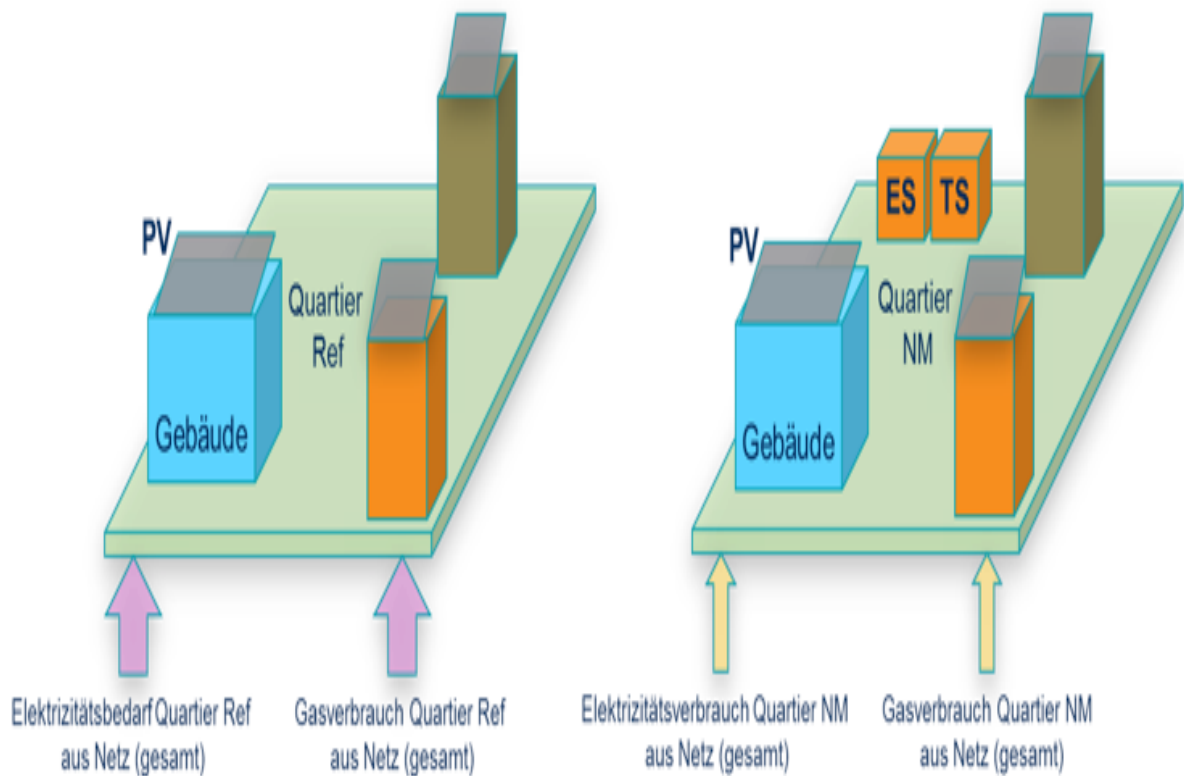




Schlussbericht

SPEQUA – Thermische und elektrische Speicher in Gebäuden und Quartieren

Systeme, Anwendung und Umweltbilanz





Datum: 15. September 2016

Ort: Langenbruck

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmerin:

Arbeitsgemeinschaft
Ökozentrum
Schwengiweg 12
4438 Langenbruck
www.oekozentrum.ch

zhaw – Institut für Energiesysteme und Fluid-
Engineering, IEFE
Technikumstrasse 9
8401 Winterthur
www.zhaw.ch

Empa Urban Energy Systems Laboratory
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf
www.empa.ch

quantis sàrl
Reitergasse 11
8004 Zürich
www.quantis-intl.com

Hochschule Luzern – Technik & Architektur,
Zentrum für integrale Gebäudetechnik, ZIG
Technikumstrasse 21
6048 Horw
www.hslu.ch

Autorinnen und Autoren:

Christian Gaegauf, Ökozentrum
Michael Sattler, Ökozentrum, michael.sattler@oekozentrum.ch
Viktor Dorer, viktor.dorer@empa.ch
Kristina Orehounig, Kristina.Orehounig@empa.ch
Gerhard Zweifel, gerhard.zweifel@hslu.ch
Claudia Bless, claudia.bless@hslu.ch
Thomas Bergmann, thomas.bergmann@zhaw.ch
Andrea Del Duce, andrea.delduce@quantis-intl.com

BFE-Bereichsleitung: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Rolf Moser, moser@enerconom.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/500987-01

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Projekt liefert eine Übersicht zu thermischen und elektrischen Speichersystemen und ihrer dezentralen Anwendung in Quartieren. Die Einbindung der evaluierten Speichersysteme wird im Kontext der dezentralen Energieerzeugung und -verteilung im Quartier Kreuzmatt in Rheinfelden/AG beurteilt. Als Basiskonfiguration des Modellquartiers wurde das Jahr 2010 herangezogen. Der Energiebedarf der Jahre 2035 und 2050 des Modellquartiers Kreuzmatt orientiert sich an den Entwicklungsszenarien der Schweizerischen Energiestrategie 2050 und dem Gebäudeparkmodell SIA-Effizienzpfad. Die auf Quartierebene angewandten Speichersysteme werden in den Punkten Effizienz, Umweltverträglichkeit und technische Einbindung charakterisiert. In der Speichersystemübersicht werden konventionelle und neuartige Technologien untersucht und auf ihre technische Verfügbarkeit und Eignung hin beurteilt. Insbesondere interessieren bei den verschiedenen Speichertechniken das Potential der Kurzzeitspeicherung und Minderung der elektrischen Lastspitzen sowie das Potential der saisonalen Energiespeicherung auf Stufe Quartier.

Résumé

Le projet délivre une vue d'ensemble de systèmes de stockage thermiques et électriques et de leur application décentralisée dans les quartiers. L'intégration des systèmes évalués est examinée dans le contexte de la production et distribution énergétique du quartier "Kreuzmatt" à Rheinfelden/AG. L'année 2010 est utilisée comme configuration de base du quartier modèle. Le besoin d'énergie des années 2035 et 2050 du quartier modèle Kreuzmatt s'oriente aux scénarios de développement de la stratégie énergétique Suisse 2050 et au modèle du parc de bâtiments de la voie SIA vers l'efficacité énergétique. Les systèmes de stockage appliqués au niveau du quartier sont caractérisés envers les points efficacité, écocompatibilité et intégration technique. Dans la vue d'ensemble de systèmes de stockage, des technologies conventionnelles et innovatives sont examinées et évaluées envers leur disponibilité technique et leur aptitude. En particulier, l'intérêt se dirige sur le potentiel des différentes technologies pour le stockage à court terme et de la réduction des pointes de charge électriques, ainsi que le potentiel du stockage saisonnier au niveau du quartier.

Summary

The project provides an overview of thermal and electric storage systems and its application in distributed energy supply for districts. The integration of the storage systems was simulated in an existing district in the city of Rheinfelden/Aargau. The start point of the energy demand is the year 2010. The future energy consumption in the years 2035 and 2050 was calculated according to the Swiss energy strategy 2050 and a calculation model of the Swiss association of architects and engineers (SIA). The storage systems applied were assessed for energy efficiency, environmental impact and technical integration in the energy supply. The storage systems include readily available and new technologies which were investigated for their feasibility. In particular the interest was focused on their potential to cut peak electrical load and shift seasonal energy supply from summer to winter.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé	3
Summary.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
1 Zusammenfassung	7
2 Ausgangslage	10
3 Ziel der Forschungstätigkeit.....	11
4 Modellquartier	12
4.1 Quartier TS Kreuzmatt, Rheinfelden/AG.....	12
4.1.1 Gebäudepark	12
4.1.2 Elektrisches Verteilnetz.....	13
4.2 Quartierentwicklung	13
4.2.1 Gebäudedaten	13
4.2.2 Berechnung Warmwasserverbrauch	15
4.2.3 Elektrische Lastprofile.....	15
4.3 Energiebedarfsentwicklung.....	18
4.3.1 Entwicklung der Gebäudesubstanz	18
4.3.2 Entwicklung Wärmebedarf.....	20
4.3.3 Entwicklung Elektrizitätsverbrauch	22
4.3.4 Entwicklung der PV-Produktion	24
5 Speichersysteme	26
5.1 Elektrische Speicher	27
5.1.1 Akku-Speichersysteme	28
5.1.2 Blei-Säure-Akkumulator	30
5.1.3 Lithium-Ionen-Akkumulator.....	30
5.1.4 Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren (Zebra).....	31
5.1.5 Redox-Flow-Akkumulator (Vanadium-Redox-Flow-Akkumulator)	31
5.1.6 Wasserstoffspeicher	31
5.2 Thermische Speicher.....	32
6 Speichermodelle	33
6.1 Quartierspeicher	33
6.2 Hybridspeicher	34
6.3 Sorptionsspeicher	36
7 Speichersimulation im Modellquartier	40
7.1 Untersuchte Konfigurationen und Szenarien	40



7.2	Simulationskonzept.....	40
7.3	Szenarien.....	42
7.4	Speichervarianten.....	43
7.4.1	Wasserspeicher.....	43
7.4.2	Erdsondenspeicher.....	43
7.4.3	Elektrospeicher.....	44
7.4.4	Simulationsmatrix.....	44
7.4.5	Bestimmung Speisetemperatur.....	45
7.4.6	Auswertungskriterien.....	46
7.5	Ergebnisse.....	47
7.5.1	Elektrischer Kurzzeitspeicher.....	47
7.5.2	Wasserspeicher.....	47
7.5.3	Erdsondenspeicher.....	48
7.6	Betriebsverhalten.....	49
7.7	Fazit Quartierspeicher.....	50
8	Energie- und Umweltbilanz.....	51
8.1	Ökobilanzen.....	51
8.2	Rahmenbedingungen zur Ökobilanzierung.....	51
8.3	Umweltauswirkungen der elektrischen Speichertechnologien.....	51
8.3.1	Rahmenbedingungen zur LCA der elektrischen Speicher.....	52
8.3.2	Datenquellen zu den elektrischen Speichern.....	53
8.3.3	Ergebnisse der elektrischen Speichertechnologien.....	53
8.4	Umweltauswirkungen der Wärmespeicher.....	58
8.4.1	Rahmenbedingungen zur LCA der Wärmespeicher.....	58
8.4.2	Datengrundlage zu den Wärmespeichern.....	59
8.4.3	Ergebnisse der Wärmespeicher.....	61
8.5	Nutzung der Speichertechnologien in einem Quartier.....	65
8.5.1	Rahmenbedingungen und Szenarien.....	65
8.5.2	Ergebnisse auf Quartierebene.....	68
8.6	Fazit Energie- und Umweltbilanz.....	74
9	Empfehlungen.....	76
9.1	Elektrische Speicher.....	76
9.2	Thermische Speicher.....	77
10	Anhang.....	81
10.1.1	Wasserspeicher.....	81
10.1.2	Erdsondenspeicher.....	81



10.1.3	Latentwärmespeicher.....	82
10.1.4	Sorptionsspeicher	83
10.1.5	Blei-Säure-Akkumulator (BSA)	86
10.1.6	Lithium-Ionen-Akkumulator (LIA)	86
10.1.7	Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren (NNA).....	86
10.1.8	Redox-Flow-Akkumulator (RFA)	87
10.1.9	Wasserstoffspeicher	88



1 Zusammenfassung

Das Projekt liefert eine Übersicht zu thermischen und elektrischen Speichersystemen und ihrer dezentralen Anwendung in Quartieren. Die Einbindung der evaluierten Speichersysteme wird im Kontext der dezentralen Energieerzeugung und -verteilung im Quartier Kreuzmatt in Rheinfelden/AG beurteilt. In diesem Quartier werden bereits verschiedene Technologien im laufenden Projekt *Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze* bezüglich dezentraler Stromerzeugung und -speicherung untersucht. Das Rheinfelder Quartier vereint Wohnen, Einkaufen, Arbeiten (Büro), Pflege (Altersheim) und Kultur (Kirche).

Um das elektrische Verteilnetz genauer analysieren zu können, wurde im Projekt nur ein Teilbereich des VEiN-Grid-Netzes ausgewählt. Dieses reduzierte Netz umfasst die Netzanbindungen von 18 Häusern bis und mit deren Anbindung an das Mittelspannungsnetz (MS-Netz) über eine Transformatorenstation (TS). Diese 18 Häuser bilden das Modellquartier "Kreuzmatt" für das vorliegende Projekt. Es handelt sich dabei um ein Niederspannungsnetz (NS), mit einem Anschlusspunkt an das MS-Netz, eine Situation, wie sie in der Schweiz sehr typisch ist.

Gebäudedaten (Grösse, Bauweise, Energieflächen) und entsprechende Versorgungstypen wurden auf der Basis von Katasterplänen und visueller Begutachtung eruiert, da die benötigten Daten nicht in ausreichender Qualität vorhanden waren. Es wurden charakteristische Gebäudetypen spezifiziert und für diese dann mittels EnergyPlus-Gebäudeenergiesimulationen der Heizwärmebedarf bestimmt.

Als Basiskonfiguration des Modellquartiers wurde das Jahr 2010 herangezogen. Der Energiebedarf der Jahre 2035 und 2050 des Modellquartiers Kreuzmatt orientiert sich an den Entwicklungsszenarien der Schweizerischen Energiestrategie 2050 und dem Gebäudeparkmodell SIA-Effizienzpfad.

Die auf Quartierebene angewandten Speichersysteme werden in den Punkten Effizienz, Umweltverträglichkeit und technische Einbindung charakterisiert. In der Speichersystemübersicht werden konventionelle und neuartige Technologien untersucht und auf ihre technische Verfügbarkeit und Eignung hin beurteilt. Insbesondere interessieren bei den verschiedenen Speichertechniken das Potential der Kurzzeitspeicherung und Minderung der elektrischen Lastspitzen sowie das Potential der saisonalen Energiespeicherung auf Stufe Gebäude und Quartier.

Als thermischer Speicher wird in der Grundversion ein herkömmlicher Wasserspeicher verwendet. In einer weiteren Variante werden Erdsonden als Speicheroption betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass in den einzelnen Gebäuden keine Heizungsspeicher installiert sind. Die Energie aus dem zentralen thermischen Speicher wird über eine Wärmepumpe geführt. Es wird davon ausgegangen, dass das System über eine Wasser/Wasser-Wärmepumpe verfügt, die alternativ mit Aussenluft (Splitgerät) oder über den Speicher via Niedertemperaturnetz gespeist wird. Der elektrische Speicher wird als Tagesspeicher eingesetzt. Die Speicherkapazität wurde so gewählt, dass der maximale Nachtverbrauch (kWh) im Jahresverlauf gespeichert werden kann.

Für die Energieflussrechnungen wurde der Aufbau des Quartierspeichersystems in der Simulationssoftware IDA ICE abgebildet. Es wurden drei Varianten untersucht: kein thermischer Speicher, Wassertankspeicher und Erdsondenspeicher. Im Vergleich zwischen den betrachteten thermischen Speichern eignet sich ein Erdsondenfeld besser als Langzeitspeicher als ein Wassertank. Dies liegt primär daran, dass das Erdreich gleichzeitig als Speicher und Quelle funktionieren kann. Der Wassertank müsste zudem für den Quartierkontext unrealistisch gross dimensioniert werden.

Auf der elektrischen Seite wird ein Kurzzeitakkumulatorspeicher vorgesehen. Der Speicher dient dazu, den Strombedarf für Grundlast und für die Wärmepumpe zur Brauchwarmwassererzeugung abzudecken. Der Elektrospeicher liefert aber keinen Strom für die Wärmepumpe im Raumheizungsbetrieb.

Um mit thermischen Langzeitspeichern einen Effekt beim Energiebedarf im Quartier und bei der elektrischen Netzstabilität erreichen zu können, ist die Produktionsmenge an elektrischer Energie sowie die Art der Wärmeerzeuger im Quartier entscheidend. Nur wenn genügend elektrischer Überschuss erzeugt wird und ausreichend Wärmepumpen im System vorhanden sind, können die betrachteten



thermischen Langzeitspeicher sinnvoll genutzt werden. Damit eine bessere Netzstabilität erreicht werden kann, ist es wichtig, dass die elektrische Energie nicht nur thermisch, sondern auch elektrisch in Kurzzeitspeichern gepuffert wird. So können die Lastspitzen im Haushaltsstromverbrauch abgedeckt werden.

Für die Betrachtung der Umweltauswirkungen der Speichervarianten wurden in den LCA-Untersuchungen (LCA, Life Cycle Assessment) die folgenden Prozesse berücksichtigt:

- Produktion: Herstellung der nötigen Materialien und Rohstoffe, Transport zur Produktionsstätte, wichtigste Produktionsschritte und Produktionsenergie
- Nutzung: Elektrizitätsverluste im Betrieb
- Entsorgung: Recycling der Akkumulatoren und Rückgewinnung der Materialien

Die elektrischen Speichertechnologien unterscheiden sich in Bezug auf die Leistungsparameter wie Lebensdauer, Energiedichte und Effizienz. Diese Aspekte müssen in der Ökobilanzierung berücksichtigt werden. Zum Vergleich der Umweltauswirkungen der verschiedenen Systeme wurde als Basis die funktionelle Einheit "Lieferung von 1 kWh gespeicherter Energie von einem Akkumulator mit einer Speicherkapazität von 10 kWh" gewählt.

Aus den LCA-Berechnungen der Akkumulatoren können folgende Trends beobachtet werden: Bei allen Indikatoren (Treibhausgase, Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen, Schaden an Gesundheit und Ökosystem) und bei allen Szenarien schloss der Blei-Akku am schlechtesten ab. Das ist auf das Zusammenspiel von relativ tiefer Energiedichte, kurzer Lebensdauer und hohen Verlusten zurückzuführen. Dagegen schloss der Li-Ionen-Akkumulator bei den meisten Indikatoren tendenziell am besten ab, was auf die hohe Lebensdauer und die tiefen Speicherverluste zurückzuführen ist.

Die im Projekt untersuchten elektrischen Speicher haben mit Ausnahme des Wasserstoffspeichers ihre Stärke in der kurzzeitigen Speicherung. Beim Einsatz als Langzeitspeicher wird pro Speichereinheit unter Betrachtung der Lebensdauer deutlich weniger Energie gespeichert, da der Energieumsatz massiv reduziert wird. Die in Bezug auf die LCA-relevanten Auswirkungen (Treibhausgase, Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen, Schaden an der Gesundheit und Ökosystem), die allein durch die Produktion des Speichers entstehen, würden durch die Anwendung als Saisonspeicher um ein vielfaches Ansteigen. Da die Umweltbelastung gemessen in UBP durch Elektrospeicher bereits im aktuellen Anwendungsszenario als Kurzzeitspeicher deutlich höher liegt als bei den thermischen Speichern, ist eine Anwendung der untersuchten elektrischen Speicher als Saisonspeicher – mit Ausnahme des Wasserstoffspeichers – nicht zu empfehlen.

Der Wasserstoffspeicher ist die einzige Technologie, die für eine saisonale Speicherung von Strom im Quartierkontext empfohlen werden kann. Dies zeigen die Betrachtungen der LCA deutlich, da der Wasserstoffspeicher das grösste Verhältnis von Verlusten zu Produktion minus Recycling aufweist. Dies zeigt, dass die Umweltbelastung primär von der Umweltbelastung des eingespeicherten Stroms ausgeht. Kann dieser als Überschuss aus PV-Strom zur Verfügung gestellt werden, kann das System als Langzeitspeicher empfohlen werden. Wird Strom als Überschuss zur Verfügung gestellt, muss allerdings die korrekte Allokation der Umweltauswirkungen dieser Energie zum produzierenden System berücksichtigt werden.

Beim Einsatz von Akkumulatorspeichern als Tagesspeicher in Quartieren ist die Lithium-Ionen-Technologie in der Regel allen anderen Stromspeichertechnologien vorzuziehen. Ausgenommen sind Second-Life-Akkumulatoren. Dies primär aus ökologischen Überlegungen, da der Lithium-Ionen-Akkumulator aktuell klar die geringsten Umweltauswirkungen aufweist.

Die Simulationen zeigen, dass der Einsatz eines Stromspeichers erst ab einer Photovoltaik-Stromproduktion von ca. 10% des Energieverbrauchs sinnvoll ist. Unter diesem Wert ist der optimierte Eigenverbrauch dominierend und elektrische Speicher werden aus technischer Sicht nicht benötigt. Der Wert von 10% PV-Strom am gesamten Energiebezug zeigt, dass Speicher in Quartieren erst bei deutlich mehr installierter PV-Leistung als dies heute der Fall ist empfohlen werden können.



In der Studie wurde für das Quartier bereits von einer maximalen installierten PV-Leistung ausgegangen. Ein zusätzlicher Ausbau der Photovoltaik wäre nur noch an Fassadenflächen und ausserhalb des Quartiers möglich. Auch wenn Szenarien wie der Einbezug von Solarstrom von ausserhalb des Quartiers die Systemgrenze überschreiten, erscheint ein kurzer Exkurs auf Grund der durchgeführten LCA-Betrachtungen zum Thema Speicher angebracht: Für die Bereitstellung von Winterstrom besteht neben der Langzeitspeicherung auch die Option, erneuerbaren Strom in den Wintermonaten mit Photovoltaikanlagen, die nur im Winter genutzt werden, zu produzieren. Basierend auf den hohen Umweltauswirkungen des H_2 -Speichers stellt sich die Frage, ob die Nutzung dieser Technologie für die Langzeitspeicherung durch die Installation einer höheren PV-Kapazität substituiert werden könnte. Erste Betrachtungen dieser Systeme lassen vermuten, dass die Ökobilanz der Langzeitspeicherung keinen eindeutigen Vorteil gegenüber der Installation von zusätzlicher Photovoltaik für die Wintermonate aufweist. Dies würde bedeuten, dass die Langzeitspeicherung deutlich an Relevanz in zukünftigen ökologisch orientierten Energieversorgungsszenarien verliert.

Da für den Einsatz eines Saisonspeichers das Verhältnis von installierter PV-Leistung zum Gesamtenergieverbrauch relevant ist, wird empfohlen, das Verhältnis durch PV-Installationen und Energiesparmassnahmen möglichst schnell zu vergrössern, um bereits vor 2050 die energetischen Voraussetzungen für Saisonspeicher zu schaffen.

Die im Projekt betrachteten thermischen Speicher eignen sich grundsätzlich alle für die saisonale Speicherung von thermischer Energie. Die LCA zeigt, dass der Wassertank aus Stahl bei allen Indikatoren am besten abschneidet. Daher wird empfohlen, wenn immer möglich den Einsatz eines thermischen Wasserspeichers zu prüfen. Der Wasserspeicher aus glasfaserverstärktem Kunststoff schneidet weniger gut ab, hat aber als Wasserspeicher ebenfalls die Eigenschaft, nur wenig Hilfsenergie in Form von Strom zu benötigen. Dies im Gegensatz zum Erdsonden- oder Eisspeicher. Da sich die Umweltbelastung von Strom in den Wintermonaten in Zukunft stark von der Umweltbelastung des im Sommerhalbjahr produzierten Stroms unterscheiden könnte, muss dem Winterstromverbrauch der thermischen Saisonspeicher die notwendige Aufmerksamkeit geschenkt werden. Bei den thermischen Speichern zeigen der Eisspeicher und der Erdsondenspeicher tendenziell grössere Umweltauswirkungen auf als die anderen Technologien. Der Hauptgrund dafür ist die Elektrizität aus dem Betrieb der Wärmepumpen, die für das Speichern und Entnehmen der Wärme bereitgestellt werden muss. Hier ist zu beachten, dass dieser Beitrag durch die Nutzung von erneuerbaren Quellen (zum Beispiel tagsüber durch PV-Anlagen) zum Teil reduziert werden könnte. Auch die Problematik, dass die notwendige Fläche für Erdsondenspeicher nicht unbegrenzt ist, muss beachtet werden. Es kann daher ein zweistufiges Vorgehen empfohlen werden:

1. Schritt: Ausnützung der vorhandenen Möglichkeiten für Wasserspeicher;
2. Schritt: den fehlenden Speicherbedarf mit einem Erdsondenspeicher ergänzen.

Die LCA von Quartieren mit thermischen und elektrischen Speichern ist denen ohne diese Speicher ähnlich. Nur mit einem maximalen Ausbau der Produktion von erneuerbaren Energien wie Photovoltaik können Speicher die Umweltauswirkungen der Energieversorgung von Quartieren deutlich reduzieren. Die Förderung von Energieeffizienz und erneuerbarer Energieproduktion ist daher deutlich stärker zu gewichten als die saisonale Speicherung.



2 Ausgangslage

Dezentrale Energiespeicher ergänzen bei der Versorgung von Gebäuden und Quartieren mit erneuerbaren Energien die Energieerzeugungsanlagen. Speicher vermögen kurzzeitige (Stunden bis Tage) aber auch saisonale Produktionsschwankungen von dezentralen Energieerzeugungssystemen auszugleichen.

Kurzzeitspeicher können den variablen Tagesgang von Photovoltaikanlagen gegenüber dem Netz ausgleichen oder die Wärmeabgabe von Netz- oder Lastmanagement-geführten Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen puffern. Dezentrale Elektrospeicher haben das Potenzial, die Kapazität der bestehenden Stromnetze zu entlasten. Durch die weitgehend vorhandene Technik können Elektrospeicher rasch umgesetzt werden. Dadurch ist ein Netzausbau in den kommenden Jahren trotz Zubau dezentraler Stromproduktionsanlagen nur in reduziertem Ausmass erforderlich.

Neben Kurzzeitspeichern sind dezentrale Saisonspeicher von Interesse. Für Gebäude gibt es bereits thermische Saisonspeichersysteme. Auf Ebene Quartiere können geeignete thermische Speichersysteme saisonale Produktionsschwankungen für ganze Gebäudecluster ausgleichen.



3 Ziel der Forschungstätigkeit

Das Projekt will eine Übersicht zu thermischen und elektrischen Speichersystemen und ihrer dezentralen Anwendung in Quartieren schaffen. Die Einbindung der evaluierten Speichersysteme wird im Kontext der dezentralen Energieerzeugung und -verteilung im Quartier Kreuzmatt in Rheinfelden/AG beurteilt. In diesem Quartier werden bereits verschiedene Technologien im laufenden Projekt *Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze* [VEiN-Grid, Schnyder, G.] bezüglich dezentraler Stromerzeugung und -speicherung untersucht. Das Rheinfelder Quartier vereint Wohnen, Einkaufen, Arbeiten (Büro), Pflege (Altersheim) und Kultur (Kirche).

In der Speichersystemübersicht werden konventionelle und neuartige Technologien untersucht und auf ihre technische Verfügbarkeit und Eignung hin beurteilt. Insbesondere interessieren bei den verschiedenen Speichertechniken das Potential der Kurzzeitspeicherung und Minderung der Lastspitzen sowie das Potential der saisonalen Energiespeicherung auf Stufe Gebäude und Quartier.

Die auf Quartierebene angewandten Speichersysteme werden in den Punkten Effizienz, Umweltverträglichkeit und technische Einbindung charakterisiert. Daraus wird ein Leistungskatalog der verschiedenen Speicherkonzepte erstellt, der es ermöglicht, die optimale Wahl der Speichersysteme in Quartieren mit dezentralen Energieerzeugungsanlagen zu treffen.

Die Charakterisierung der Speichersysteme umfasst:

- Anwendbarkeit des Speichersystems auf Gebäude bzw. Quartier
- Einbindung in die Energieerzeugung und -verteilung
- Eignung als Kurzzeit- oder Saisonspeicher
- Energieeffizienz
- Umweltindikatoren

Zielgruppen des Projektes sind Energieplaner, Haustechnikplaner, Anlagebauer, Haustechnikbranche, Energieversorgungsunternehmen sowie Energiefachstellen.



4 Modellquartier

Die Beurteilung geeigneter Speichersysteme bezüglich Effizienz, Umweltverträglichkeit und Einbindung in die Energieversorgung soll für ein bestehendes Quartier durchgeführt werden. Dazu wurde das Quartier TS Kreuzmatt (TS: Trafo-Station des Niederspannungsnetzes) in Rheinfelden/AG ausgewählt. In diesem Quartier werden bereits verschiedene Technologien im laufenden Projekt *Verteilte Einspeisung in Niederspannungsnetze* [VEiN-Grid, Schnyder, G.] bezüglich dezentrale Stromerzeugung und -speicherung untersucht.

4.1 Quartier TS Kreuzmatt, Rheinfelden/AG

4.1.1 Gebäudepark

Das Quartier TS Kreuzmatt vereint Wohnen, Einkaufen, Arbeiten (Büro), Pflege (Altersheim) und Kultur (Kirche). Um die im Projekt VEiN-Grid erfasste vorhandene Bebauung und die entsprechenden lokalen Energieerzeuger zu beschreiben, und daraus für die einzelnen Gebäude resp. Gebäudetypen die Verbrauchsprofile für Raumheizung, Warmwasser und Elektrizität festzulegen, wurden die verfügbaren Daten aus dem Projekt VEiN-Grid verwendet (Abbildung 1Abbildung 1).

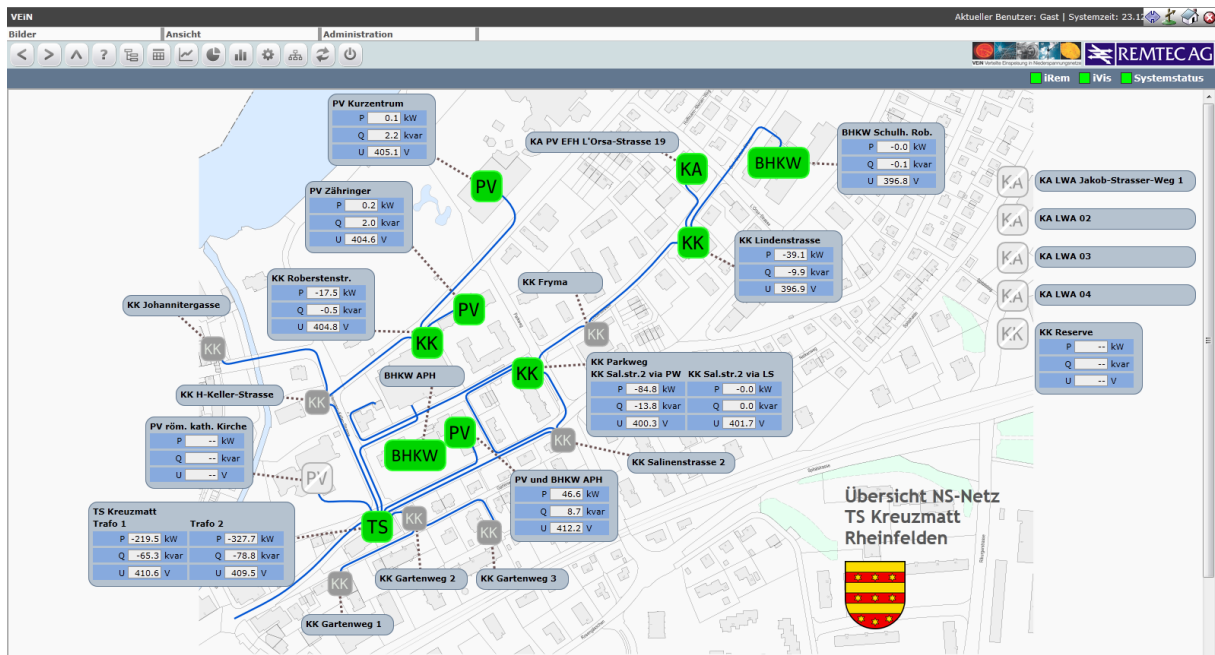


Abbildung 1

Quartier Kreuzmatt, Rheinfelden/AG mit schematischer Darstellung von Kabelkabinen und Energiesystemen [VEiN-Grid, Schnyder, G.]

In Kontakten mit den Projektkoordinatoren des Projektes VEiN-Grid wurde die Datenlage bezüglich elektrischer Messdaten abgeklärt. Die VEiN-Grid Messungen wurden grossteils in den sogenannten Kabelkabinen (KK) resp. Trafostationen (TS) des lokalen Niederspannungsnetzes durchgeführt. Die Messdaten sind zeitlich hoch aufgelöst, beschränken sich aber auf die drei Kabelkabinen Parkweg, Fryma und Roberstenstrasse. Rückschlüsse auf den Elektrizitätsbedarf sind pro Gebäudegruppe je nach Netztopologie der einzelnen KK nur beschränkt möglich, Rückschlüsse auf den Bedarf auf Stufe Einzelgebäude sind nicht möglich.



Bezüglich Gebäudedaten (Grösse, Bauweise, Energieflächen) und entsprechender Versorgungstypen waren vom lokalen Energieversorger Elektrizität (AEW Energie AG) und von der Gemeindeverwaltung Rheinfelden nur sehr wenige Daten erhältlich. Rheinfelden selbst verfügt über keine GIS-basierten Gebäude- und Energiedaten.

Daher mussten die Gebäudedaten auf der Basis von Katasterplänen und visueller Betrachtung eruiert werden. Die Gebäude wurden den einzelnen KK und TS zugeordnet. Für jeden Abschnitt wurden charakteristische Gebäudetypen spezifiziert, um für diese dann mittels EnergyPlus-Gebäudeenergiesimulationen den Heizwärmebedarf zu bestimmen.

Für den elektrischen Energieverbrauch, der als Eingabe in den thermischen Simulationen benötigt wird, wurden Profile auf der Basis SIA 2024 [SIA Merkblatt, 2006] abgeleitet. Im Weiteren wurde der Warmwasserverbrauch gemäss SIA 2024 ermittelt. Die Abschätzung der stündlichen Verbrauchswerte wurde in einem weiteren Schritt mittels eines Wahrscheinlichkeitsverteilungs-basierten Berechnungstools für alle Gebäude abgeschätzt. Die elektrischen Lastprofile wurden aus vorhandenen Messdaten der Kabelkabinen mittels eines Berechnungstools, das von der Zürcher Fachhochschule ZHAW entwickelt wurde, auf stündliche Werte pro Gebäude heruntergebrochen.

Die erhobenen und simulierten Daten sind Basis für die Bewertung der ausgewählten Speichertechnologien. Ausgehend von einer Basiskonfiguration 2010 sowie zwei weiteren Zukunftsszenarien für die Jahre 2035 und 2050 werden die thermischen und elektrischen Speicher mit verschiedenen Lastgängen auf ihre Energie- und Umweltbilanz untersucht.

4.1.2 Elektrisches Verteilnetz

Vom Projekt VEiN-Grid liegen im Quartier Messungen im Niederspannungsnetz (NS-Netz) ab dem Jahr 2011 vor. Das NS-Netz wurde in der Software PowerFactory von DlgSILENT [DIgSILENT, online] modelliert.

Um das elektrische Verteilnetz genauer analysieren zu können, wurde im vorliegenden Projekt nur ein Teilbereich des VEiN-Grid-Netzes ausgewählt. Dieses reduzierte Netz umfasst die Netzanbindungen von 18 Häusern bis und mit deren Anbindung an das Mittelspannungsnetz (MS-Netz) über die Transformatorstation (TS) Kreuzmatt. Diese 18 Häuser bilden das Modellquartier für das vorliegende Projekt. Es handelt sich dabei um ein NS-Netz, mit einem Anschlusspunkt an das MS-Netz, eine Situation, wie sie in der Schweiz sehr typisch ist.

Die 18 gewählten Häuser werden über 3 Kabelkabinen (KK) versorgt:

- KK Roberstenstrasse
- KK Parkweg
- KK Fryma

4.2 Quartierentwicklung

Als Basiskonfiguration des Modellquartiers wurde das Jahr 2010 herangezogen. Der Energiebedarf der Jahre 2035 und 2050 des Modellquartiers TS Kreuzmatt orientiert sich an den Entwicklungsszenarien der Schweizerischen Energiestrategie 2050 [Prognos, 2012] und des Gebäudeparkmodells SIA-Effizienzpfad [Heeren N. et al., 2009].

4.2.1 Gebäudedaten

Basierend auf den Grundflächen und den mittleren Gebäudehöhen der 18 Gebäude wurde die Energiebezugsfläche der einzelnen Gebäude abgeschätzt. In einem weiteren Schritt wurden statistische Daten für die durchschnittliche Wohnfläche pro Einwohner herangezogen, um die Belegungs-



dichte der Gebäude zu ermitteln. Dies ergibt in etwa 500 Einwohner für die 18 vorhandenen Gebäude. Annahmen bezüglich vorhandener Gebäudesysteme beruhen auf der Energiestrategie 2050, in der typische Prozentsätze von vorhandenen Wärmepumpen aufgeführt werden. Eine Hochrechnung für das Quartier ergibt, dass im Jahr 2010 zwei Wärmepumpen vorhanden sind. Als weitere Annahme wurde davon ausgegangen, dass der Rest der Gebäude mit einem Hochtemperatur-Wärmesystem wie z. B. Ölheizungen oder Gasheizungen ausgestattet sind. In Tabelle 1 sind die gewählten Gebäudetypen zusammengestellt.

Tabelle 1 Gebäudeübersicht im Modellquartier

Haustyp	Baujahr*	Anzahl Gebäude
Mehrfamilienhaus	1947-1975	1
Mehrfamilienhaus	1985-2000	9
Einfamilienhaus	1947-1975	3
Reiheneinfamilienhaus	1947-1975	2
Bürogebäude	1947-1975	2
Kindergarten	1947-1975	1

*Das genaue Baujahr ist nicht bekannt. Es wurde aufgrund des heutigen Bauzustandes abgeschätzt und den Bauperioden zugewiesen [SIA Merkblatt, 2006]

Für die in Tabelle 1 zusammengestellten Gebäude wurde jeweils ein typischer Vertreter ausgewählt, an dem der aktuelle Energieverbrauch festgelegt und seine zukünftige Entwicklung modelliert wurde.

Für die Bestimmung des Energieverbrauches 2035 bzw. 2050 wurde die Erneuerungsrate der Gebäude gemäss Prognosen des SIA-Effizienzpfads herangezogen. In Tabelle 2 ist die Erneuerungsrate des Bauteils Fenster als Beispiel aufgeführt.

Tabelle 2 Erneuerungsrate für Fenster von Mehrfamilienhäusern [Heeren N. et al., 2009]

Building part	Construction period	Renewal period			
		2010-2020	2020-2030	2030-2040	2040-2050
Window	Vor1947	0,007	0,003	0,002	0,001
	1947-75	0,015	0,008	0,005	0,004
	1975-85	0,025	0,021	0,014	0,005
	1985-2000	0,018	0,020	0,017	0,008

Die kumulierte Erneuerungsrate berechnet sich aus den Raten der einzelnen Zeitperioden gewichtet mit der Zeitdauer. So errechnet sich die Erneuerungsrate bis ins Jahr 2035 für den Bauteil Fenster eines Gebäudes, das in der Zeitperiode von 1985-2000 errichtet wurde, nach der Gleichung:

$$\text{kumulierte Erneuerungsrate (2035)} = 0.018 \cdot 10 + 0.020 \cdot 10 + 0.017 \cdot 5 = 0.465$$

In Tabelle 3 sind die weiteren Bauteile und ihre Erneuerungsrate für Mehrfamilienhäuser mit Baujahr 1985-2000 zusammengefasst.



Tabelle 3 Kumulierte Erneuerungsraten für diverse Bauteile von Mehrfamilienhäusern mit Baujahr 1985-2000

Bauteil	kumulierte Erneuerungsraten	
	Referenzszenario 2035	Referenzszenario 2050
Fenster	0.47	0.63
Dach	0.38	0.52
Wände	0.08	0.12
Böden	0.05	0.08

Die Abschätzung der kumulierten Erneuerungsraten des Gebäudeparks setzt die Annahmen bezüglich der Summe der getroffenen Sanierungsmassnahmen voraus. In Tabelle 4 sind die verwendeten Werte für die Szenarien 2035 und 2050 aufgeführt.

Tabelle 4 Kumulierte Erneuerungsraten für Sanierungen von Mehrfamilienhäusern mit Baujahr 1985-2000

	kumulierte Erneuerungsraten	
	Referenzszenario 2035	Referenzszenario 2050
Fenster	0.09	0.11
Fenster + Dach	0.30	0.40
Fenster + Dach + Wand	0.03	0.04
Fenster + Dach + Wand + Boden (Gesamtsanierung)	0.05	0.08
keine Sanierung	0.53	0.37

4.2.2 Berechnung Warmwasserverbrauch

Als Grundlage für die Berechnung des Warmwasserverbrauchs der einzelnen Gebäude wurde die SIA 2024 herangezogen, in der davon ausgegangen wird, dass der typische Verbrauch 45 Liter pro Person und Tag beträgt. Des Weiteren wird von einer mittleren Wassererwärmung von 40 K ausgegangen und der Energieinhalt daraus errechnet. Für die 18 Gebäude wurden mittels Wahrscheinlichkeitsverteilung mit dem Tool DHWcalc [Jordan U., Vajen K., 2003] stündliche Lastprofile erzeugt. Es wird ausserdem davon ausgegangen, dass der Warmwasserverbrauch über die Jahre bis 2050 konstant gehalten wird, jedoch das System erneuert werden kann.

4.2.3 Elektrische Lastprofile

Die elektrischen Verbrauchsprofile wurden mittels stochastischen Methoden erzeugt. Basierend auf realen Verbrauchsdaten elektrischer Energie (Smart Meter-Messungen) stehen tageszeitabhängige Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Verfügung. Dazu wurde analytisch wie auch empirisch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zu jedem Messzeitpunkt der realen Leistungsverteilung angeglichen. So entstanden aufgeteilt auf Werktag, Samstag und Sonntag je Monat ein Satz Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Die daraus resultierenden Zufallswerte stellen Grundlastprofile dar, welche die elektrischen Verbraucher wie Licht, Küchengeräte usw. in einem Haushalt umfassen. Die Grundlastprofile werden auf den jährlichen elektrischen Energieverbrauch skaliert.



Zu den Grundlastprofilen werden Grossverbraucher wie Brauchwarmwassererzeuger (Boiler als Widerstandsheizung) und Wärmepumpen dazu gerechnet. Dabei werden Rundsteuerungsschaltzeiten sowie der monatliche, jahreszeitabhängige Energieverbrauch dieser Geräte beachtet.

Die erwähnten Smart Meter-Messungen wurden im Versorgungsgebiet der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ) installiert. Die Messungen beschränken sich auf den privaten Sektor, wobei Einfamilien- (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) betrachtet werden.

4.2.3.1 Grundlastprofil

Wie vorgängig erwähnt, umfasst die Datengrundlage zur Erstellung der elektrischen Profile nur Messungen von EFH sowie MFH. Aus diesem Grund ist eine entsprechende Kategorisierung der 18 Gebäude notwendig. Der jährliche Energieverbrauch der einzelnen Gebäude in Rheinfelden ist unbekannt. Es wird deshalb ein durchschnittlicher Energieverbrauch pro Haushalt angenommen. Dazu werden die EKZ Smart Meter-Daten verwendet, welche folgende durchschnittliche Jahresenergieverbräuche für das Jahr 2012 ausweisen:

- 5500 kWh/a für ein Einfamilienhaus
- 2500 kWh/a pro Haushalt in einem Mehrfamilienhaus

Diese Energiemengen decken die elektrische Grundlast ab. Zur Grundlast zählen Verbraucher wie Licht und Haushaltgeräte. Küchengeräte sind in diesem Verbrauch ebenfalls enthalten. Grossverbraucher zur Erzeugung von Brauchwarmwasser und Heizwärme zählen nicht zum Grundlastprofil.

Werden die Durchschnittswerte der EKZ-Messung mit den Angaben der Eidgenössischen Elektrizitätskommission (ElCom) verglichen, zeigt sich, dass die obige Annahme gerechtfertigt ist. Gemäss ElCom beträgt der jährliche Energieverbrauch eines typischen Haushaltes (Stand heute):

- | | |
|------------------------|---|
| – Kat. H2: 2'500 kWh/a | 4-Zimmerwohnung mit Elektroherd |
| – Kat. H4: 4'500 kWh/a | 5-Zimmerwohnung mit Elektroherd & Tumbler (ohne Boiler) |
| – Kat. H5: 7'500 kWh/a | 5-Zimmer-EFH mit Elektroherd, Elektroboiler und Tumbler |

Die Einteilung in EFH respektive MFH sowie die Anzahl Haushalte pro Gebäude sind in Tabelle 5 ersichtlich. Den Gebäuden Nr. 16, 17 und 18, die als Büro bzw. Kindergarten genutzt werden, wurde ein Grundlastprofil eines EFH zugewiesen. Die restlichen Gebäude sind entweder EFH oder MFH, und die dazu erstellten Profile decken sich mit deren Nutzung.

Die Anzahl Haushalte pro Gebäude wurde anhand von Angaben aus dem Projekt VEiN-Grid sowie anhand von Luftbildern (Google Earth) bestimmt.



Tabelle 5

Kategorisierung der Gebäude zur Bestimmung der elektrischen Verbrauchsprofile

Gebäude	SpeQua-Nr.	Anzahl Haus halte	Gebäudetyp Profilerstellung	Gebäudetyp Erhebung Empa (EMPA)
Jakob-Strasser-Weg 1	1	1	EFH	EFH
Lindenstrasse 8	2	1	EFH	EFH
Hermann-Keller-Strasse 7	3	1	EFH	EFH
Lindenstrasse 5	4	24	MFH	MFH
Parkweg 8 & 10	5	8	MFH	MFH
Lindenstrasse 19 & 21	6	12	MFH	MFH
Lindenstrasse 23 & 25	7	12	MFH	MFH
Lindenstrasse 15	8	6	MFH	MFH
Lindenstrasse 17	9	6	MFH	MFH
Parkweg 3	10	6	MFH	MFH
Parkweg 5	11	6	MFH	MFH
Roberstenstrasse 10	12	32	MFH	MFH
Lindenstrasse 12&14&16&18	13	4	MFH	MFH
Lindenstrasse 20&22&24&26&28	14	5	MFH	MFH
Lindenstrasse 10c	15	6	MFH	MFH
Roberstenstrasse 20	16	1	EFH	Büro
Roberstenstrasse 22	17	1	EFH	Büro
Roberstenstrasse 16	18	1	EFH	Kindergarten

4.2.3.2 Vergleich der Verbrauchsprofile mit VEiN-Grid-Messdaten

Im Projekt VEiN-Grid werden im Quartier Rheinfelden an verteilten Messpunkten im elektrischen Verteilnetz Leistungsmessungen durchgeführt. Ebenfalls sind einige Gebäude mit einem Smart Meter ausgestattet. Die Messungen erfolgen meist auf Stufe von Kabelkabinen, und umfassen somit mehrere Gebäude.

Für das Gebäude Nr. 12 (Roberstenstrasse 10) liegen Smart Meter-Daten für jeden Haushalt vor. Diese Messdaten können direkt mit den generisch erzeugten Lastprofilen verglichen werden. Abbildung 2 zeigt das gemessene wie auch das simulierte Lastprofil für das Gebäude an der Roberstenstrasse 10 in der ersten Juli Woche 2012. Die generierten Profile basieren auf Daten des Jahres 2012, womit sich die Wochentage decken und ein Direktvergleich gerechtfertigt ist. Wie in Abbildung 2 sichtbar ist, decken sich das gemessene wie auch das simulierte Profil. Der tägliche Lastgang mit einem Anstieg am Morgen sowie gegen Abend ist sichtbar. Durch grössere Verbraucher verursachte Leistungsspitzen sind in beiden Profilen erkennbar, wenn auch nicht zeitgleich. Grund dafür ist die stochastische Generierung der Lastprofile.

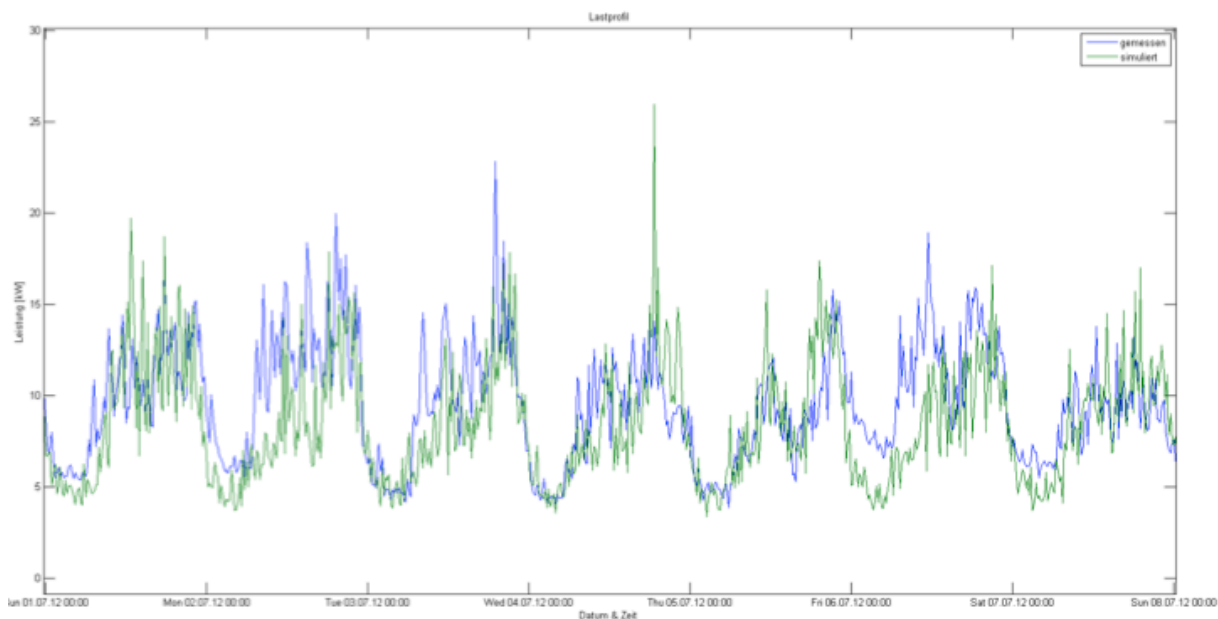


Abbildung 2 *Messung vs. Simulation: elektrisches Verbrauchsprofil des Gebäudes Roberstenstrasse 10 (1. Woche im Juli 2012)*

Die Smart Meter-Daten des Projekts VEiN-Grid weisen für das Jahr 2012 einen elektrischen Gesamtenergieverbrauch für das Gebäude an der Roberstenstrasse 10 von 84'518 kWh aus. Im vorliegenden Projekt wird von einem etwas kleineren Energieverbrauch von 80'000 kWh ausgegangen (32 Haushalte mit einem Verbrauch von je 2'500 kWh).

4.2.3.3 Verbrauchsprofile

Wie in den vorangehenden Abschnitten beschrieben, wurde für jedes einzelne Gebäude ein elektrisches Lastprofil erstellt. In Tabelle 6 ist der aggregierte Energiebezug 2010 sämtlicher Häuser des Modellquartiers zusammengefasst.

Tabelle 6 *Aktueller elektrischer Jahresenergieverbrauch im Modellquartier Rheinfelden*

Jahr	elektrischer Energieverbrauch [MWh/a]
2010	526.84

4.3 Energiebedarfsentwicklung

4.3.1 Entwicklung der Gebäudesubstanz

Für die Energiebedarfsentwicklung 2035 und 2050 wurden die 2 Szenarios gemäss dem Gebäudeparkmodell [Heeren N. et al., 2009] herangezogen. Das Referenzszenario geht von einer von weiteren Politikmassnahmen unbeeinflussten Entwicklung aus. Das Effizienzszenario setzt ambitionssere energetische Sanierungen voraus, wobei die Ziele einer 2000-Watt-Gesellschaft angestrebt werden.

Für die Berechnung der Heizenergie wurde der energetische Zustand der Gebäude über den Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der Bauteile abgeschätzt. Ausgehend vom aktuellen U-Wert wurde seine Entwicklung in den Jahren 2035 bzw. 2050 errechnet.



Für den Typ Mehrfamilienhaus Baujahr 1985-2000 wurden Ausgangswerte gemäss Tabelle 7 verwendet.

Tabelle 7 Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) verschiedener Bauteile vor Sanierung (Typ Mehrfamilienhaus mit Baujahr 1985-2000)

Bauteil	U [W/(m ² K)]
Wand	0.55
Boden	0.50
Dach	0.45
Fenster	1.8

In Tabelle 8 ist der spezifische Wärmebedarf aufgrund der U-Werte sowie der energietechnischen Sanierungsmassnahmen für das Referenzszenarium der Jahre 2035 bzw. 2050 dargestellt. Die Werte spiegeln die Verhältnisse von Mehrfamilienhausbauten wieder, die in der Zeitperiode von 1985-2000 errichtet wurden.

Tabelle 8 Referenzszenario: spezifischer Heizenergiebedarf Typ Mehrfamilienhaus Baujahr 1985-2000

Mehrfamilienhaus (1985-2000) - Referenzszenario							
2035							
			Wände	Boden	Dach	Fenster	
U [W/(m²K)]			0.25	0.23	0.23	1.20	
Sanierter Bauteil						Anzahl	spez. Wärmebedarf
Wände	Boden	Dach	Fenster	Anteil	Gebäude	[kWh/(m² a)]	
1	-	-	+	9%	1	48.1	
2	-	-	+	30%	3	45.9	
3	+	-	+	3%	-	36.3	
4	+	+	+	5%	-	34.0	
5	-	-	-	53%	5	66.1	
2050							
			Wände	Boden	Dach	Fenster	
U [W/(m²K)]			0.25	0.22	0.21	1.15	
Sanierter Bauteil						Anzahl	spez. Wärmebedarf
Wände	Boden	Dach	Fenster	Anteil	Gebäude	[kWh/(m² a)]	
1	-	-	+	11%	1	47.8	
2	-	-	+	40%	4	45.6	
3	+	-	+	4%	-	36.1	
4	+	+	+	8%	1	33.6	
5	-	-	-	37%	3	66.1	

Der spezifische Wärmebedarf für das Effizienzscenario ist der Tabelle 9 zu entnehmen.



Tabelle 9

Effizienzzenario: spezifischer Heizenergiebedarf Typ Mehrfamilienhaus Baujahr 1985-2000

Mehrfamilienhaus (1985-2000) - Effizienzzenario							
2035							
		Wände		Boden	Dach	Fenster	
U [W/(m²K)]		0.15		0.15	0.15	0.81	
Sanierter Bauteil					Anzahl	spez. Wärmebedarf	
Wände	Boden	Dach	Fenster	Anteil	Gebäude	[kWh/(m² a)]	
1	-	-	+	9%	1	44.0	
2	-	-	+	33%	3	40.7	
3	+	-	+	1%	-	27.1	
4	+	+	+	8%	1	24.0	
5	-	-	-	49%	4	66.1	
2050							
		Wände		Boden	Dach	Fenster	
U [W/(m²K)]		0.14		0.14	0.14	0.78	
Sanierter Bauteil					Anzahl	spez. Wärmebedarf	
Wände	Boden	Dach	Fenster	Anteil	Gebäude	[kWh/(m² a)]	
1	-	-	+	16%	1	42.9	
2	-	-	+	50%	3	39.8	
3	+	-	+	2%	-	25.9	
4	+	+	+	14%	1	23.0	

4.3.2 Entwicklung Wärmebedarf

Für sämtliche Gebäudetypen des Modellquartiers wurden analog dem oben dargestellten Typus Mehrfamilienhaus Baujahr 1985-2000 der Heizwärmebedarf in den Jahren 2035 und 2050 hochgerechnet. Tabelle 10 zeigt den spezifischen Heizbedarf der verschiedenen Gebäudetypen im Modellquartier mit den 18 Gebäuden.



Tabelle 10

Entwicklung des spezifischen Heizwärmebedarfs des Gebäudeparks

Haustypen	Durchschnitt des spezifischen Heizwärmebedarfs [kWh/(m ² a)]			
	Referenzszenario		Effizienzszenario	
	2035	2050	2035	2050
Mehrfamilienhäuser 1947-1975	81.8	81.8	81.8	25.1
Mehrfamilienhäuser 1985-2000	57.1	54.0	49.9	44.3
Einfamilienhäuser	81.6	79.8	49.8	49.1
Reiheneinfamilienhäuser	98.0	83.0	77.3	67.7
Bürogebäude	80.6	72.2	59.7	43.1
Kindergarten	75.0	70.8	62.5	52.8

Anhand der spezifischen Heizwärmewerte lassen sich aufgrund der Gebäudeflächen die jährlichen Heizwärmeverbräuche berechnen. Tabelle 11 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 11

Szenario des Verbrauchs für Heizwärme des Gebäudeparks

Haustyp	Heizwärmebedarf [kWh/a]			
	Referenzszenario		Effizienzszenario	
	2035	2050	2035	2050
Mehrfamilienhäuser 1947-1975	133'024	133'024	133'024	40'818
Mehrfamilienhäuser 1985-2000	120'5926	1'140'124	1'053'835	936'332
Einfamilienhäuser	76'357	74'740	46'572	45'974
Reiheneinfamilienhäuser	167'753	142'078	132'449	115'928
Bürobauten	187'277	167'759	138'715	100'144
Kindergarten	32'228	30'423	26'856	22'688
Gesamtbedarf Heizwärme	1'802'564	1'688'147	1'531'451	1'261'884

Zusammenfassend ergibt sich demnach eine Reduktion des Heizwärmebedarfs von 27% im Jahr 2035 gegenüber dem Jahr 2010 und 40% Reduktion bis in das Jahr 2050 für das Effizienzszenario. Der konstante Wert für die Warmwasseraufbereitung (DHW) beträgt im Jahr 2010 18% des Heizwärmebedarfs, während er im Jahr 2050 30% ausmacht. Die entsprechenden Werte sind in Abbildung 3 zusammengefasst. Die Wärmepumpenanzahl im Quartier erhöht sich von 2 im Jahr 2010 auf 7 bzw. 9 Stück in den Jahren 2035 und 2050.

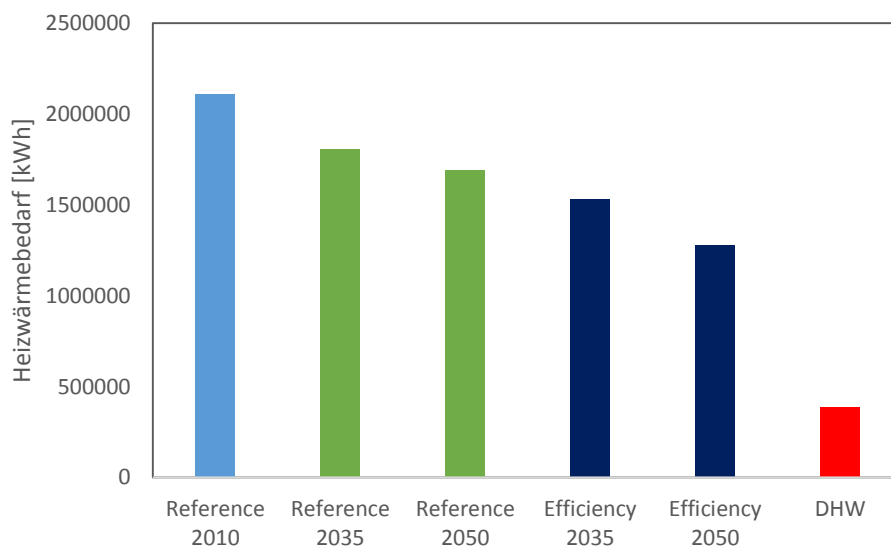


Abbildung 3 Entwicklung des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs für die verschiedenen Szenarien

Die Energieverbrauchswerte sind Basis für die Simulation des Modellquartiers. Anhand der Simulation können ausgewählte Speichertechnologien bewertet und optimiert werden.

4.3.3 Entwicklung Elektrizitätsverbrauch

Wie in den vorangehenden Abschnitten beschrieben, wurde für jedes einzelne Gebäude ein elektrisches Lastprofil erstellt. In Tabelle 12 ist der aggregierte Energiebezug sämtlicher Häuser des Modellquartiers zusammengefasst.

Für das elektrische Lastprofil wurden neben den Szenarien für die Entwicklung des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs noch Szenarien mit maximalem PV-Ausbau gemäss Solarkataster des Kantons Aargau definiert. Dabei wurde angenommen, dass bis im Jahr 2050 sämtliche Dachflächen, die gemäss Solarkataster noch geeignet sind (mittlere Einstrahlung grösser als 800 kWh/m²/Jahr), für PV genutzt werden. Gleichzeitig werden bis 2050 alle Wärmeerzeuger (Warmwasser und Heizung) durch Wärmepumpen ersetzt. Das Szenario maximaler PV-Ausbau 2035 geht davon aus, dass zwischen dem Referenzszenario und der Szenario maximaler PV-Ausbau 2050 ein linearer Zubau von PV und Wärmepumpen erfolgt.

Tabelle 12 Elektrischer Jahresenergieverbrauch im Modellquartier Rheinfelden für die verschiedenen Szenarios

Szenario	elektrischer Energieverbrauch [MWh/a]	Anteile in % gegenüber Referenz 2010
Referenz 2010	526	100%
Effizienz 2035	478	91%
Effizienz 2050	433	82%
maximaler PV-Ausbau 2035	525	99.7%
maximaler PV-Ausbau 2050	747	142%



Die Energieperspektiven des Bundes [Prognos, 2012] gehen im Zielszenario 'Neue Energiepolitik' (NEP) von einer Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs der privaten Haushalte aus.

Tabelle 13

Elektrischer Energieverbrauch privater Haushalte Schweiz nach Zielszenario 'Neue Energiepolitik' NEP [Prognos, 2012]

Jahr	elektrischer Energieverbrauch Schweiz [PJ/a] / [kWh/a]	Anteile in % gegenüber Referenzjahr 2010
2010	67.0 / 18.6 Mio.	100%
2035	55.9 / 15.5 Mio.	83%
2050	48.4 / 13.4 Mio	72%

In Abbildung 4 wird die festgelegte Entwicklung des elektrischen Energieverbrauchs mit derjenigen der Energiestrategie (NEP, private Haushalte) verglichen. Es sind dies Anteile in Prozent, relativ zum Referenzjahr 2010. Es ist sichtbar, dass im Szenario 'Effizienz' der Energiebedarf sinkt, wenn auch nicht im gleichen Umfang wie in den Energieperspektiven. Im Szenario 'maximaler PV-Ausbau' stagniert der Energieverbrauch bis ins Jahr 2035, worauf er bis ins Jahr 2050 auf 142% gegenüber dem Jahr 2010 ansteigt. Grund dafür ist die konsequente Substitution sämtlicher WW-Aufbereitungsanlagen und Heizungen durch elektrisch betriebene Wärmepumpen.

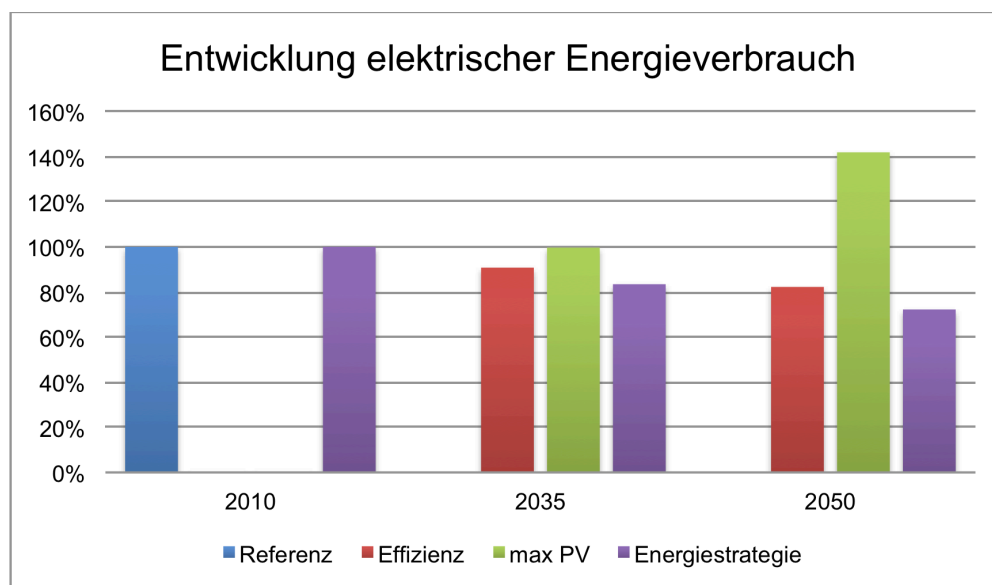


Abbildung 4

Vergleich der Entwicklung des elektrischen Energieverbrauchs zwischen Modellquartier und Energieperspektiven



4.3.4 Entwicklung der PV-Produktion

Mit Hilfe der Software Meteotest [Meteonorm] wurden Meteodaten für den Standort Rheinfelden bestimmt. Für die stündliche Auswertung gelten folgende Parameter:

- Standortname = Rheinfelden
- Geogr. Breite [°] = 47.553, Geogr. Länge [°] = 7.796, Höhe [m] = 274
- Klimaregion = III, 3
- Albedo = 0
- Strahlungsmodell = Standard (Stunde); Temperaturmodell = Standard (Stunde)
- Diffusstrahlungsmodell = Standard (Stunde) (Perez)
- Strahlung: Neue Periode = 1991-2010
- Temperatur: Neue Periode = 2000-2009

Diese Meteodaten wurden verwendet, um mit der Software [PVsyst Software] eine südausgerichtete, 30° aufgeständerte 12 kWp PV-Anlage zu simulieren. Der PVsyst Export liefert Stundenwerte mit der Datumsgebung des Jahres 1990. Um das PV-Profil mit den Verbrauchsprofilen (Datum 2012) vergleichbar zu machen, wurden folgende Änderungen getätigt:

- 28.02.1990 Tag verdoppelt, da 2012 Schaltjahr
- 25.03.1990 Stunde zwischen 2 Uhr und 3 Uhr gestrichen (Umschaltung auf Sommerzeit)
- 29.10.1990 Stunde zwischen 2 Uhr und 3 Uhr verdoppelt (Umschaltung auf Winterzeit)
- Viertelstundenwert mit Spline-Interpolation aus Stundenwerten ermittelt

Die öffentlich zugänglichen Daten des Solarkatasters des Kantons Aargau [Solarkataster Kanton Aargau] wurden für die im vorliegenden Projekt untersuchten 18 Gebäude ermittelt. Die Datenabfrage erfolgte am 11.05.2015 online.

Im Projekt VEiN-Grid sind bereits PV-Anlagen im Betrieb. Von diesen Anlagen liegen Ertragsmessungen vor, die mit dem Solarkataster verglichen werden können. Ein solcher Vergleich ist in Tabelle 14 am Beispiel der 31.5 kWp-Anlage an der Roberstenstrasse 10 (Wohnbaugenossenschaft WBG Zähringer) gemacht. Es ist erkennbar, dass nicht das volle PV-Potential ausgeschöpft ist.

Tabelle 14

Messdaten vom Projekt VEiN-Grid: PV-Anlage Roberstenstrasse 10

Jahr	Solarkataster	2011 VEiN	2012 VEiN
Ertrag aus PV-Anlage [kWh/a]	50'313	37'560	30'887
Anteil am Solarkataster	100%	74.7%	61.4%

Um die PV-Erträge der einzelnen Szenarien zu ermitteln, wurde die Kategorisierung gemäss dem Solarkataster übernommen, und wo nötig eine Skalierung durchgeführt. In Tabelle 15 ist dieses Vorgehen in Zahlen festgehalten. Es wird allgemein angenommen, dass Dachflächen mit ‚sehr hoher‘ Einstrahlung zuerst, und solche mit ‚geringer‘ zuletzt mit PV-Modulen bestückt werden. So sind zum Beispiel für das Szenario 'Effizienz 2050' die Teildachflächen mit einer ‚hohen‘ und ‚sehr hohen‘ Einstrahlung berücksichtigt. Um dem ermittelten PV-Ertrag des gesamten Quartiers zu entsprechen, sind aber nur 24% aller Dachflächen mit Modulen bestückt.



Tabelle 15

PV-Potential des Quartiers Kreuzmatt gemäss Solarkataster Kanton Aargau
[Solarkataster Kanton Aargau]

Szenario	elektrischer Energieverbrauch [MWh/a]	PV-Ertrag Solarkataster [MWh/a]	Anteil an Energieverbrauch in %	PV-Ertrag Projekt 'SpeQua' [MWh/a]	Anteil an Energieverbrauch in %	Skalierungsfaktor Solarkataster >> Abschätzung	Einstrahlung 'gering'	Einstrahlung 'mässig'	Einstrahlung 'hoch'	Einstrahlung 'sehr hoch'
Referenz 2010	526.842	0.000	0%	0.000	0%	-	-	-	-	-
Effizienz 2035	478.290	320.013	67%	61.072	13%	0.19	-	-	-	x
Effizienz 2050	433.249	381.157	88%	90.167	21%	0.24	-	-	x	x
maximaler PV-Ausbau 2035	525.068	519.013	99%	378.207	72%	0.73	-	x	x	x
maximaler PV-Ausbau 2050	747.608	593.726	79%	593.726	79%	1.00	x	x	x	x

Einige Häuser im Modellquartier weisen nur bedingt geeignete Dachflächen für Photovoltaik auf. Das führt dazu, dass im Szenario 'Effizienz 2050' an der Roberstenstrasse 16 keine PV-Module installiert sind, da nur Teildachflächen mit einer Einstrahlung der Kategorien 'hoch' sowie 'sehr hoch' berücksichtigt werden.

Im Szenario 'Effizienz 2035' werden nur Teildachflächen mit einer Einstrahlung der Kategorie 'sehr hoch' berücksichtigt. Dies führt dazu, dass in diesem Szenario auf folgenden 4 Gebäuden keine PV-Module installiert sind:

- • Lindenstrasse 8
- • Hermann-Keller-Strasse 7
- • Roberstenstrasse 20
- • Roberstenstrasse 16



5 Speichersysteme

Speicher erfüllen je nach ihrer Speichercharakteristik die folgenden Funktionen:

- Ausgleich stochastisch anfallender Produktion von Energieerzeugungsanlagen (z. B. Solaranlagen) und Energiebedarf
- Produktionsoptimierung (z. B. Wärme-Kraftkopplungsanlagen)
- Glättung des Nachfrageprofils (z. B. Netzentlastung)

Verschiedene bestehende und neuartige Speichersysteme wurden auf ihre Eignung als Gebäude- bzw. Quartierspeicher untersucht. Aufgrund der Untersuchung wurden die folgenden Speichertechnologien für das Modellquartier Kreuzmatt evaluiert und auf ihre Ökobilanz untersucht (Tabelle 16).



Tabelle 16

Speichertechnologien für Modellquartier TS Kreuzmatt

Technologie	Speicherart	Speichermedium	Speicherdauer
elektrische Speicher			
Blei-Säure-Akkumulator	elektrochemisch	Blei, Schwefelsäure	Tagesspeicher
Lithium-Eisenphosphat- bzw. Cobaltoxid-Akkumulator	elektrochemisch	Lithium, Eisenphosphat bzw. Cobaltoxid	Tagesspeicher
Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator	elektrochemisch	Natrium-NiCl	Tagesspeicher
Redox-Flow-Akkumulator	elektrochemisch	Vanadium	Tagesspeicher & Saisonspeicher
H ₂ -Druckspeicher Elektrolyseur/Brennstoffzelle	chemisch	Wasserstoff	Saisonspeicher
thermische Speicher			
Wasserspeicher (Metall)	thermisch (sensibel)	Wasser	Saisonspeicher (Hybridspeicher)
Wasserspeicher (Kunststoff)	thermisch (sensibel)	Wasser	Saisonspeicher (Hybridspeicher)
Erdsondenspeicher	thermisch (sensibel)	Erdreich	Saisonspeicher (Hybridspeicher)
Eisspeicher	thermisch (sensibel und latent)	Wasser	Saisonspeicher (Hybridspeicher)
Natronlaugenspeicher (Sorptionswärmespeicher mit Natronlauge)	thermochemisch	Natronlauge	Saisonspeicher (Hybridspeicher)
Natriumacetat Latentwärmespeicher	thermisch (sensibel und latent)	Natriumacetat	Tagesspeicher

5.1 Elektrische Speicher

Stromspeicher werden für verschiedene Speicheraufgaben eingesetzt:

- Energiespeicherung zur Glättung des Nachfrageprofils, zur Produktionsoptimierung oder für Zwecke des Energiehandels
- Erbringung von Reservekapazitäten (Sekundär- und Tertiärreserve)
- Frequenzhaltung (Primärregelung)
- Engpassmanagement
- Blindleistungskompensation
- Inselbetriebs- und Schwarzstartfähigkeit



Stromspeicher weisen unterschiedliche Eigenschaften auf. Aus diesen ergeben sich die Einsatzbereiche für eine bestimmte Speicherfunktion. Speichersysteme, die eine Ausspeicherdauer von unter einer Stunde aufweisen (z. B. Schwungräder, Kondensatoren, Spulen etc.) oder solche, die im Quartierkontext nicht realistisch angewendet werden können (Druckluftspeicher, Pumpspeicherwerke, Lageenergiespeicher etc.) wurden für die Evaluation ausgeschlossen.

Der Fokus von Stromspeichern im Umfeld von Gebäuden und Quartieren liegt auf der Energiespeicherung zur Produktionsoptimierung dezentraler Eigenerzeugungsanlagen (Photovoltaik- und Wärme-Kraftkopplungsanlagen) und der Glättung des Angebot-/Nachfrageprofils. Ihre Netzeinbindung erfolgt auf der Ebene von Niederspannung (< 1 kV) oder Mittelspannung (6-30 kV).

In Abbildung 5 ist der Wirkungsgrad der im Projekt betrachteten Speichertypen dargestellt.

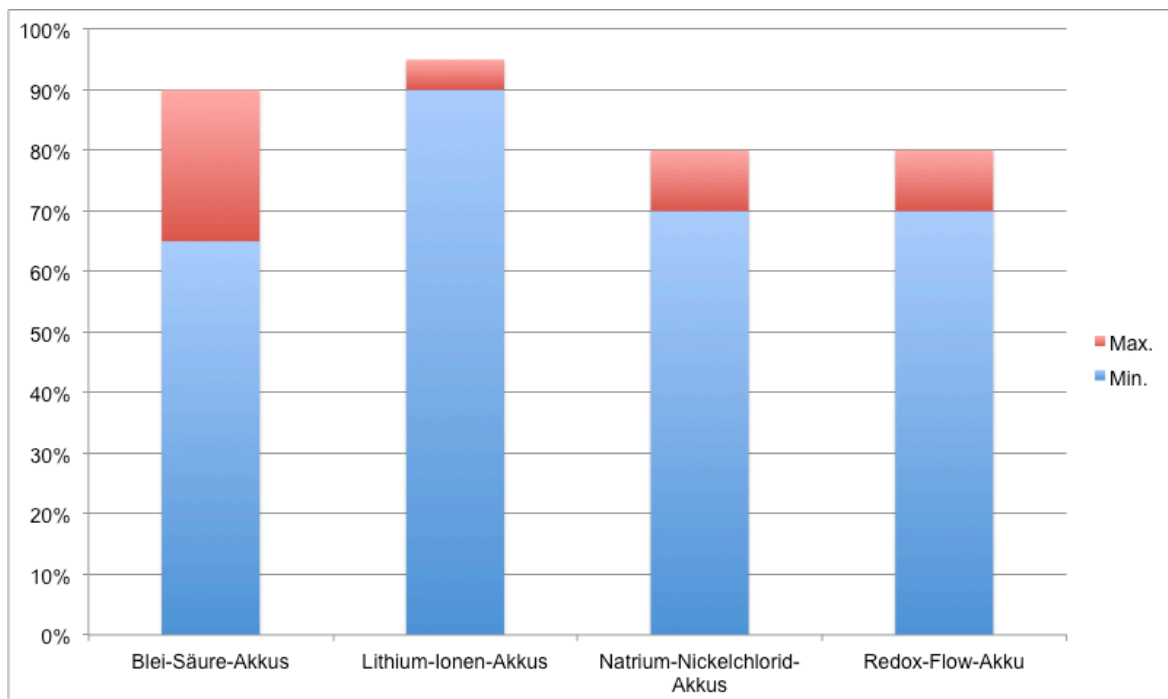


Abbildung 5

Wirkungsgrad verschiedener Stromspeicher

5.1.1 Akku-Speichersysteme

Akkumulatoren lassen sich mit verschiedenen Zelltypen aufbauen. In Abbildung 6 sind die Eigenschaften der unterschiedlichen Zelltypen zusammengefasst.

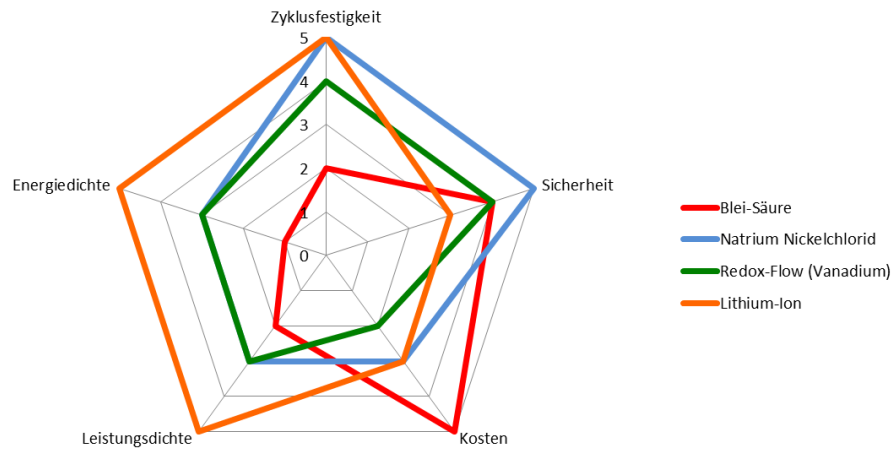


Abbildung 6 Spezifische Eigenschaften verschiedener Akku-Zellen

Von den in Abbildung 5 dargestellten Technologien sind grundsätzlich alle für einen Einsatz im Quartier geeignet. Entsprechend den spezifischen Anforderungen vor Ort gibt es heute für alle genannten Akkutechnologien Beispiele von Installationen in Quartieren. Bei allen Akkutypen ausser beim Blei-Akku sind zukünftig grosse technologische Entwicklungsschritte zu erwarten.

Neben den in Abbildung 6 aufgeführten Eigenschaften gibt es weitere, für eine optimale technische Integration relevante Parameter. Die Tabelle 17 gibt eine Übersicht von spezifischen Werten, die kommerziell verfügbare Akkus aufweisen und die bei der Integration in ein Quartier von Interesse sind.

Tabelle 17 Vergleich verschiedener Akkumulator-Speichertypen

Parameter		Blei-Säure-Akkumulator	Lithium-Ionen Akkumulator	Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator	Redox-Flow-Akkumulator
spezifische Energiedichte (Masse)	Wh/kg	24-50	50-110	80-140	13.5
spezifische Energiedichte (Volumen)	Wh/l	20-110	20-150	160	7.7
spezifische Leistung (Masse)	W/kg	200	600-2000	160	-
spezifische Entladeleistung (Kapazität)	kW/kWh	5-10	3-20	1-1.5	-
spezifische Ladeleistung (Kapazität)	kW/kWh	0.7	0.3-1	0.2-1	-
Zyklen-Lebensdauer	–	1'200-3800 (bei 50 % DOD)	2'500-8200 (bei 90% DOD)	1'750-3'750 (bei 80% DOD)	3'750-7'300 (bei 90% DOD)
Selbstentladung (in % der Gesamtkapazität)	%/Mt	3-30	3	0 (aber thermische Verluste)	<1
Energieeffizienz	%	50-85	90-97	80	50-80



Die Werte der einzelnen Zell- bzw. Akkutypen können von den Werten in Tabelle 17 abweichen.

Für verschiedene weitere Parameter wie Temperaturempfindlichkeit, Installationsposition, Alterungsprozesse bei Teilladung, etc. gibt es zwischen den verschiedenen Akkutechnologien wie auch innerhalb der gleichen Akkutypen beträchtliche Unterschiede. Diese müssen in der spezifischen Anwendung berücksichtigt werden.

Im Anhang A sind die verschiedenen Technologien kurz beschrieben. Im Folgenden sind die Stärken und Schwächen für ihren Einsatz als Quartierspeicher zusammengefasst.

5.1.2 Blei-Säure-Akkumulator

Stärken:

Die Technologie von Bleiakkumulatoren ist ausgereift und verbreitet. Es liegt viel Erfahrung beim Bau von Speichersystemen vor. Bleiakkumulatoren zählen immer noch zu den kostengünstigsten Speichersystemen und haben eine ausreichende Entladeleistung, was ein breites Einsatzspektrum ermöglicht.

Schwächen:

Bleiakkumulatoren sollten nicht für längere Zeit (typischerweise mehrere Wochen) auf einem tiefen Ladezustand (state of charge, SOC) gehalten und nicht bei Temperaturen unter Null betrieben werden. Weiter sind Bleiakkumulatoren (vor allem offene Systeme, lead acid battery flooded, LAB) vergleichsweise wartungsintensiv (regelmässige Vollladung/Gasungsladung, Säurestandskontrollen) und sehr empfindlich auf Fehlbehandlung (Überladung/Tiefentladung). Bei den elektrischen Kennzahlen sind die teilweise hohe Selbstentladung und die relativ geringe Ladeleistung zu beachten. Diese Punkte lassen keinen Einsatz als Langzeitspeicher zu. Auch können sie nur einen Teil der Spitzenströme von PV-Anlagen aufnehmen.

5.1.3 Lithium-Ionen-Akkumulator

Stärken:

Unter den Lithium-Ionen-Akkus (LIA) gibt es eine grosse Vielfalt verschiedener Zellchemien, die jeweils unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Die grosse Auswahl an verschiedenen Zellen erlaubt es, für fast jede Anwendung den passenden Akkumulator auf Li-Ionen-Basis einzusetzen. Akkumulatoren auf Basis von Lithium-Ionen-Zellen sind in der Regel wartungsarm und weniger anfällig auf nicht korrekte Behandlung als Blei-Säure-Akkumulatoren.

Schwächen:

Obwohl kleinere Fehler in der Ladung/Entladung wenig problematisch sind, braucht es für die Überwachung ein aufwendiges Batteriemanagement-System (BMS) mit verschiedenen Sicherheitsfunktionen, da verschiedene LIA bei massiver Überladung/Tiefentladung in Brand geraten können. Die Tatsache, dass die Inhaltsstoffe der meisten LIA brennbar sind, verlangt besondere Vorsicht bei der Technologiewahl und Installation.

Bei verschiedenen LIA ist auch die Bestimmung des Ladezustandes aufwendig, da der SOC nicht auf Grund der Spannung definiert ist. LIA sind heute noch teurer als Blei-Säure-Akkumulatoren.



5.1.4 Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren (Zebra)

Stärken:

Der Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator ist sicher im Betrieb, da er unbrennbar ist. Die praktisch unbegrenzte Haltbarkeit im abgekühlten Zustand macht den Akku interessant für Anwendungen, die über längere Zeiträume keine Speicherkapazität erfordern. Die äusserst geringe elektrische Selbstentladung ist technisch interessant, wird aber im Betrieb relativiert, da der Akku permanent auf einer Betriebstemperatur von ca. 300°C gehalten werden muss.

Schwächen:

Wird der Akkumulator nicht permanent gezykelt, aber dennoch in Bereitschaft gehalten, entsteht durch das erforderliche Heizen ein Standby-Verlust von ca. 100 Watt (Verlustleistung für einen Akkumulator mit ca. 20 kWh Kapazität). Der Akku hat eine begrenzte Entladeleistung und kann daher nur bedingt zur Spitzendeckung eingesetzt werden.

5.1.5 Redox-Flow-Akkumulator (Vanadium-Redox-Flow-Akkumulator)

Stärken:

Der Redox-Flow-Akkumulator kann erst ab einer gewissen Grösse sinnvoll eingesetzt werden, da eine aufwendige Konstruktion erforderlich ist. Da diese kritische Grösse bei einem Einsatz im Quartier sicher erreicht ist, eignet sich der Redox-Flow-Akkumulator sehr gut als Quartierspeicher. Der Wegfall der Selbstentladung, die freie Wahl der Kapazität und die sichere Trennung von Reaktionszone und Elektrolytspeicher sprechen für diesen Speichertyp.

Schwächen:

Heute ist der Redox-Flow-Akkumulator noch teuer im Vergleich zu den anderen Speichersystemen. Da sein Einsatz auf die Anwendung als stationärer Speicher beschränkt ist, wird seine Entwicklung nicht forciert.

5.1.6 Wasserstoffspeicher

Stärken:

Ähnlich wie beim Redox-Flow-Akkumulator ist auch für die Wasserstoffspeicherung eine gewisse Leistungsgrösse erforderlich, die aber im Quartierspeicher erreicht wird. Da die Energieträger Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser hergestellt werden, sind die Kosten für grosse Anlagen primär vom Speicherbau abhängig und somit gut planbar. Wasserstoffspeicherung ist aktuell die einzige Technologie, um mit kalkulierbaren Kosten eine Langzeitspeicherung von Strom auf Quartierebene zu realisieren. Auch die Umweltbelastung wird für diese Technologie als unproblematisch betrachtet.

Schwächen:

Die hohen Umwandlungsverluste erlauben nur einen wirtschaftlichen Einsatz als Saisonspeicher. Die grossen Speicher für Wasserstoff und Sauerstoff verlangen in der Regel die Ausscheidung von Ex-Zonen. Im Praxisbetrieb haben sich noch keine klar zu beziffernde Standzeiten der Brennstoffzellen und Elektrolyseure ergeben. Wasserstoff ist aktuell als Energie- bzw. Stromspeicher noch mit hohen Kosten verbunden.



5.2 Thermische Speicher

Die in Tabelle 16 dargestellten thermischen Speicher eignen sich alle als Saisonspeicher. Sie liefern im Winter Heizwärme und werden in der Sommersaison wieder regeneriert. Die wichtigsten Kennzahlen der verschiedenen Speichertechnologien sind in Tabelle 18 zusammengestellt.

Tabelle 18 Kennzahlen thermischer Speicher

		Wasser- speicher	Erdsonden- speicher	Natronlaugen- speicher (Sorptions- wärmespei- cher mit Natronlauge)	Latentwärme- speicher (Eis)	Latentwärme- speicher (Natrium- acetat)
Parameter						
max. spezifische Speicherkapazität (Volumen)	kWh/m ³	80 @ ΔT 70 K	15 - 30	440	83	87 ohne sensiblen Anteil
Speichervolumenfaktor im Vergleich mit Wasser	–	1	3 - 5	0.2	1	0.3 - 0.9
Temperaturniveau	°C	0 °C - 100 °C	0 °C - 85 °C	60 °C	0 °C - 20 °C	60 °C - 80 °C
spezifische Speicherkosten (Kapazität)	CHF/kWh	> 4	ca. 1	0.75	40	45

Mit den spezifischen Eigenschaften können alle aufgeführten thermischen Speicher gut in die Energieversorgung von Quartieren integriert werden. Sämtliche bis heute entwickelten thermischen Speichertechnologien sind von der Grösse (Speicherkapazität) her auf die Anwendung in Quartieren und Städten limitiert, da lange Wärmetransportwege, im Gegensatz zum Strom, mit grossen Verlusten verbunden sind.

Die Vielfalt an möglichen Temperaturniveaus beim Laden und Entladen (unterschiedliche Exergie-Niveaus) der betrachteten Speichersysteme erfordert entsprechend angepasste Heizkonzepte. Die Speichertechnologie kann daher nicht losgelöst vom entsprechenden Heizsystem betrachtet werden. Eine Darstellung der Stärken und Schwächen für den Einsatz als Quartierspeicher auf Ebene Speichertechnologie ist daher, im Gegensatz zu den elektrischen Speichern, nicht zielführend. Die Eigenschaften der verschiedenen Speichertechnologien sind im Anhang A dargestellt. Die Beurteilung der thermischen Speichertechnologien findet sich im Kapitel Energie- und Umweltbilanz.



6 Speichersmodelle

6.1 Quartierspeicher

6.1.1.1 Modellaufbau

In Abbildung 7 ist der Aufbau des Quartierspeichersystems in der Simulationssoftware IDA ICE dargestellt. Dabei sind auf der linken Seite die Inputparameter aufgeführt, auf der rechten Seite der thermische Speicher. Dazwischen sind die Elemente enthalten wie Verbraucher, Erzeuger und elektrischer Speicher.

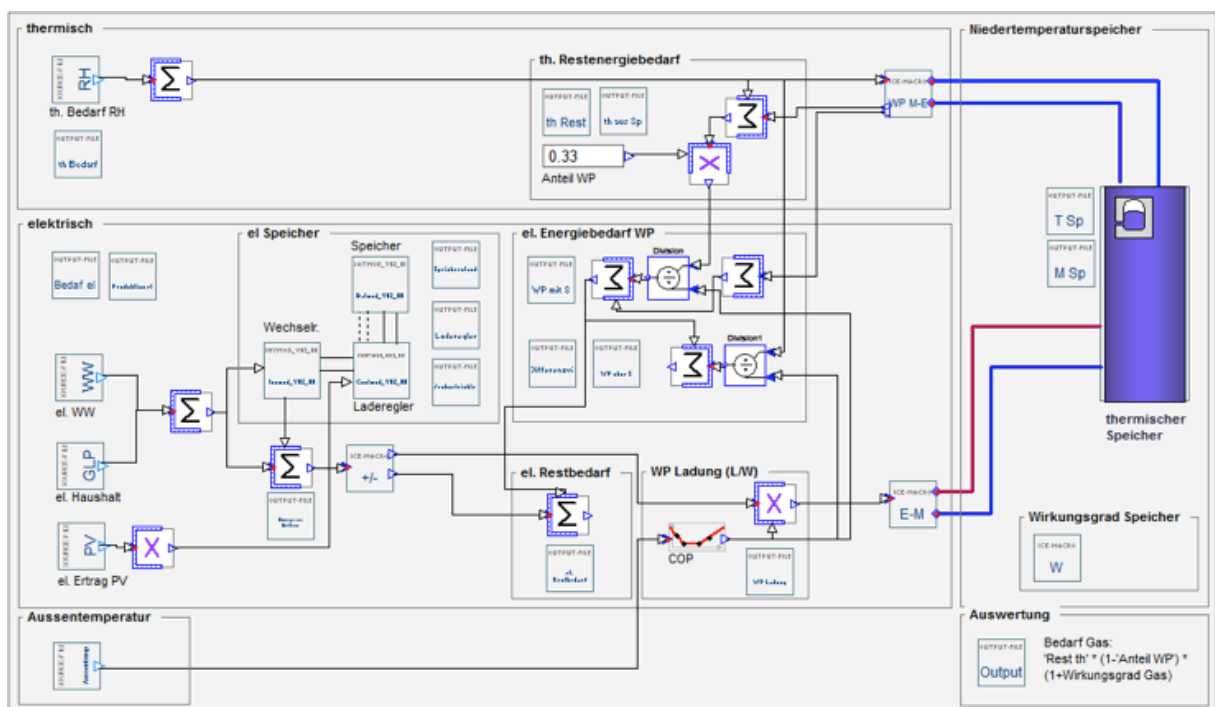


Abbildung 7 Simulationaufbau des Quartierspeichersystems in der Simulationssoftware IDA ICE

Aus den elektrischen Liefer- und Bezugsprofilen wird der Stromüberschuss gerechnet, der über eine Wärmepumpe mit der Aussenluft als Quelle in den thermischen Quartierspeicher geführt wird. Die Umrechnung der Energie in Massenstrom erfolgt in einem Makro, das die thermischen Leistungen in Massenströme umrechnet.

6.1.1.2 Thermischer Speicher

Als thermischer Speicher wird in der Grundversion ein herkömmlicher Wasserspeicher verwendet. In einer weiteren Variante werden Erdsonden als Speicheroption betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass in den Gebäuden keine Heizungspeicher installiert sind.

6.1.1.3 Wärmepumpen

Die Energie aus dem thermischen Speicher wird über die Wärmepumpe geführt. Es wird davon ausgegangen, dass das System über eine Wasser/Wasser-Wärmepumpe verfügt, die alternativ mit



Aussenluft (Splitgerät) oder über den Speicher (via Niedertemperaturnetz) gespeist wird. Aus diesem Grund ist die Arbeitszahl (COP) in der Berechnung in Abhängigkeit der Quellentemperatur aufgeführt. Eine obere Temperaturbegrenzung verhindert, dass die Temperatur im thermischen Speicher zu hoch wird, wenn zu viel Energie für die Speicherung vorhanden wäre. Bei der Entladung ist eine minimale Speichertemperatur vorgegeben, damit die Speichertemperatur nicht unrealistisch weit abfallen kann.

Da die Wärmepumpe den Speicher als Wärmequelle nutzt, wird die Speicherenergie mit dem COP multipliziert.

6.1.1.4 Elektrischer Speicher

Der elektrische Speicher wird als Tagesspeicher eingesetzt. Es wird etwa so viel Energie darin gespeichert, wie in der nachfolgenden Nacht von den verschiedenen Verbrauchern wieder gebraucht wird. Daraus ergibt sich die Speicherkapazität.

Das elektrische Speichermodell mit dem dazugehörigen Wechselrichter und Laderegler wurde von der Bachelor-Diplomarbeit von [Frey & Rüegger, 2015] übernommen und für die Simulation angepasst.

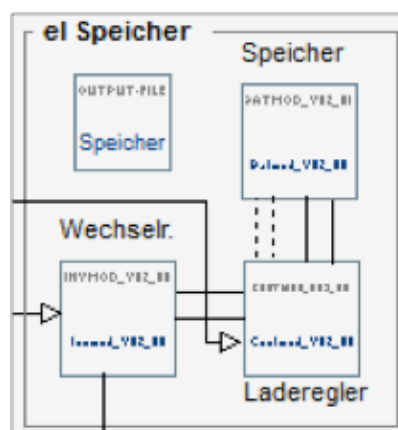


Abbildung 8 Modell des Elektrospeichers

Das Elektrospeicher/Wechselrichtersystem wandelt den Gleich- in Wechselstrom um und umgekehrt. Ein Laderegler sorgt dafür, dass zuerst der aktuelle Strombedarf gedeckt wird und die überschüssige Energie in den thermischen Speicher geführt wird. Der dann noch vorhandene Überschuss wird ins Netz eingespeisen. Detaillierte Beschreibungen zu diesem Modell sind in der Arbeit von [Frey & Rüegger, 2015] zu finden.

Für die Bestimmung der Grösse des elektrischen Speichers werden unterschiedliche Varianten berechnet. Die Inverterleistung des Wechselrichters wird anhand der Akkumulatorgrösse bestimmt mit dem Verhältnis 1:1.5 (in der Praxis verwendete Auslegegrösse: 1:1 für Haushaltsanlagen, 1:2 für Grossanlagen). Die Ladekapazität wirkt nicht beschränkend auf den Bezug aus dem Elektrospeicher.

6.2 Hybridspeicher

Die Energy Box ist ein Hybridspeicher, der von der Empa für die autarke Wohnzelle SELF entwickelt wurde. Dieses Speichersystem besteht aus einem Tages- und einem Saisonspeicher. Als Tagesspeicher dient ein Block Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Für die saisonale Speicherung wird die solar erzeugte elektrische Energie mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt und in Metallhydridtanks gespeichert. Bei Bedarf kann mit dem Wasserstoff aus den Tanks über Brennstoffzellen wieder elektrische Energie erzeugt werden. Das SELF nutzt neben dem Strom den Wasserstoff auch direkt für den Gaskochherd.



Für das vorliegende Projekt ist vor allem der Teil der saisonalen Speicherung von Interesse. Deshalb wurde ein entsprechendes Simulationsmodell aufgebaut. Für die Berechnung des saisonalen Speichers der Energy Box in IDA ICE wurden Erfahrungswerte der Empa für die unterschiedlichen Komponenten verwendet.

Bei dieser Simulation wird analog zur thermischen Speichersimulation nur mit thermischen und elektrischen Leistungen gerechnet, da die Betrachtung von Wasserstoff zu weit führen würde.

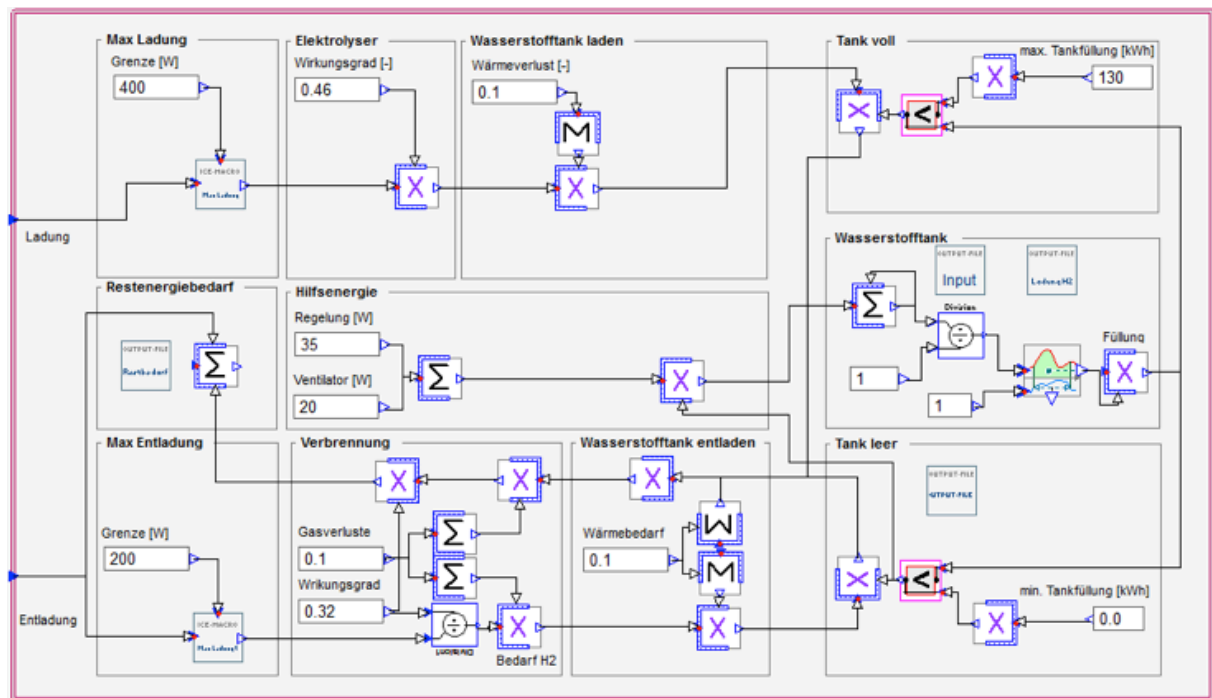


Abbildung 9

Simulationsmodell IDA ICE für die Energieversorgung (Energy Box) der Empa-Wohnzelle SELF

Die überschüssige elektrische Energie wird nach Abzug des direkten Verbrauches und der Tages-speicherung in die Energy Box geführt (Ladung). Für die Elektrolyse wird im Prototyp der Empa lediglich ein Wirkungsgrad von 46% erreicht. Durch das Laden des Wasserstofftanks entstehen zusätzliche Wärmeverluste. Diese Abwärme könnte für die Raumheizung oder die Brauchwarm-wassererzeugung genutzt werden, das ist aber in diesem Modell, wie auch in der Energy Box, nicht vorgesehen. Da diese Wärme aber trotzdem abtransportiert werden muss, um den Speicher nicht zu überhitzen, ist ein Ventilator eingebaut (Hilfsenergie). Zusätzlich zu der Ventilatorenergie wird der Energieverbrauch der Regelung als Hilfsenergie in das System eingerechnet.

Der Speicher selbst wird mit Hilfe eines Integrators dargestellt. Dieser wird geladen bzw. entladen, bis jeweils die maximale bzw. die minimale Ladekapazität erreicht ist.

Die Entladung des Wasserstoffspeichers wird durch den elektrischen Energiebedarf ausgelöst. Auf diesen Verbrauch werden die anfallenden Verluste aufgerechnet, die bei der Umwandlung des Wasserstoffes in der Brennstoffzelle entstehen, sowie der Wärmebedarf, der nötig ist, um den Speicher zu entladen. Die daraus resultierende Energiemenge wird dem Speicher entnommen. Je nachdem wie viel Energie aus dem Speicher gezogen werden kann, ergibt sich ein Restenergiebedarf, der angibt, wie viel elektrische Energie noch mit einer alternativen Quelle erzeugt werden muss, um den gesamten Energiebedarf zu decken.



Das erarbeitete Simulationsmodell wurde mit den gemessenen Werten [Fumey B. & Fritschi, M. 2014] verglichen. Gemäss [Fumey B. & Fritschi, M. 2014] weist die Energy Box einen resultierenden Wirkungsgrad für die saisonale Speicherung von ungefähr 15% auf. Dieser Wert wird, wie beim Simulationsmodell, vom elektrischen Input zum elektrischen Output bestimmt. Zu beachten ist, dass gemäss den Werten der Empa in diesem Wirkungsgrad die Hilfsenergie für die Regelung und den Ventilator nicht eingerechnet wird, diese wurden im Tagesspeicher betrachtet. Im Simulationsmodell hingegen werden diese berücksichtigt, da die Werte für die Bewirtschaftung des Wasserstofftanks anfallen. Unter der Voraussetzung, dass die Hilfsenergie nicht betrachtet wird, kann mit dem Simulationsmodell ebenfalls ein Wirkungsgrad von rund 15% erreicht werden.

6.3 Sorptionsspeicher

Sorptionsspeicher speichern im Gegensatz zu sensiblen Wärmespeichern lediglich das chemische Potential, mit dem bei Bedarf vorhandene Niedertemperaturwärme auf das benötigte Nutztemperaturniveau angehoben werden kann. Das ermöglicht eine verlustlose Langzeitspeicherung mit hoher Energiedichte.

Im Wesentlichen wurden bisher Sorptionsspeicherkonzepte auf der Basis von Adsorption entwickelt. Durch die Verwendung flüssiger Speichermedien (Absorptionsspeicher) ist durch die einfache Transportmöglichkeit in Rohrleitungen eine Entkopplung von Speichereinheit (Tank) und Übertragungseinheit (Absorber / Desorber – Verdampfer / Kondensator) und somit die Trennung von Kapazität und Leistung des Speichers möglich.

Aufgrund seiner thermodynamischen Eigenschaften eignet sich Wasser sehr gut als Arbeitsstoff in Verbindung mit hygroskopischen Salzlösungen, Basen oder Säuren. Nachteilig ist der geringe Dampfdruck des Arbeitsmittels bei Nutzung von Niedertemperaturwärme, was einen Betrieb der Speichertechnik unterhalb des Umgebungsdruckes (Vakuum) notwendig macht.

Absorptionsprozesse besitzen, bedingt durch die für den Stoff- und Wärmetransport notwendigen grossen Übertragungsflächen, ein sehr träges dynamisches Verhalten, was zu erheblichen thermodynamischen Verlusten (Mischungs- und Wärmeübertragungsprozesse) im alternierenden Betrieb führt. Zur Vermeidung dieser Verluste ist es von Vorteil, wenn der Sorptionsspeicher in einem möglichst konstanten Betriebszustand arbeitet.

6.3.1.1 Aufbau des Speichermodells

Das Speichermodell (Abbildung 10) verbindet die solarthermische Energiegewinnung (ST – Solarthermischer Kollektor) und die Hydraulik der thermischen Energieversorgung (rot – Vorlauf / blau – Rücklauf) mit der photoelektrischen Energiegewinnung (PV – Photovoltaikanlage) sowie der elektrischen Versorgung (hellblau – elektrische Leitungen) und Netzeinbindung (Einspeisung / Bezug).

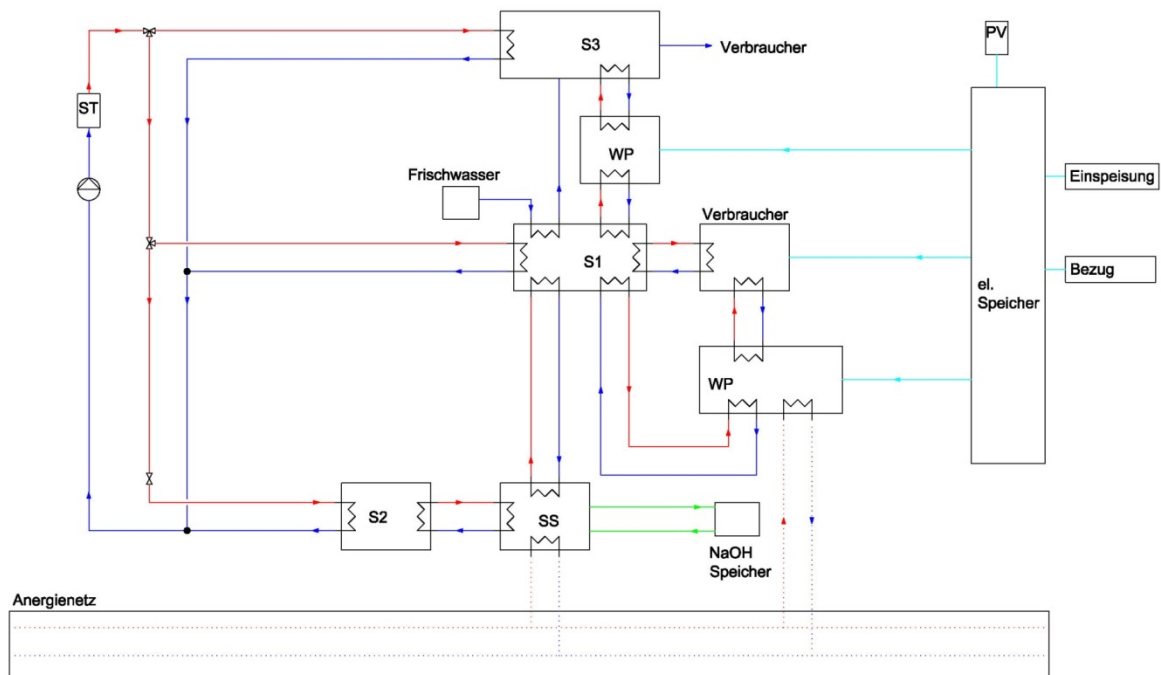


Abbildung 10

Modell des Energiesystems mit Sorptionsspeicher

Das thermische Modell besitzt verschiedene Temperaturebenen:

- Niedertemperaturwärme (Umgebungswärme, Niedertemperaturnetz, solarthermische Energiegewinnung auf niedrigem Temperaturniveau – Pufferspeicher S2 im Heiz- bzw. Winterbetrieb des Sorptionsspeichers SS)
- Heiztemperaturniveau (Verbraucher) – abhängig von Heizsystem, Gebäudeisolierung und Umgebungstemperatur => Heizkurve
- Temperaturniveau der Warmwasserbereitstellung (Warmwasserspeicher S3)
- Temperaturniveau der Beladung des Sorptionsspeichers (Pufferspeicher S2 im Regenerations- bzw. Sommerbetrieb des Sorptionsspeichers SS)

Der Sorptionsspeicher (SS) arbeitet zwischen dem Temperaturniveau der Niedertemperaturwärme und einem Temperaturniveau für die Grundlastwärmeversorgung (Pufferspeicher S1). Die Pufferspeicher S1 und S2 sind so zu bemessen, dass sowohl der Absorptionsprozess beim Entladen des Speichers (Winterbetrieb) als auch der Desorptionsprozess bei der Speicherbeladung (Sommerbetrieb) stationär und kontinuierlich über längere Zeitintervalle (mehrere Stunden bis Tage) ablaufen können.

Kompressionswärmepumpen (WP) mit einem niedrigen Temperaturhub gleichen die Temperaturdifferenz zwischen Grundlastwärme (Pufferspeicher S1) und der von der Umgebungstemperatur abhängigen Temperatur des Heizwärmebedarfs (Verbraucher) aus. Bei unzureichendem Speicherfüllgrad (S1 und S2) kann die Wärmepumpe auch bei erhöhtem Temperaturhub die gesamte Wärmeversorgung sicherstellen (Versorgungssicherheit). Für den Temperaturhub des Brauchwarmwassers zwischen Heizwassertemperatur (S1) und Warmwassertemperatur (S3) ist ebenfalls eine elektrisch angetriebene Wärmepumpe implementiert.



6.3.1.2 Implementierung und Ziel der Modellsimulation im SPEQUA-Projekt

Das Sorptionsspeichermodell wurde in das dynamische Energiesimulationsprogramm TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation Program) integriert. Die durch Parametervorgaben definierte Wärmeversorgung lässt sich mit dem TRNSYS-Modell in Stundenschritten über eine Jahresperiode rechnerisch simulieren. Verschiedene verfügbare Kollektorsysteme sowie Standortfaktoren (Wetterdaten, Kollektorausrichtung etc.) lassen sich mit der zur Verfügung stehenden Datenbasis einfach abbilden.

6.3.1.3 Systemoptimierung

Ausgehend von einer nur mit thermischen Kollektoren betriebenen Systemkonfiguration für ein Mehrfamilienhaus mit einem Wärmebedarf von 2 MWh pro Person und Jahr (50°C Heizwasservorlauf) wurde der Einfluss verschiedener Randbedingungen, wie die verfügbare Kollektorfläche und Speicherkapazität, untersucht. Dabei wurde als Speichermedium eine Natriumhydroxydlösung gewählt, welche im beladenen Zustand eine NaOH-Konzentration von 50 Ma% besitzt. Der Konzentrationsunterschied zwischen beladenem und entladenen Speichermedium wird mit 10% festgelegt. Zur Beurteilung der Effizienz des Systems dient der nicht durch Solarenergie abgedeckte Energiegesamtbedarf innerhalb einer Jahresperiode [Brunner D., 2014].

In der Abbildung 11 ist die durch den Sorptionsspeicher erzielbare Energieeinsparung (d.h. die Reduzierung des nicht durch Solarenergie abgedeckten Jahresenergiebedarfes pro Person) in Abhängigkeit von der verfügbaren Kollektorfläche dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass der Gewinn durch den saisonalen Speicher mit wachsender Kollektorfläche stark abnimmt.

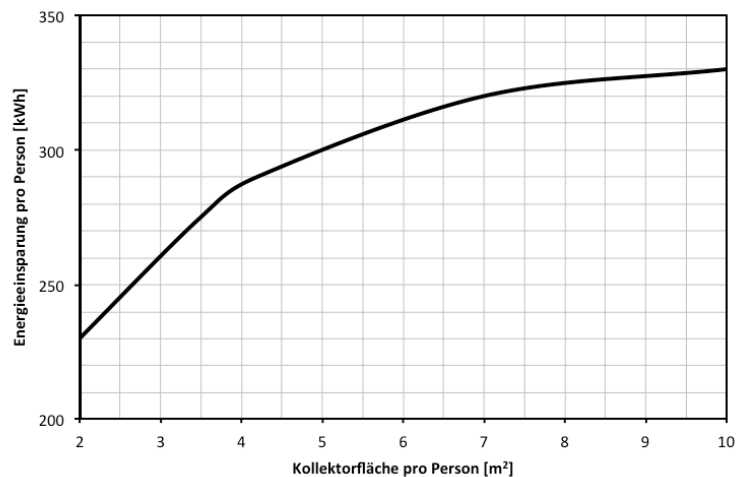


Abbildung 11

Jährliche Energieeinsparung pro Person durch den Speicherbetrieb in Abhängigkeit von der verfügbaren Solarkollektorfläche [Brunner D., 2014]

Eine differenzierte Betrachtung des Wärmebedarfes nach dem benötigten Temperaturniveau zeigt Abbildung 12. Hier ist der auf den drei Temperaturniveaus Warmwasser (S3), Heizung (S1) und Niedertemperaturwärme (S2) benötigte Jahresenergiebedarf pro Person in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Speicherkapazität dargestellt.

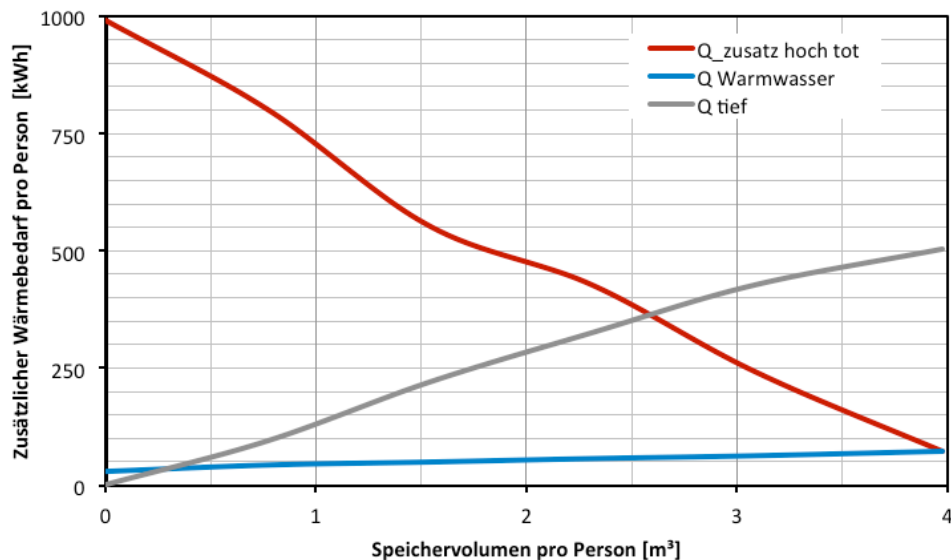


Abbildung 12

Jährlicher, nicht durch solare Erzeugung abgedeckter Wärmebedarf pro Person in Abhängigkeit vom verfügbaren Sorptionsspeichervolumen [Brunner D., 2014]

Die Simulationen zeigen, dass die Effizienz saisonaler Sorptionsspeicher mit zunehmender Kollektorfläche abnimmt. Weiterhin kann der notwendige Niedertemperaturwärmebedarf in der Winterperiode nicht vollständig durch Solarwärme bereitgestellt werden. Eine Erhöhung der Speicherkapazität führt jedoch zu einer Verschiebung des Wärmebedarfes auf Heiztemperaturniveau (im Beispiel 50°C) auf ein sehr viel niedrigeres Temperaturniveau (im Beispiel 20°C). Dieses kann beim Einsatz einer Kompressionswärmepumpe mit annähernd doppelter Effizienz, d.h. halbem Bedarf an elektrischer Antriebsenergie erzeugt werden.

Der mit der Simulationsrechnung ermittelte solare Deckungsbeitrag für die Wärmeversorgung eines Mehrfamilienhauses mit thermischen Solarkollektoren und einem saisonalen Sorptionsspeicher liegt bei einer Kollektorfläche von 2 m² und einer Speicherkapazität von 4 m³ pro Person bei ca. 75%.

Die Simulationsergebnisse lassen darauf schliessen, dass sich der solare Deckungsanteil der sorptionspeicherunterstützten Wärmeversorgung durch eine Kombination mit einer Kompressionswärmepumpe, die ihre Antriebsenergie über PV-Strom erhält, erheblich steigern liesse. Dabei kann das Speichersystem auf einem niedrigeren Temperaturniveau betrieben werden, wodurch sich der nicht solarthermisch abdeckbare Bedarf an Niedertemperaturwärme verringert, da die thermischen Verluste an den Kollektoren niedriger ausfallen. Weiterhin kann die Effizienz der verfügbaren Fläche für Solarkollektoren durch eine Kombination von Solarthermie und Photovoltaik optimiert werden. Der nicht durch eigene solare Energieerzeugung abgedeckte Wärmeenergiebedarf kann durch den Sorptionsspeicher auf ein niedriges Temperaturniveau verschoben werden, wodurch sich im Falle der Bereitstellung über eine Kompressionswärmepumpe hohe COP-Werte ergeben und damit der elektrische Energiebedarf entsprechend gering ist.



7 Speichersimulation im Modellquartier

Die erhobenen und simulierten Verbrauchsdaten des Quartierteils mit den 18 Gebäuden im Quartier TS Kreuzmatt sind Basis für die Bewertung der untersuchten Speichertechnologien. Für die Verbrauchsszenarien in den Jahren 2035 und 2050 werden die thermischen und elektrischen Speicher auf ihre Einbindung in das Energieversorgungssystem untersucht.

7.1 Untersuchte Konfigurationen und Szenarien

7.1.1.1 Thermische Speicher

Für die Simulation wird davon ausgegangen, dass im Modellquartier ein Niedertemperaturwärmenetz aufgebaut wird, das einen zentralen thermischen Speicher mit den Gebäuden verbindet.

Es wurden die folgenden Varianten untersucht:

- kein Speicher
- Wassertankspeicher
- Erdsondenspeicher

7.1.1.2 Elektrische Speicher

Auf der elektrischen Seite wird ein Kurzzeitakkumulatorspeicher vorgesehen. Der Speicher dient dazu, den Tagesbedarf des Stromes für Grundlast und die Wärmepumpe zur Brauchwarmwassererzeugung abzudecken. Der Elektrospeicher liefert aber keinen Strom für die Wärmepumpe im Raumheizungs-betrieb.

7.1.1.3 Wärmepumpen

Einzelne Gebäude verfügen über eine Wärmepumpe, die Energie aus dem Wärmenetz zieht bzw. rückspeist. Die Wärmepumpen werden mit dem elektrischen Überschuss betrieben, der dann vorliegt, wenn der Elektroverbrauch für Quartier und Speicherakkumulatorladung gedeckt ist. Damit kann der Stromüberschuss von einem Gebäude mit einer Gasheizung in einem Gebäude mit Wärmepumpe für Heizwärme genutzt werden. Thermische Verluste, die über das Netz entstehen, sowie die Möglichkeit der direkten Nutzung der thermischen Energie im Gebäude werden nicht berücksichtigt.

7.2 Simulationskonzept

In Abbildung 13 ist die Übersicht der Quartiersimulation dargestellt. Am Projekt arbeiten verschiedene Institutionen. Die einzelnen Bereiche mit den zuständigen Projektpartnern sind mit Farbe eingerahmt. Die Gesamtsimulation des Quartiers wurde von der Hochschule Luzern T&A (HSLU) durchgeführt. Die Simulation erfolgte auf der Basis von IDA ICE.

Im Verlauf des Projektes wurde festgestellt, dass die Betrachtung des elektrischen Kurzzeitspeichers nicht losgelöst von der Simulation des thermischen Speichers gemacht werden darf. Auch der Energiebedarf der Wärmepumpe konnte nicht als Profil eingelesen werden, da sich dadurch eine direkte Rückkopplung mit dem thermischen Speicher ergibt. Es wurden die Inputprofile der Simulationen der anderen Institute eingerechnet. Die Daten werden in einem gängigen Tabellenformat zur Verfügung gestellt und beinhalten die jeweiligen Energien bzw. mittleren Leistungen pro Stunde [W] bzw. [kW].



Folgende Daten werden als Input geliefert:

- elektrischer Energieverbrauch Haushaltsstrom (ZHAW)
- elektrischer Energieverbrauch Elektroboiler (ZHAW)
- elektrischer Energieverbrauch Wärmepumpe (BWW und Heizung) (ZHAW)
- thermischer Energieverbrauch Raumheizung (Empa)
- elektrischer Energieertrag Photovoltaik (ZHAW)

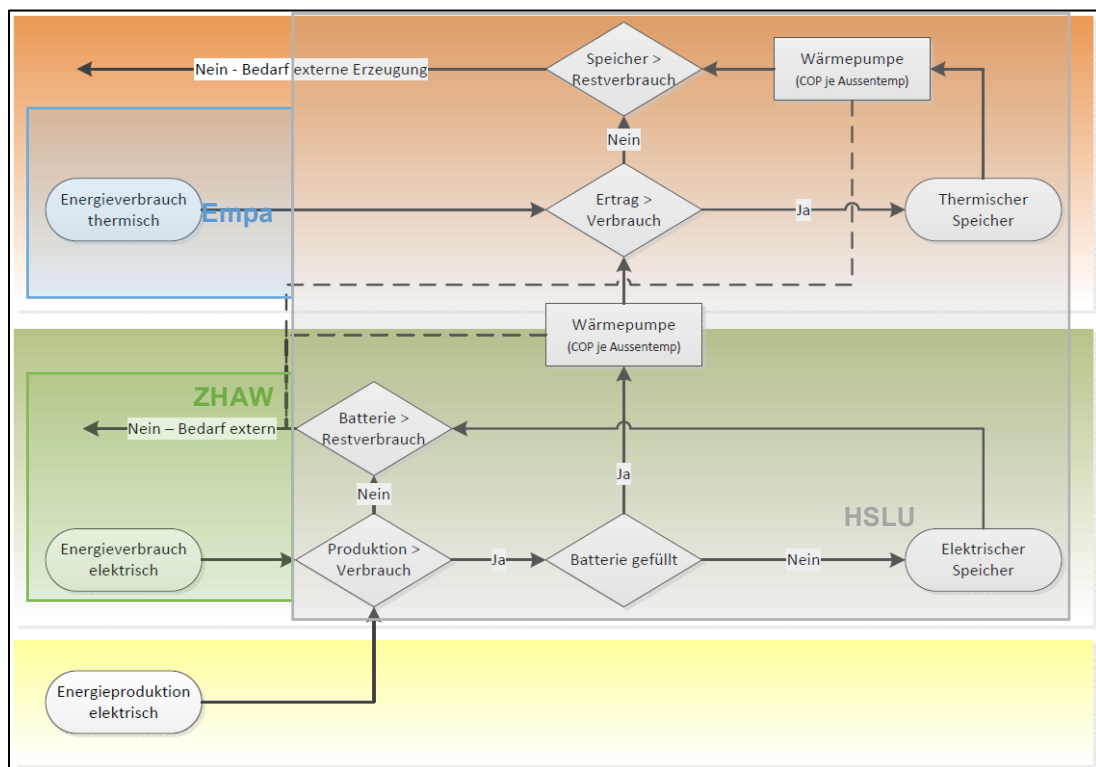


Abbildung 13

Übersicht über das Simulationskonzept für das Modellquartier und das dabei verwendete Regelungskonzept für die Speicher

Die Energieverbrauchswerte für den Haushaltsstrom, die Erträge der Photovoltaikanlage sowie der Wärmebedarf für die Raumheizung können direkt in die Simulation integriert werden. Das Profil für die benötigte Energie für die Warmwassererzeugung musste generiert werden.

Wenn ein Gebäude einen Elektro-Wassererwärmer besitzt, wird die benötigte Energie diesem Profil zugeordnet. Besitzt es jedoch eine Wärmepumpe, wird der Warmwasserverbrauch dem Wärmepumpenprofil zugerechnet, das bereits die benötigte Energie für die Raumheizung erzeugt. Wird das Warmwasser über eine andere Energiequelle erzeugt, wird es in diesen Profilen nicht berücksichtigt.



Aus diesem Grund mussten die Warmwasserprofile erstellt werden. Es wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die Energie, die über andere Erzeuger (Gas) generiert wird, wird nicht separat in die Simulation eingerechnet, sondern als jährlicher thermischer Energiebedarf ausgewiesen.
- Wenn Warmwasser mit der Wärmepumpe erzeugt wird, könnte die benötigte Energie analog zum Gesamtprofil der Wärmepumpe skaliert werden. Dies geht in diesem Fall aber nicht, da es im Sommer keinen Energiebedarf für die Raumheizung, aber trotzdem Warmwasserverbrauch gibt.
- Erzeugung komplett neuer Profile: Bedarf Warmwasser 1'800 Volllaststunden pro Jahr. Dies ergibt knapp 5 Stunden pro Tag. Im Tagesprofil wird die WP zwischen 10:00 und 14:00 Uhr betrieben, im Nachtfall zwischen 24:00 und 05:00 Uhr.

Die Verbrauchswerte wurden jeweils pro Gebäude erzeugt und den drei Quartierteilen Fryma, Parkweg und Roberstenstrasse zugeordnet. Für die Simulation der thermischen Speicher wurde das ganze Quartier der drei Unterquartiere betrachtet.

7.3 Szenarien

Die Simulationen wurden für die nachfolgenden Szenarien durchgeführt:

- **Effizienz 2035 (EFF35)**
voraussichtlicher Energiebedarf und -produktion für 2035 gemäss der Entwicklung der Energiestrategie des Bundes Szenario "Effizienz"
- **Effizienz 2050 (EFF50)**
voraussichtlicher Energiebedarf und -produktion für 2050 gemäss der Entwicklung der Energiestrategie des Bundes Szenario "Effizienz"
- **Max 2035 (MAX35)**
voraussichtlicher Energiebedarf für 2035 gemäss der Entwicklung der Energiestrategie des Bundes Szenario "Effizienz"; Entwicklung der Energieproduktion mit maximal möglicher PV-Produktion und nur noch Wärmepumpen bis 2050
- **Max 2050 (MAX50)**
voraussichtlicher Energiebedarf für 2050 gemäss der Entwicklung der Energiestrategie des Bundes Szenario "Effizienz"; maximal mögliche PV-Produktion und gesamte Wärmeerzeugung durch Wärmepumpen

7.3.1.1 Simulations-Varianten

Für die Simulationen der Quartierspeicher wurden die Varianten gemäss Tabelle 19 untersucht.



Tabelle 19 Übersicht der simulierten Szenarios

Variante	Speicher	Szenario	Charakteristik
<i>Wasserspeicher</i>			
V0	ohne	2035 (EFF35)	nach Energieeffizienzpfad
V01	ohne	2050 (EFF50)	nach Energieeffizienzpfad
V10	mit	2035 (EFF35)	nach Energieeffizienzpfad
V11	mit	2050 (EFF50)	nach Energieeffizienzpfad
V20	mit	2035 (MAX35)	maximaler Ausbau PV
V21	mit	2050 (MAX50)	maximaler Ausbau PV, alles WP
<i>Erdsondenspeicher</i>			
V30	mit	2035 (EFF35)	nach Energieeffizienzpfad
V31	mit	2050 (EFF50)	nach Energieeffizienzpfad
V40	mit	2035 (MAX35)	maximaler Ausbau PV
V41	mit	2050 (MAX50)	maximaler Ausbau PV, alles WP
V42	mit	2050 (MAX50)	maximaler Ausbau PV, alles WP, höhere Sondenzahl

7.4 Speichervarianten

7.4.1 Wasserspeicher

Es wird davon ausgegangen, dass der Wasserspeicher im Erdreich aufgebaut ist. Deshalb ist der Speicher mit einem U-Wert von $0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ gedämmt und von einer konstanten Aussentemperatur von 10°C umgeben.

Der Speicher ist geschichtet und die Anschlüsse dementsprechend angeordnet. Die Speichergösse wird so bestimmt, dass die überschüssige elektrische Energie (nach der elektrischen Tagesspeicherung) aufgenommen werden kann. Die Speicherbewirtschaftung schaut, dass der Speicher nicht über zu lange Zeit komplett gefüllt ist, da sonst keine Energie mehr aufgenommen werden kann.

7.4.2 Erdsondenspeicher

Erdsonden können als Wärmespeicher und -quelle dienen. Die Auslegung gestaltet sich als aufwendiger. Da der Simulationsaufwand für die Erdsonden auch bedeutend grösser ist als bei den Wasserspeichern, wurde hier keine Variantenstudie durchgeführt und für die einzelnen Szenarien nur jeweils ein Erdsondenfeld simuliert.

Die Grösse der Felder wurde anhand des thermischen Energiebedarfes und des Anteils Wärmepumpe an der Erzeugung ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass eine Sonde 200 m lang ist und pro Meter etwa die üblichen 60 W gewonnen werden können.



7.4.3 Elektrospeicher

Für die Betrachtung der thermischen Speicher wurde entschieden, dass auch die Elektrospeicher als Tagesspeicher ausgelegt werden sollen. Deshalb wurden die elektrischen Speichergrössen gemäss Tabelle 20 definiert.

Tabelle 20 elektrische Speichergrössen

Variante	Speichergrösse	Ladekapazität
	[kWh]	[kW]
EFF35	100	150
EFF50	200	300
Max35	300	450
Max50	500	750

7.4.4 Simulationsmatrix

In der Simulationsmatrix (Tabelle 21 und Tabelle 22) werden die verwendeten Parameter für die einzelnen Simulationsgruppen dargestellt.

Tabelle 21 Simulationsmatrix Wasserspeicher

Nr.	Beschrieb	Grundlage	Grösse	Anteil WP
[-]		[-]	[m ³]	[-]
V0	ohne Speicher: Bedarfsszenario 2035 mit Produktion nach Energieeffizienzpfad	EFF35	-	0.21
V01	ohne Speicher: Bedarfsszenario 2050 mit Produktion nach Energieeffizienzpfad	EFF50	-	0.33
V10	mit Speicher: Bedarfsszenario 2035 mit Produktion nach Energieeffizienzpfad	EFF35	1	0.21
V11	mit Speicher: Bedarfsszenario 2050 mit Produktion nach Energieeffizienzpfad	EFF50	1	0.33
V20	mit Speicher: Maximaler Ausbau PV, Bedarfsszenario 2035	MAX35	4'524	0.34
V21	mit Speicher: Maximaler Ausbau PV, Bedarfsszenario 2050, alles WP	MAX50	14'137	1.00



Tabelle 22 Simulationsmatrix Erdsonden

Nr.	Beschrieb	Grundlage	Anzahl Sonden	Anteil WP
		[-]	[Stk.]	[-]
V30	mit Speicher: Bedarfsszenario 2035 mit Produktion nach Energieeffizienzpfad	EFF35	16	0.21
V31	mit Speicher: Bedarfsszenario 2050 mit Produktion nach Energieeffizienzpfad	EFF50	24	0.33
V40	Maximaler Ausbau PV, Bedarfsszenario 2035	MAX35	28	0.34
V41	Maximaler Ausbau PV, Bedarfsszenario 2050, alles WP	MAX50	68	1.00
V42	Maximaler Ausbau PV, Bedarfsszenario 2050, alles WP, höhere Sondenzahl	MAX50	120	1.00

7.4.5 Bestimmung Speisetemperatur

Neben der Art des Speichers stellt sich die Frage, mit welcher Temperatur der Speicher geladen werden soll. In einem ersten Simulationskonzept wurde davon ausgegangen, dass die Speisetemperatur maximal der Heiztemperatur im Quartier entsprechen soll (40°C), denn darauf sind die Wärmepumpen grundsätzlich ausgelegt. Für das Erdreich wurde eine Temperatur von 20°C angenommen, da diese Temperatur vertretbar ist für die Erwärmung des Erdreiches.

Am Wassertankspeichermodell wurde untersucht, wie der Einfluss der Speisetemperatur auf die Gesamtbilanz ausfällt. Für die verschiedenen Temperaturniveaus muss der COP der Wärmepumpe angepasst werden. Dazu wurden typische Werte für die Temperaturen 35°C und 55°C recherchiert und die restlichen Temperaturen interpoliert. Die Resultate sind in Tabelle 23 dargestellt.



Tabelle 23

Auswertung Einfluss Speisetemperatur

	Temperatur	Restenergie- bedarf elektrisch	Restenergie- bedarf thermisch	Energiebe- darf RH Gas	Total (elektrisch und Gas)		Total Primär- energie (elektrisch und Gas)	
	[°C]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]	[kWh]	[-]
VT_20	20	257'554	1'173'141	812'987	1'070'541	100%	1'699'869	97%
VT_30	30	269'939	1'144'357	793'039	1'062'978	100%	1'713'714	98%
VT_40	40	290'646	1'119'539	775'841	1'066'487	100%	1'755'435	100%
VT_50	50	332'173	1'087'591	753'701	1'085'874	102%	1'853'309	106%
VT_60	60	411'631	1'077'229	746'520	1'158'151	109%	2'081'042	119%

Aus Tabelle 23 geht hervor, dass der elektrische Restenergieverbrauch mit der Zunahme der Speisetemperatur steigt. Gleichzeitig nimmt der thermische Restenergiebedarf ab. Dies liegt daran, dass bei hoher Speisetemperatur zwar das Temperaturniveau im Speicher erhöht wird, es steht aber nicht mehr Speiseenergie zur Verfügung. Daraus folgt, dass bei einer höheren zu erzeugenden Temperatur ein kleinerer Massenstrom resultiert, der in den Speicher geführt werden kann. Bei der Entladung hingegen sorgt eine höhere Speichertemperatur dafür, dass bei gleichbleibender zusätzlicher Energie für die Wärmepumpen mehr thermische Energie erzeugt werden kann, weshalb der thermische Restenergiebedarf sinkt. Dies führt allerdings neben dem sinkenden thermischen Energiebedarf zu einem gleichbleibenden elektrischen Bedarf. Die Tatsache, dass der elektrische Bedarf trotzdem steigt, lässt darauf schliessen, dass bei höherer Speichertemperatur auch grössere Verluste auftreten, die den elektrischen Energieverbrauch ansteigen lassen.

Für die Modellrechnungen wurden die 40°C für den Wassertank bzw. 20°C für den Erdsondenspeicher belassen.

7.4.6 Auswertungskriterien

In der Auswertung der Simulationen werden die folgenden Daten ausgewiesen:

- **Speicher Input**
thermische Energie, die nach der Deckung des Eigenverbrauches in den Speicher geführt wird (Temperaturniveau 40°C für Wasserspeicher bzw. 20°C für Erdsondenspeicher)
- **Speicher Output**
thermische Energie, die aus dem Speicher gewonnen werden kann (nach der Wärmepumpe)
- **thermischer Restenergiebedarf**
Energie, die noch aufgewendet werden muss, um den thermischen Energiebedarf der Raumheizung zu decken
- **elektrischer Restenergiebedarf**
elektrische Energie, die vom Netz bezogen werden muss, um den gesamten elektrischen Energiebedarf decken zu können
- **Warmwasser Restenergiebedarf**
Energie, die aufgewendet werden muss um das Warmwasser zu erwärmen, welches nicht mit Wärmepumpe oder Elektroheizung erzeugt wird



– **Energiebedarf Gas**

Energie für die Gaskessel, um den thermischen Restenergiebedarfs zu decken, der nicht von einer Wärmepumpe abgedeckt wird (der Wärmepumpenstrom ist bereits im elektrischen Verbrauch eingerechnet)

Die ersten vier Datensätze können direkt der Simulation entnommen werden. Der Restenergiebedarf Warmwasser wird als Jahreswert ausgewiesen. Der Gasbedarf wird aus dem thermischen Restenergiebedarf ermittelt. Der Wirkungsgrad der Gasheizung wird mit 95% angenommen.

7.5 Ergebnisse

7.5.1 Elektrischer Kurzzeitspeicher

Um den Einfluss des elektrischen Kurzzeitspeichers zu untersuchen, wurden die Wasserspeicher mit zehn verschiedenen Elektrospeichergrossen von 0 bis 900 kWh Kapazität kombiniert.

Die gewählte Elektrospeicherbewirtschaftung deckt mit dem Ertrag aus der PV-Anlage zuerst den aktuellen elektrischen Verbrauch. Die überschüssige Energie wird dann in den Akkumulatorspeicher gegeben, bis dieser voll geladen ist. Die dann noch überschüssige Energie wird über eine Wärmepumpe in thermische Energie umgewandelt und in den thermischen Speicher abgegeben. Bei einem zu grossen elektrischen Speicher wird der thermische Speicher kaum oder gar nicht geladen.

Bei der Variante ohne thermischen Speicher (V01) ist der elektrische Restenergiebedarf dort am kleinsten, wo der Akkumulator jeweils genügend Energie speichern kann, um den Strombedarf der Nacht abzudecken und bei grösseren Speichern auch den tagesübergreifenden Bedarf.

Hat der Akkumulator ein grosses Speichervermögen, nimmt der elektrische Restenergiebedarf wieder zu. Dies liegt daran, dass so viel elektrische Energie gespeichert wird, dass kein Überschuss mehr anfällt, der für die direkte Raumheizung genutzt bzw. in den thermischen Speicher geführt werden kann. Dadurch muss eine grössere thermische Energiemenge mit Wärmepumpen erzeugt werden, was wiederum den elektrischen Energiebedarf erhöht.

7.5.2 Wasserspeicher

Die nachfolgende Tabelle 24 zeigt den Restenergieverbrauch der unterschiedlichen Simulationsvarianten gemäss der Simulationsmatrix (Tabelle 21).



Tabelle 24

Simulationsergebnisse für einen zentralen Wasserspeicher

Variante	Thermische Speichergrosse	Restenergie elektrisch	Restenergie thermisch	Energiebedarf RH Gas	Energiebedarf WW Gas	Total (elektrisch und Gas)		Total (gew. Primär- energiefaktor)	
	[m ³]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[-]	[MWh]	[-]
V0	-	338	1'533	1'272	246	1'856	100%	2'749	100%
V01	-	331	1'276	897	257	1'486	80%	2'311	84%
V10	1	337	1'533	1'272	246	1'856	100%	2'748	100%
V11	1	292	1'276	897	257	1'447	78%	2'196	80%
V20	4'524	372	1'012	701	137	1'210	65%	2'069	75%
V21	14'137	382	152	-	-	382	21%	1'136	41%

Wie der Vergleich der Varianten mit und ohne Speicher zeigt, ist der Effekt bei dem Effizienzscenario 2050 sehr klein und bei 2035 kaum vorhanden. Dies liegt daran, dass in diesen Szenarien nur sehr wenig PV vorhanden ist. Die produzierte Energie reicht aus, um einen Teil des Haushaltsstromverbrauches abzudecken. Danach ist kaum mehr Überschuss vorhanden, der in den elektrischen Speicher geführt werden kann. Aus diesem Grund ist bei diesen beiden Varianten auch der thermische Speicher klein.

7.5.3 Erdsondenspeicher

Mit dem Erdsondenspeicher werden ähnliche Resultate wie beim Wasserspeicher erzielt, ohne dabei unrealistisch grosse Speicher verwenden zu müssen.

Die Resultate der Untersuchung der Erdsondenspeicher sind in der Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25

Simulationsergebnisse für einen zentralen Erdsondenspeicher

Variante	Anzahl Sonden	Restenergie elektrisch	Restenergie thermisch	Energiebedarf RH Gas	Energiebedarf WW Gas	Total (elektrisch und Gas)		Total (gew. Primär- energiefaktor)	
	[Stk.]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[MWh]	[-]	[MWh]	[-]
V30	16	337	1'533	1'272	246	1'856	100%	2'748	100%
V31	24	335	1'256	884	257	1'476	80%	2'307	84%
V40	28	365	1'210	839	137	1'341	72%	2'207	80%
V41	68	454	110	-	-	454	24%	1'350	49%
V42	120	441	0	-	-	441	24%	1'310	48%



Auch hier ist auffällig, dass der elektrische Restenergiebedarf steigt, je mehr thermische Energie über die Wärmepumpe erzeugt wird. Da im Erdreich tiefere Temperaturen herrschen als im Wasserspeicher, ist der elektrische Restenergieanteil höher als beim Wasserspeicher.

7.6 Betriebsverhalten

Eines der Ziele der Speicheruntersuchung besteht darin, die elektrischen Lastspitzen bei Verbrauch und Produktion zu reduzieren und damit die Netzstabilität zu erhöhen. Im Bereich der thermischen Speicher gelingt es, die Lastspitzen des elektrischen Restenergieverbrauches über das Jahr leicht zu reduzieren, allerdings nur beim maximalen PV-Ausbauszenario.

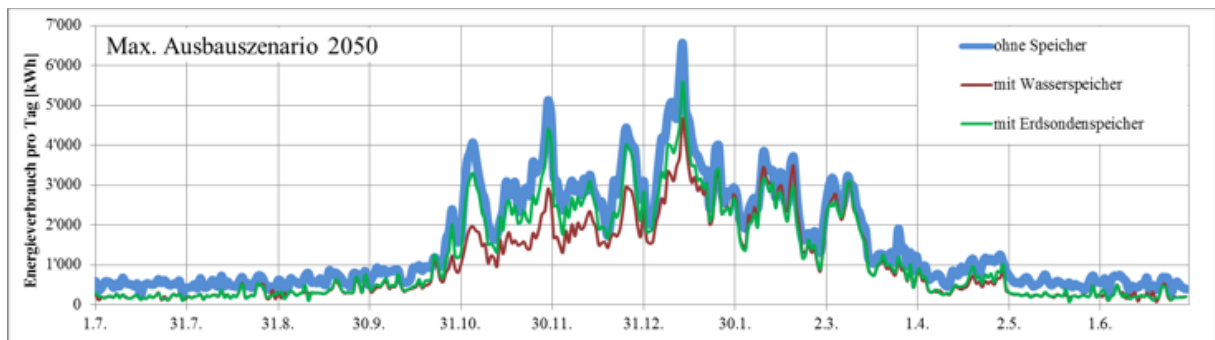


Abbildung 14

Verbrauchsprofil des Stroms mit thermischem Langzeitspeicher für das Szenario maximaler PV-Ausbau 2050

In Abbildung 14 ist dargestellt, wie sich der tägliche elektrische Energieverbrauch über das Jahr verhält. Mit der Variante ohne Speicher treten vor allem im Winter grosse Lastspitzen auf, die mit dem Wasserspeicher bzw. dem Erdsondenspeicher etwas gedämpft werden können. Der Effekt des Erdsondenspeichers (grün) ist etwas kleiner als jener des Wasserspeichers (rot). Der Grund dafür liegt in der tieferen Temperatur, die im Erdreich angenommen wurde im Vergleich zum Wasserspeicher. Dadurch wird für die Aufbereitung der thermischen Energie aus dem Wasserspeicher weniger elektrische Energie für die Wärmepumpe benötigt. Dafür ist ersichtlich, dass auch der sehr gross dimensionierte thermische Speicher nicht ausreicht, um den Energiebedarf über die ganze Heizperiode tief zu halten. Die Werte nähern sich ab Ende Januar jenen des Szenarios ohne Speicher. Der elektrische Restenergieverbrauch bei der Variante mit Erdsondenspeicher bleibt über das ganze Jahr unter der Variante ohne Speicher.

Die Auswirkung des elektrischen Kurzzeitspeichers auf den elektrischen Energiebedarf ist in der nachfolgenden Abbildung 15 dargestellt. Darin ist die stündlich benötigte elektrische Leistung über eine Woche ersichtlich. Es zeigt sich der glättende Effekt des Akkumulators auf den Energieverbrauch. Die elektrische Produktion reicht aus, um den Energiebedarf am Tag zu decken und die elektrischen Speicher zu laden, welche so die grossen Lastspitzen in der Nacht abzudecken vermögen.

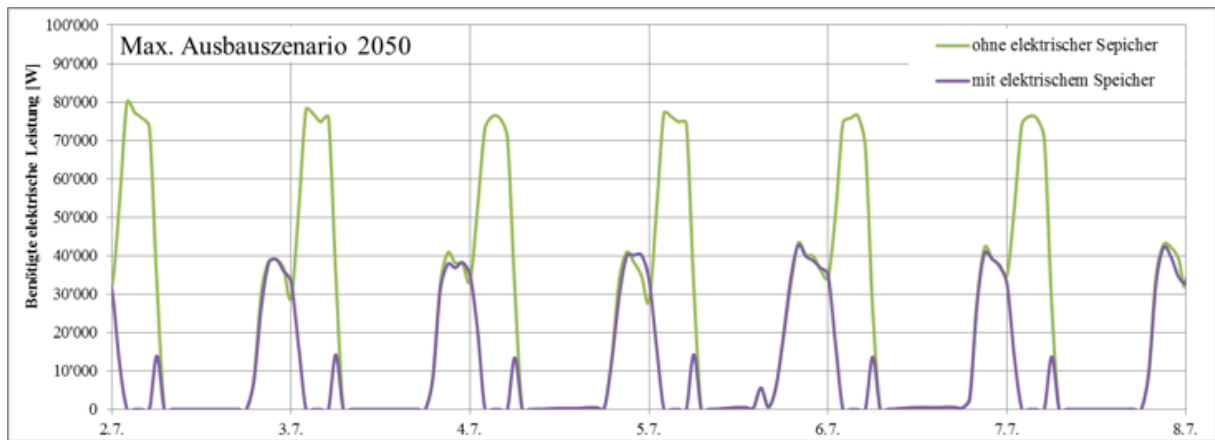


Abbildung 15

Leistungsbedarf von Strom mit elektrischem Kurzzeitspeicher für das Szenario maximaler PV-Ausbau 2050

7.7 Fazit Quartierspeicher

Um mit thermischen Langzeitspeichern einen Effekt auf den Energiebedarf im Quartier und die elektrische Netzstabilität erreichen zu können, ist die Produktion an elektrischer Energie sowie die Art der Wärmeerzeuger im Quartier entscheidend. Nur wenn genügend elektrischer Überschuss erzeugt wird und ausreichend Wärmepumpen im System vorhanden sind, können die betrachteten thermischen Langzeitspeicher sinnvoll genutzt werden.

Damit eine bessere Netzstabilität erreicht werden kann, ist es wichtig, dass die elektrische Energie nicht nur thermisch, sondern auch elektrisch (Kurzzeitspeicher) gespeichert wird. So können die Lastspitzen im Haushaltsstromverbrauch abgedeckt werden.

Im Vergleich zwischen den betrachteten thermischen Speichern eignet sich ein Erdsondenfeld besser als Langzeitspeicher als ein Wassertank wegen den realistischeren Dimensionen des Speichers. Dies liegt primär daran, dass das Erdreich gleichzeitig als Speicher und Quelle funktionieren kann.



8 Energie- und Umweltbilanz

8.1 Ökobilanzen

Verschiedene bestehende und neuartige Speichersysteme wurden auf ihre Eignung als Gebäude- bzw. Quartierspeicher untersucht. Bezüglich Ökobilanz wurden die in Tabelle 16 aufgeführten Speichertechnologien detailliert untersucht.

8.2 Rahmenbedingungen zur Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung (oder Life Cycle Assessment, LCA) quantifiziert die Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen über den ganzen Lebenszyklus: Produktion, Nutzung und Entsorgung [ISO 14040:2006], [ISO 14044:2006]. Dazu gehören auch die Beiträge, die aus der Fertigstellung der nötigen Rohmaterialien kommen, alle für den Lebenszyklus des analysierten Objektes relevanten Dienstleistungen (zum Beispiel die Transporte der Rohmaterialien zur Produktionsstätte), sowie all-fälliges Recycling und die daraus zurückgewonnen Materialien. Für die Berechnungen wurde die Hintergrunddatenbank ecoinvent 2.2 und die Umweltauswirkungsmethode Impact 2002+ [Humbert et al., 2014] für die Bewertung der Treibhausgasemissionen, der Schäden an der menschlichen Gesundheit, der Schäden am Ökosystem und dem Verbrauch von nicht erneuerbaren Ressourcen benutzt. Für eine gesamtheitliche Betrachtung im Schweizer Kontext wurden zusätzlich die Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit verwendet [Frischknecht et al., 2006]. Diese ist eine aggregierte Methodik, die die Umweltauswirkungen zu unterschiedlichen Aspekten (zum Beispiel Treibhausgasemissionen, Landnutzung, Emissionen karzinogener Substanzen in die Luft, usw.) basierend auf den Schweizer Kontext in einem SinglePoint-Indikator zusammenführt.

8.3 Umweltauswirkungen der elektrischen Speichertechnologien

Für das Speichern von Elektrizität stehen zurzeit eine Reihe verschiedener Technologien zur Verfügung. In diesem Projekt wurden folgende Technologien betrachtet:

- Lithium-Ionen Akkumulatoren (LIA)
- Blei-Säure Akkumulatoren (BSA)
- Redox-Flow-Akkumulatoren (Vanadium-Redox Akkumulator, VRA)
- Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator (NNA)
- H₂-Speicher mit Brennstoffzellen (BZ)
(Der Wasserstoffspeicher mit Brennstoffzelle ist die einzige Speichertechnologie, die explizit für eine saisonale Speicherung konzipiert wurde. Ein direkter Vergleich mit den anderen Systemen ist daher nicht möglich. Entsprechend sind die Ergebnisse nur auf Ebne der UBP in einer Grafik dargestellt.)



8.3.1 Rahmenbedingungen zur LCA der elektrischen Speicher

Für die LCA-Untersuchungen wurden die Umweltauswirkungen aus folgenden Prozessen berücksichtigt:

- Produktion: Herstellung der nötigen Materialien und Rohstoffe, Transport zur Produktionsstätte, wichtigste Produktionsschritte und Produktionsenergie
- Nutzung: Elektrizitätsverluste im Betrieb
- Entsorgung: Recycling der Akkumulatoren und Rückgewinnung der Materialien

Die oben erwähnten elektrischen Speichertechnologien unterscheiden sich in Bezug auf die Leistungsparameter wie Lebensdauer, Energiedichte und Effizienz. Diese Aspekte müssen in der Ökobilanzierung berücksichtigt werden. Zum Vergleich der Umweltauswirkungen der verschiedenen Systeme wurde als Basis die folgende funktionelle Einheit gewählt: **Lieferung von 1 kWh** gespeicherter Energie von einem Akkumulator mit einer **Speicherkapazität von 10 kWh**.

Dazu wird quantifiziert, wie viel elektrische Energie der Akkumulator über den ganzen Lebenszyklus liefern kann und welche Umweltauswirkungen dabei entstehen. Anschliessend werden die Umweltauswirkungen auf 1 kWh runterskaliert.

Die Analyse der Systeme basiert auf den in Tabelle 17 vorgestellten Werten. Da es insbesondere bei der Lebenserwartung der Akkumulatoren grundsätzlich relativ hohe Unsicherheiten gibt und dieser Parameter einen grossen Einfluss auf die Endergebnisse haben kann, wurden dazu unterschiedliche Szenarien analysiert – jeweils ein durchschnittliches, ein Worst- und ein Best-Case-Szenario. Die relevanten Eckzahlen zu den analysierten Szenarien für die Ökobilanzierung der Akkumulatoren sind in Tabelle 26 zusammengefasst.

Tabelle 26 Eckzahlen zu den untersuchten Speichertechnologien

	Vollzyklen (Gesamt- Lebenslauf)	DoD (% - Depth of discharge)	Energie- dichte (Wh/kg)	Effizienz (%)	Gewicht (kg für 10 kWh mit entsprechen- dem DoD)	Gelieferte Energie (Lebens- zyklus)	Gesamt- verluste (Lebens- zyklus)
Li-Ion (Worst-Case)	2500	90	71	92.5	156.49	23125	1875.00
Li-Ion (Durchschnitt)	3750	90	71	92.5	156.49	34687.5	2812.50
Li-Ion (Best-Case)	8212	90	71	92.5	156.49	75961	6159.00
Blei-Akku (Worst-Case)	1200	50	34	77.5	588.24	9300	2700.00
Blei-Akku (Durchschnitt)	2500	50	34	77.5	588.24	19375	5625.00
Blei-Akku (Best-Case)	3800	50	34	77.5	588.24	29450	8550.00
Vanadium Redox (Worst-Case)	3750	90	13.5	75	823.05	28125	9375.00
Vanadium Redox (Durchschnitt)	5000	90	13.5	75	823.05	37500	12500.00
Vanadium Redox (Best-Case)	7300	90	13.5	75	823.05	54750	18250.00
Zebra Akkumulator (Worst-Case)	1750	80	116	80	107.76	14000	3500.00
Zebra Akkumulator (Durchschnitt)	2500	80	116	80	107.76	20000	5000.00
Zebra Akkumulator (Best-Case)	3750	80	116	80	107.76	30000	7500.00



In Tabelle 26 beziehen sich die Verluste bei den Akkumulatoren auf die elektrische Energie, die aufgrund der internen Widerstände der Akkumulatoren beim Auf- und Entladen verloren geht.

Die oben beschriebenen Systeme können allgemein als Tagespeicher betrachtet werden. Der H₂-Speicher mit Brennstoffzelle ist dagegen ein Speichersystem, das aufgrund der sehr kleinen Verluste für sehr lange Speicherzeiten geeignet ist. Als Gesamteffizienz für die Brennstoffzelle (Erzeugung von Wasserstoff aus Elektrizität und bei Elektrizitätsbedarf nachfolgende Umwandlung des H₂ in Elektrizität) wurde ein Wert von 44.5% angenommen. Um 10 kWh lieferbare Energie für einen Nutzer speichern zu können, muss der Speicher ungefähr 0.4 kg an Wasserstoff speichern können. Für die Lebenserwartung des Systems wurden 60'000 Betriebsstunden angenommen (de Bruijn, 2011). Als Leistung der Brennstoffzelle wurde für ein Haussystem mit 5 kW gerechnet, was insgesamt mit der Effizienz des Systems eine lieferbare Energie über den ganzen Lebenszyklus von ca. 133'543 kWh Elektrizität ergibt. Um diese Energie zu liefern, müssen aufgrund der vergleichsweise tiefen Effizienz des H₂-Speichers mit Brennstoffzelle neben den 133'543 kWh bezogener Elektrizität noch zusätzlich 166'457 kWh Elektrizität aufgewendet werden, die im System als Wärme verloren gehen.

8.3.2 Datenquellen zu den elektrischen Speichern

Lithium-Ionen-Akkumulatoren (LIA)

Die Inventardaten zur Produktion der Lithium-Ionen Akkumulatoren stammen zum grössten Teil aus [Majeau-Bettez et al., 2011]. Da es zurzeit noch keine etablierten Methoden zum Recycling von Lithium gibt, wurde in der Analyse der Entsorgung nur die Rückgewinnung des Kupfers aus der negativen Elektrode und des Aluminiums in der Zellenhülle berücksichtigt.

Blei-Säure-Akkumulator (BSA)

Die Inventardaten zur Produktion des Blei-Säure-Akkumulators basieren auf [Rydh, 1999]. Bei der Entsorgung wurde die Rückgewinnung des Bleis und der Thermoplasten aus der Hülle berücksichtigt.

Natrium-Nickelchlorid-Akkumulator (NNA)

Die Inventardaten zur Produktion des Natrium-Nickelchlorid-Akkumulators stammen aus ecoinvent v3 [ecoinvent3.0, 2013]. Bei der Entsorgung wurde die Rückgewinnung von Kupfer, Nickel und Eisen berücksichtigt.

Vanadium-Redox-Akkumulator (VRA)

Die Inventardaten zur Produktion des Vanadium-Redox-Akkumulators basieren auf [Rydh, 1999]. Bei der Entsorgung wurde die Rückgewinnung von Kupfer, Nickel und Eisen berücksichtigt.

H₂-Speicher mit Brennstoffzelle (BZ)

Die Inventardaten zum Wasserstoffspeichersystem stammen aus internen Industrieprojekten. Bei der Entsorgung wurde die Rückgewinnung des Platinums in der Brennstoffzelle sowie der wichtigsten Metalle im System berücksichtigt.

8.3.3 Ergebnisse der elektrischen Speichertechnologien

In Abbildung 16 bis Abbildung 19 sind die Treibhausgasemissionen, der Schaden an der Gesundheit, der Schaden am Ökosystem und der Verbrauch von Ressourcen für die unterschiedlichen Akkumulatoren aufgezeigt. Es werden zuerst nur die Ergebnisse der Akkumulatoren diskutiert, da diese Tagespeicher sind, während der Wasserstoffspeicher mit Brennstoffzelle für saisonale Speicherung geeignet ist und entsprechend unterschiedliche Funktionen erfüllt. Die Zahlen beziehen sich auf 1 kWh gespeicherte und gelieferte Energie von einem Speichersystem, das eine Kapazität von 10 kWh hat unter Berücksichtigung der spezifischen Lebenserwartung, Energiedichte und Verluste der Systeme. Für die Berechnungen zu den spezifischen Technologien wurden die in Tabelle 26 aufgeführten Parameter benutzt. Da im vorliegenden Projekt die elektrischen Speicher als Zwischen-



speicher für erneuerbare Stromquellen betrachtet werden, wurde bei der Berechnung der Umweltauswirkungen der Lade- und Entladeverluste angenommen, dass der Strom aus PV-Anlagen kommt. Die Umweltauswirkungen der 1 kWh eingespeicherten und dann gelieferten elektrischen Energie werden in den Grafiken nicht aufgezeigt, da diese für alle Technologien gleich sind.

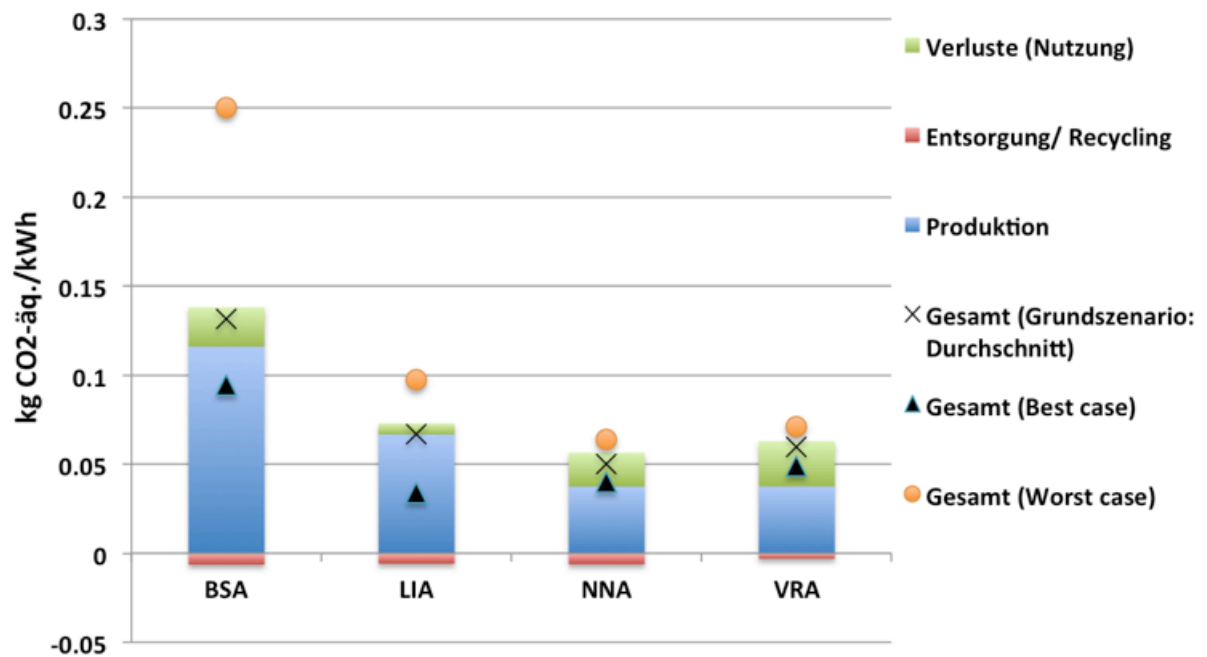


Abbildung 16

Treibhausgasemissionen der elektrischen Speicher
(BSA: Blei-Säure-Akku; LIA: Lithium-Ionen-Akku;
NNA: Natrium-Nickelchlorid-Akku; VRA: Vanadium-Redox-Akku)

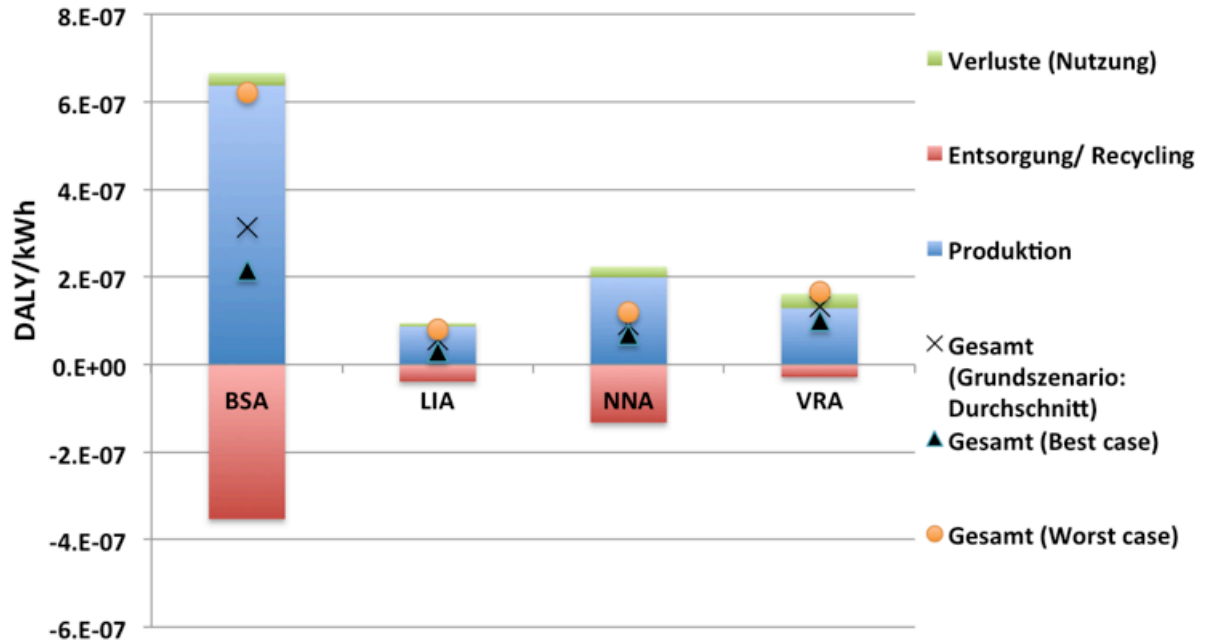


Abbildung 17

Gesundheitsschaden durch elektrische Speicher
(BSA: Blei-Säure-Akku; LIA: Lithium-Ionen-Akku;
NNA: Natrium-Nickelchlorid-Akku; VRA: Vanadium-Redox-Akku)

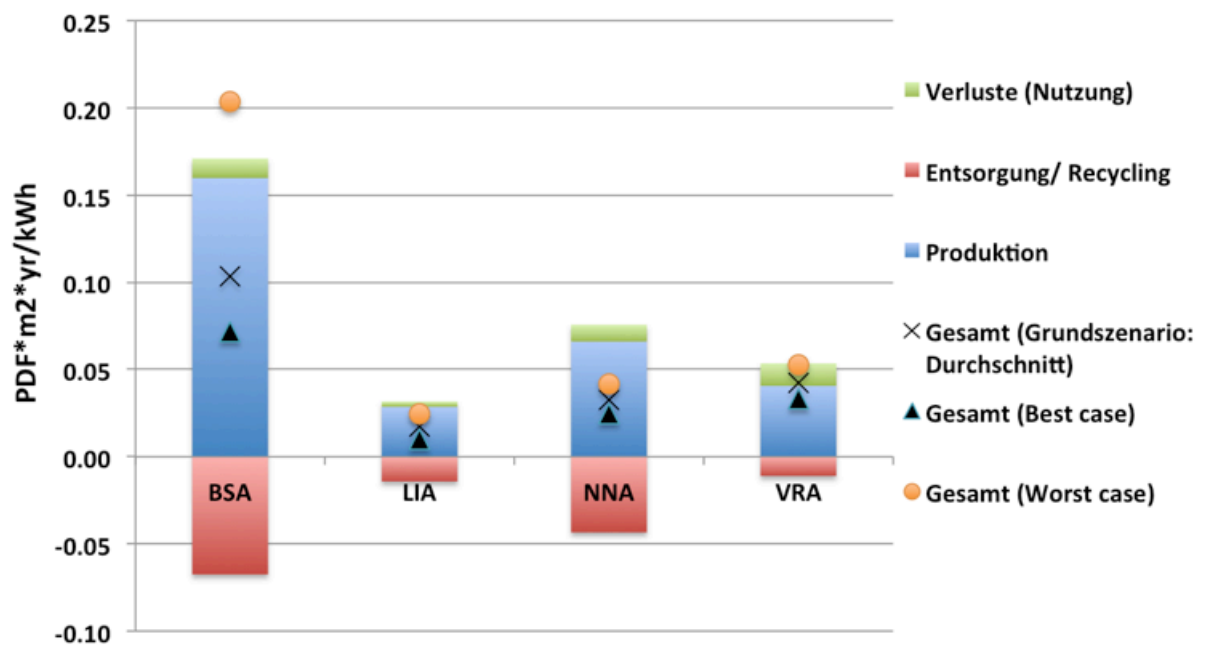


Abbildung 18

Ökosystemschaden durch elektrische Speicher
(BSA: Blei-Säure-Akku; LIA: Lithium-Ionen-Akku;
NNA: Natrium-Nickelchlorid-Akku; VRA: Vanadium-Redox-Akku)

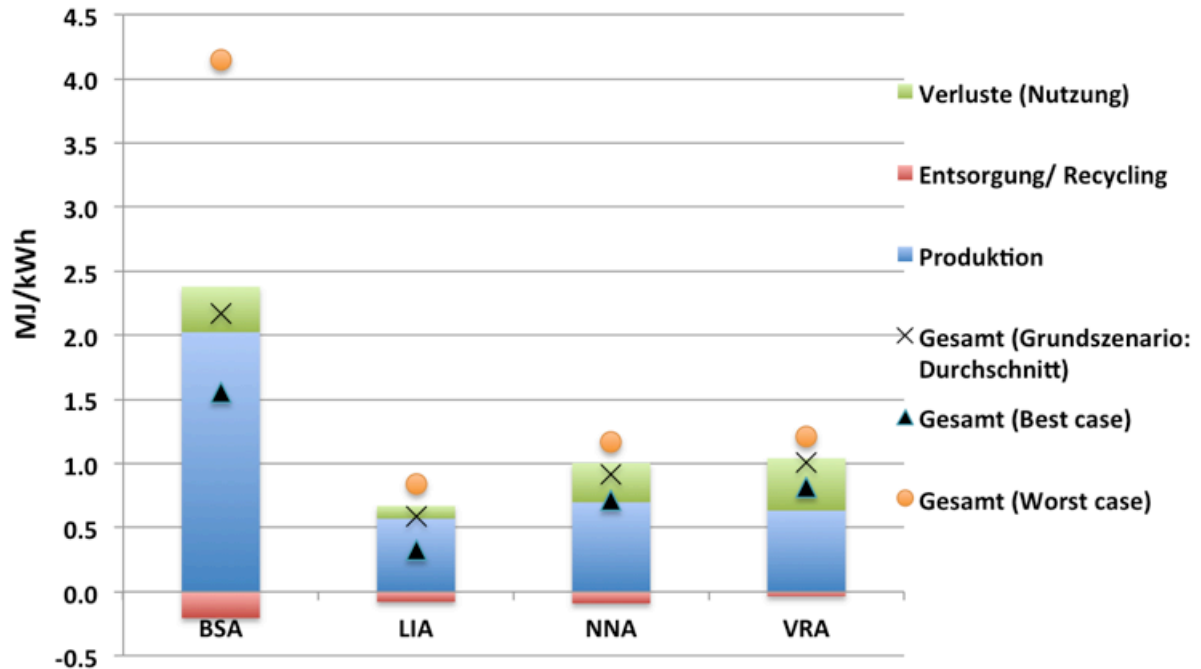


Abbildung 19

Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen durch elektrische Speicher
(BSA: Blei-Säure-Akku; LIA: Lithium-Ionen-Akku;
NNA: Natrium-Nickelchlorid-Akku; VRA: Vanadium-Redox-Akku)

Aus den Abbildungen können folgende Trends beobachtet werden: Bei allen Indikatoren und bei allen Szenarien schliesst der Blei-Akku am schlechtesten ab. Das ist auf das Zusammenspiel von relativ tiefer Energiedichte, kurzer Lebensdauer und hohen Speicherverlusten zurückzuführen. Dagegen schliesst der Li-Ionen-Akkumulator bei den meisten Indikatoren (HH, EQ und RQ) tendenziell am besten ab, was auf die hohe Lebensdauer und die tiefen Speicherverluste zurückzuführen ist. Bei den Treibhausgasemissionen kann der Li-Ionen-Akkumulator besser oder schlechter als der Zebra-Akkumulator oder der Vanadium-Redox-Akkumulator abschliessen, basierend auf den Lebensdauerannahmen. Die Produktion des Li-Ionen-Akkumulators hat einen starken Einfluss auf die Treibhausgasemissionen. Hier ist aber auch zu beachten, dass im Rahmen der möglichen Li-Ionen-Technologien für diese stationäre Applikation eine relativ tiefe Energiedichte angenommen wurde, während deutlich höhere Energiedichten möglich sind. Bei höheren Energiedichten sind auch geringere Akkumulatormengen nötig, was einen positiven Einfluss auf die Ergebnisse haben könnte. Allgemein weisen der Zebra-Akkumulator und der Vanadium-Redox-Akkumulator bei allen Indikatoren und Szenarien ähnliche Ergebnisse auf. Interessant ist diesbezüglich, dass die Energiedichte des Vanadium-Redox-Akkumulators viel tiefer als die des Zebra-Akkumulators ist. Das wird aber durch die längere Lebensdauer kompensiert.

Zur Gesamtbewertung der Systeme im Schweizer Kontext wurden noch die Gesamtauswirkungen nach der Methode der ökologischen Knappheit in Umweltbelastungspunkten (UBP) berechnet (Abbildung 20).

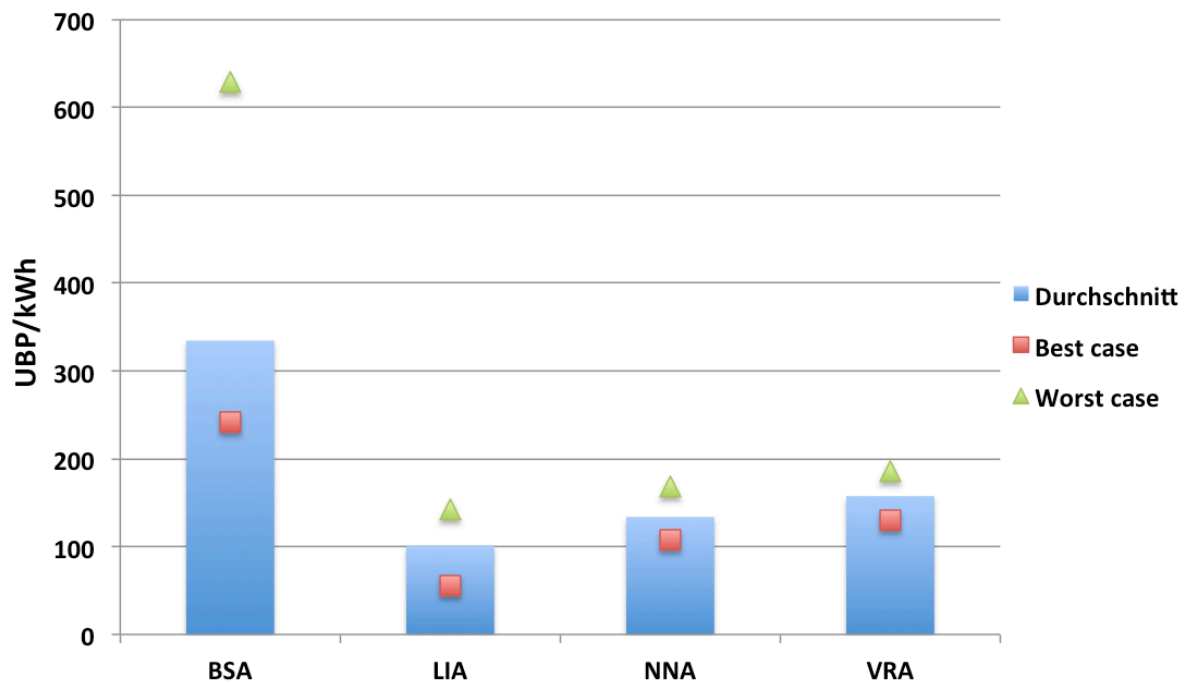


Abbildung 20

Umweltbelastungspunkte (UBP) der elektrischen Speicher
(BSA: Blei-Säure-Akku; LIA: Lithium-Ionen-Akku;
NNA: Natrium-Nickelchlorid-Akku; VRA: Vanadium-Redox-Akku)

Um in diesem Kontext ein Gefühl für die Ökobilanz des Wasserstoffspeichers mit Brennstoffzelle zu bekommen, wurden auch diese berechnet und mit denen der anderen elektrischen Speichertechnologien verglichen, obwohl der direkte Vergleich dieser Systeme aufgrund der unterschiedlichen Funktionen irreführend sein kann. Deswegen werden die Ergebnisse dazu separat und nur für die UBP für das Durchschnittsszenario aufgezeigt (Abbildung 21).

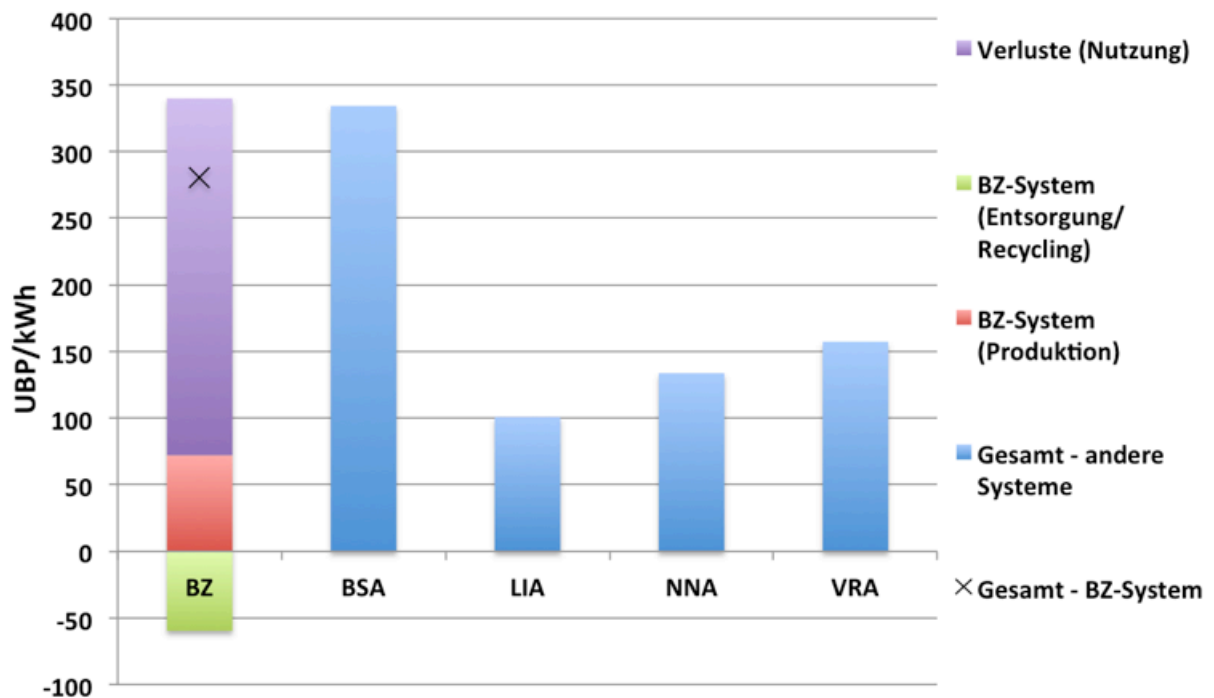


Abbildung 21

Gesamtumweltbelastung nach der Methode der ökologischen Knappheit: Vergleich aller Systeme, inklusive Brennstoffzelle und Wasserstoffspeicher (BZ: H_2 -Speicher/Brennstoffzelle; BSA: Blei-Säure-Akku; LIA: Lithium-Ionen-Akku; NNA: Natrium-Nickelchlorid-Akku; VRA: Vanadium-Redox-Akku)

Der Wasserstoffspeicher (Gesamt-BZ-System) schneidet besser ab als der Durchschnitt der Blei-Säure-Akkumulatoren aber auch immer schlechter als der Durchschnitt der anderen Speichertechnologien. Das ist auf die tiefe Effizienz der Elektrolyse zurückzuführen, die pro kWh Energie, die einem Nutzer zum Verbrauch geliefert wird, einen hohen Elektrizitätsaufwand verursacht.

8.4 Umweltauswirkungen der Wärmespeicher

Im Projekt wurden folgende Wärmespeicher-Technologien betrachtet:

- Wasserspeicher (sensibel) – sowohl mit Tank aus Stahl als auch mit Glasfaser verstärktes Kunststoff (GFK)
- Natronlaugenspeicher (Sorptionswärmespeicher mit Natronlauge)
- Latentwärmespeicher
- Eisspeicher
- Erdsondenspeicher

8.4.1 Rahmenbedingungen zur LCA der Wärmespeicher

Die Systemgrenzen bei der Bewertung der Wärmespeicher sind sehr ähnlich denen der elektrischen Speicher:



- Produktion: Herstellung der nötigen Materialien und Rohstoffe, Transport zur Produktionsstätte, wichtigste Produktionsschritte und Produktionsenergie
- Nutzung: Elektrizitätsverluste in der Nutzungsphase durch den Einsatz von Pumpen und Kontrollelektronik
- Entsorgung: Recycling der Speicher und Rückgewinnung der Materialien

Leider ist bei den Wärmespeichern die Datenverfügbarkeit viel geringer als bei den elektrischen Speichern. Nicht nur gibt es wenige (oder zum Teil keine) Ökobilanzierungen zu den unterschiedlichen Technologien, die verfügbaren Studien analysieren von Technologie zu Technologie sehr unterschiedliche Systeme bezüglich Grösse und Gesamtkapazität, was einen Vergleich der Ergebnisse erschwert. Basierend auf die verfügbaren Studien wurden folgende Systeme betrachtet:

Tabelle 27 Eckzahlen zu den betrachteten Wärmespeichern

	Volumen [m ³]	Gelieferte Wärme pro Jahr [MJ]	Lebenserwartung [Jahre]	Datenquelle
Wasserspeicher sensibel (Stahl)	205	268'220	40	[Simons & Firth, 2011]; Jenni Energietechnik (http://www.jenni.ch)
Wasserspeicher sensibel (GFK)	205	268'220	40	(Simons & Firth, 2011); Ebitsch Energietechnik (http://www.ebitsch-energietechnik.de)
Natronlaugenspeicher	5 m ³ NaOH Lösungstank und 2 m ³ Wasserspeicher	62'000	20	spezifische Daten Empa
Latentwärmespeicher	1.5m ³	12'755	20	spezifische Daten eines kommerziellen Produktes
Eisspeicher	75	126'000	40	(Minder, Wagner, Mühlebach, & Weisskopf, 2014)
Erdsondenspeicher	150 m Sonde	20'000	50	Ecoinvent v2.2 (Heck, 2007)

Für die oben erwähnten Technologien wurde jeweils die Energie berechnet, die die unterschiedlichen Speicher über den ganzen Lebenszyklus einem Nutzer für Wärmezwecke liefern. Dabei wurden die Speicher als Hybridsysteme (Verwendung als Kurz- und Langzeitspeicher) betrachtet. Die Umweltauswirkungen wurden dann auf 1 MJ Energie runterskaliert. Die funktionelle Einheit ist in diesem Falle das **Entnehmen von 1 MJ Wärme** aus einem Wärmespeicher.

Die Wärme, die in den Speichern einfließt, kommt typischerweise aus Sonnenkollektoren. Diese werden in dieser Analyse nicht in den Berechnungen berücksichtigt, da die Kollektoren bei allen Technologien erforderlich sind und entsprechend nur einen fixen Beitrag hinzufügen.

8.4.2 Datengrundlage zu den Wärmespeichern

Wasser – sensibel (Stahl)

Die Daten für die Modellierung des Wasserspeichers mit Stahltank stammen zum grössten Teil aus [Simons & Firth, 2011]. Nach direkter Abklärung mit der Firma Jenni wurde die Stahlmenge für den



Tank eines heutigen Speichers mit 205 m³ Volumen von 18'500 kg auf 16'400 kg reduziert. Die Ergebnisse berücksichtigen das Recycling des Stahls. Basierend auf [Simons & Firth, 2011] wurde noch pro Jahr ein Elektrizitätsverbrauch für den Betrieb der elektrischen Pumpen im System von 2236 MJ einbezogen.

Wasser – sensibel (GFK)

Die Daten für die Modellierung des Wasserspeichers mit GFK-Tank stammen zum grössten Teil aus [Simons & Firth, 2011]. Der Stahl für den Tank wurde in diesem Fall mit GFK ersetzt. Basierend auf Gewichtsangaben auf der Webseite von Ebitsch wurden 18'500 kg GFK für den Tank angenommen. Die restlichen Daten (z. B. Ressourcen für Rohrleitungen und Isolierung, Herstellung des Tanks und Elektrizitätsverbrauch im Betrieb) sind die gleichen der Stahlvariante. Für das Lebensende des Tanks wurde angenommen, dass das GFK weiter verwertet werden kann. Als Beispiel wurde das CompoCycle-Verfahren in Betracht gezogen, bei dem das GFK in der Zementproduktion eingesetzt wird und dadurch Kohle, Kalk/Kreide, Sand und Aluminiumoxid substituiert.

Natronlaugenspeicher (NLS)

Die Berechnungen der auf Natronlauge basierenden Sorptionswärmespeicherung beziehen sich auf Angaben der Empa. Die Empa betreibt seit etlichen Jahren Forschung und Entwicklung in diesem Themenbereich. Um einen möglichst relevanten Vergleich der Sorptionsspeichertechnologie zu den Wasser- und Eisspeichersystemen zu ermöglichen, wird von einem Sorptionswärmespeicher in Kombination mit einem Warmwasserspeicher als Tagesspeicher ausgegangen. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass Warmwasserspeicher wie auch Eisspeicher sowohl als saisonale Speicher als auch als Tagesspeicher funktionieren. Der Sorptionswärmespeicher an sich ist aber nur für den Einsatz als saisonaler Speicher sinnvoll. Für den Vergleich wird der Sorptionsspeicher mit einem 2 m³-Wassertagesspeicher kombiniert. Der Sorptionsspeicher besteht im geladenen Zustand einerseits aus 6 Edelstahltanks mit je 2.1 m³ Innenvolumen und insgesamt 5 m³ wässriger Natronlauge mit einer Gewichtskonzentration von 50% und andererseits aus 7.6 m³ Wasser. Dies entspricht einem Volumen von 12 m³ Natronlauge bei einer Konzentration von 25% im entladenen Zustand. Bezüglich Elektrizitätsverbrauch wird mit 4% der entnommenen Wärmeenergie in der Nutzungsphase des Systems gerechnet. Da kaum eine Veränderung der Lauge über die Betriebszeit erwartet wird, kann nach der erwarteten Lebensdauer Stahl und Natronlauge rezykliert werden.

Zur Definition der Modellierungsparameter wurden folgende Annahmen getroffen:

Sorptionsspeicherkapazität: 12 m³ x 410 Wh/l = 5'130 kWh => 18500 MJ

Wird angenommen, dass durch den hybriden Betrieb eine Volllast-Zykluszahl von 3.3 pro Jahr erreicht wird, so liefert das gesamte System 62'000 MJ pro Jahr. Im Vergleich zu den betrachteten Warmwasserspeichersystemen und dem Eisspeichersystem ist diese Volllast-Zykluszahl eher tief. Simulationen der Empa zeigen, dass sich je nach Gebäudestandort und Systemauslegung auch Jahresvolllast-Zykluszahlen von über 10 ergeben. In so einem Fall würde ein Sorptionshybridsystem mit den oben angenommenen 5 m³ Natronlauge eine Energiemenge von etwa 185'000 MJ pro Jahr zur Verfügung stellen.

Die Sorptionsspeichertechnologie steckt im Vergleich zu den Wasser- und Eisspeichern noch in den Kinderschuhen. Entsprechend wurde versucht, aus den aktuellen Daten des Pilotprojekts der Empa ein Zukunftsszenario zu entwickeln, das einem kommerziellen System entsprechen könnte. Das betrifft insbesondere zwei Aspekte: die Lebenserwartung des Systems und die gesamte Energiemenge, die das System über ein Jahr liefern kann. Bezüglich der Lebenserwartung wird für das Empa-System im Moment mit 20 Jahren gerechnet. Grundsätzlich scheint es nicht unwahrscheinlich, dass ein kommerzielles System mit optimiertem Materialeinsatz auch bis zu 40 Jahre funktionieren könnte.

Als Vergleichsszenario für den Natronlaugenspeicher wurde deswegen mit 40 Jahren Lebensdauer und 185'000MJ gelieferter Energie pro Jahr gerechnet. Um den Unterschied zum heutigen System aufzuzeigen, wurden aber auch die Ergebnisse zum jetzigen Entwicklungsstand berechnet. Diese sind in den Grafiken mit „Total NLS (Entw.)“ gekennzeichnet.



Latentwärmespeicher

Die Daten für die Ökobilanzierung des Latentwärmespeichers wurden von einer Firma geliefert und beziehen sich auf ein kommerziell verfügbares System. Die Modellierung basiert auf den gleichen Prinzipien, die auch bei den anderen Technologien angewendet wurden. Die Daten zum Speichersystem sind vertraulich.

Eisspeicher

Die Modellierung des Eisspeichers basiert auf der Pilotanlage des SPF-Institutes an der Hochschule Rapperswil mit 75 m³ Volumen [Minder et al., 2014]. Die Grundstruktur besteht aus einem Betontank mit Wärmetauscher in der Form von Stahlplatten und einer elektrischen Wärmepumpe. Für die weiteren Komponenten im System (z. B. zusätzliche Rohrleitungen) wurden die gleichen Daten der sensiblen Speicher (nach einer Skalierung aufgrund des kleineren Volumens) benutzt. Basierend auf den Daten aus dem Bericht von Minder et al., wurde für den Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpe in der Nutzungsphase des Eisspeichers ein Beitrag von 20% der entnommenen Wärmemenge zugerechnet. Für das Lebensende wurde das Recycling des Stahls und des Betons berücksichtigt.

Erdsondenspeicher

Die Daten zum Erdsondenspeicher stammen aus ecoinvent („Heat, borehole heat exchanger, at brine-water heat pump 10 kW/CH“). Diese berücksichtigen die Erdsonde, die elektrische Wärmepumpe, die Flüssigkeit, die im System zum Austausch der Wärme eingesetzt wird und den Elektrizitätsverbrauch der Wärmepumpe in der Nutzungsphase (ca. 25% der gelieferten Energie). Das Recycling der Materialien wird im ecoinvent-Modell nicht berücksichtigt. Da aber die Ergebnisse in einer ersten Analyse aufgezeigt haben, dass bei Erdsondenspeichern die Infrastruktur keinen dominanten Einfluss hat, wurde dieser Aspekt für die Schlussfolgerungen der Studie als vernachlässigbar betrachtet.

8.4.3 Ergebnisse der Wärmespeicher

In Abbildung 22 bis Abbildung 25 sind jeweils die Treibhausgasemissionen, der Schaden an der Gesundheit, der Schaden am Ökosystem und der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen, die vom Lebenszyklus der unterschiedlichen saisonalen Speichertechnologien verursacht werden, aufgezeigt. Da es sich beim Latentwärmespeicher um einen Tagespeicher handelt und diese Funktion anders ist als die der anderen Systeme, wird diese Technologie separat diskutiert. In der Interpretation der Ergebnisse sollte ausserdem berücksichtigt werden, dass die Technologien bezüglich Speicherdauer unterschiedliche Voraussetzungen haben. Während einige Technologien (zum Beispiel der Natronlaugenspeicher) die Wärme mit sehr kleinen Verlusten über eine lange Zeit speichern können, sind die Verluste bei anderen Technologien wesentlich grösser. Solche verlustbehaftete Technologien eignen sich für die Speicherung über kleinere Zeitabschnitte. Die Natronlaugenspeichertechnologie befindet sich noch deutlich in der Entwicklungsphase, während die anderen Speichersysteme kommerziell verfügbar sind. Der Vergleich der Ergebnisse sollte entsprechend mit gewisser Vorsicht gemacht werden. In den Abbildungen stehen die Abkürzungen LWS, NLS, Eissp. und Erds. jeweils für den PCM-Latentwärmespeicher, den Natronlaugenspeicher, den Eisspeicher und die Erdsonde. In der Interpretation der Ergebnisse muss noch Folgendes beachtet werden: In diesem Teil der Analyse geht es um das Speichern von Wärme. Es wird hier angenommen, dass diese aus Sonnenkollektoren gewonnen wird. Für den Betrieb dieser Technologien ist aber auch Elektrizität erforderlich. In der Analyse wurde angenommen, dass die Elektrizität vom Netz geliefert wird. Ein Teil davon könnte auch aus erneuerbaren Quellen kommen (zum Beispiel tagsüber mit einer PV-Anlage). Spezifische Szenarien dazu wurden aber nicht betrachtet.

Die Ergebnisse für den heutigen Entwicklungsstand des NLS sind mit „Total NLS (Entw.)“ gekennzeichnet.

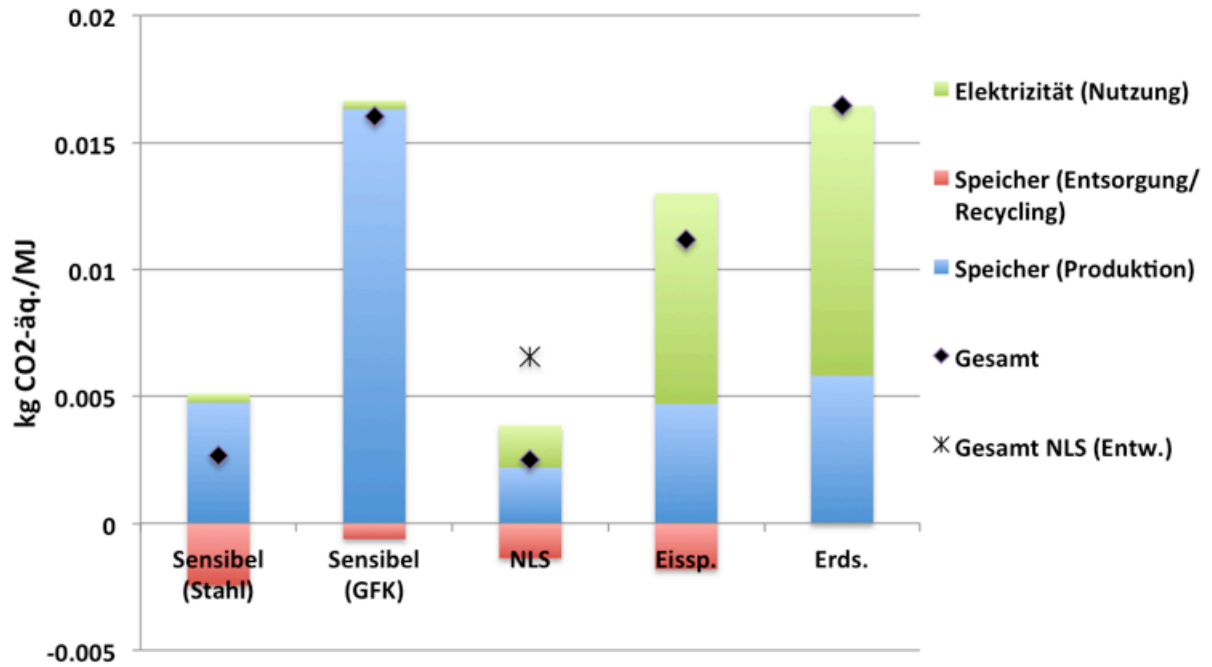


Abbildung 22

Treibhausgasemissionen der Wärmespeicher

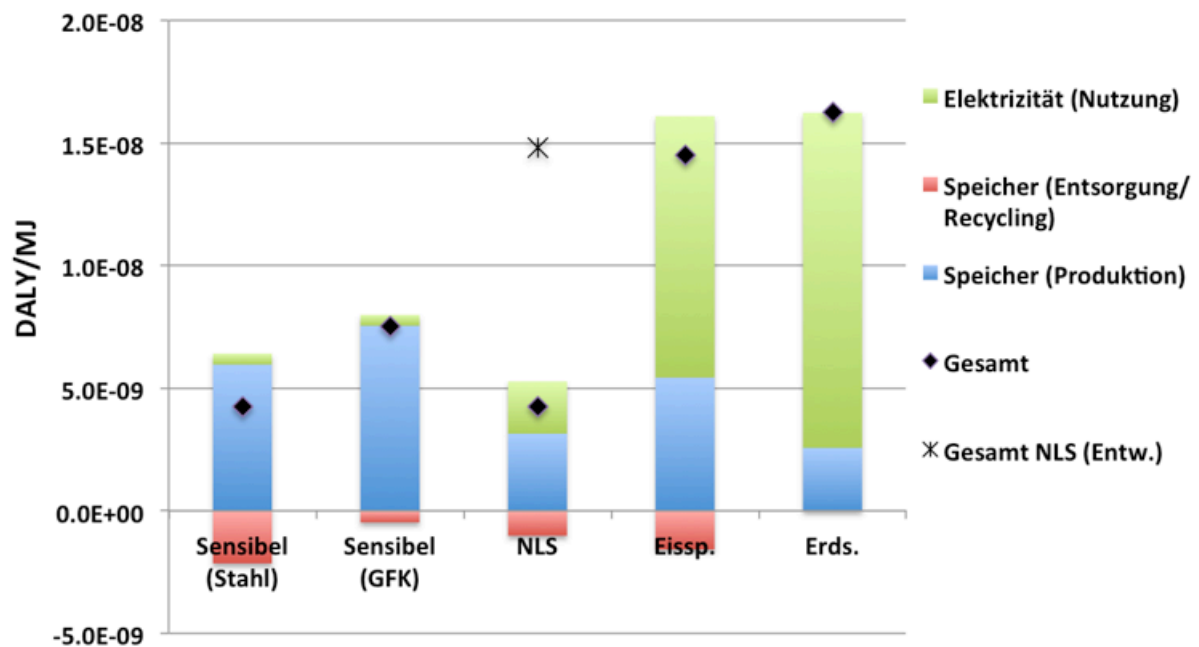


Abbildung 23

Schaden an der Gesundheit durch Wärmespeicher

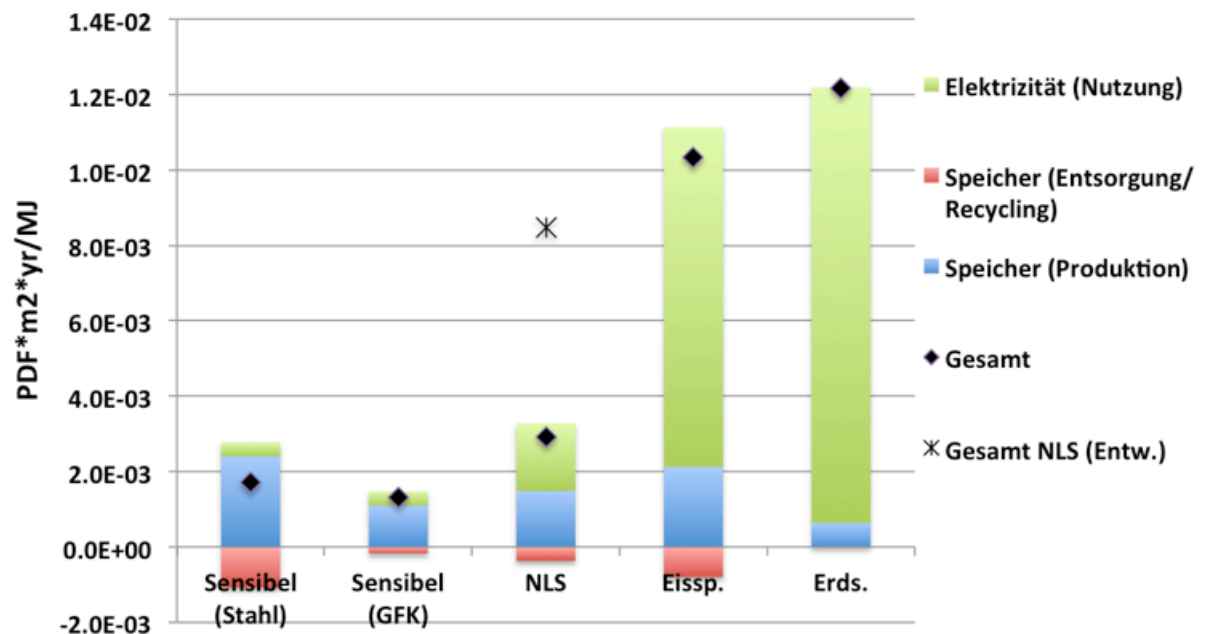


Abbildung 24 Ökosystemschaden durch Wärmespeicher

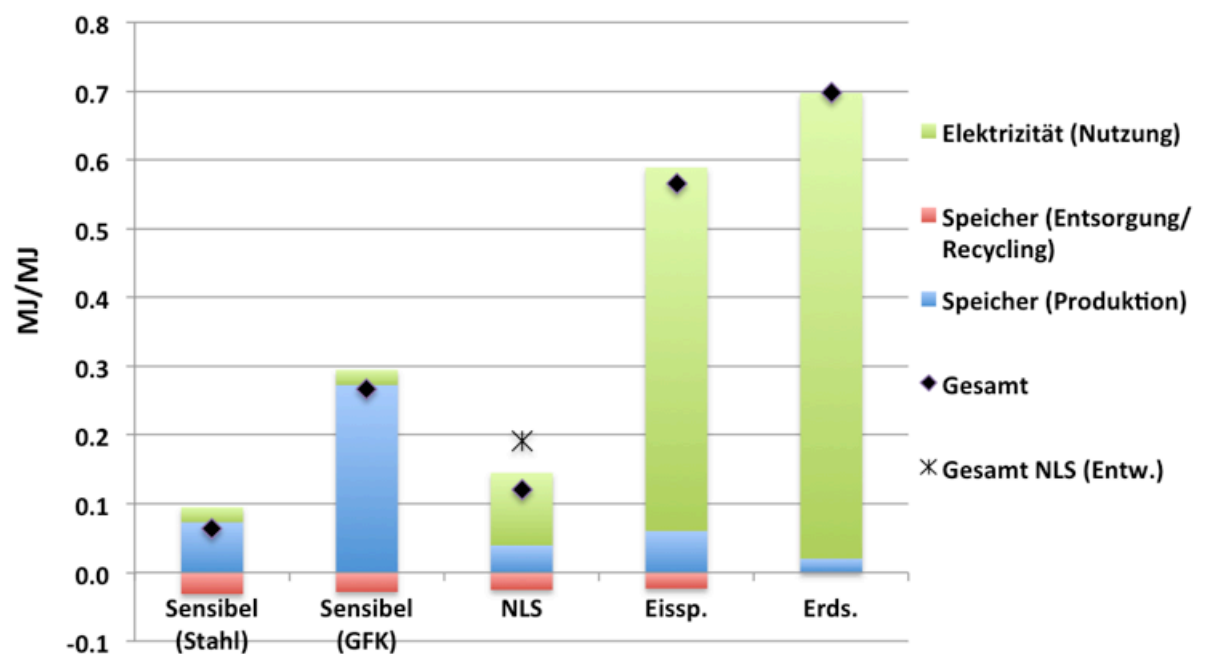


Abbildung 25 Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen für Wärmespeicher

Allgemein können folgende Trends aus den Abbildungen entnommen werden: Der Eisspeicher und der Erdsondenspeicher schneiden tendenziell schlechter ab als die anderen Technologien. Der Hauptgrund dafür ist die Elektrizität aus dem Betrieb der Wärmepumpen, die für das Speichern und



Entnehmen der Energie nötig ist. Wie bereits erwähnt, gilt es hier zu beachten, dass dieser Teil durch die Nutzung von erneuerbaren Quellen (zum Beispiel tagsüber durch PV-Anlagen) reduziert werden könnte. Der Wasserspeicher aus Stahl schneidet bei allen Indikatoren sehr gut ab. Die guten Ergebnisse können auf die lange Lebenszeit zurückgeführt werden, wodurch die Umweltauswirkungen aus der Produktion auf eine grosse Menge an insgesamt gespeicherter und entnommener Energie verteilt werden. Die Umweltauswirkungen des Wassertanks mit GFK sind beim Schaden an der Gesundheit und am Ökosystem in der gleichen Grössenordnung wie die des Stahltanks, jedoch grösser bei den Treibhausgasemissionen und dem Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen. Das ist auf die deutlich höheren Umweltauswirkungen der Produktion von 1 kg GFK im Gegensatz zu 1 kg Stahl zurückzuführen. Beim Natronlaugenspeicher ist interessant zu sehen, wie im abgeleiteten kommerziellen Zukunftsszenario gute Ergebnisse erzielt werden können, sodass zum Beispiel die Treibhausgasemissionen und der Schaden an der Gesundheit sehr ähnlich sind wie die Werte des Wassertanks mit Stahlspeicher. Die Streuung der Ergebnisse ist im Gegensatz zum Szenario, das auf dem heutigen Stand basiert, jedoch gross. Bei den Indikatoren Schaden an der Gesundheit und am Ökosystem werden deutlich schlechtere Werte erhalten. Das zeigt, dass von der Umweltperspektive aus der Natronlaugenspeicher durchaus ein gutes Potential hat, aus technologischer Sicht aber das System sich noch stark entwickeln muss, sonst werden diese Potentiale nicht realisiert. In Abbildung 26 sind die Gesamtauswirkungen nach der Methode der ökologischen Knappheit für alle saisonalen Speichertechnologien aufgezeigt. Das Bild fasst die oben beschriebenen Trends gut zusammen.

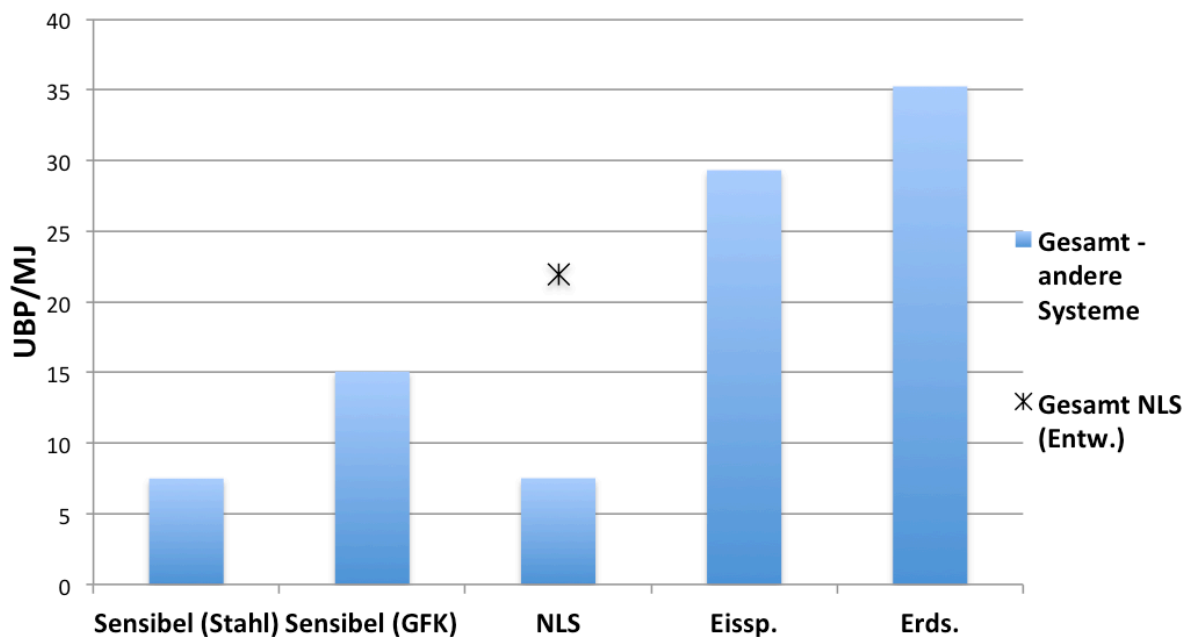


Abbildung 26

Gesamtumweltbelastung (UBP) der saisonalen Speicher nach der Methode der ökologischen Knappheit

Die Grössenordnung der Umweltauswirkungen des PCM-Latentwärmespeichers zeigt, dass der direkte Vergleich irreführend sein kann, da man Tagesspeicher mit Saisonspeichern vergleicht. Die Ergebnisse werden deswegen nur mit den UBPs besprochen (Abbildung 27). Die Ergebnisse zum PCM-Latentwärmespeicher sind in der Abbildung mit dem Akronym „LWS“ markiert.

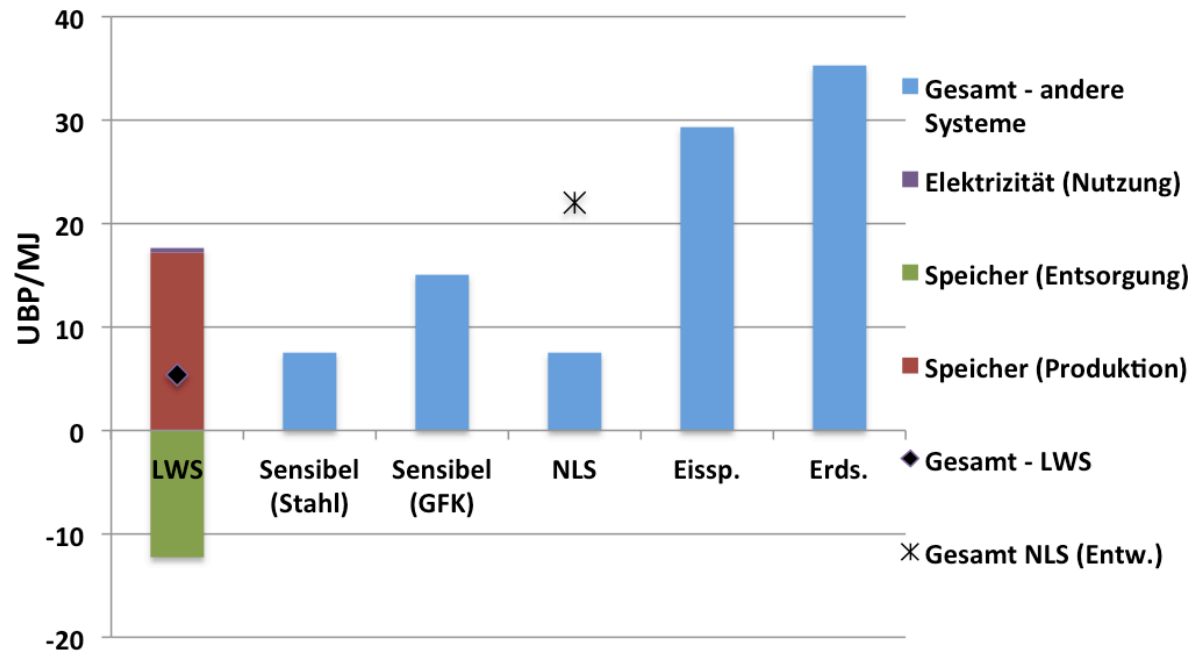


Abbildung 27

Gesamtauswirkungen nach der Methode der ökologischen Knappheit für alle Technologien

Der PCM-Latentwärmespeicher zeigt grundsätzlich sehr gute Ergebnisse auf. Das ist auf die hohe Energiedichte und gute Rezyklierbarkeit des Systems zurückzuführen.

8.5 Nutzung der Speichertechnologien in einem Quartier

8.5.1 Rahmenbedingungen und Szenarien

Kernziel des vorliegenden Projektes ist es, Vorteile und Herausforderungen des Einsatzes von elektrischen Speichern (ES) und thermischen Speichern (TS) für das Energiemanagement und den Energieverbrauch eines Quartiers aufzuzeigen. Dabei soll die Analyse einen Vergleich ermöglichen zwischen einem Quartier, in dem Technologien zur Produktion von erneuerbarer Energie vorhanden sind aber keine Speichertechnologien und einem Quartier, in dem sowohl die Produktion der Energie, als auch dessen Speicherung betrieben wird. Die Situation ist schematisch in Abbildung 28 dargestellt.

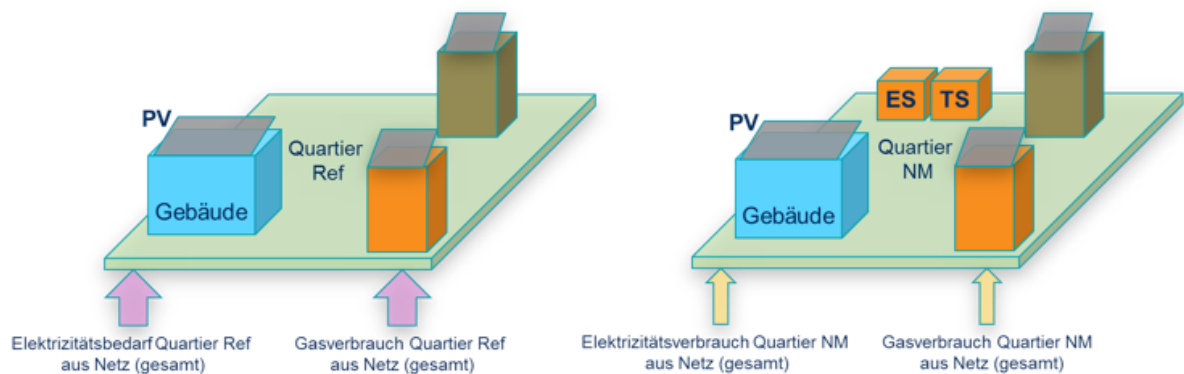


Abbildung 28

Systemunterschiede im Quartier: Modell mit und ohne Speichertechnologien

Es wird angenommen, dass das Quartier mit Speichertechnologien und die Referenz sich nur durch die Verfügbarkeit der Speichertechnologien unterscheiden. Gebäudetechnologien und Technologien für die Produktion erneuerbarer Energien sind für beide Fälle die gleichen. Hierbei handelt es sich um eine Vereinfachung, da insbesondere bei den Szenarien zum maximalen PV Ausbau die Menge an installierter PV Kapazität steigt. Ziel ist, zu verstehen, ob aus Umweltperspektive die zusätzlichen Umweltauswirkungen aus der Produktion, Nutzung und Entsorgung der Speichertechnologien durch einen kleineren Verbrauch an nicht-erneuerbaren Ressourcen (z. B. Strom und Gas aus dem Netz) kompensiert werden können. Damit fokussiert die Analyse auf die Umweltauswirkungen aus der Produktion der nicht-erneuerbaren Energiequellen, die die unterschiedlichen Quartierszenarien brauchen und den Umweltauswirkungen aus dem Lebenszyklus der Speichertechnologien. Für die Bilanzierung des Netzstromes wird der Durchschnitt des heutigen Schweizer Strom-Mix und des Standard-Szenarios der BFE-Prognosen für 2050 genommen. Es werden zwei unterschiedliche Speichertechnologien betrachtet: Wasser- und Erdsondenspeicher. Zu den Wärmespeichern wird ein Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher dazugestellt. Sowohl bei den Wärmespeichern als auch beim Lithium-Ionen-Akkumulator werden unterschiedliche Speichergrößen in Betracht gezogen. Tabelle 28 und Tabelle 29 fassen die wichtigsten Eckzahlen zu den unterschiedlichen Szenarien zusammen. Die Szenarien und Daten wurden vom Zentrum für Integrale Gebäudetechnik der Hochschule Luzern übernommen. Basierend auf unterschiedlichen Annahmen zum Gesamtenergiebedarf des Quartiers in 2035 und 2050 werden für alle Szenarien die entsprechenden nötigen Restenergien bei unterschiedlichen Speicherkonfigurationen aufgezeigt. Zusätzlich werden die Szenarien mit maximalem PV-Strom-Ausbau analysiert. In der Tabelle zu den Eckzahlen für die Erdsonden werden die Zahlen zu den Referenzen nicht wiederholt, da diese die gleichen des Wasserspeichers sind.



Tabelle 28

Eckzahlen zu den Quartierszenarien mit Wasserspeicher

Szenarien- Name	th Grösse	Restenergie elektrisch	Energiebedarf RH Gas	Energiebedarf WW Gas	el Speicher	Bezugsjahr	Kommentar
	[m3]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
Ref 2035	0	340'430	1'271'948	246'462	keine Speicher (Referenz)	2035	Referenz 2035
Ref 2050	0	346'441	897'614	256'820	keine Speicher (Referenz)	2050	Referenz 2050
V0	0	337'605	1'271'880	246'462	100	2035	Standardszenario ohne thermischen Speicher
V01	0	331'283	897'410	256'820	200	2050	Standardszenario ohne thermischen Speicher
V10	1.26	337'384	1'271'966	246'462	100	2035	Standardszenario mit thermischem und elektrischem Speicher
V11	1.26	292'321	897'456	256'820	200	2050	Standardszenario mit thermischem und elektrischem Speicher
V20	4'524	371'973	701'230	137'123	300	2035	Maximaler PV Ausbau
V21	14'137	382'451	0	0	500	2050	Maximaler PV Ausbau



Tabelle 29

Eckzahlen zu den Quartierszenarien mit Erdsonden

Szenarien-Name	Anzahl Sonden	Restenergie thermisch	Energiebedarf RH Gas	Energiebedarf WW Gas	el Speicher	Bezugsjahr	Kommentar
	[Stk.]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]		
V30	16	1'533'080	1'271'689	246'461	100	2035	Standardszenario mit thermischem und elektrischem Speicher
V31	24	1'255'883	883'514	256'820	200	2050	Standardszenario mit thermischem und elektrischem Speicher
V40	28	1'210'067	838'576	137'123	300	2035	Maximaler PV Ausbau
V41	68	110'143	0	0	500	2050	Maximaler PV Ausbau
V42	120	0.3643	0	0	500	2050	Maximaler PV Ausbau

Für die Bilanzierung der Speicher wurden die Daten aus dem vorherigen Kapitel verwendet. Als Wasserspeicher wurde das Modell mit Stahltank angenommen.

8.5.2 Ergebnisse auf Quartierebene

Ergebnisse 2035Abbildung 29 bis Abbildung 33 sind jeweils die Treibhausgasemissionen, der Schaden an der Gesundheit, der Schaden am Ökosystem, der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen und die UBP für die unterschiedlichen Quartierszenarien und für die zwei betrachteten Wärmespeichertechnologien (Wasserspeicher und Erdsonden) aufgezeigt.

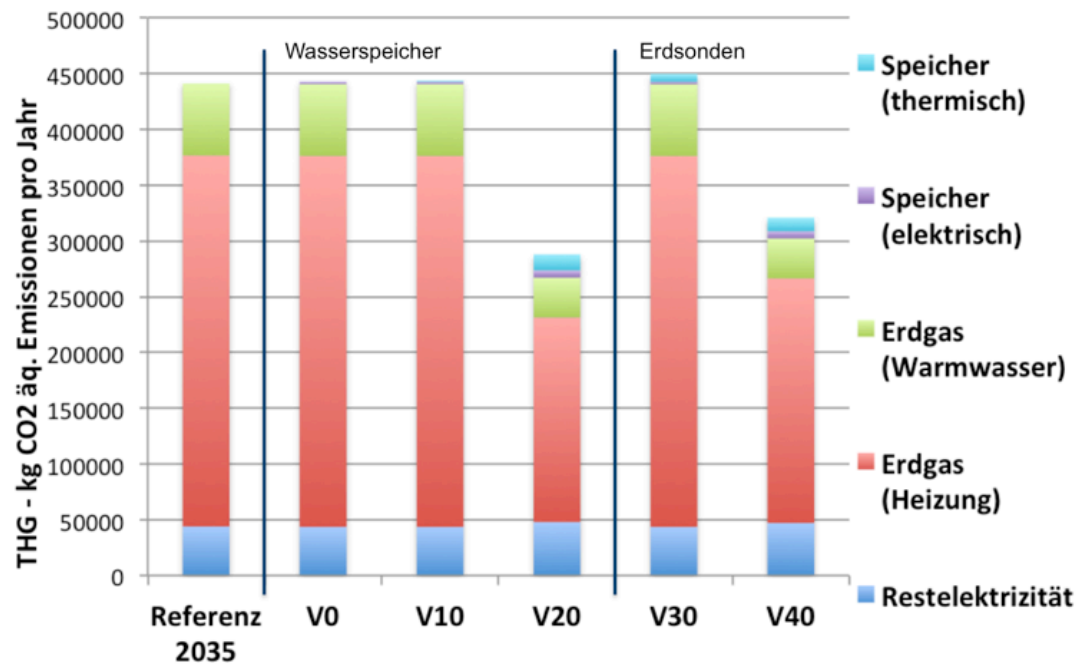


Abbildung 29 Treibhausgasemissionen der Quartierszenarien 2035 für Wasserspeicher und Erdsonden

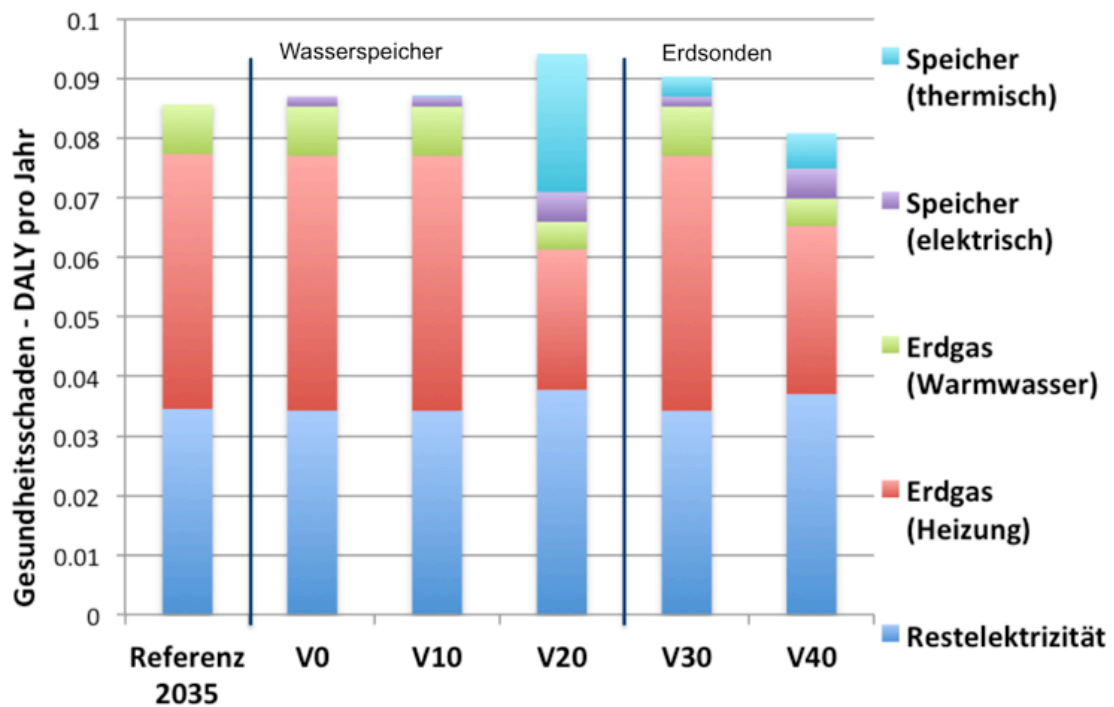


Abbildung 30 Schaden an der Gesundheit bei Quartierszenarien 2035 mit Wasserspeicher und Erdsonden

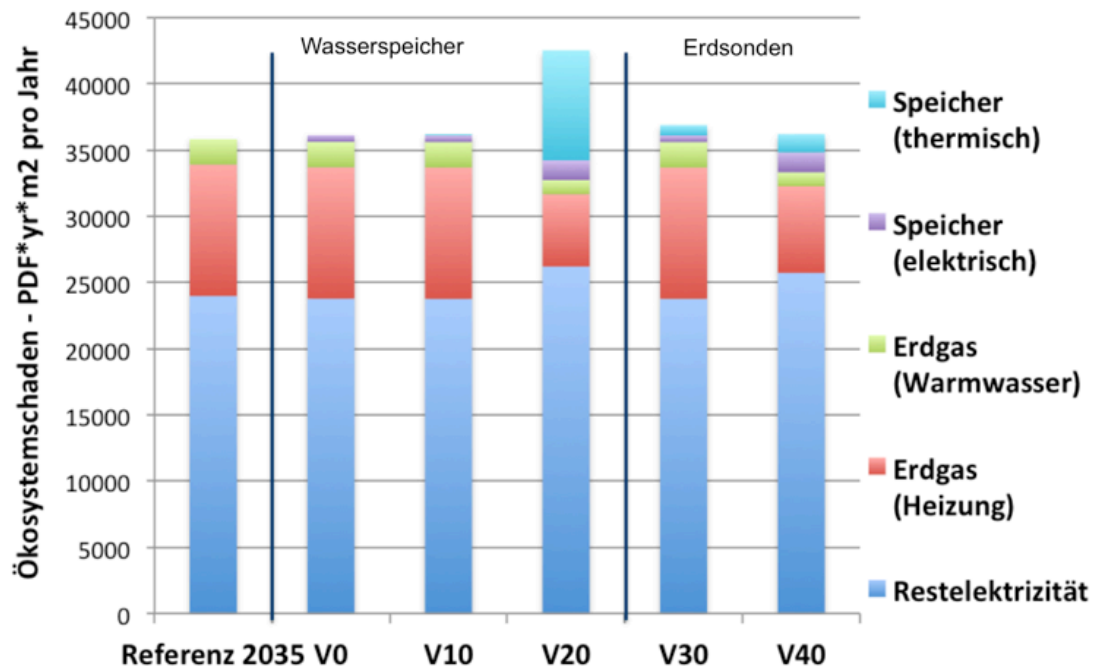


Abbildung 31 Ökosystemschaden bei Quartierszenarien 2035 mit Wasserspeicher und Erdsonden

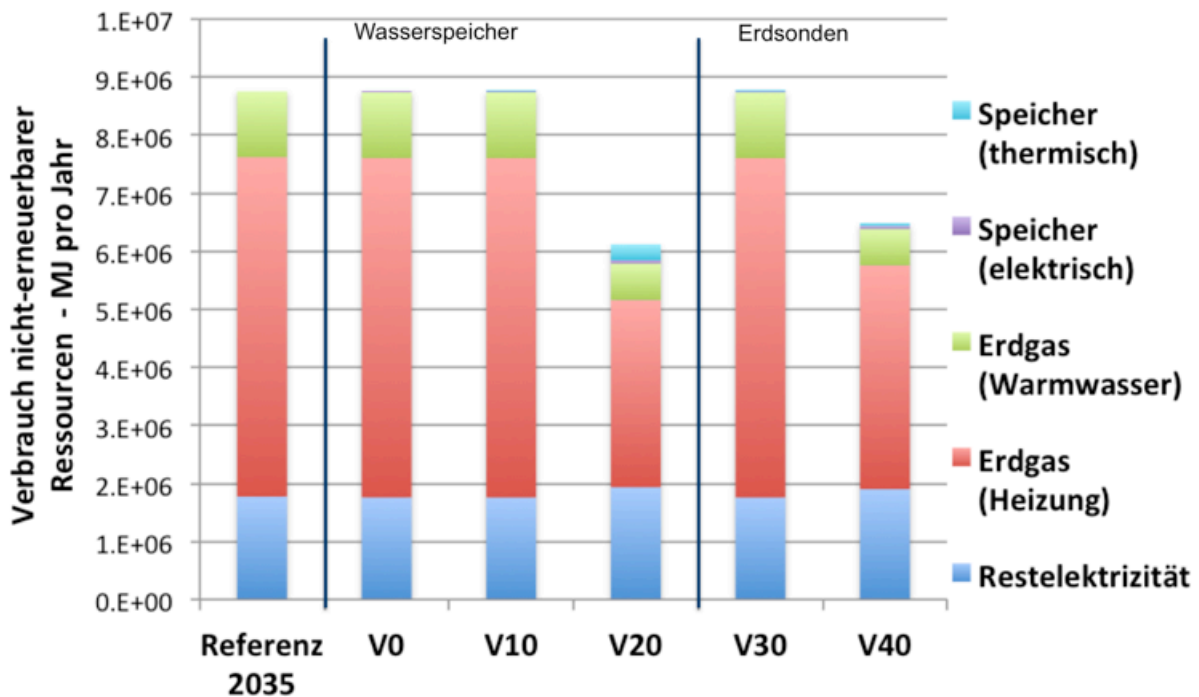


Abbildung 32 Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen der Quartierszenarien 2035 für Wasserspeicher und Erdsonden

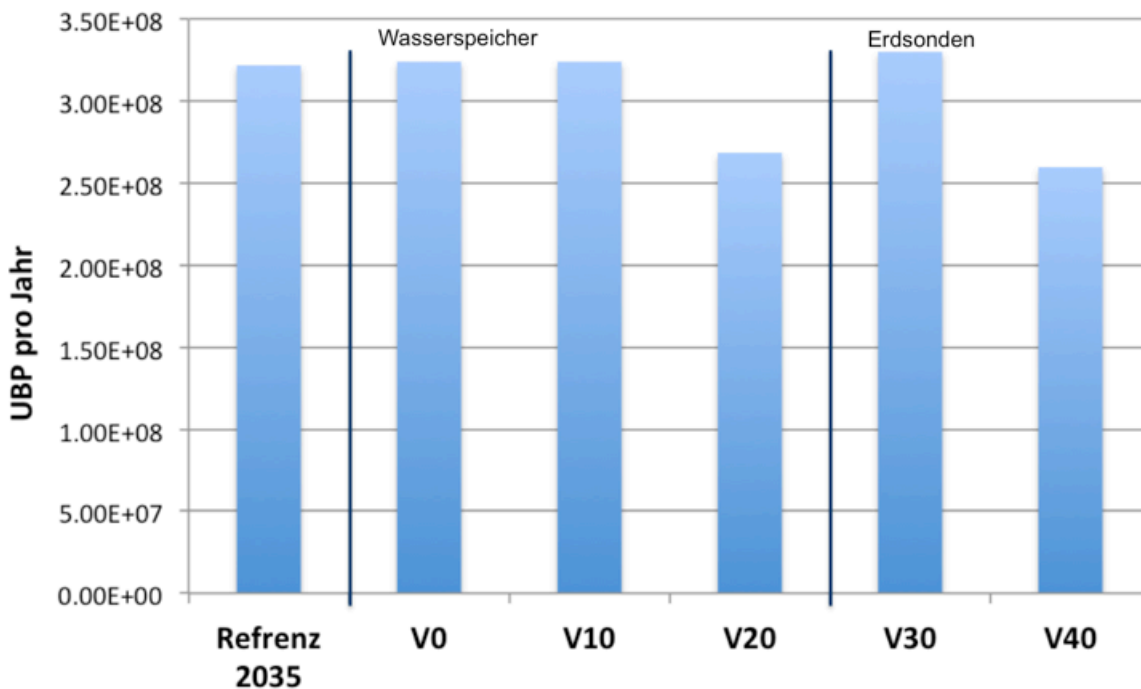


Abbildung 33

Umweltbelastungspunkte (UBP) der Quartierszenarien 2035 mit Wasserspeicher und Erdsonden

Bei Szenarien, in denen nur der elektrische Speicher oder eine kleine Wärmespeicher-Kapazität eingesetzt wird (V0 und V10 beim Wasserspeicher und V3E bei den Erdsonden), sind die Unterschiede zu der Referenz sowohl bei der Nutzung des Wasserspeichers, als auch der Erdsonden minim. Nur beim Einsatz von grossen Speicherkapazitäten (Szenarien V20 beim Wasserspeicher und V40E bei den Erdsonden) sind relevante Unterschiede in den Ergebnissen zu erkennen. In diesem Fall sind aber unterschiedliche Trends bemerkbar. Bei Indikatoren, die stark auf den Verbrauch von fossilen Ressourcen reagieren (THG, Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen und UBP) führt der Einsatz von hohen Speicherkapazitäten zu deutlichen Vorteilen. Ein wichtiger Faktor ist hier der kleinere Verbrauch an Erdgas wegen der gespeicherten Wärme. Bei Indikatoren, die weniger empfindlich auf den Verbrauch von fossilen Ressourcen sind, schlagen dagegen die Beiträge aus der grossen Speicherinfrastruktur stark durch, sodass die Vorteile aus dem kleineren Verbrauch an Erdgas schlussendlich kompensiert werden. In den betrachteten Szenarien führt also in 2035 der Einsatz von Speichertechnologien zu keinen eindeutigen Vorteilen.

8.5.2.1 Ergebnisse 2050

In Abbildung 34 bis Abbildung 38 sind jeweils die Treibhausgasemissionen, der Schaden an der Gesundheit, der Schaden am Ökosystem, der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen und die UBP für die unterschiedlichen Quartierszenarien und für die zwei betrachteten Wärmespeichertechnologien (Wasserspeicher und Erdsonden) aufgezeigt.

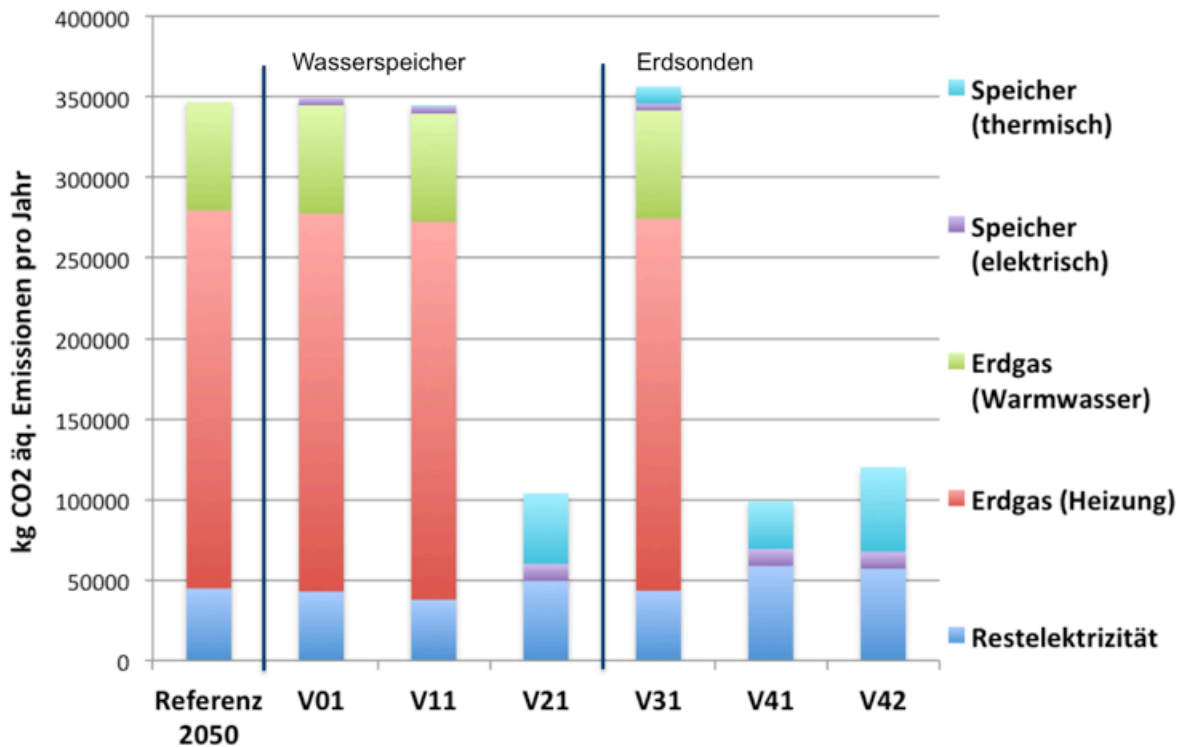


Abbildung 34

Treibhausgasemissionen der Quartierszenarien 2050 mit Wasserspeicher und Erdsonden

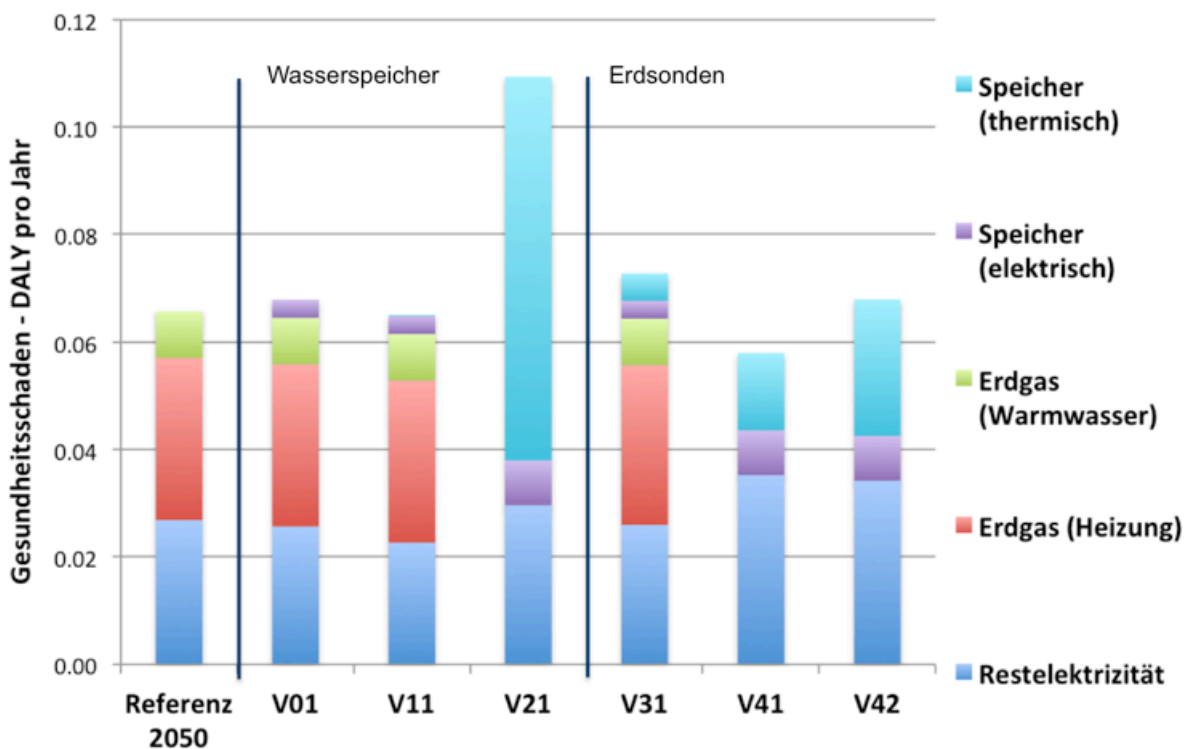


Abbildung 35

Schaden an der Gesundheit bei Quartierszenarien 2050 mit Wasserspeicher und Erdsonden

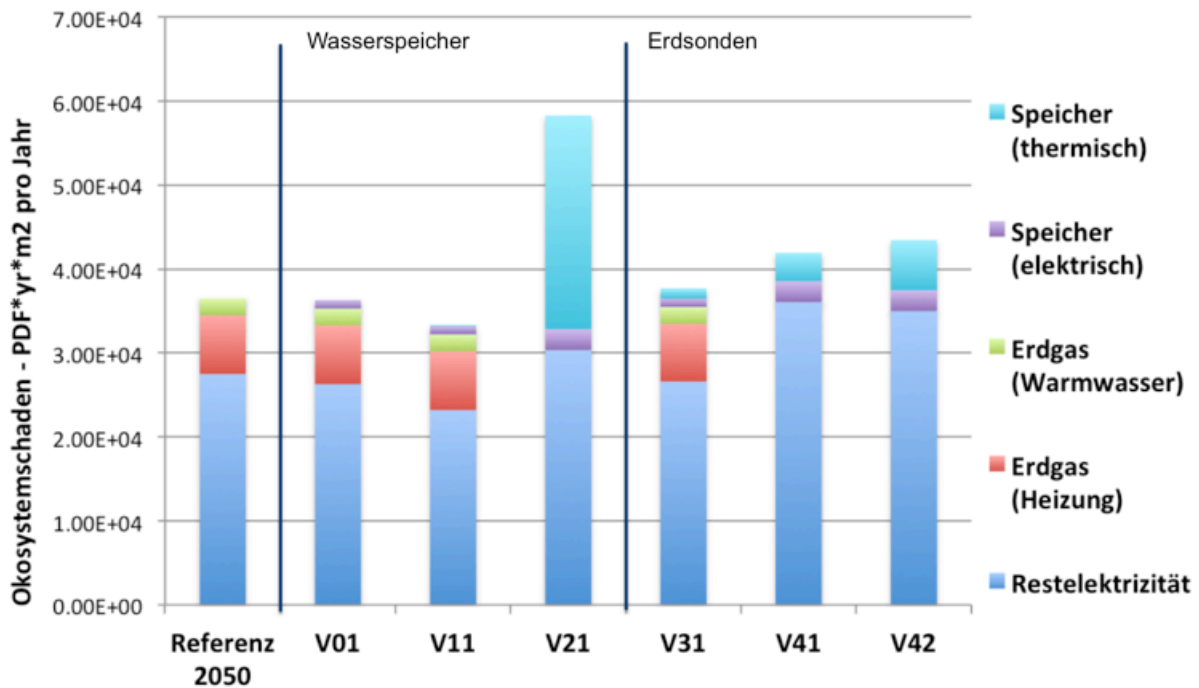


Abbildung 36

Ökosystems Schaden bei Quartierszenarien 2050 mit Wasserspeicher und Erdsonden

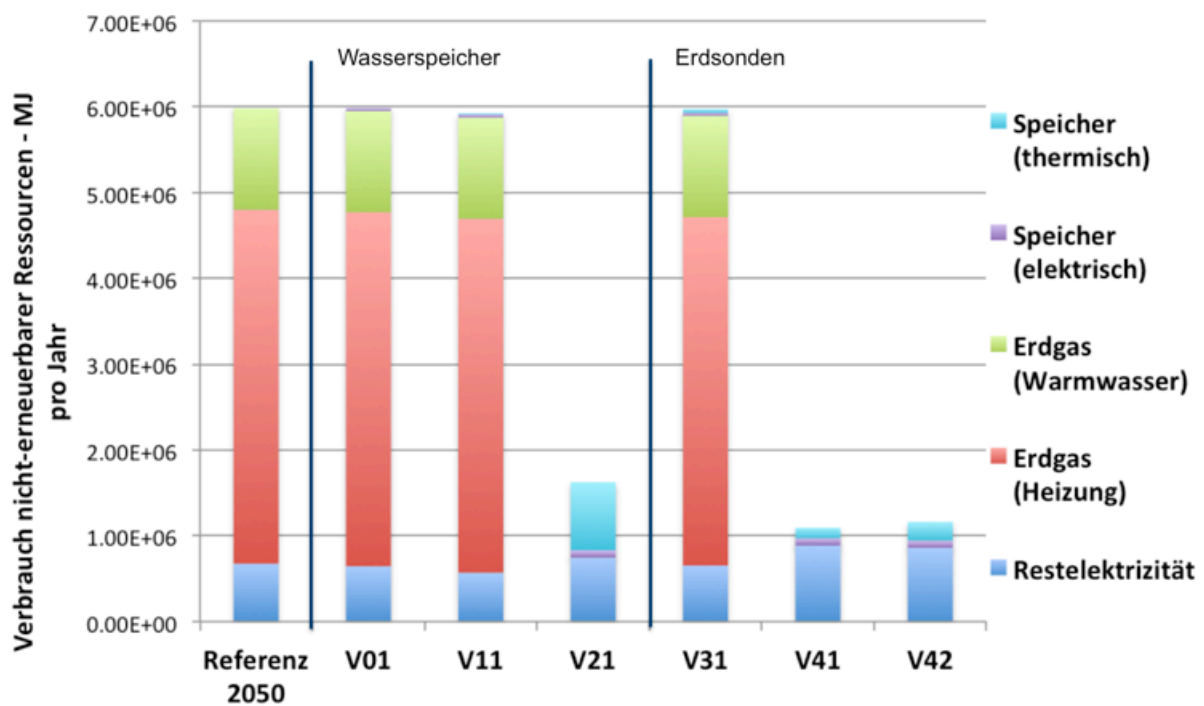


Abbildung 37

Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen bei Quartierszenarien 2050 mit Wasserspeicher und Erdsonden

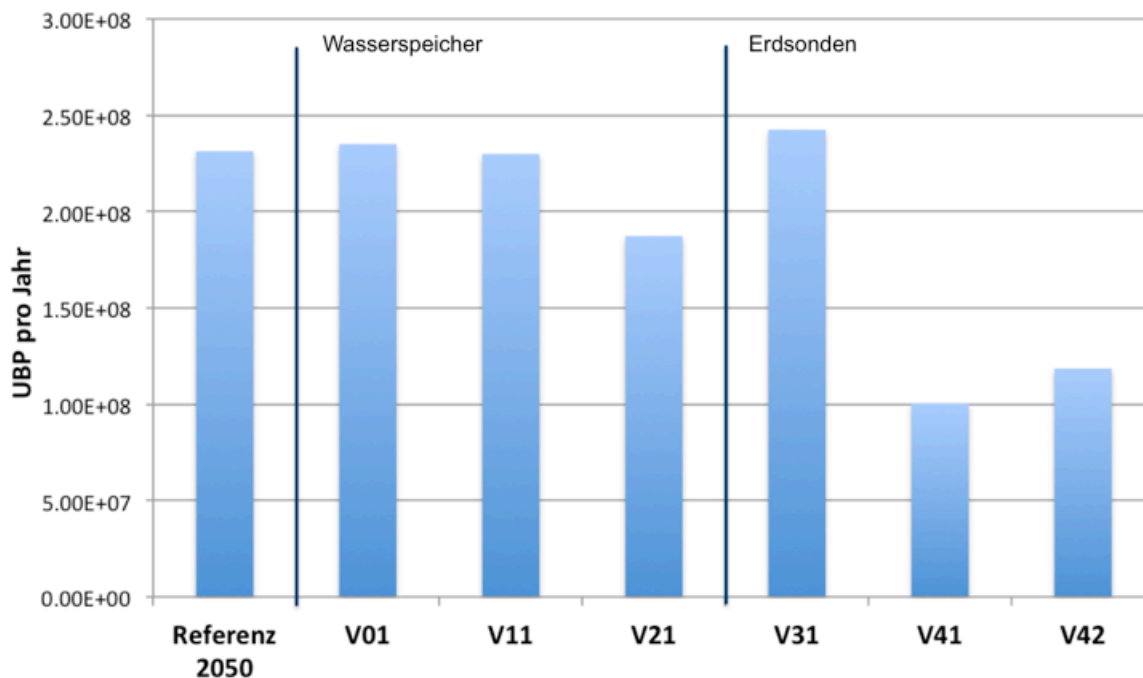


Abbildung 38

Umweltbelastungspunkte (UBP) bei Quartierszenarien 2050 mit Wasserspeicher und Erdsonden

Das Bild ist mit dem von 2035 vergleichbar, wenn auch zum Teil noch ausgeprägter. Bei Szenarien mit kleiner Speicherkapazität sind die Unterschiede zu der Referenz kaum spürbar oder wenig relevant. Bei Szenarien mit hoher Speicherkapazität (V21 beim Wasserspeicher und V41E und V42E bei den Erdsonden) weisen einige Indikatoren (THG, Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen und UBP) klare Vorteile auf, während bei anderen (Schaden an der Gesundheit und am Ökosystem) die Vorteile der Netzeenergieeinsparungen dank der Speicherung der Beiträge aus der grossen Speicherinfrastruktur kompensiert werden.

8.6 Fazit Energie- und Umweltbilanz

Aus den Ergebnissen zu den Akkumulatoren konnten folgende Trends beobachtet werden: Bei allen Indikatoren und bei allen Szenarien schloss der Blei-Akku am schlechtesten ab. Das ist auf das Zusammenspiel von relativ tiefer Energiedichte, kurzer Lebensdauer und hohen Verlusten zurückzuführen. Dagegen schloss der Li-Ionen-Akkumulator bei den meisten Indikatoren (Schaden an der Gesundheit, Schaden am Ökosystem, Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen) tendenziell am besten ab, was auf die hohe Lebensdauer und die tiefen Speicherverluste zurückzuführen ist. Bei den Treibhausgasemissionen kann der Li-Ionen-Akkumulator besser oder schlechter als der Zebra-Akkumulator oder der Vanadium-Redox-Akkumulator abschliessen, je nach Annahme der Lebensdauer. Der Zebra-Akkumulator und der Vanadium-Redox-Akkumulator zeigen bei allen Indikatoren und Szenarien ähnliche Ergebnisse. Interessant ist diesbezüglich, dass die Energiedichte des Vanadium-Redox-Akkumulators viel tiefer als die des Zebra-Akkumulators ist. Das wird aber durch die längere Lebensdauer kompensiert. Die Ergebnisse zum Wasserstoffspeicher mit Brennstoffzelle wurden anschliessend separat diskutiert, da dieser eher für Langzeitspeicherung geeignet ist und für einen direkten Vergleich irreführend sein kann. Die Ergebnisse zeigen auf, dass bei dieser Technologie die tiefe Effizienz von Elektrolyse und Brennstoffzelle zu hohen Beiträgen in den Ergebnissen führt. Eine weitere Technologie, die auch für Langzeitspeicherung eingesetzt werden könnte, ist der Vanadium-



Redox-Akkumulator. Eine detailliertere Analyse mit spezifischen Szenarien zu Lade- und Entlade-Schemata in der Langzeitspeicherung sowie zur Selbstentladung der Speicher ist zusätzlich erforderlich, um schlüssige Folgerungen machen zu können.

Bei den thermischen Speichern zeigen der Eisspeicher und der Erdsondenspeicher tendenziell grössere Umweltauswirkungen auf als die anderen Technologien. Der Hauptgrund dafür ist die Elektrizität aus dem Betrieb der Wärmepumpen, die für das Speichern und Entnehmen der Wärme bereitgestellt werden muss. Hier ist zu beachten, dass dieser Beitrag durch die Nutzung von erneuerbaren Quellen (zum Beispiel tagsüber durch PV-Anlagen) zum Teil reduziert werden könnte. Der Wasserspeicher aus Stahl schnitt bei allen Indikatoren sehr gut ab. Die guten Ergebnisse können zum Teil auf die lange Lebenszeit zurückgeführt werden, wodurch die Umweltauswirkungen aus der Produktion auf eine grosse Menge an insgesamt gespeicherter und entnommener Energie verteilt werden. Die Umweltauswirkungen des Wassertanks mit GFK sind beim Schaden an der Gesundheit und am Ökosystem in der gleichen Grössenordnung wie diejenigen des Stahltanks, jedoch grösser bei den Treibhausgasemissionen und beim Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen. Das ist auf die deutlich höheren Umweltauswirkungen der Produktion von 1 kg GFK im Gegensatz zu 1 kg Stahl bei diesen Indikatoren zurückzuführen. Beim Natronlaugenspeicher ist interessant zu sehen, wie im abgeleiteten kommerziellen Zukunftsszenario gute Ergebnisse erzielt werden können, sodass zum Beispiel die Treibhausgasemissionen und der Schaden an der Gesundheit sehr ähnlich sind wie die Werte des Wassertanks mit Stahlspeicher. Die Streuung der Ergebnisse im Gegensatz zum Szenario, das auf dem heutigen Stand basiert, ist jedoch gross, sodass in diesem Falle insbesondere beim Schaden an der Gesundheit und am Ökosystem deutlich schlechtere Werte erhalten werden. Das zeigt auf, dass aus Umweltperspektive der Natronlaugenspeicher sehr gutes positives Potential hat, aber dafür aus technologischer Sicht das System sich noch stark entwickeln muss, um dieses Potential tatsächlich umwandeln zu können. Anschliessend wurden auch die Umweltauswirkungen des Latentwärmespeichers in Betracht gezogen. Dieser wurde separat diskutiert, weil es sich eher um einen Tagespeicher handelt, während die anderen Technologien generell für Langzeitspeicherung geeigneter sind. Der Latentwärmespeicher zeigt grundsätzlich sehr gute und dem Stahl-Wasserspeicher sehr ähnliche Ergebnisse auf. Das ist auf die hohe Energiedichte und gute Rezyklierbarkeit des Systems zurückzuführen.

Bei der Nutzung von Speichertechnologien im Quartier kann, unabhängig ob ein Wasserspeicher oder Erdsondenspeicher eingesetzt wird, Folgendes beobachtet werden: Bei Szenarien, in denen nur der elektrische Speicher oder eine kleine Wärmespeicher-Kapazität eingesetzt wird, sind die Unterschiede zu der Referenz (Umweltauswirkungen des Quartiers ohne Speicher) minim. Nur beim Einsatz von grossen Speicherkapazitäten sind relevante Unterschiede in den Gesamtumweltauswirkungen zu erkennen. In diesem Fall sind aber unterschiedliche Trends bemerkbar. Bei Indikatoren, die stark auf den Verbrauch von fossilen Ressourcen reagieren (THG, Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen und UBP) führt der Einsatz von hohen Speicherkapazitäten zu deutlichen Vorteilen. Ein wichtiger Faktor ist hier der kleinere Verbrauch an Erdgas dank der gespeicherten Wärme. Bei Indikatoren, die weniger empfindlich auf den Verbrauch von fossilen Ressourcen sind, schlagen dagegen die Beiträge aus der grossen Speicherinfrastruktur stark durch, sodass die Vorteile aus dem kleineren Verbrauch an Netzenergie durch die gespeicherte Energie wieder kompensiert werden. In den betrachteten Szenarien führt also der Einsatz von Speichertechnologien nicht zu eindeutigen Vorteilen.



9 Empfehlungen

9.1 Elektrische Speicher

Die im Projekt untersuchten elektrischen Speicher haben mit Ausnahme des Wasserstoffspeichers ihre Stärken in der kurzzeitigen Speicherung. Beim Einsatz als Langzeitspeicher wird pro Speichereinheit unter Betrachtung der Lebensdauer deutlich weniger Energie gespeichert, da der Energieumsatz massiv reduziert wird. Die in Bezug auf die LCA relevanten Auswirkungen (Treibhausgasemissionen, Schaden an der Gesundheit, Schaden am Ökosystem und der Verbrauch von nicht-erneuerbaren Ressourcen), die allein durch die Produktion des Speichers entstehen, würden durch die Anwendung als Saisonspeicher um ein Vielfaches ansteigen. Da die Umweltbelastung gemessen in UBP durch Elektrospeicher bereits im aktuellen Anwendungsszenario als Kurzzeitspeicher deutlich höher liegt als bei den thermischen Speichern, ist eine Anwendung der untersuchten elektrischen Speicher als Saisonspeicher mit Ausnahme des Wasserstoffspeichers nicht zu empfehlen.

Der Wasserstoffspeicher ist die einzige Technologie, die für eine saisonale Speicherung von Strom im Quartierkontext empfohlen werden kann. Dies zeigen die Betrachtungen der LCA deutlich, da der Wasserstoffspeicher das grösste Verhältnis von Verlusten zu Produktion minus Recycling aufweist. Dies zeigt, dass die Umweltbelastung primär von der Umweltbelastung des eingespeicherten Stroms ausgeht. Kann dieser als Überschuss aus PV-Strom zur Verfügung gestellt werden, kann das System als Langzeitspeicher empfohlen werden. Wird Strom als Überschuss zur Verfügung gestellt, muss allerdings die korrekte Allokation der Umweltauswirkungen dieser Energie zum produzierenden System berücksichtigt werden.

Da die Produktion von Überschussenergie immer auch die Installation der entsprechenden Produktionsanlagen erfordert, muss dies in einer allfälligen LCA-Betrachtung berücksichtigt werden. Im Falle von mit Photovoltaik produziertem Strom müssen z. B. die Umweltauswirkungen einer erhöhten installierten PV-Leistung und der saisonalen Speicherung für die Bereitstellung von Winterstrom berücksichtigt werden. Da im vorliegenden Falle das Quartier bereits mit einer maximalen installierten PV-Leistung gerechnet wurde, fällt die Option einer Leistungserhöhung dahin. Für Quartiere ist eine Erhöhung der installierten PV-Leistung für den Ersatz eines elektrischen Saisonspeichers auf Grund der begrenzten Fläche in der Regel keine Option.

Beim Einsatz von Akkumulatorspeichern als Tagesspeicher in Quartieren ist die Lithium-Ionen-Technologie in der Regel allen anderen Stromspeichertechnologien vorzuziehen. Ausgenommen sind Second-Life-Akkumulatoren. Dies primär aus ökologischen Überlegungen, da der Lithium-Ionen-Akkumulator aktuell klar die geringsten Umweltauswirkungen aufweist. Obwohl Bleiakkumulatoren gemeinhin als gut rezyklierbar gelten, ist die Ökobilanz dieser Akkumulatoren deutlich schlechter als bei allen anderen Stromspeichern. Auch aus technischer Sicht erfüllt der Lithium-Ionen-Akkumulator die Anforderungen an einen Quartierspeicher, da die Kennzahlen eines Lithium-Ionen-Speichers praktisch in allen Punkten besser sind als diejenigen der anderen Technologien.

Mit der Simulationen von Energiebedarf und -produktion im Quartier in Rheinfelden konnte gezeigt werden, dass der Einsatz eines elektrischen Speichers die durchschnittliche Auslastung der Betriebsmittel zwar senken konnte, jedoch die Belastungsspitzen nicht reduziert wurden. Überspannungen konnten mit dem Einsatz des Akkumulatorspeichers nicht verhindert werden. Als Lösung bot sich im konkreten Fall die Verstärkung der Hauptzuleitungen an. Diese Situation ist darin begründet, dass der Speicher nur auf 90% aller Verbrauchssituationen ausgelegt wurde. Die Überspannungen stellen somit eine seltene, aber relevante Situation dar. Der Netzausbau kann mit dem Einsatz von elektrischen Speichern im konkreten Beispiel in Rheinfelden ohne Lastmanagement und Wirkleistungsreduktion der PV nicht vermieden werden.

Die Simulationen zeigen, dass der Einsatz eines Stromspeichers erst ab einer Photovoltaik-Stromproduktion von ca. 10% des Energieverbrauchs sinnvoll ist. Unter diesem Wert ist der optimierte Eigenverbrauch dominierend und elektrische Speicher werden aus technischer Sicht nicht benötigt.



Der Wert von 10% PV-Strom am gesamten Energiebezug zeigt, dass Speicher in Quartieren erst bei deutlich mehr installierter PV-Leistung empfohlen werden können.

Die Installation von kleinen Hausspeichern ist aus volkswirtschaftlicher Perspektive noch nicht notwendig, da der Solarstromanteil in der Schweiz noch unter 10% liegt. Die Installation von Quartierspeichern dürfte ab 2035, ein entsprechender Ausbau der Photovoltaik vorausgesetzt, an Bedeutung gewinnen.

In der Studie wurde für das Quartier bereits mit einer maximalen installierten PV-Leistung ausgegangen. Ein zusätzlicher Ausbau der Photovoltaik wäre nur noch an Fassadenflächen und ausserhalb des Quartiers möglich. Auch wenn Szenarien wie der Einbezug von Solarstrom von ausserhalb des Quartiers die Systemgrenze überschreiten, erscheint ein kurzer Exkurs auf Grund der durchgeführten LCA-Betrachtungen zum Thema Speicher angebracht: Für die Bereitstellung von Winterstrom besteht neben der Langzeitspeicherung auch die Option, erneuerbaren Strom in den Wintermonaten mit Photovoltaikanlagen, die nur im Winter genutzt werden, zu produzieren. Basierend auf den hohen Umweltauswirkungen des H₂-Speichers stellt sich die Frage, ob die Nutzung dieser Technologie für die Langzeitspeicherung durch die Installation einer höheren PV-Kapazität substituiert werden könnte. Erste Betrachtungen dieser Systeme lassen vermuten, dass die Ökobilanz der Langzeitspeicherung keinen eindeutigen Vorteil gegenüber der Installation von zusätzlicher Photovoltaik für die Wintermonate aufweist. Dies würde bedeuten, dass die Langzeitspeicherung deutlich an Relevanz in zukünftigen Energieversorgungsszenarien verliert.

9.2 Thermische Speicher

Die im Projekt betrachteten thermischen Speicher eignen sich grundsätzlich alle für die saisonale Speicherung von thermischer Energie. Die LCA zeigt, dass der Wassertank aus Stahl bei allen Indikatoren am besten abschneidet. Daher wird empfohlen, wenn immer möglich den Einsatz eines thermischen Wasserspeichers zu prüfen. Der Wasserspeicher aus glasfaserverstärktem Kunststoff schneidet weniger gut ab, hat aber als Wasserspeicher ebenfalls die Eigenschaft nur wenig Hilfsenergie in Form von Strom zu benötigen. Dies im Gegensatz zum Erdsonden- oder Eisspeicher. Da sich die Umweltbelastung von Strom in den Wintermonaten in Zukunft stark von der Umweltbelastung des im Sommerhalbjahr produzierten Stroms unterscheiden könnte, muss dem Stromverbrauch der thermischen Saisonspeicher die notwendige Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Der Einsatz eines Eisspeichers oder eines Erdsondenspeichers sollte vor allem dann geprüft werden, wenn ein Wasserspeicher nicht installiert werden kann oder dieser nicht alle Anforderungen der Heizung und Kühlung abdecken kann.

Die Simulationen von Energiebedarf und -produktion zeigen, dass Saisonspeicher nur dann vorteilhaft eingesetzt werden können, wenn grossflächige Photovoltaikanlagen einen hohen Stromüberschuss produzieren, mit dem die Wärmepumpen die thermischen Langzeitspeicher laden können. Dies trifft allerdings in Quartieren auch im Bedarfsszenario 2050 mit Produktion nach Energieeffizienzpfad noch nicht zu. Somit bleibt für Quartiere, die einer für die Schweiz typischen Erneuerungsrate folgen, noch genügend Zeit, um die thermischen Speicher zu planen. Es wird empfohlen, grosse Wasserspeicher in die Quartierentwicklung einzuplanen. Es ist denkbar, dass der geplante Raum zu einem späteren Zeitpunkt für eine andere, effizientere thermische Speichertechnologie verwendet werden kann. Eine Second-Life-Nutzung von bestehenden Bauten und Strukturen als Wasserspeicher sollte geprüft werden, da dies die Ökobilanz weiter verbessern könnte.

Da für den Einsatz eines Saisonspeichers das Verhältnis von installierter PV-Leistung zum Gesamtenergieverbrauch relevant ist, wird empfohlen, das Verhältnis durch PV-Installationen und Energiesparmassnahmen möglichst schnell zu vergrössern, um bereits vor 2050 die energetischen Voraussetzungen für Saisonspeicher zu schaffen.



Auch die Problematik, dass die notwendige Fläche für Erdsondenspeicher nicht unbegrenzt ist, muss beachtet werden. Es kann daher ein zweistufiges Vorgehen empfohlen werden:

1. Schritt: Ausnützung der vorhandenen Möglichkeiten für Wasserspeicher;
2. Schritt: den fehlenden Speicherbedarf mit einem Erdsondenspeicher ergänzen.

Der LCA-Vergleich zwischen den betrachteten thermischen Langzeitspeichern (Wasser und Erdsonden) zeigt, dass sich ein Erdsondenfeld besser als Langzeitspeicher eignet als ein Wassertank. Dies hauptsächlich wegen dem realistischeren Ausmass des Speichers. Dies liegt primär daran, dass das Erdreich gleichzeitig als Speicher und Quelle funktionieren kann.

Die LCA von Quartieren mit thermischen und elektrischen Speichern ist denen ohne diese Speicher ähnlich. Nur mit einem maximalen Ausbau der Produktion von erneuerbaren Energien wie Photovoltaik können Speicher die Umweltauswirkungen der Energieversorgung von Quartieren deutlich reduzieren. Die Förderung von Energieeffizienz und erneuerbarer Energieproduktion ist daher deutlich stärker zu gewichten als die saisonale Speicherung.



Referenzen

- [Bundesamt für Energie, 2013] *Energiespeicher in der Schweiz: Bedarf, Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen im Kontext der Energiestrategie 2050*, BFE, Bern, 2013.
- [Brunner D., 2014] Brunner D., "Dynamische Modellierung eines saisonalen Sorptionsspeichers", MSE-Vertiefungsarbeit am IEFE (ZHAW) 2014
- [Carmen, 2015 online] www.carmen-ev.de
- [DIgSILENT, online] www.digsilent.de
- [ecoinvent3.0, 2013] ecoinvent3.0. (2013). ecoinvent v3.01 LCI database
- [Frey & Rüegger, 2015] Bachelor-Diplomarbeit, BDA_G_15_27
- [Frischknecht, R. et al., 2006] Frischknecht, R., Steiner, R., & Jungbluth, N. (2006). Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006
- [Fumey B. & Fritschi, M. 2014] Fumey B. & Fritschi, M. Interner Report, 2014
- [Hafner A., 2014] Hafner A.: *Technologieroadmap stationärer Energiespeicher*, Bachelor-Diplomarbeit, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, 2014.
- [Heck, T., 2007]. ecoinvent Report 6 - Teil X: Wärmepumpen, 2007
- [Heeren N. et al., 2009] Heeren N., Gabathuler M., Wallbaum H., Jakob M., Martius G., Gross N., 2009. Gebäudeparkmodell SIA Effizienzpfad Energie Dienstleistungs- und Wohngebäude. Vorstudie zum Gebäudeparkmodell Schweiz – Grundlagen zur Überarbeitung des SIA Effizienzpfades Energie. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- [Hewicker C. et al., 2013] Hewicker, C. et al.: *Energiespeicher in der Schweiz – Bedarf, Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen im Kontext der Energiestrategie 2050*. Bundesamt für Energie, BFE, Bern, Schlussbericht 12. Dezember 2013.
- [Hiremath, 2014] Hiremath, M., Comparative Life Cycle Assessment of Stationary Battery Storage Technologies for Balancing Fluctuations of Renewable Energy Sources, 2014
- [Hochschule Luzern, 2015] Hochschule Luzern, Forschungsgruppe Thermische Speicher, CC TEVT, interne Mitteilung
- [Hochschule Luzern, 2015]
- [Humbert, S. et al., 2014] Humbert, S., De Schryver, A., Bengoa, X., Margni, M., & Jolliet, O. (2014). IMPACT 2002+: User Guide. Retrieved from http://www.quantis-intl.com/pdf/IMPACT2002+_UserGuide_for_vQ2.21_30April2014a.pdf
- [ISO 14040: 2006] ISO 14040: (2006). Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework



[ISO 14044: 2006]	ISO 14044: 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines
[Jordan U., Vajen K., 2003]	Jordan U., Vajen K., 2003. <i>DHWcalc-Werkzeug zur Generierung von Trinkwasser-Zapfprofilen auf statistischer Basis</i> , Technical University of Denmark DTU, http://www.uni-kassel.de/~solar .
[Majeau-Bettez et al., 2011]	Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R., & Stromman, A. H. (2011). Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles (vol 45, pg 4548, 2011). <i>Environmental Science & Technology</i> , 45(12), 5454. http://doi.org/10.1021/es2015082
[Meteonorm]	Meteonorm Software, « www.meteonorm.com »
[Minder et al., 2014]	Minder, S., Wagner, R., Mühlebach, M., & Weisskopf, T.. <i>EnergieSchweiz: Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren – Technologiestudie</i> , 2014.
[Prognos, 2012]	Prognos AG (2012). <i>Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050</i> . Swiss Federal Office of Energy (SFOE).
[PVSyst Software]	PVSyst Software, « www.pvsyst.com »
[Rydh, 1999]	Rydh, C., Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. <i>Journal of Power Sources</i> , 80, 21–29, 1999
[SIA Merkblatt, 2006]	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2006. <i>SIA 2024: Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik</i> , Zürich.
[Simons, A., & Firth, S., 2011].	Simons, A., & Firth, S., Life-cycle assessment of a 100% solar fraction thermal supply to a European apartment building using water-based sensible heat storage. <i>Energy and Buildings</i> , 43, 1231–1240, 2011
[Solarkataster Kanton Aargau]	Departement Bau, Verkehr und Umwelt - Kanton Aargau, «Solarkataster Kanton Aargau,» [Online]. Available: https://www.ag.ch/de/bvu/energie/energieversorgung/energie_aus___/sonne/solarkataster/solarkataster_1.jsp .
[VEiN-Grid, Schnyder, G.]	Projektleitung: Schnyder Ingenieure AG, 6331 Hünenberg; Informationen zum Projekt: www.vein-grid.ch



10 Anhang

10.1.1 Wasserspeicher

Wasserspeicher sind ein verbreitetes Speichersystem, da Wasser als Wärmeträgermedium optimale physikalische Eigenschaften aufweist. Die hohe spezifische Wärmekapazität und niedrige Viskosität von Wasser stellen keine hohen Anforderungen an die Speichertechnik. Mit ein und demselben technischen System lassen sich das Ein- und Ausspeichern der thermischen Energie bewerkstelligen. Nachteilig ist die begrenzte Maximaltemperatur, da das Wasser in Warmwassersystemen nicht über seinen Siedepunkt erwärmt werden kann.

Für Gebäude werden Saisonspeicher mit Metall- und Kunststofftanks auf dem Markt angeboten. Der Metallspeicher ist in erster Linie für die Installation in Gebäuden konzipiert. Es werden Speicher bis zu 200 m³ Volumen verbaut. Kunststofftanks mit Volumina zwischen 10 bis 50 m³ sind für die Verlegung im Erdreich konzipiert. Mit einer integrierten Isolation werden Wärmedurchgangskoeffizienten von 0.12 W/(m²*K) erzielt.

Speicherkosten:

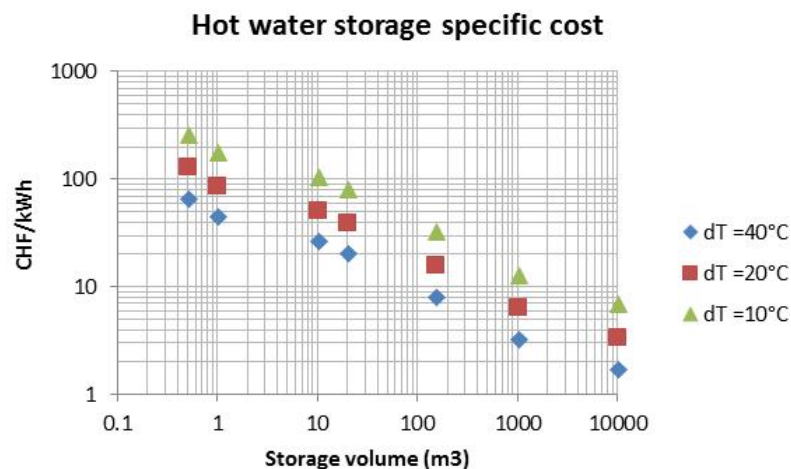


Abbildung 39

Spezifische Investitionskosten für Wasserspeicher
[Hochschule Luzern, 2015]

10.1.2 Erdsondenspeicher

Erdsondenspeicher können in tonigem, wassergesättigtem Boden in Tiefen von 30 bis 90 Metern Wärme speichern. Mehrere Erdsonden werden in Abständen von 1.5 bis 2.5 Metern in die Tiefe gebohrt. Je nach Kollektorgrösse und Sondenanzahl kann so ein Nahwärmenetz versorgt werden. Erdsondenspeicher bedingen einen gut bohrbaren Boden ohne Grundwasser. Vor dem Bau von Erdsondenspeichern sind geologische Untersuchungen des Baugrundes durch Tiefenbohrungen erforderlich.

Grundsätzlich soll der Erdsondenspeicher ein optimiertes Verhältnis Oberflächen zu Volumen aufweisen. Daraus resultiert meist ein Sondenfeld in zylindrischer Anordnung. Der Durchmesser des Zylinders soll dabei ungefähr gleich der Zylindertiefe (Sondentiefe) sein. Der Speicher wird im Idealfall zur Oberfläche hin gedämmt. Es sollte eine Speichergösse von > 10'000 m³ gewählt werden.



10.1.3 Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher funktionieren durch die Ausnutzung der Enthalpie reversibler thermodynamischer Zustandsänderungen eines Speichermediums, wie z.B. des Phasenübergangs fest-flüssig. Die Ausnutzung des Phasenübergangs fest-flüssig ist das am häufigsten genutzte Prinzip.

Latentwärmespeicher sind platzsparender als Wassertanks oder Kies. Wegen der Nutzung der Latentwärme bewegen sich die Speichertemperaturen auf konstantem Niveau. Hartparaffine schmelzen bei etwa 60 °C. Die Schmelzwärme liegt mit 200 bis 240 kJ/kg um etwa ein Drittel niedriger als die Schmelzwärme von Wasser. Die Wärmekapazität ist mit etwa 2.1 kJ/(kg*K) halb so gross wie die von Wasser. Vorteil ist, dass $\frac{2}{3}$ der Wärme dauerhaft über Monate hinweg im Phasenübergang gespeichert bleibt.

10.1.3.1 Eisspeicher

Wird Wärme in einem konventionellen Warmwasserspeicher eingespeichert, muss dieser Speicher eine gute Wärmedämmung aufweisen. Dies ist dann ein Problem, wenn ein grosser Wärmespeicher als saisonaler Speicher dienen soll. Bei grossen Wärmespeichern wird die Wärmedämmung aufwendig, insbesondere wenn sie von ihrem Volumen her ausserhalb eines Gebäudes aufgestellt werden soll.

Ein Eisspeicher wird bei niedrigen Temperaturen betrieben, typischerweise zwischen 0°C und 20°C. Auf eine Wärmedämmung kann komplett verzichtet werden. Die Zisterne wird oberflächennah in die Erde eingegraben, so dass das untere Ende ca. 4 Meter unter der Erdoberfläche liegt. Oben wird sie mit Erde bedeckt. Da das niedrige Temperaturniveau des Speichers für die direkte Nutzung in einer Zentralheizung und für Warmwasser nicht ausreicht, ist eine Wärmepumpe erforderlich. Diese schickt eine abgekühlte Sole (z. B. ein frostsicheres Glykol/Wasser-Gemisch) durch einen langen Kunststoffschlauch im Wassertank. Der Schlauch dient auch als Wärmetauscher. Wenn das Wasser im Speicher auf 0°C abgekühlt ist, beginnt es zu gefrieren. Beim Gefrieren wird latente Wärme frei. Bei stetiger Wärmeentnahme bleibt die Temperatur konstant bei 0°C. Dabei gefriert ein immer grösserer Teil des Wassers. Obwohl die Wärmepumpe selbst dem ganz eingefrorenen Speicher immer noch Wärme entziehen kann, wird ihre Leistungszahl und damit die Energieeffizienz abfallen.

Der Speicher muss wieder regeneriert werden, wobei zum Schmelzen des Eises wieder entsprechende Wärmemengen zugeführt werden. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten: Im Sommer kann Wärme von Sonnenkollektoren eingeleitet werden – entweder überschüssige Wärme von Warmwasserkollektoren oder von speziell zur Bewirtschaftung des Eisspeichers installierten Kollektoren. Selbst im Winter können einfache, kaum oder gar nicht wärmegeämmte Sonnenkollektoren den Speicher beladen, da die dazu nötige Temperatur sehr tief ist. Selbst Aussenluft reicht, um den Eisspeicher zu regenerieren, solange die Luft wärmer ist als der Speicher. Wo Abwärme zur Verfügung steht, etwa von Abwässern oder Abluft einer Lüftungsanlage, kann auch diese genutzt werden.

10.1.3.2 Natriumacetat-Speicher

Ein verbreitetes Latentwärmespeicher-Prinzip basiert auf einer übersättigten Natriumacetat-Trihydrat-Lösung. Sie wird bei einer Schmelztemperatur von 58°C verflüssigt. Das Material bleibt auch noch bei Temperaturen weit unterhalb des Schmelzpunktes – unter Umständen bis -20°C – als unterkühlte Schmelze in einem metastabilen Zustand flüssig, da das Salz sich in seinem Kristallwasser löst; die Wassermoleküle bilden eine Art eigenes Kristallgitter, das sich zuerst auflöst.

Andere Salzhydrate können ebenfalls verwendet werden, z. B. Glaubersalz mit einem Schmelzpunkt von 32.5°C oder Alaun.



Der Vorteil dieser Wärmespeichertechnik beruht darauf, in einem kleinen, durch die Schmelztemperatur des eingesetzten Speichermaterials festgelegten Temperaturbereich, viel Wärmeenergie in relativ wenig Masse zu speichern. Beim blossen Erwärmen des Mediums ohne Phasenwechsel wird dagegen ein grösserer Temperaturbereich benötigt, um vergleichbare Wärmemengen zu speichern.

10.1.4 Sorbtionsspeicher

Energie wird nicht als Wärme gespeichert, sondern in Sorptionsmaterialien thermochemisch eingelagert. Das Prinzip beruht auf der Absorption von Wasser durch stark hygroskopisches Material. Verluste treten vor allem beim Laden und Entladen auf – ideal für einen Langzeitspeicher. So lässt sich überschüssige Sommerwärme für die Wintermonate lagern.

Natronlauge (NaOH) ist ein kostengünstiges Sorptionsmittel, das für Sorptionsspeicher gut geeignet ist. Im Gegensatz zu anderen Sorptionsspeichern läuft der Ladeprozess bei unter 100°C ab, Temperaturen also, wie sie herkömmliche Sonnenkollektoren liefern können. Beim Sorptionsspeicher wird dem Sorptionsmittel NaOH im Sommer mit der Wärme aus Sonnenkollektoren Wasser als Sorbat ausgetrieben. Der Wasserdampf wird kondensiert und getrennt vom entwässerten Sorptionsmittel gelagert.

Im Winter wird das gespeicherte Wasser dem Sorptionsmittel wieder zugeführt. Im Entladeprozess (Wärmeabgabeprozess) wird das Wasser als Sorbat mittels einer Niedertemperaturquelle, zum Beispiel einer Erdsonde, verdampft. Der Sorbatdampf wird vom Sorbent absorbiert und gibt seine Verdampfungsenthalpie frei. Durch die hohe Affinität vom Sorbent zum Sorbat wird Wärme akkumuliert, was die Temperatur ansteigen lässt. Dies ist die typische Funktionsweise einer chemisch angetriebenen Wärmepumpe (Sorptionswärmepumpe).

Die Speicherleistung wird durch die zwei zentralen Parameter Speicherentladetemperatur und Speicherkapazität bestimmt. Da der Sorptionsspeicher als Wärmepumpe funktioniert, sind diese Parameter von den Randbedingungen der Laugenkonzentration im geladenen Zustand, der Temperatur der Erdsonde und der Temperatur des aufzuheizenden Heizwassers (z. B. Heizungsrücklauf) abhängig. Diese Randbedingungen sind an physikalische Grenzen gebunden und können nicht frei gewählt werden. Die Entladetemperatur wird bestimmt durch die Konzentration der Natronlauge und der Erdsondentemperatur. Mit der Erdsonde wird das beim Ladeprozess kondensierte Wasser auf der Temperatur T_{Eout} verdampft. Aus dem Diagramm (Abbildung 40) ist ersichtlich, dass die zu erwartende Entladetemperatur von der Höhe der Verdampfungstemperatur T_{Eout} abhängig ist. So ist z. B. bei einer Verdampfungstemperatur von 10°C und einer Laugenkonzentration von 50% mit einer Entladetemperatur von 48°C zu rechnen.

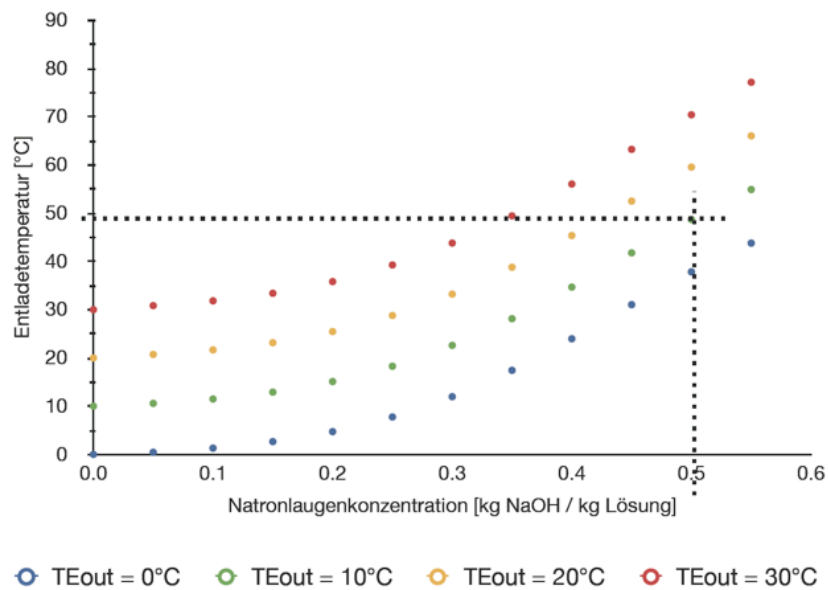


Abbildung 40

NaOH-Sorbtionsspeicher: Entladetemperaturen in Funktion der Laugekonzentration und der Niedertemperaturquelle (z. B. Erdsondentemperatur)

Die Speicherkapazität ist direkt abhängig von der Natronlaugekonzentration im geladenen Zustand, der Verdampfungstemperatur TEout und der Entladetemperatur (z. B. Heizungsrücklauf). Grundsätzlich steigt die Energiedichte, je stärker die Lauge beim Entladeprozess verdünnt werden kann. Der Verdünnungsgrad wiederum ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Verdampfungstemperatur TEout und der Entladetemperatur. Liegt diese Temperaturdifferenz bei 7°C, kann die Lauge bis auf 25% Konzentration verdünnt werden. Bei ansteigender Temperaturdifferenz sinkt allerdings der Verdünnungsgrad und somit auch die Speicherkapazität. Bei der Verdünnung auf 25% wird eine theoretische Energiedichte, bezogen auf das Volumen der verdünnten Lauge, von 440 Wh/l erreicht (Abbildung 41).

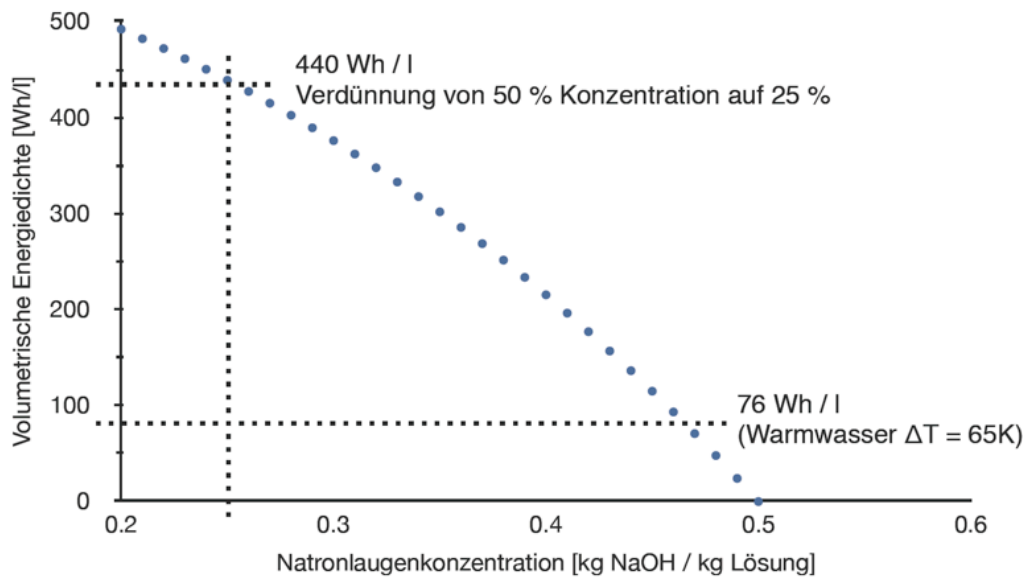


Abbildung 41

NaOH-Sorptionsspeicher: volumenbezogene Energiedichte in Funktion der Laugenkonzentration bei 50% Verdünnung und 25% Laugenkonzentration

Diese Energiedichte ist erheblich höher als bei einem sensiblen Warmwasserspeicher. Es muss aber berücksichtigt werden, dass sich die Angaben nur auf das Speichermedium beziehen und kein Volumen, das durch Systemkomponenten benötigt wird, beinhaltet. Auch muss der Verlust durch die Umwandlung berücksichtigt werden. Somit wird ein reales Sorptionssystem eine geringere Energiedichte aufweisen als 440 Wh/l. Sie liegt jedoch über der eines Warmwasserspeichers, der eine Energiedichte von etwa 76 Wh/l bei einer nutzbaren Temperaturdifferenz von 65°C aufweist. Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Wärmespeichern besteht darin, dass während der Lagerzeiten des aktivierten Sorptionsmittels keine Wärmeverluste auftreten.

Eckdaten Natronlaugenspeicher:

max. Speichergrösse	theoretisch unbegrenzt
Mindestgrösse	ca. 1 m ³
Ladetemperatur	max. 95°C
Wärmesenketemperatur	max. 35°C
Temperaturdifferenz der Ladetemperatur zur Wärmesenketemperatur	50 K bis 60 K
Tieftemperaturwärmequelle:	min. 5°C
Entladetemperatur	Niveau Heizungsrücklauftemperatur etwa 26°C; tiefere Temperaturen erlauben eine höhere Speicherentladung



Elektrische Speicher

10.1.5 Blei-Säure-Akkumulator (BSA)

Der Blei-Säure-Akkumulator besteht im Prinzip aus zwei Bleiplatten, die in den Elektrolyten (Schwefelsäure) eingetaucht sind und je nach Ausführung zusätzlich mit einem Separator getrennt sind. Im entladenen Zustand lagert sich bei den Platten eine Schicht aus Blei(II)-Sulfat ab. Beim Laden bildet sich an der positiven Elektrode Blei(IV)-Sulfat und an der negativen poröses Blei.

Dieses Funktionsprinzip wird von den Herstellern durch optimierte Bleistrukturen, Bleilegierungen und Separatoren weiter optimiert.

Heute kommen die folgenden Blei-Säure-Akkumulatoren als stationäre Stromspeicher zum Einsatz:

- Blei-Säure-Akkumulator offen – Lead Acid Battery flooded, LAB
- ventilgeregelter Blei-Säure-Akkumulator - Valve Regulated Lead-Acid Battery, VRLA
 - o Gel-Akkumulator, VRLA-SLA – Sealed Lead Acid, mit gelartigem Elektrolyt (weisen höheren Innenwiderstand auf als offene Blei-Säure-Akkumulatoren)
 - o VRLA-AGM, Absorbent Glass Mat (hohe Strombelastbarkeit, kleiner Innenwiderstand)

10.1.6 Lithium-Ionen-Akkumulator (LIA)

Der Lithium-Akkumulator besteht aus zwei ortsfesten Elektroden, zwischen denen die Lithium-Ionen hin und her wandern. Die Elektroden sind durch einen Separator getrennt, der für Li-Ionen durchlässig ist. Während die positive Elektrode meist einen Aufbau aus Lithium-Metalloxiden in Schichtstruktur aufweist, besteht die negative Elektrode in der Regel aus Graphit.

Da die Li-Ionen sich hin und her verschieben und keine chemischen Veränderungen erfahren, wird auch vom Schaukelstuhl-Prinzip "Rocking Chair" gesprochen. Dieses System hat den Vorteil, dass die Coulomb-Effizienz typischerweise annähernd 100% erreicht.

Unter den Lithium-Ionen-Akkumulatoren finden sich heute die folgenden Typen:

- Lithium-Cobaltdioxid, LiCoO_2
- Lithium-Eisenphosphat, LiFePO_4
- Lithium-Nickel-Mangan-Cobaltdioxid, $\text{Li}_{1,1}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$
- diverse Typen, die sich zum Teil noch im experimentellen Status befinden
 LiMn_2O_4 , LiCoPO_4 , $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$

10.1.7 Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren (NNA)

Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren (NNA) kombinieren einen festen Elektrolyten und eine Kombination aus flüssigen und festen Elektroden. Die positive Elektrode besteht aus flüssiger Salzlösung mit Nickelchlorid und Natriumchlorid durchtränktem gesintertem Nickel. Die negative Elektrode besteht aus flüssigem Natrium. Getrennt werden die Elektroden durch einen Separator aus Keramik, der gleichzeitig als Festelektrolyt dient.



Die Betriebstemperatur des durch Vakuum-Isolation wärmegeprägten Akkumulators beträgt typisch 300°C. Die Coulomb-Effizienz beträgt annähernd 100 %. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 80%. Allerdings muss die Zelle zur Aufrechterhaltung der Funktion auf hoher Betriebstemperatur gehalten werden, wodurch trotz thermischer Isolation eine Heizung erforderlich ist. Während bei hinreichend hoher Energieentnahme die thermischen Verluste am Innenwiderstand der Zelle für das Halten der Temperatur ausreichen, ist bei Nichtnutzung eine zusätzliche Heizung notwendig, die, wenn sie ihre Leistung von der Zelle bezieht, zu einer stetigen Entladung führt.

Die Energiedichte beträgt etwa 80 - 140 Wh/kg. Im Vergleich dazu hat ein Bleiakкумулятор eine Dichte von etwa 20 - 40 Wh/kg. Hinsichtlich der Lebensdauer wird über Testakkumulatoren berichtet, die seit elf Jahren im Test und über 3000 Zyklen genutzt worden sind.

Die Ausgangsstoffe Nickel, Eisen, Kupfer, Kochsalz und Aluminiumhydroxid sind im Vergleich zu anderen Akkutechnologien in ausreichenden Mengen preiswert vorhanden. Auch die Herstellung ist relativ unkompliziert.

10.1.8 Redox-Flow-Akkumulator (RFA)

Der Redox-Flow-Akkumulator (RFA) speichert elektrische Energie in chemischen Verbindungen, wobei die Reaktionspartner in einem Lösungsmittel in gelöster Form vorliegen. Die zwei energiespeichernden Elektrolyte zirkulieren dabei in zwei getrennten Kreisläufen, zwischen denen in der galvanischen Zelle über eine Membran der Ionenaustausch erfolgt, wobei elektrische Energie frei wird.

Der Stoffaustausch erfordert eine aufwendige Konstruktion mit Pumpen, Speichertanks und Steuerung. Der bisher am häufigsten eingesetzte Typ ist der Vanadium-Redox-Akkumulator.

Die flüssigen chemischen Verbindungen können in Tanks gespeichert werden. Die gespeicherte Energiemenge ist daher nicht von der Zellengrösse abhängig. Beide Komponenten (Zelle und Elektrolyttanks) können unabhängig voneinander dimensioniert werden. Die Energieabgabe ist abhängig vom umgewälzten Elektrolytvolumen und kann bei heute gebauten RFA bis 100 kW erreichen. Die Lade-/ Entladeeffizienz der RFA liegt zwischen 50 - 80%. Der Wirkungsgrad hängt von den eingesetzten Pumpen ab. Die Energiedichte liegt bei 15 - 80 Wh/Liter und ist damit eher gering.

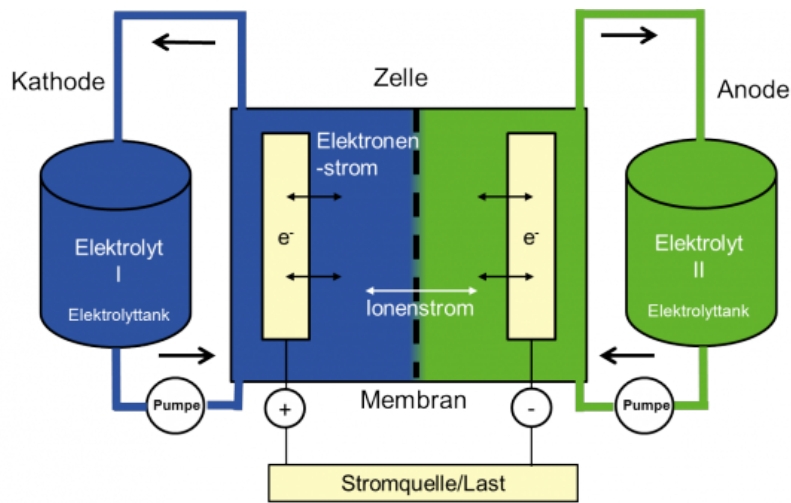


Abbildung 42

Schematischer Aufbau eines Redox-Flow-Akkumulators
(Quelle: www.carmen-ev.de)

10.1.9 Wasserstoffspeicher

Mittels Elektrolyse (PEM-Elektrolyse oder alkalische Elektrolyse) wird Wasserstoff und Sauerstoff produziert. Diese Gase werden unter hohem Druck bei mehreren 100 bar in Druckflaschen (oder beim H_2 alternativ in Metall-Hydrid-Speichern) gespeichert. Anschliessend wird mit der Brennstoffzelle aus Wasserstoff und Sauerstoff (teilweise auch Luft) wieder Strom gewonnen.

In Form von Wasserstoff kann Energie über lange Zeit und ohne Verlust in grossen Mengen gespeichert werden. Bei Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff geht nach dem derzeitigen Stand ca. 70% der Energie verloren.