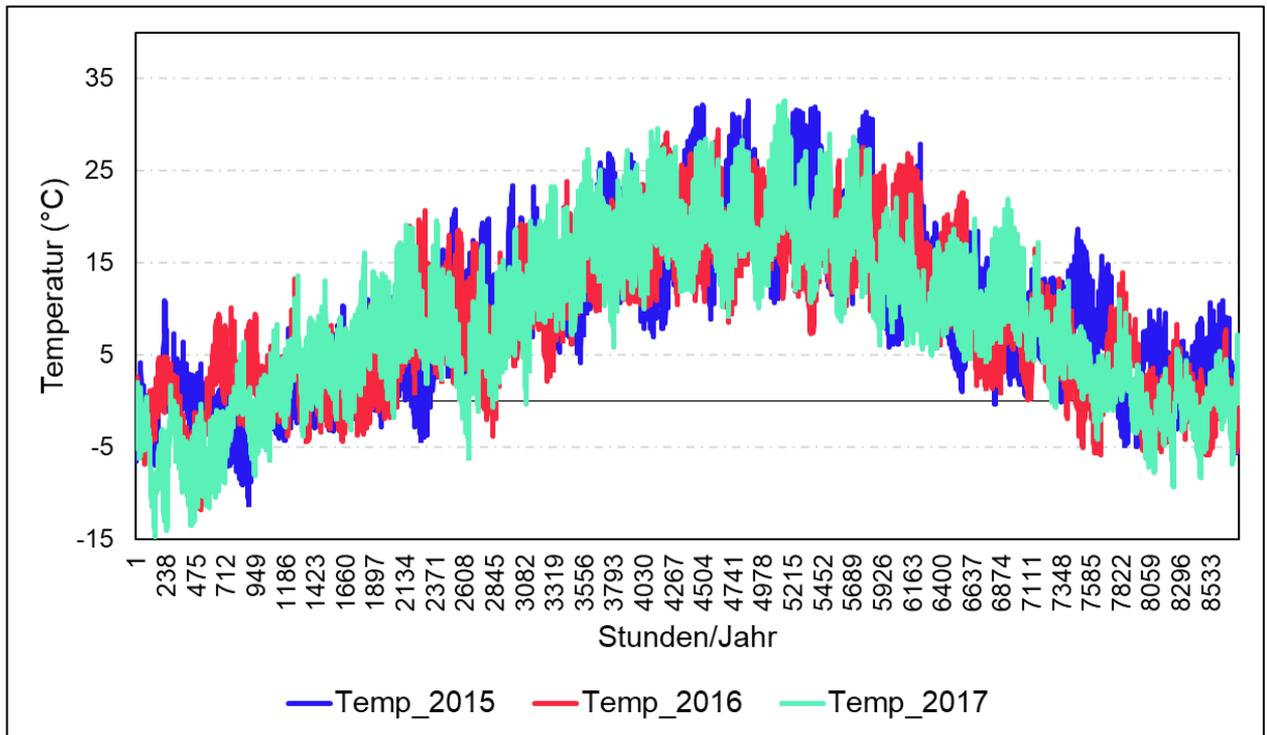


Abbildung 68: Temperaturverteilung der Jahre 2015-2017 (Pfenninger und Staffell, 2020)

Um einen Ausblick in die Zukunft mit Temperatursteigerungen gewährleisten zu können, wird zusätzlich basierend auf dem Wetterjahr 2017, das Temperaturprofil des Jahres so verändert, dass diese nicht unter +5 °C fallen, um zu schauen, wie sich ein etwaiger Gesamttemperaturanstieg auf die Kosten der Wärmepumpen auswirkt.

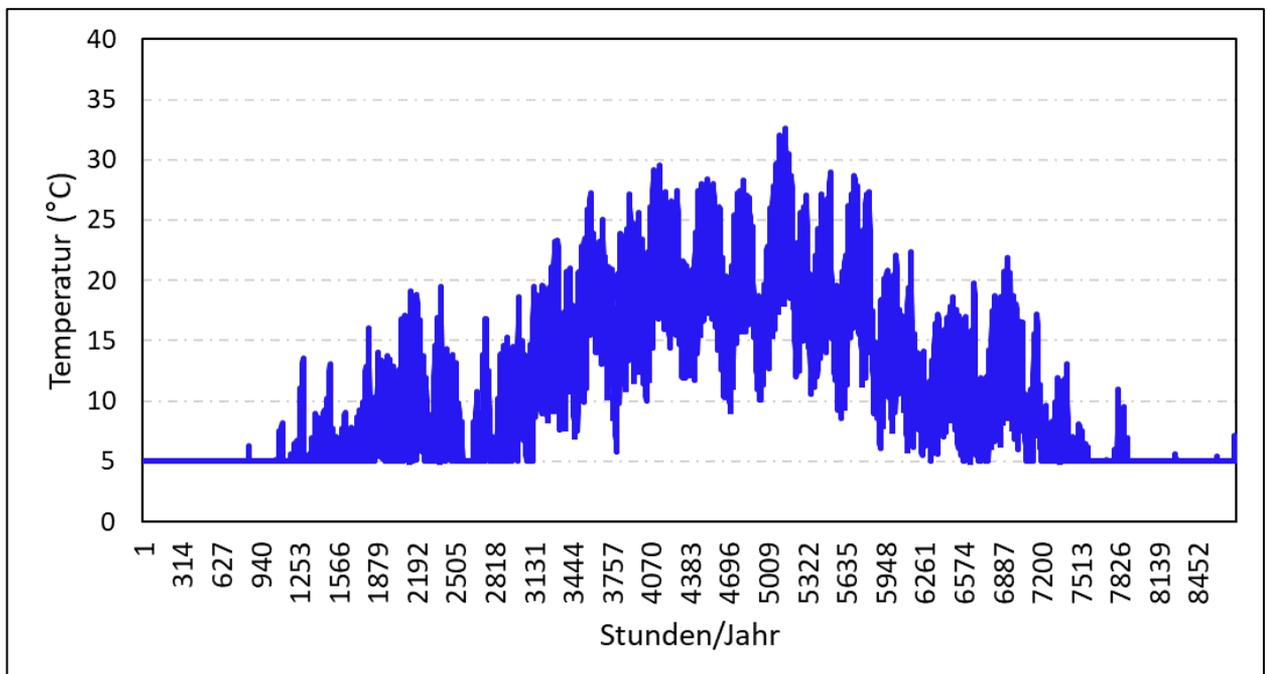


Abbildung 69: Temperaturverteilung mit einem Minimaltemperaturwert von +5 °C (TU Wien, 2024)

Die aus den jeweiligen Profilen resultierende Jahresarbeitszahl (β) der Luftwärmepumpe wird dafür verwendet, den monatlichen Strombedarf der WP (D_{WP_m}) des Einfamilienhauses zu berechnen:

$$D_{WP_m} = (HWB_m + WWWB_m) / \beta \quad (\text{kWh}_{\text{el}}/\text{M}) \quad (14)$$

Die Kapazität der WP (P_{WP}) des Einfamilienhauses wird anhand der erstellten AIT Lastprofile und der Gesamtstromnachfrage der WP (E_{WP}) mithilfe der Volllaststunden (FLH) ermittelt.

$$P_{WP} = E_{WP} / FLH \quad (\text{kW}_{\text{el}}) \quad (15)$$

Mithilfe der Wärmepumpenkapazität und der stündlichen Auslastung (FLH/Stunde) des AIT Lastprofils, kann das spezifische stündliche Lastprofil der WP des Einfamilienhaushaltes erstellt werden.

$$D_{WP_h} = P_{WP} * FLH_h \quad (\text{kWh}_{\text{el}}/\text{h}) \quad (16)$$

Abbildung 70 zeigt die jeweiligen Lastprofile der WP (Leistung: 11 kWth) in Abhängigkeit des jeweiligen Temperaturprofils (2015-2017).

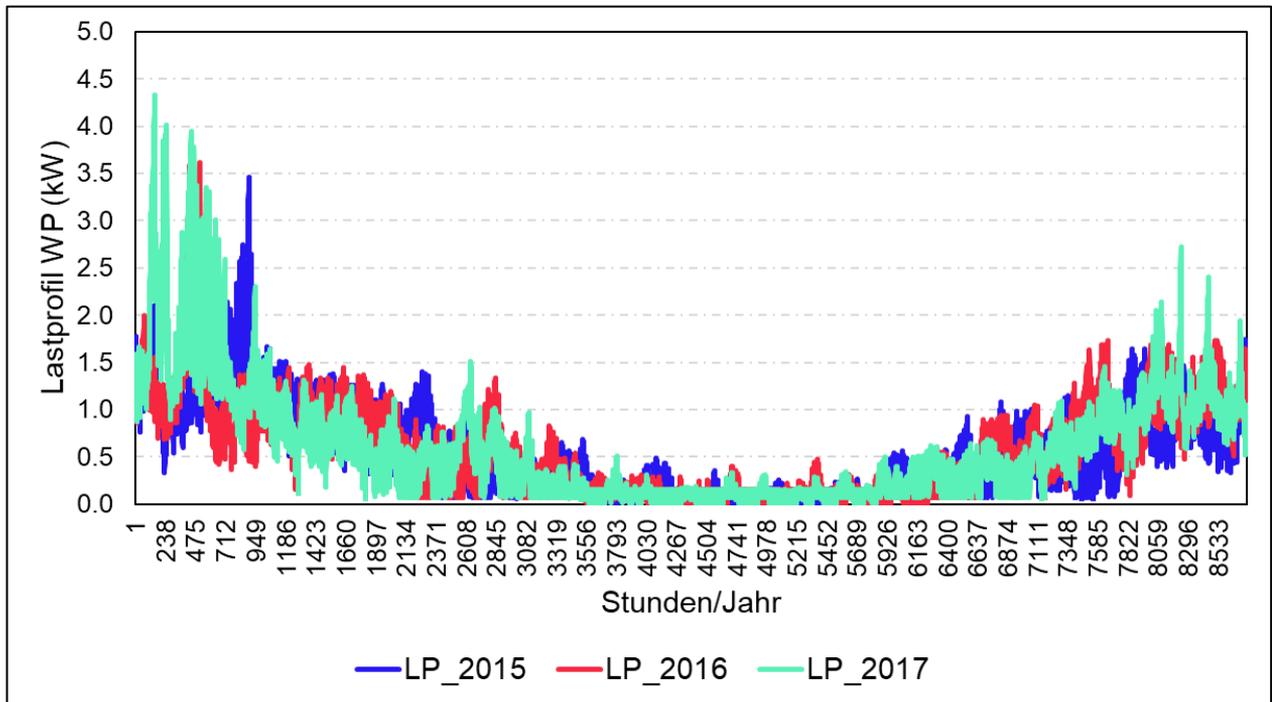


Abbildung 70: Lastprofile der WP des Einfamilienhaushaltes abhängig von der jeweiligen Temperatur (2015-2017) (TU Wien, 2024)

Entsprechend den saisonalen Mustern der Heizgradtage ist der Wärmebedarf in Österreich im Winter am höchsten und im Sommer am niedrigsten. Das wirkt sich auch auf das Flexibilitätspotenzial des Eisspeichers aus, je kälter es ist, desto mehr Energie wird zum Heizen benötigt und desto mehr Energie kann verlagert werden, siehe Abbildung 71. Die Temperaturabhängigkeit wird bei der Modellierung durch das Temperaturprofil berücksichtigt, aber dynamische Wärmeverluste werden nicht modelliert. In der Realität variieren diese Verluste je nach Gebäudetyp, Isolierung und Außentemperatur (Schöniger, 2023).

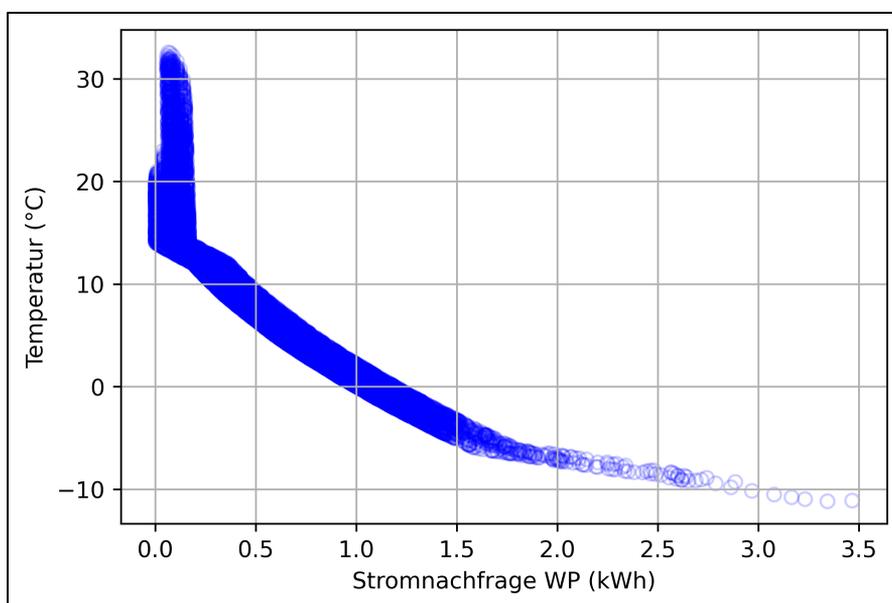


Abbildung 71: Abhängigkeit der Stromnachfrage von der Temperatur (TU Wien, 2024)

Zur Analyse der Gesamtstromkosten innerhalb eines Jahres und des Zusammenhangs der Volatilität des Strompreises und einer möglichen Einsparung durch Lastverschiebungen mittels Eisspeicher werden drei Szenarien analysiert: ein fixer Strompreis, ein dynamischer Strompreis und ein dynamischer Strompreis mit Eisspeicher. Im Szenario des fixen Strompreises wird ein Preis von 0,23 €/kWh verwendet (statista, 2023).

Zur Analyse des dynamischen Strompreises werden fünf stündliche Preisprofile herangezogen. Die ersten drei Profile bilden den historischen Day-Ahead-Strompreis (EPEX Spot) der Jahre 2015-2017 ab, siehe Abbildung 72. Ein hypothetisches Netzentgelt und Steuern von 0,2 €/kWh wird addiert, um einen realistischen Endkundenstrompreis zu erhalten. Die durchschnittlichen Kosten dieser drei Profile (0,232, 0,229, 0,234 €/kWh) decken sich auch mit den Haushaltsstrompreisen des Jahres 2022 von 0,23 €/kWh (statista, 2023).

Die beiden weiteren Preisprofile sollen einen zukünftigen Strompreis inklusive CO₂ Preis abbilden, da erwartet wird, dass die Volatilität des Strompreises, bedingt durch den weiteren Ausbau erneuerbarer Erzeugung und einer höheren Bepreisung von fossiler Erzeugung, weiter steigen wird und somit eine größere Möglichkeit zu Lastverschiebungen geboten sind. Es werden dazu die CO₂ Preise von 53 und 106 €/t CO₂ herangezogen (Abbildung 72). Die Profile wurden von Franziska Schöniger in Balmorel modelliert und ebenfalls mit dem hypothetischen Netzentgelt und Steuern von 0,2 €/kWh hochgerechnet, um Haushaltsstrompreise zu erhalten. Balmorel ist ein partielles Gleichgewichtsmodell für die Analyse des Stromsektors mit Berücksichtigung der Nachbarländer und Interaktionen (Balmorel, 2023). Bei den verwendeten Zeitreihen wurde angenommen, dass das Szenario des nationalen Energie- und Klimaplanes WAM, mit zusätzlichem Ausbau der erneuerbaren Erzeugung zur Erreichung des 100% bilanziell erneuerbaren Ziels umgesetzt wird. Für die Nachbarländer wird von den installierten Kapazitäten und Nachfrage des Zehn-Jahres-Netzentwicklungsplan (TYNDP) 2020 und dem Szenario Nationale Trends angenommen. Weiterführende Informationen und Analysen dazu sind unter (Schöniger, 2023) zu finden.

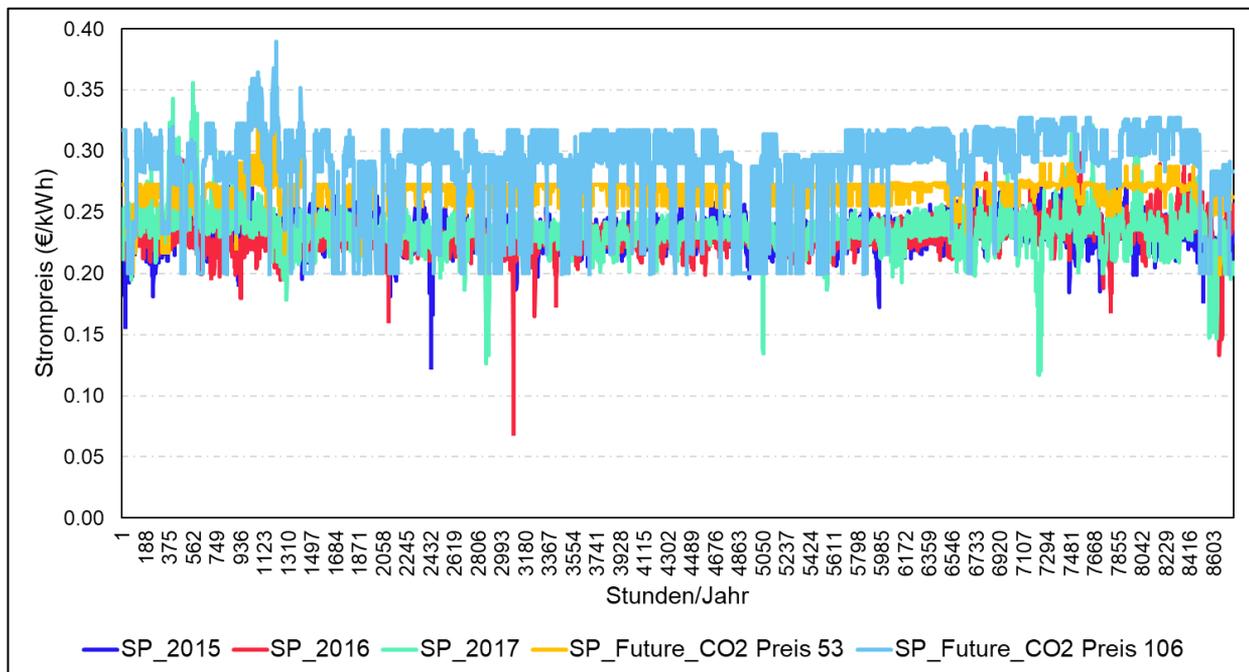


Abbildung 72: Analyzierte Strompreise (TU Wien, 2024)

6.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Strompreisanalyse bei dynamischen Preisen zeigen eine Kostenersparnis beim preisgesteuerten WP und Eisspeicherbetrieb. In den Wetterjahren 2015–2017 können dadurch jährlich zwischen 61 und 104 € pro Jahr eingespart werden, siehe Tabelle 10. Die Potenziale hängen somit stark von den jeweiligen Wetterbedingungen im analysierten Jahr ab. Zum einen haben die Außentemperaturen einen Einfluss auf den Strombedarf der WP und zum anderen hat der Anteil von erneuerbarer Erzeugung einen Einfluss auf die jeweils hinterlegten Strompreise. In Jahren mit geringer Erzeugung von erneuerbarem Strom und einem hohen Strombedarf im Winter sind die allgemeinen Stromkosten höher, da jedoch die erneuerbare Erzeugung nicht in jeder Stunde verfügbar ist, führt dies zu einem möglichen Verschiebepotenzial des WP-Eisspeichersystems. Das Wetterjahr 2017 ist hierfür ein gutes Beispiel. Die absoluten Stromkosten sind hier am höchsten, allerdings auch das Einsparungspotenzial aufgrund der vorhin genannten Gründe.

Beim Vergleich zwischen einem fixen und einem dynamischen Strompreis in Wärmepumpensystemen ohne Eisspeicher zeigen die Ergebnisse, dass in allen drei Fällen ein fixer Strompreis über das ganze Jahr mit geringeren Kosten verbunden ist. Dies kann auf einen tendenziell höheren Strompreis im Winter aufgrund des Einsatzes von Gas – und Dampfkraftwerken zurückzuführen sein. Ein fixer Strompreis über das ganze Jahr ist somit für den Teil der Raumwärme, die in den kalten Monaten gebraucht wird, von Vorteil. Der Unterschied beträgt jährlich zwischen 4 und 52 €.

Bei zukünftigen Strompreisen (Zukunft 1 und 2) werden Einsparungen von 197 und 314 € pro Jahr im Modell gezeigt. Die Einsparungen sind aufgrund des höheren Anteils an erneuerbarer Energie im Stromsystem und die daraus resultierenden Varianzen höher. Das Einsparungspotenzial steigt, je höher der angenommene CO₂-Preis ist. Je höher dieser ist, desto teurer wird die Stromproduktion von fossilen Ressourcen, die speziell im Winter in Stunden mit wenig erneuerbarer Erzeugung genutzt werden. Eine potenzielle Verschiebung des Strombedarfs hin zu Stunden mit hoher erneuerbarer Erzeugung führt somit zu höheren Kosteneinsparungen.

Sobald die Temperatur generell auf mindestens +5 °C beschränkt wird, ist deutlich zu sehen, dass der allgemeine Strombedarf der Wärmepumpen und somit auch die Gesamtstromkosten zurückgehen. Das Einsparungspotenzial durch Eisspeicher beträgt in diesem Szenario 83 € pro Jahr.

Tabelle 10 Gesamtstromkosten eines Haushaltes zur Heizung und Warmwasserbereitstellung mittels WP und Eisspeicher;

Anmerkung: Die Szenarien Zukunft 1 und 2 unterscheiden sich im CO₂ Preis (53 und 103 €/t CO₂)

Strompreis	Strom Jahresgesamtkosten (€/Jahr)					
	Wetterjahr 2015	Wetterjahr 2016	Wetterjahr 2017	Zukunft 1	Zukunft 2	2017 (5 Grad)
Fix	1 167,7	1 201,1	1 273,1	n,a,	n,a,	888,4
Dynamisch	1 178,3	1 205,4	1 324,7	1 357,9	1 508,8	913,2
Dynamisch mit Eisspeicher (optimiert)	1 116,2	1 144,3	1 221,1	1 161,2	1 195,2	829,9
Einsparungspotenzial durch Eisspeicher	62,1	61,0	103,6	196,7	313,6	83,3

Die Ergebnisse aus Tabelle 10 sind in Abbildung 73 grafisch dargestellt.

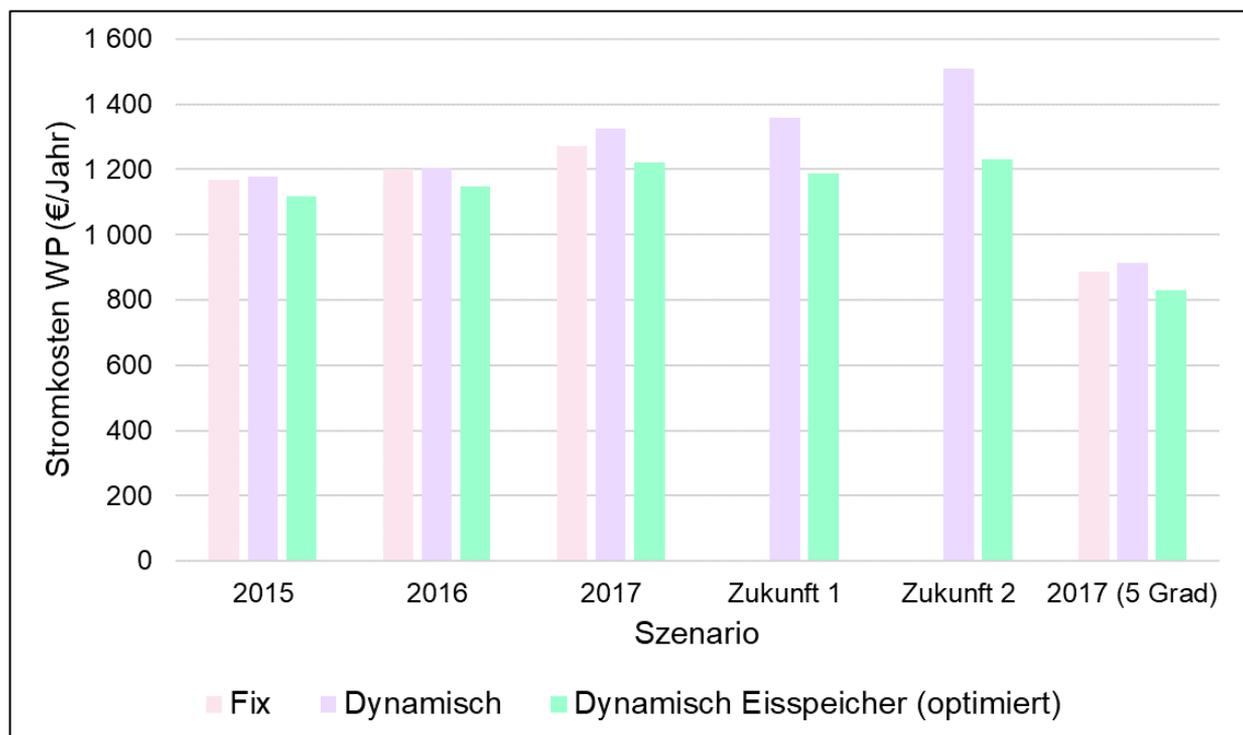


Abbildung 73: Gesamtstromkosten des Wärmepumpenbetriebs unter unterschiedlichen Strompreisszenarien (fixer, dynamischer und dynamischer Strompreis mit Eisspeicher) und Wetterjahren (2015-2017) und zwei Zukunftsszenarien (TU Wien, 2024)

Abbildung 74 veranschaulicht, dass die Integration eines Eisspeichers den Netzstrombezug optimiert, basierend auf dem hinterlegten dynamischen Strompreis, wenn die beiden dynamischen Strompreisszenarien über das Jahr miteinander verglichen werden. In Stunden mit geringem Strompreis wird eingespeichert und in Stunden mit hohem Strompreis wird wenig bzw. gar kein Strom aus dem Netz bezogen. In diesen Stunden kommt dann der Eisspeicher zum Einsatz.

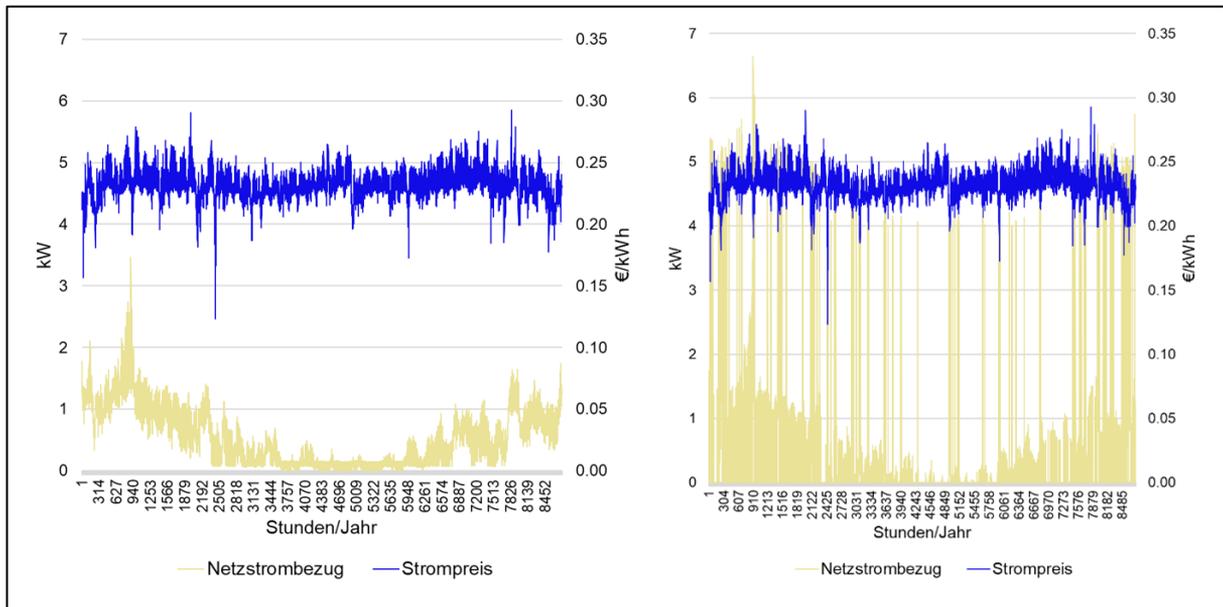


Abbildung 74: Netzstrombezug ohne Eisspeicher (links) und mit Optimierung durch den Eisspeicher (rechts); basierend auf Wetterjahr und Strompreisszenario 2015, mit den Strompreisen auf der rechten Achse (TU Wien, 2024)

In Abbildung 75 und Abbildung 76 sind der Netzstrombezug des dynamischen Preismodells mit und ohne Eisspeicher sowie der Strompreis für vier der untersuchten Szenarien einer Woche im Februar dargestellt. Auf der rechten Achse y-Achse ist der jeweilige hinterlegte Strompreis dargestellt. Hier ist gut ersichtlich, wie mit Eisspeicher in den Stunden mit vergleichsweise niedrigem Strompreis eingespeichert wird. Bei höherer Preisvolatilität wird möglichst viel eingespeichert.

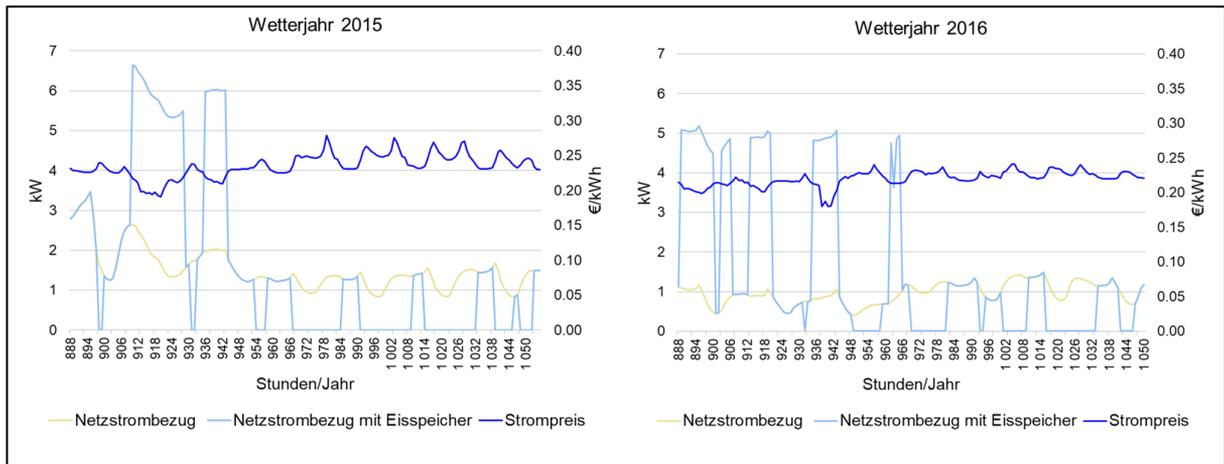


Abbildung 75: Netzstrombezug mit und ohne Eisspeicher einer Winterwoche (6.2.-13.2.) mit den Strompreisen auf der rechten Achse (TU Wien, 2024)

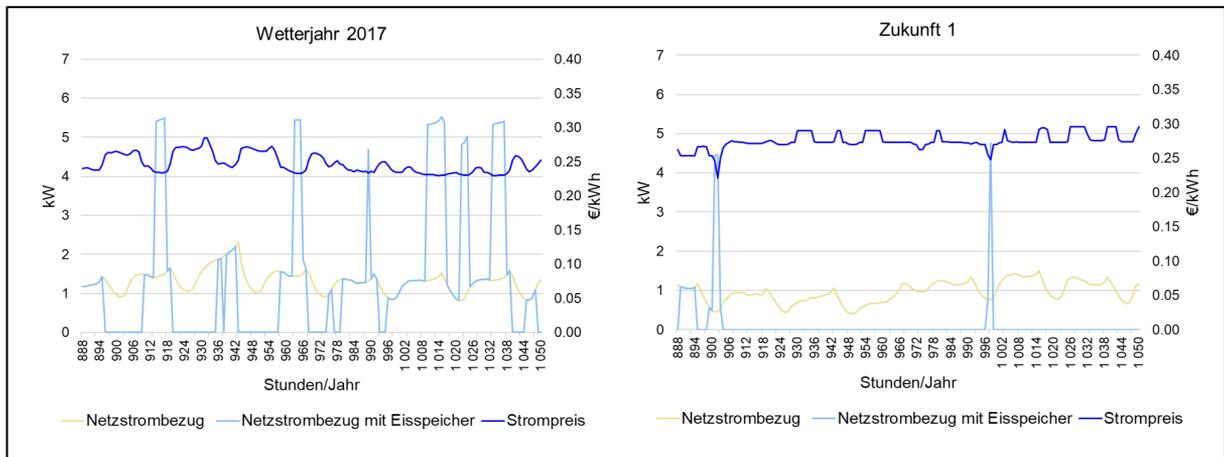


Abbildung 76: Netzstrombezug mit und ohne Eisspeicher einer Winterwoche (6.2.-13.2.) mit den Strompreisen auf der rechten Achse (TU Wien, 2024)

Im Folgenden sind die Ergebnisse der TCU-Analyse dargestellt. In Tabelle 11 Kostenstruktur eines WP- und eines WP-Eisspeichersystems mit dynamischen Stromkosten sind die Ergebnisse der TCU mit den einzelnen Kostenanteilen tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 11 Kostenstruktur eines WP- und eines WP-Eisspeichersystems mit dynamischen Stromkosten

	TCU (€/Jahr)							
	2015 WP	2015 WP + Eissp.	2016 WP	2016 WP + Eissp.	2017 WP	2017 WP + Eissp.	5 Grad WP	5 Grad WP+ Eissp.
Investitionskosten WP	612	612	612	612	612	612	278	278

Investitionskosten Eisspeicher		628		628		628		329
Investitionskosten Sonstige	175	352	175	352	175	352	264	332
Wartungs- und Instandhaltungskosten	495	595	495	595	495	595	225	270
Stromkosten	1178	1119	1205	1149	1325	1223	913	830
Gesamt	2460	3306	2487	3336	2606	3410	1680	2039

In Abbildung 77 sind die Ergebnisse dargestellt.

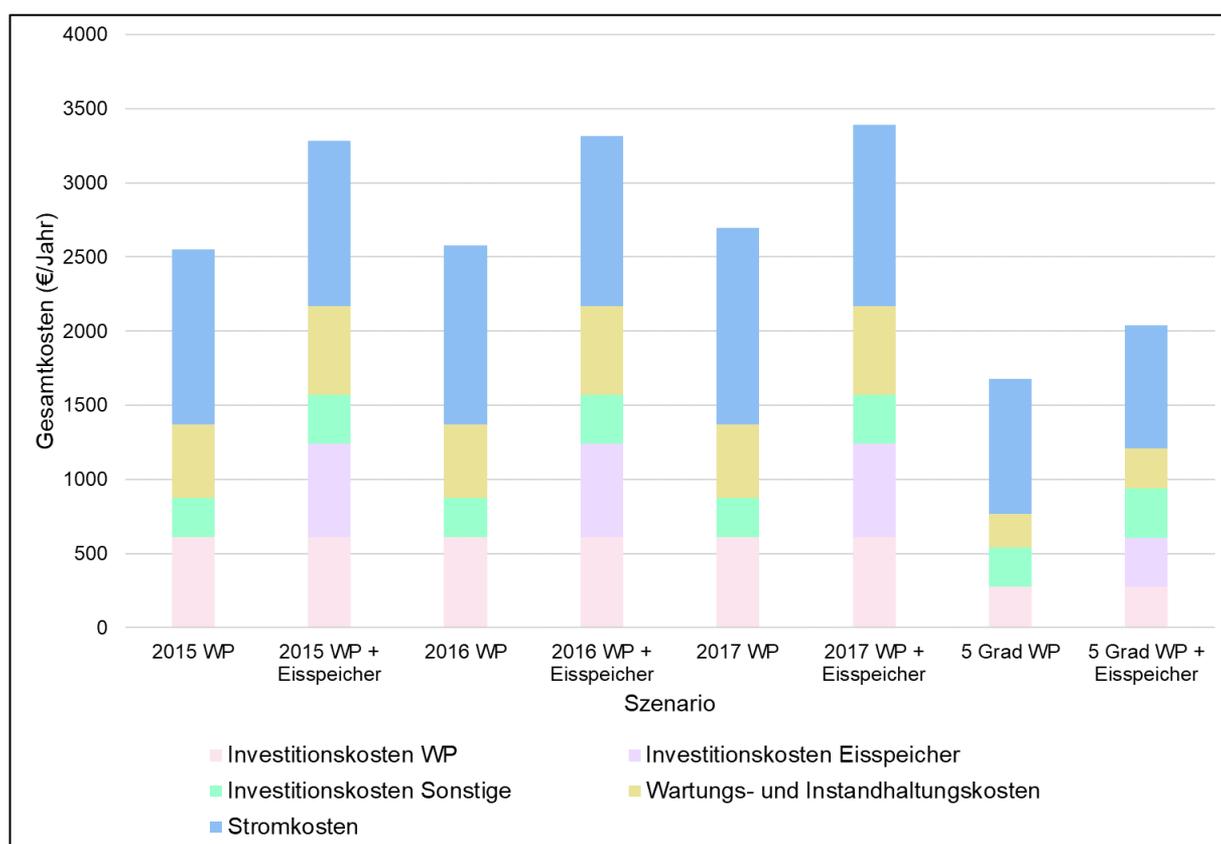


Abbildung 77: TCU des WP- und Wärmepumpen-Eisspeichersystems unter Berücksichtigung der Wetterjahre 2015-2017 (TU Wien, 2024)

In der Abbildung 78 ist ersichtlich, dass in allen heutigen Strompreisszenarien, das WP-Eisspeichersystem in unserem Modell mit höheren Gesamtkosten verbunden ist. Die ist auf die hohen Investitionskosten des Eisspeichers zurückzuführen, siehe Abbildung 78. Bei der Investitionskostenberechnung wurden zu den Stückkosten auch Installationskosten, Pufferspeicher, Warmwasserspeicher, Steuerung, sowie Rohrleitungskosten, Wärmetauscher und Grabungsarbeiten für den Eisspeicher berücksichtigt. Auch die Kosteneinsparungen bei den Stromkosten im WP-

Eisspeichersystem können die aktuellen Investitionskosten in dieser Berechnung nicht ausgleichen. Sobald die Wintertemperaturen erhöht werden, sodass keine Temperaturwerte unter 5 °C zugelassen werden, verringern sich die Gesamtkosten des Heizungssystems in beiden Varianten, da in diesem Fall die Wärmepumpe sowie der Eisspeicher eine geringere Dimensionierung bedarf. Jedoch auch hier ist zu sehen, dass beim Eisspeichersystem zusätzliche Investitionskosten anfallen. Die könnte sich jedoch im zukünftigen Energiesystem ändern. Hier wurden im Modell noch höhere Kosteneinsparungen gezeigt und zukünftig könnten auch die Kosten von Eisspeichern, bei einer zukünftig höheren Installationsrate durch technologisches Lernen, zurückgehen. Etwaige Förderungen für Speicher wurden in dieser Analyse nicht berücksichtigt. Dies könnte jedoch ebenfalls eine Möglichkeit sein, um niedrigere Gesamtkosten zu erreichen.

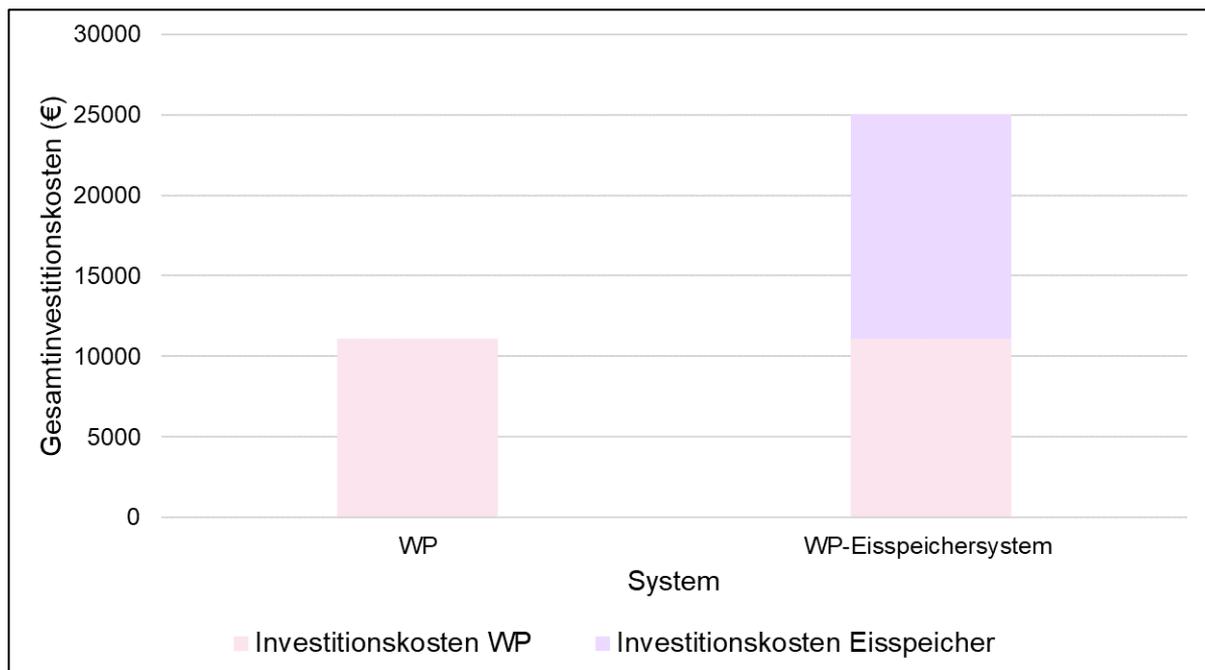


Abbildung 78: Gesamtinvestitionskosten eines WP sowie WP-Eisspeichersystems (inklusive Stückkosten, Installationskosten, Pufferspeicher, Warmwasserspeicher, Steuerung, Rohrleitungskosten, Wärmetauscher und Grabungsarbeiten) (TU Wien, 2024)

6.3. Sensitivitätsanalyse

Zum besseren Verständnis der Berechnungsergebnisse und um herauszufinden, wie der Eisspeicher wettbewerbsfähig werden kann, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei werden verschiedene Eingangsparameter der Wirtschaftlichkeitsberechnung nacheinander variiert, um deren Einfluss herauszuarbeiten.

Im Folgenden werden die Eingangsparameter des Zinssatzes, die Abschreibungsdauer (analysierter Zeitraum) und die Investitionskosten des Eisspeichers variiert. Es ist wichtig, dass immer nur ein Parameter von der Ausgangsberechnung geändert ist, um dessen Einfluss genau herauszuarbeiten.

Zur besseren Übersicht wird in der Sensitivitätsanalyse das Szenario Wetterjahr 2016 verwendet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

6.3.1. Variation des Zinssatzes

Zunächst wird der Zinssatz zur Annuitätenberechnung variiert. In Abbildung 79 sind die Ergebnisse für 3%, 5% und 7% dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bei steigendem Zinssatz, die Gesamtsystemkosten steigen.

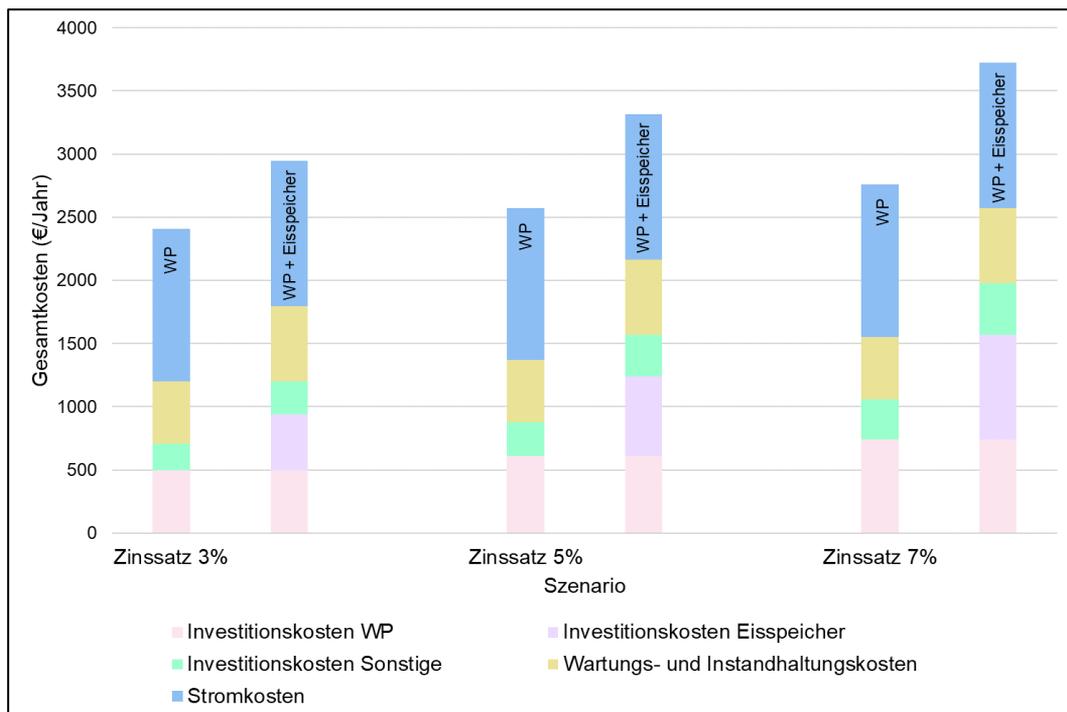


Abbildung 79: TCU bei Variation des Zinssatzes (TU Wien, 2024)

6.3.2. Variation der Abschreibungsdauer

Als Nächstes wird die Abschreibungsdauer (analysierter Zeitraum) des Eisspeichers variiert. In Abbildung 80 sind die Ergebnisse für 30 Jahre, 50 Jahre und 70 Jahre dargestellt. Es ist ersichtlich, dass je höher die Abschreibungsdauer, desto geringer die Gesamtkosten des Systems sind.

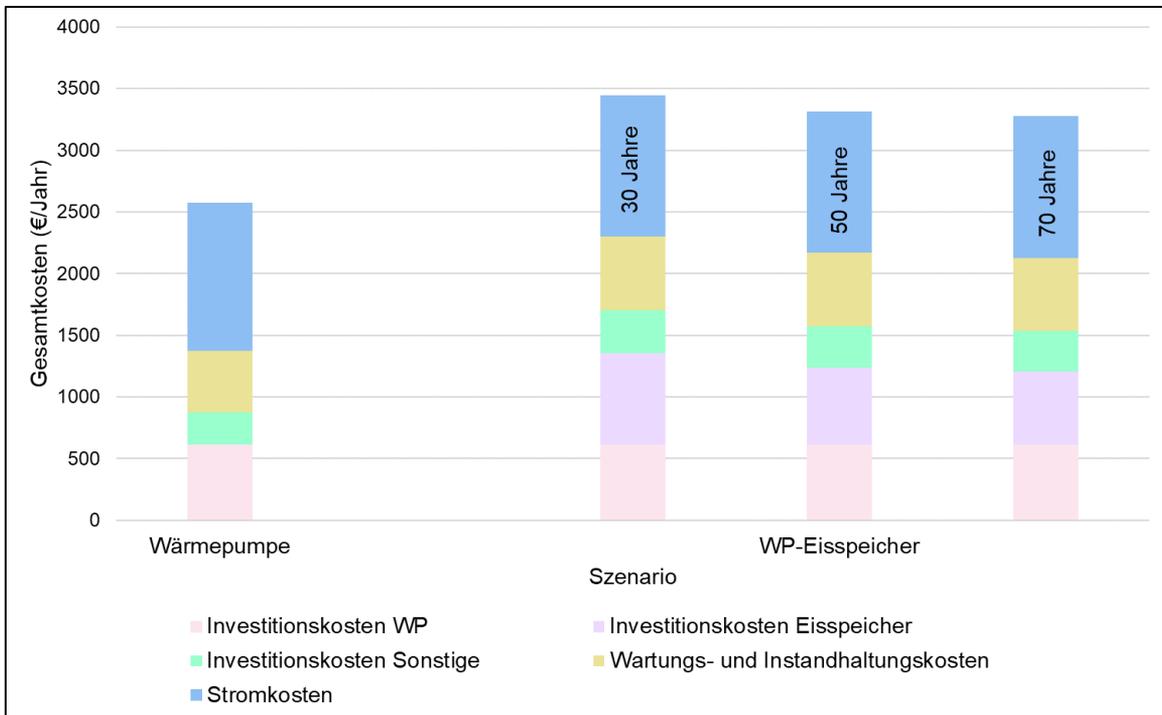


Abbildung 80: TCU bei Variation der Abschreibungsdauer (TU Wien, 2024)

6.3.3. Variation der Investitionskosten

Wie in Abbildung 81 dargestellt, wurde die Investitionskostenreduktion des Eisspeichersystems auf 100%, 50% und 70% der ursprünglichen Investitionskosten untersucht. Es zeigte sich, dass die TCU des WP-Eisspeichersystems erst bei einer Investitionskostenreduktion von 70% einem ähnlichen Wert der TCU des WP-Systems entspricht.

Zuletzt werden die Investitionskosten variiert. In Abbildung 81 sind die Ergebnisse für 100%, 50% und 70% der ursprünglichen Investitionskosten des Eisspeichers. Es ist ersichtlich, dass die TCU des WP-Eisspeichersystems erst bei einer Investitionskostenreduktion von 70% in die Nähe der TCU des WP-Systems kommen.

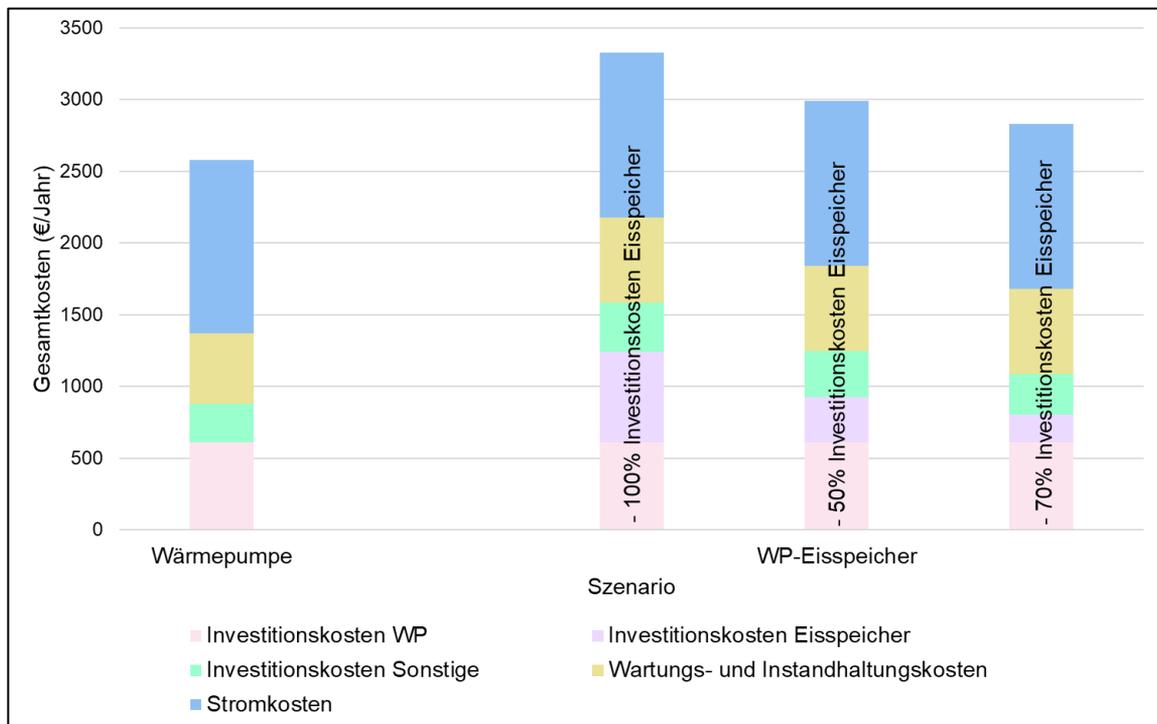


Abbildung 81: TCU bei Variation der Investitionskosten (TU Wien, 2024)

Insgesamt ist aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse ersichtlich, dass die zusätzlichen Kosten durch Anschaffung und Betrieb eines Eisspeichers bei aktuellen Strompreisverläufen nicht kompensiert werden können. Dies stellt generell bei Speichertechnologien aktuell als großes Hindernis für die Marktdurchdringung dar. Könnten sowohl die Investitionskosten langfristig gesenkt werden und würde ein dynamischer Strompreis Knappheits- und Überschusspreise korrekt darstellen, könnte der Eisspeicher wirtschaftlich werden.

7 Emissionsreduktionen

Im folgenden Kapitel werden zum einen der Energieverbrauch und resultierende Emissionen der Herstellung eines Eisspeichers aufgezeigt und zum anderen berechnet, wie hoch die Emissionseinsparungen durch eine Verringerung des Gasverbrauches im Szenario 2030 im Modell sind.

In Tabelle 12 werden noch nach (Boulamanti et al., 2020) die eingebetteten Emissionen eines Eisspeichers gezeigt. Darin werden die Emissionen der Herstellung eines Eisspeichers in (kg CO_{2eq} / kWh_{el}) angegeben. Bezogen auf den Speicher in forliegender Studie sind das insgesamt ungefähr 30210 CO_{2eq} / Speicher.

Tabelle 12 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen zur Herstellung und Montage eines Eisspeichers (Boulamanti et al., 2020)

	Energieverbrauch (kWh)	Treibhausgasemissionen (kg CO _{2eq} / Speicher)
Herstellung und Montage	52450	30210

Im Modell werden 140 GWh_{el} fossile Erzeugung eingespart. Es wird davon ausgegangen, dass diese Erzeugung durch Gas- und Dampfkraftwerke bereitgestellt wird. Der Wirkungsgrad dieser Anlagen beträgt ca. 60%. Mit dem Default CO₂ Emissionsfaktor der IPCC 2006 Guidelines, der für Erdgas mit 56,1 t CO₂/TJ festgelegt wurde (Umweltbundesamt, 2022), kann somit berechnet werden, dass im Modellszenario mittels WP-Eisspeichersystemen 47040 t CO₂ eingespart werden können, siehe Tabelle 13.

Tabelle 13 Emissionseinsparungen durch WP-Eisspeichersysteme im Modell im Jahr 2030

	Einheit	Ergebnisse
Fossile Erzeugung	GWh _{el}	140
Effizienz GuD Kraftwerk		0,6
Erdgas verbrannt	GWh _{gas}	233
Emissionsfaktor Erdgas	kg CO ₂ /kWh	0.202
Gesamtemissionseinsparungen	t CO ₂	47040

8 Schlussfolgerungen

Eine Zusammenführung geeigneter Komponenten und Geräte zur Realisierung des Konzepts Eisspeicher NEU ist möglich und energiewirtschaftlich sinnvoll.

Die Entwicklung und Erprobung einer elektrisch schaltbaren Nanobeschichtung, um dünne Eisplatten mit wenig Energieeinsatz in differenzierter Abfolge antauen zu können und die Nutzbarkeit der Erstarrungswärme deutlich steigern zu können wäre möglich und sinnvoll.

Eine spezielle Regelungstechnik und Steuerungssoftware ist notwendig und deren Integration in gebäudetechnische Softwareprogramme wie IDA-ICE wäre sehr vorteilhaft.

Wenn das Konzept mithilft, Stromspitzen zu reduzieren, um ev. den notwendigen Netzausbau geringer halten zu können, ist eine finanzielle Unterstützung der privaten Errichter volkswirtschaftlich sinnvoll.

Es ist entscheidend, bei der Gestaltung des zukünftigen Energiesystems verschiedene Flexibilitätsmaßnahmen zu berücksichtigen. WP-Eisspeichersysteme spielen dabei eine zentrale Rolle, indem sie auf der Nachfrageseite auf Haushaltsebene Lastverschiebungen mit vergleichsweise geringen zusätzlichen technologiebedingten Emissionen ermöglichen. Zwei positive Effekte dieser Lastverschiebung sind die Substitution fossiler Kraftwerke und die Reduzierung des ungenutzten Stromüberschusses im Modell.

Eisspeicher könnten dazu beitragen, die Verteilnetze zu entlasten, indem sie auf Haushaltsebene Spitzen bei der Einspeisung von PV-Strom vermeiden. Trotz vielversprechender Aspekte liegt der aktuelle Nachteil in den vergleichsweise hohen Kosten für die Investition in einen Eisspeicher. Selbst eine Optimierung des Betriebs nach einem dynamischen Börsenstrompreis führte nicht zu ausreichenden Kosteneinsparungen, um die zusätzlichen Investitionskosten auf Haushaltsebene auszugleichen.

Die zukünftigen Möglichkeiten solcher Systeme sind von verschiedenen Faktoren abhängig, insbesondere in der kurzfristigen Perspektive, solange Erdgas verwendet wird, von dessen Preis als auch vom CO₂-Preis. Wie gezeigt wurde, sind bei einer Erhöhung des CO₂-Preises höhere Kosteneinsparungen möglich. Jedoch werden auch Investitionskostenförderungen und das technologische Lernen der Technologien eine große Rolle spielen, um die Kosten zu senken.

Dennoch zeigt die Studie, dass eine Beteiligung der Marktteilnehmer:innen auf Haushaltsebene machbar ist und zu realisierbaren Energiekosteneinsparungen führt. Daher ist ein dynamischer marktwirtschaftlicher Rahmen unerlässlich, um die Beteiligung der Verbraucher:innen zu fördern.

9 Ausblick und Empfehlungen

Das erwartete Potenzial der Verbesserung konventioneller Eisspeicher durch das Konzept Eisspeicher NEU ist groß und wird weiterverfolgt, durch einen Prototyp erprobt und vermessen zu werden und in weiterer Folge als Teil von energieeffizienten Gebäudeenergiekonzepten realisiert zu werden.

Die Erfassung aller relevanten Wärmetransportvorgänge ist sehr komplex und sowohl messtechnisch an einem Prototyp als auch numerisch in einem Simulationsmodell schwierig. Für eine Weiterführung des Projekts ist ein Projektpartner mit diesen Fähigkeiten erforderlich. Dieser sollte dann in Folge auch eine Steuerungssoftware für das Betreiben des neuen Systems im Zusammenspiel mit der Gebäudetechnik erarbeiten können.

Für den Teilbereich Beschichtungstechnik steht ein geeigneter Forschungs- und Entwicklungspartner zur Verfügung.

10 Literaturverzeichnis

- AIT, 2023a. Lastprofilgenerator – Elektrofahrzeuge in Österreich [WWW Document]. URL <https://ev-lastprofil.ait.ac.at/> (Zugegriffen am 27.11.23).
- AIT, 2023b. Lastprofilgenerator – Wärmepumpen in Österreich [WWW Document]. URL <http://62.218.45.123/> (Zugegriffen am 21.11.23).
- AIT, 2018. Technologie-Roadmap Energiespeichersysteme in und aus Österreich: Eine Studie erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds.
- Altuntas, M., Erdemir, D., 2022. An investigation on potential use of ice thermal energy storage system as energy source for heat pumps. *Journal of Energy Storage* 55, 105588. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105588>
- As permafros thaws, protecting infrastructure becomes more important, 2021.
- AURES, 2022. Home [WWW Document]. AURES II. URL <http://aures2project.eu/> (Zugegriffen am 27.11.23).
- Austrian Energy Agency, 2024a. Endenergie Raumheizung, Klimaanlage & Warmwasser. URL https://www.energyagency.at/fileadmin/1_energyagency/projekte/erneuerbare_waerme/08082022_entwicklung_des_raumwaermebedarfs_in_oesterreich_-_endbericht.pdf
- Austrian Energy Agency, 2024b. Entwicklung Österreichischer Strompreisindizes. URL <https://www.energyagency.at/fakten/strompreisindex-gruppe>
- Austrian Standards International, 2023. ÖNORM B 8110-6-2 Wärmeschutz im Hochbau Teil 6-2: Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf.
- awattar, 2024. HOURLY. URL <https://www.awattar.at/tariffs/hourly>
- Balmorel, 2023. The Balmorel Open Source Project - Home [WWW Document]. URL <https://www.balmorel.com/> (Zugegriffen am 23.11.23).
- Bick, H., 2017. Effizientes Kühlen mit Eisspeicher. URL <https://www.ikz.de/detail/news/detail/effizientes-kuehlen-mit-eisspeicher/>
- Biermayr, P., Aigenbauer, S., Dißauer, C., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Fink, C., Fuhrmann, M., Hengel, F., Jaksch-Fliegenschnee, M., Leonhartsberger, K., Matschegg, D., Moidl, S., Prem, E., Riegler, T., Savic, S., Schmidl, C., Strasser, C., Wonisch, P., Wopienka, E., 2023a. Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2022.
- Biermayr, P., Aigenbauer, S., Dißauer, C., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Fink, C., Fuhrmann, M., Hengel, F., Jaksch-Fliegenschnee, M., Leonhartsberger, K., Matschegg, D., Moidl, S., Prem, E., Riegler, T., Savic, S., Schmidl, C., Strasser, C., Wonisch, P., Wopienka, E., 2023b. Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2022.
- Biermayr, P., Prem, E., 2023. Wärmepumpen Marktentwicklung 2022. URL https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/schriftenreihe-2023-36g-marktstatistik-2022-waermepumpen.pdf
- BMK, 2024. Raus aus Öl und gas. URL https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/energiewende/raus-aus-oel-gas.html
- BMK, 2020. Energie in Österreich 2020 - Zahlen, Daten, Fakten.
- Boulamanti, A., Guthörl, D., Clapasson, C., Steiger, S., Zeindler, D., Tillenkamp, F., Wiedenmann, E., Schönenberger, J., 2020. Maximierung der Photovoltaik-Eigennutzung mittels Eisspeicher der Supermarkt Verkaufsstelle Coop Etagnières. Bundesamt für Energie BFE.
- Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2024. Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland 2004-2023. URL https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/Mediengalerie/Zahlen_und_Daten/Absatzzahlen_Marktanteile/Diagramm_Absatz_WP_2004-2023.png

- Chen, Q., Wei, W., Li, N., 2022. Techno-economic control strategy optimization for water-source heat pump coupled with ice storage district cooling system. *International Journal of Refrigeration* 138, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.03.010>
- Das ökoEnergieLand, 2023. Wärmebedarf [WWW Document]. Südburgenländisches Energiehandbuch: Hauskraftwerk. URL <https://www.haus-kraftwerk.at/waermebedarf> (Zugegriffen am 22.11.23).
- Dott, R., Winteler, C., Afjei, T., Hafner, B., 2016. Key Facts for High Efficient Solar Ice Storage Heat Pump Systems.
- E-Control, 2024a. Netto-Stromimporte. URL <https://oesterreichsenergie.at/fakten/energiegrafiken/detailseite/netto-stromimporte>
- E-Control, 2024b. Physikalische Importe und Exporte. URL https://www.e-control.at/statistik/e-statistik/charts/str_ges_imex
- E-Control, 2024c. Entwicklung der Strombedarfe nach Sektoren. URL <https://oesterreichsenergie.at/aktuelles/neuigkeiten/detailseite/klimawende-unsere-vision-fuer-2040>
- E-Control, 2024d. Gasimporte Anteil Russland. URL <https://energie.gv.at/hintergrund/import-von-russischem-gas>
- E-Control, 2024e. Funktionsprinzip Merit-Order. URL <https://www.energyagency.at/presse/aktuelle-grafiken>
- energie-experten, 2021. Funktion und Kosten von Eisspeichern [WWW Document]. energie-experten. URL <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/arten/eisspeicher> (Zugegriffen am 21.11.23).
- Energieinstitut Vorarlberg, 2024. Projekt Langenegg Unterstein.
- Enpal, 2023. Wärmepumpe Kosten: Aktuelle Preisübersicht 2023 [WWW Document]. URL <https://www.enpal.de/waermepumpe/kosten> (Zugegriffen am 21.11.23).
- ENTSO-E, 2022. TYNDP 2022 Scenario Report – Introduction and Executive Summary [WWW Document]. URL <https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/> (Zugegriffen am 27.11.23).
- ESDA Technologie GmbH, 2019. Kapsel aus Phasenwechselmaterial sorgt für höhere thermische Energiespeicherung. URL <https://technologie.esda.de/de/produkte/heatsels%C2%AE/>
- EU, 2020. European Parliament resolution of 10 July 2020 on a comprehensive European approach to energy storage (2019/2189(INI)).
- Europäisches Parlament, 2024. Gebäudeenergieeffizienz: Parlament nimmt Pläne für CO₂-ärmere Gebäude an. URL <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20240308IPR19003/gebaudeenergieeffizienz-parlament-nimmt-plane-fur-co2-armere-gebaude-an>
- European Commission, 2020a. New electricity market design: a fair deal for consumers [WWW Document]. URL https://energy.ec.europa.eu/system/files/2016-11/technical_memo_marketsconsumers_0.pdf (Zugegriffen am 25.11.23).
- European Commission, 2020b. Technology pathways in decarbonisation scenarios., Directorate General for Energy. Publications Office, LU.
- Fessler, R., 2013. Robert Fessler Architektur fotografie. URL <https://www.nextroom.at/actor.php?id=18301>
- Fraunhofer IPM, 2024a. Leitprojekt EIKaWe. URL <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/energiewandler-thermische/elkawe-leitprojekt.html>
- Fraunhofer IPM, 2024b. Der magneto-kalorische Zyklus. URL <https://www.ipm.fraunhofer.de/de/gf/energiewandler-thermische/komp/kalorische-systeme/elektrokalorische-systeme.html>
- GEOPUNKT Bohrtechnik GmbH, 2024. Konzept Terra-Booster. URL <https://www.geopunkt.de/terra-booster/>
- Giesinger, A., 2019. Wärmemanagement in der Elektronik. Springer.
- Goeke, J., 2021. Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik. Springer.
- Gratzl et al., 2019. Einsatz passiver Erdreichkühlung zur Konditionierung von Lagerhäusern. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bapi.201800038>

- Grotz, B., 2021. Wärmezufuhr Phasenübergänge. URL https://www.grundwissen.de/physik/_images/diagramm-waermezufuhr-phasenuebergaenge.png
- Haas, R., Ajanovic, A., Ramsebner, J., Perger, T., Knápek, J., Bleyl, J.W., Energy Economics Group, TU Wien, A-1040 Vienna, Austria, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic, Energetic Solutions, 8020 Graz, Lendkai 29, Austria, 2021. Financing the future infrastructure of sustainable energy systems. *Green Finance* 3, 90–118. <https://doi.org/10.3934/GF.2021006>
- Haas, R., Resch, G., Burgholzer, B., Totschnig, G., Lettner, G., Auer, H., Geipel, J., 2017. Stromzukunft Österreich 2030 - Analyse der Erfordernisse und Konsequenzen eines ambitionierten Ausbaus erneuerbarer Energien.
- hausinfo, 2022. Solareisspeicher: Heizen mit Sonne und Eis. URL <https://hausinfo.ch/de/bauen-renovieren/haustechnik-vernetzung/heizung-lueftung-klima/waermepumpen/solar-eis-speicher.html>
- Heizsparer, 2023. Wärmepumpe: Preise, Kosten und Wirtschaftlichkeit. Heizsparer. URL <https://www.heizsparer.de/heizung/heizungssysteme/waermepumpe/waermepumpen-kosten> (Zugegriffen am 21.11.23).
- Heizsparer, 2022. Wärmepumpe: Der Eisspeicher als Energiequelle. Heizsparer. URL <https://www.heizsparer.de/heizung/heizungssysteme/waermepumpe/waermepumpe-eisspeicher> (Zugegriffen am 21.11.23).
- Heuer, C.E., 1979. The application of heat pipes on the trans-alaska pipeline.
- HK Architekten, 2024. Unterstein, Langenegg. URL <https://www.hkarchitekten.at/de/projekt/morscher-unterstein/#lightbox-7>
- IG Windkraft, 2023. Windfakten - [WWW Document]. URL https://www.igwindkraft.at/fakten/?xmlval_ID_KEY%5B0%5D=1234 (Zugegriffen am 31.10.23).
- IKZ Haustechnik, 2017. Effizientes Kühlen mit Eisspeicher. URL <https://www.ikz.de/detail/news/detail/effizientes-kuehlen-mit-eisspeicher/>
- Isocal, 2022. Solareisspeicher: Heizen mit Sonne und Eis. URL <https://hausinfo.ch/de/bauen-renovieren/haustechnik-vernetzung/heizung-lueftung-klima/waermepumpen/solar-eis-speicher.html>
- Katsman, D., 2020. The potential of demand flexibility provided by heat pumps to the Austrian electricity system. Diploma Thesis.
- Konrad, A., Wogrin, S., Gaugl, R., 2023. Die Abhängigkeit des österreichischen Elektrizitätssektors von ausländischem Gas. URL https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://iewt2023.eeg.tuwien.ac.at/download/contribution/presentation/250/250_presentation_2023_0210_144802.pptx&ved=2ahUKEwi2nKir06aFAxXugf0HHT-bBHgQFnoECA8QAQ&usq=AOvVaw1iIBVZ2III2fYnymvaJ0uq
- Koppensteiner, M., 2023. Heizen und kühlen eines Niedrigenergieeinfamilienhauses mittels Wärmepumpen und Eisspeicher - Einfluss unterschiedlicher Standorte auf technische und ökonomische Faktoren.
- kraftBoxx GmbH, 2024. coolBoxx. URL <https://heatstixx.de/produkt-eisspeicher/>
- Kruse et al., 2011. Möglichkeiten der Nutzung von CO₂-Erdwärmesonden in der mitteltiefen Geothermie.
- Kühl, A., 2022. Eisspeicher als Wärmequelle für die Heizung. *Energieblog energynet*. URL <https://www.energynet.de/2022/11/17/eisspeicher-heizung/> (Zugegriffen am 21.11.23).
- LAMBDA Wärmepumpen GmbH, 2024. Die Eureka-Luft (EU-L) - Serie. URL <https://lambda-wp.at/luft-waermepumpen/>
- Lambert, M.A., 2007. Design of solar powered adsorption heat pump with ice storage. *Applied Thermal Engineering* 27, 1612–1628. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.09.016>
- Mascherbauer, P., Kranzl, L., Yu, S., Haupt, T., 2022a. Investigating the impact of smart energy management system on the residential electricity consumption in Austria. *Energy* 249, 123665. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123665>

- Mascherbauer, P., Schöniger, F., Kranzl, L., Yu, S., 2022b. Impact of variable electricity price on heat pump operated buildings. *Open Res Europe* 2, 135. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.15268.1>
- Meco, 2024. Sole-Erdsonde - CO2-Sonde. URL <https://www.meco.at/produkte/waermepumpen/soleerde-und-co2-sonde/>
- Minder, S., Wagner, R., Mühlebach, M., Weisskopf, T., 2014. Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren. *Technologiestudie*.
- Neumann, H., 2018. Eisspeicher mit Solaranlage kombiniert [WWW Document]. top agrar online. URL <https://www.topagrar.com/rind/aus-dem-heft/eisspeicher-mit-solaranlage-kombiniert-9635957.html> (Zugegriffen am 21.11.23).
- Österreichisches Parlament, 2021. 733 d.B. (XXVII. GP) - Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzpaket – EAG-Paket [WWW Document]. URL https://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXVII/I/I_00733/index.shtml#
- OVUM Wärmepumpen GmbH, 2024. Die effizienteste Wärmepumpe der Welt! OVUM AirCube ACP. URL <https://www.ovum.at/produkte/luft-die-koenigsklasse/>
- Pehnt, M., 2023. Heizen mit 65 % erneuerbaren Energien.
- Pfenninger, S., Staffell, I., 2020. *Weather Data*. https://doi.org/10.25832/WEATHER_DATA/2020-09-16
- Platzenbecker, E., Grözinger, J., Kube, M., Petersdorff, C., 2019. Die Rolle der Gasinfrastruktur im zukünftigen Energiesystem: FGW.
- Porada, S., Siemonsmeier, M., Wirtz, P., Mehlem, J., Pacco, K., 2023. Flexibilitäetsoptionen für den Betrieb des zukünftigen österreichischen Stromsystems.
- RHP Group, 2024. Attophotonics Biosciences GmbH. URL <https://rhp.at/de//rhp-attophotonics>
- Rubitherm Technologies GmbH, 2024. PCM SP-Serie. URL <https://www.rubitherm.eu/produktkategorie/anorganische-pcm-sp>
- Schöniger, F.B., 2023. The role of flexibility in electricity systems with high shares of variable renewable energy.
- Sehar, F., Rahman, S., Pipattanasomporn, M., 2012. Impacts of ice storage on electrical energy consumptions in office buildings. *Energy and Buildings* 51, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.002>
- Selfmade Energy, 2023. Eisspeicher: Wie heizt eine Wärmepumpe mit Eisspeicherheizung? *Solarwissen Selfmade Energy*. URL <https://solarwissen.selfmade-energy.com/eisspeicher-was-ist-das/> (Zugegriffen am 21.11.23).
- SOLTOP Energie AG, 2024. IceSol. URL <https://www.soltop-energie.ch/icesol/>
- SOLTOP Energie AG, 2018. IceSol Eisspeicher Datenblatt. URL <https://www.soltop-energie.ch/cm/wp-content/uploads/Datenblatt-ICESOL-Eisspeicher-DE-2018.11.19.pdf>
- Song, X., Zhu, T., Liu, L., Cao, Z., 2018. Study on optimal ice storage capacity of ice thermal storage system and its influence factors. *Energy Conversion and Management* 164, 288–300. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.007>
- Sperber, E., Frey, U., Bertsch, V., 2020. Reduced-order models for assessing demand response with heat pumps – Insights from the German energy system. *Energy and Buildings* 223, 110144. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110144>
- statista, 2023. Österreich - Strompreis Privathaushalte 2022 | Statista [WWW Document]. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/287837/umfrage/strompreise-fuer-privathaushalte-in-oesterreich/> (Zugegriffen am 22.11.23).
- Suna, D., Totschnig, G., Schöniger, F., Resch, G., Spreitzhofer, J., Esterl, T., 2022. Assessment of flexibility needs and options for a 100% renewable electricity system by 2030 in Austria. *Smart Energy* 100077. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100077>
- Umweltbundesamt, 2022. CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe.
- US Research Nanomaterials, Inc, 2024. MWCNTs Water Dispersion (3wt%, >95%, OD: 5-15 nm, Length 50um). Houston, TX.
- Viessmann GmbH, 2024. Eis-Energiespeicher, System für Großanlagen. URL <https://www.viessmann.at/de/produkte/waermepumpe/eis-energiespeicher-systeme-fuer-grossanlagen.html>

- Viessmann GmbH, 2022. Heizen mit Eis. URL https://www.viessmann.at/content/dam/public-brands/at/pdf/waermepumpen/kpr-vitaset-eis-energiespeicher-AT.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/kpr-vitaset-eis-energiespeicher-AT.pdf
- Wärmepumpe Austria, 2023. Erneuerbare Heizsysteme: Wärmepumpenentwicklung 2023. URL https://www.oekonews.at/index.php?mdoc_id=1186385
- Winteler, C., Dott, R., Afjei, T., Hafner, B., 2014. Seasonal Performance of a Combined Solar, Heat Pump and Latent Heat Storage System. Energy Procedia 48, 689–700. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.080>
- ZAMG, S., 2024. Durchschnittliche Temperatur in Wien. URL https://www.norddeutsche-geothermietagung.de/vortraege/2011/NGT2011_Kruse_Moeglichkeiten-Nutzung-CO2-Erdwaermesonden-mitteltiefe-Geothermie.pdf
- Zhu, N., Hu, P., Xu, L., Jiang, Z., Lei, F., 2014. Recent research and applications of ground source heat pump integrated with thermal energy storage systems: A review. Applied Thermal Engineering 71, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.040>

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Windkraftleistung in Österreich (IG Windkraft, 2023); der jährliche Abbau wurde vom jährlichen Zubau abgezogen; 2023 stellt eine Prognose dar.	11
Abbildung 2: Windstromverfügbarkeit entlang der Strompreisverteilungskurve (Ist) (TU Wien, 2024)	12
Abbildung 3: Nettostromimporte der letzten Jahre (E-Control, 2024a)	14
Abbildung 4: Importe / Exporte aus / in jeweilige Nachbarstaaten (E-Control, 2024b)	15
Abbildung 5: Entwicklung der Strombedarfe nach Sektoren (E-Control, 2024c).....	15
Abbildung 6: Endenergie Raumheizung, Klimaanlage & Warmwasser Szenario "Forcierter Ausstieg" für Österreich (Austrian Energy Agency, 2024a).....	16
Abbildung 7: Österreichische Strompreisentwicklung (Austrian Energy Agency, 2024b)	17
Abbildung 8: Anteil Gasimporte Russland vs. andere Importländer (E-Control, 2024d)	18
Abbildung 9: Prinzip der Merit-Order-Preisfindung (E-Control, 2024e)	19
Abbildung 10: Absatzentwicklung von WP in Österreich (Biermayr et al., 2023a)	20
Abbildung 11: Speicherkonzepte und Beispiele mit Technologie-Reifegraden (TRL) aus (AIT, 2018) ..	21
Abbildung 12: Schema eines Solar-Eisspeichers (Heizsparer, 2022).....	22
Abbildung 13: Passivhaus Plus Unterstein, Langenegg (HK Architekten, 2024) (Fessler, 2013).....	24
Abbildung 14: PV-Stromanteil für Wärmepumpe, PH MFH Unterstein (Energieinstitut Vorarlberg, 2024).....	25
Abbildung 15: Marktanteile der Wärmequellsysteme am Inlandsmarkt 2022 (Biermayr et al., 2023b)	26
Abbildung 16: Die Marktentwicklung der Wärmepumpen in Österreich bis 2022 (Biermayr et al., 2023b)	27
Abbildung 17: Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland (Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2024)	27
Abbildung 18: Konzept des Terra-Boosters (GEOPUNKT Bohrtechnik GmbH, 2024)	28
Abbildung 19: Der magneto-kalorische Zyklus (Fraunhofer IPM, 2024b).....	30
Abbildung 20: Das Ausheben der Grube für den 10 m ³ fassenden Eisspeicher im oberbayrischen Landshut. (Bick, 2017; IKZ Haustechnik, 2017)	31
Abbildung 21: Einheben einer Betonzisterne / des Eisspeichers mit dem Autokran (hausinfo, 2022) (Isocal, 2022)	31
Abbildung 22: Betonzisterne (d = 3,2 m, h = 3,3 m) wird mittels Autokran in die fertige Grube gehoben (Bick, 2017; IKZ Haustechnik, 2017)	32
Abbildung 23: Spiralförmig angebrachte Rohrleitungen im Eisspeicher mit 2 Wärmetauschern (ein Regenerationsrohr & ein Entzugswärmetauscher) und Temperaturfühler im Zentrum (Bick, 2017; IKZ Haustechnik, 2017).....	32
Abbildung 24: Seitenansicht eines durchgefrorenen Eisspeichers (Viessmann GmbH, 2022) (Viessmann GmbH, 2024).....	33

Abbildung 25: Darstellung der Wärmeübergangskoeffizienten von Edelstahl-Plattenwärmetauscher, Kupferrohren und PE-Rohren zum Wasser bzw. Eis (Goeke, 2021).....	34
Abbildung 26: Icesol, vertikale Wärmetauscher-Platten in zylindrischem Eisspeicher (SOLTOP Energie AG, 2018).....	35
Abbildung 27: Aufgeschwommene Eisplatten nach Abtauvorgang und neue Eisplatten im Entstehen an den Wärmetauscher-Platten (SOLTOP Energie AG, 2024)	36
Abbildung 28: HeatSel® mit Temperatur-Farben, im Warmwasser-Tank und zwei Größen (ESDA Technologie GmbH, 2019).....	38
Abbildung 29: Volumenreduktion durch PCM-Kapseln (kraftBoxx GmbH, 2024).....	39
Abbildung 30: Alaska Pipeline mit Heatpipes (<i>As permafros thaws, protecting infrastructure becomes more important, 2021</i>).....	40
Abbildung 31: Schema der Einbindung eines Gravitationswärmerohrs in eine Wärmepumpenheizung (Meco, 2024)	41
Abbildung 32: Edelstahl-Spiralwellrohr als Erdwärmerohr (Kruse et al., 2011).....	41
Abbildung 33: Oberes Ende des Erdwärmerohrs nach Einbringen in das Bohrloch (Kruse et al., 2011)	42
Abbildung 34: Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten von Edelstahl-Plattenwärmetauscher zu Wasser bei entstehender Eisschicht mit sechs Abtauvorgängen (bei ca. 4 Heizmonaten [~120 Tage] ca. alle 20 Tage) (Goeke, 2021)(Abbildung 25) + eigene Überarbeitung	43
Abbildung 35: Ablauf der Eisbildung und des Abschmelzens der Eisplatten (Schöberl & Pöll GmbH, 2024).....	44
Abbildung 36: Durchschnittliche Temperatur in Wien (2013-2023) (ZAMG, 2024)	45
Abbildung 37: Jahrestemperaturverlauf Außenluft, Erdreich und Grundwasser (Gratzl et al., 2019) .	45
Abbildung 38: Optionen zur Minimierung des thermischen Austausches zur kalten Außenluft bzw. Erdoberfläche (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)	46
Abbildung 39: Verbesserung des Wärmestroms durch Verlängerung nach unten (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)	46
Abbildung 40: Funktionsweise Heatpipe (Giesinger, 2019)	47
Abbildung 41: Schematische Darstellung der Erdwärmennutzung durch Wärmerohre (weiße Elemente) (Schöberl & Pöll GmbH, 2024).....	48
Abbildung 42: Wärmekapazität und Phasenübergänge bei Wasser (in orange) mit eigenen Ergänzungen PCM für +5°C (in blau) und +10°C (in grün) (Grotz, 2021).....	49
Abbildung 43: Illustrierter Abtau- und Aufschwimmvorgang der Eisplatten (Schöberl & Pöll GmbH, 2024).....	50
Abbildung 44: CNT Carbon Nanotubes in einer Beschichtung (US Research Nanomaterials, Inc, 2024)	51
Abbildung 45: Ablauf des Wärmeentzugs, der Eisbildung und des Abschmelzens der Eisplatten an Wärmetauscherplatten (Schöberl & Pöll GmbH, 2024)	52
Abbildung 46: Beispiel für die Minimierung des Behälter-Durchmessers für Eisspeicher (Schöberl & Pöll GmbH, 2024).....	53

Abbildung 47: Maßstäbliche Skizze des Eisspeichers NEU ohne Darstellung der inneren Rohrleitungen (Schöberl & Pöll GmbH, 2024).....	54
Abbildung 48: Angebotsspitze 1.1.2023 (Feiertag und entsprechend geringe Nachfrage) (awattar, 2024).....	58
Abbildung 49: Angebotsspitze 23.7.2023 (Sonntag, geringe Nachfrage) (awattar, 2024).....	59
Abbildung 50: lange Angebotsspitze 8.8.2023, viel PV- und Windstrom, werktags (awattar, 2024) ...	59
Abbildung 51: Gesamte Windenergie-Erzeugungsleistung für das Jahr 2030 (basierend auf Wetterjahr 2015) (TU Wien, 2024)	61
Abbildung 52: Unterschiede in der Windenergie-Erzeugungsleistung für das Jahr 2030 in Abhängigkeiten der Wetterjahre (basierend auf Wetterjahr 2016 – links und Wetterjahr 2017 – rechts) (TU Wien, 2024)	61
Abbildung 53: Windenergie-Erzeugungsleistung für das Jahr 2030 (basierend auf Wetterjahr 2015 (links), 2016 (Mitte), 2017 (rechts)) (TU Wien, 2024)	62
Abbildung 54: Stromverbrauch unterschiedlicher Wärmepumpenkategorien (AIT, 2023b).....	64
Abbildung 55: Verlauf der volatilen Stromerzeugung (Wasserkraft, Wind und PV) und der Nachfrage (Last) einer Winterwoche (22.-28.1.2030) (TU Wien, 2024).....	65
Abbildung 56: Residuallast einer Winterwoche (22.-28.1.2030) (TU Wien, 2024)	65
Abbildung 57: Erneuerbare Erzeugung und Last pro Monat im Jahr 2030 (TU Wien, 2024).....	66
Abbildung 58: Auszug einer Winterwoche (1.2.-7.2.2030) zur Darstellung der erneuerbaren Erzeugung und der Last (Szenario Erneuerbare) (TU Wien, 2024)	67
Abbildung 59: Auszug einer Sommerwoche (1.6.-7.6.2030) zur Darstellung der erneuerbaren Erzeugung und der Last (Szenario Erneuerbare) (TU Wien, 2024)	67
Abbildung 60: Unterschied zwischen dem Lastprofil Szenario Erneuerbare und dem optimierten Lastprofil mit Eisspeicher für die Jahre 2030 (links) und 2050 (rechts) (TU Wien, 2024).....	69
Abbildung 61: Ausschnitt einer Winter- (links) und einer Sommerwoche (rechts) im Szenario Erneuerbare 2030 (TU Wien, 2024)	70
Abbildung 62: Ausschnitt einer Winter- (links) und einer Sommerwoche (rechts) im Szenario Erneuerbare 2030 mit Lastoptimierung durch WP-Eisspeichersysteme (TU Wien, 2024)	70
Abbildung 63: Ausschnitt einer Winter- (links) und einer Sommerwoche (rechts) im Szenario Erneuerbare 2050 (TU Wien, 2024)	70
Abbildung 64: Ausschnitt einer Winter- (links) und einer Sommerwoche (rechts) im Szenario Erneuerbare 2050 mit Lastoptimierung durch WP-Eisspeichersysteme (TU Wien, 2024)	71
Abbildung 65: Darstellung des analysierten Eisspeicher-Wärmepumpensystems (TU Wien, 2024)....	73
Abbildung 66: Varianten des Strombezugs der WP im Überblick (TU Wien, 2024).....	75
Abbildung 67: Gesamtaufbau des Modells (TU Wien, 2024)	78
Abbildung 68: Temperaturverteilung der Jahre 2015-2017 (Pfenninger und Staffell, 2020)	84
Abbildung 69: Temperaturverteilung mit einem Minimaltemperaturwert von +5 °C (TU Wien, 2024)	84
Abbildung 70: Lastprofile der WP des Einfamilienhaushaltes abhängig von der jeweiligen Temperatur (2015-2017) (TU Wien, 2024).....	86
Abbildung 71: Abhängigkeit der Stromnachfrage von der Temperatur (TU Wien, 2024)	86

Abbildung 72: Analysierte Strompreise (TU Wien, 2024)	88
Abbildung 73: Gesamtstromkosten des Wärmepumpenbetriebs unter unterschiedlichen Strompreisszenarien (fixer, dynamischer und dynamischer Strompreis mit Eisspeicher) und Wetterjahren (2015-2017) und zwei Zukunftsszenarien (TU Wien, 2024)	90
Abbildung 74: Netzstrombezug ohne Eisspeicher (links) und mit Optimierung durch den Eisspeicher (rechts); basierend auf Wetterjahr und Strompreisszenario 2015, mit den Strompreisen auf der rechten Achse (TU Wien, 2024).....	91
Abbildung 75: Netzstrombezug mit und ohne Eisspeicher einer Winterwoche (6.2.-13.2.) mit den Strompreisen auf der rechten Achse (TU Wien, 2024)	92
Abbildung 76: Netzstrombezug mit und ohne Eisspeicher einer Winterwoche (6.2.-13.2.) mit den Strompreisen auf der rechten Achse (TU Wien, 2024)	92
Abbildung 77: TCU des WP- und Wärmepumpen-Eisspeichersystems unter Berücksichtigung der Wetterjahre 2015-2017 (TU Wien, 2024)	93
Abbildung 78: Gesamtinvestitionskosten eines WP sowie WP-Eisspeichersystems (inklusive Stückkosten, Installationskosten, Pufferspeicher, Warmwasserspeicher, Steuerung, Rohrleitungskosten, Wärmetauscher und Grabungsarbeiten) (TU Wien, 2024).....	94
Abbildung 79: TCU bei Variation des Zinssatzes (TU Wien, 2024)	95
Abbildung 80: TCU bei Variation der Abschreibungsdauer (TU Wien, 2024)	96
Abbildung 81: TCU bei Variation der Investitionskosten (TU Wien, 2024)	97

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rubitherm PCM SP-SERIE, PCM mit hoher Dichte aus Wasser-Salz-Gemisches und Additiven (Auszug) (Rubitherm Technologies GmbH, 2024)	37
Tabelle 2 Eingangsdaten Strommarktmodell	62
Tabelle 3 Eingangsdaten zu Wärmepumpen detailliert (AIT, 2023b)	63
Tabelle 4 Modellergebnisse des Szenarios Erneuerbare mit und ohne Lastoptimierung durch WP-Eisspeichersysteme im Jahr 2030 und 2050.....	72
Tabelle 5 Literaturrecherche zu Investitionskosten eines Eisspeichers.....	78
Tabelle 6 Literaturrecherche zu Anschaffungskosten einer Luftwärmepumpe.....	79
Tabelle 7 Eingangsdaten der TCU-Berechnung	79
Tabelle 8 Objektdaten eines repräsentativen Einfamilienhaus aus ÖNORM B 8110-6-2 (Austrian Standards International, 2023)	82
Tabelle 9 Heizwärmebedarfswerte (HWB) (monatlich und jährlich) (Austrian Standards International, 2023) und Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung (WWWB) (Das ökoEnergieland, 2023).....	83
Tabelle 10 Gesamtstromkosten eines Haushaltes zur Heizung und Warmwasserbereitstellung mittels WP und Eisspeicher;	89
Tabelle 11 Kostenstruktur eines WP- und eines WP-Eisspeichersystems mit dynamischen Stromkosten	92
Tabelle 12 Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen zur Herstellung und Montage eines Eisspeichers (Boulamanti et al., 2020)	98
Tabelle 13 Emissionseinsparungen durch WP-Eisspeichersysteme im Modell im Jahr 2030.....	98

