



# Betonkernaktivierung als Heizsystem für energieflexible Gebäude

---

Untersuchung von drei speziellen Fragestellungen zum Betrieb

Im Auftrag der  
Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie  
Franz-Grill-Straße 9, O 214, 1030 Wien

Institute of Building Research & Innovation  
DI Dr. Peter Holzer  
Arch. DI Dr. Renate Hammer, MAS  
David Stuckey, BSc  
DI Philipp Stern  
Mag. Nadja Bartlmä, BSc

## Schlussbericht

Arbeitszeitraum: März bis Juni 2018

Wien, 14.10.2018

mit formalen Korrekturen vom 08.03.2019

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Kurzfassung / Executive Report .....</b>	<b>4</b>
1.1	<i>Hintergrund .....</i>	4
1.2	<i>Fragestellungen .....</i>	4
1.3	<i>Methode .....</i>	4
1.4	<i>Ergebnisse.....</i>	5
1.5	<i>Schlussfolgerungen .....</i>	9
<b>2</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>10</b>
2.1	<i>Hintergrund .....</i>	10
2.2	<i>Fragestellungen .....</i>	11
2.3	<i>Methodik .....</i>	12
<b>3</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>15</b>
3.1	<i>Klimastandort .....</i>	15
3.2	<i>Dauern der Heizunterbrechung.....</i>	17
3.3	<i>Referenzgebäude .....</i>	19
3.4	<i>Baukonstruktionen .....</i>	23
3.5	<i>Gebäudetechnik .....</i>	28
3.6	<i>Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom.....</i>	29
3.7	<i>Ökologische Qualitäten von Netzstrom und erneuerbarem Überschussstrom .....</i>	32
3.8	<i>Heizsysteme und Regelungsstrategien .....</i>	33
3.9	<i>Dimensionierung der Speicher .....</i>	33
<b>4</b>	<b>Energiebilanzen bei energieflexiblem Gebäudebetrieb .....</b>	<b>39</b>
4.1	<i>Heizenergie-Mehrbedarf bei energieflexiblem Gebäudebetrieb .....</i>	39
4.2	<i>Ausmaß der Nutzbarkeit von Überschussstrom aus der Windkraft.....</i>	42
4.3	<i>Energieflussbilder.....</i>	43
<b>5</b>	<b>Ökologischer Rucksack thermischer Energiespeicherung in Beton .....</b>	<b>53</b>
5.1	<i>Zusammenfassung .....</i>	53
5.2	<i>Ökologische Wirkungen – Basisindikatoren.....</i>	55
5.3	<i>Ökologische Wirkungen – Weiterführende Indikatoren .....</i>	58
5.4	<i>Ökologische Wirkungen – Biodiversitätsverluste .....</i>	64
5.5	<i>Aspekte sozialer Wirkungen.....</i>	67
<b>6</b>	<b>Ökologischer Rucksack elektrischer Energiespeicherung.....</b>	<b>69</b>
6.1	<i>Zusammenfassung .....</i>	69

6.2	<i>Charakterisierung marktverfügbarer elektrischer Energiespeicher.....</i>	70
6.3	<i>Bewertung ausgewählter stationärer haustechnisch eingebundener Batteriespeicher .....</i>	115
6.4	<i>Ökologische Wirkungen - Basisindikatoren.....</i>	118
6.5	<i>Ökologische Wirkungen – Weiterführende Indikatoren .....</i>	126
6.6	<i>Aspekte sozialer Wirkungen.....</i>	137
<b>7</b>	<b>Vergleich des ökologischen Rucksacks aus thermischer und elektrischer Energiespeicherung .....</b>	<b>140</b>
7.1	<i>Vergleich der ökologischen Wirkungen – Basisindikatoren .....</i>	140
7.2	<i>Vergleich der ökologischen Wirkungen – Weiterführende Indikatoren.....</i>	143
7.3	<i>Vergleich der Aspekte von sozialen Wirkungen .....</i>	144
<b>8</b>	<b>Ergebniszusammenfassung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>146</b>
<b>9</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>148</b>
9.1	<i>Quellenverzeichnis.....</i>	148
9.2	<i>Abbildungsverzeichnis .....</i>	156
9.3	<i>Tabellenverzeichnis .....</i>	158

# 1 Kurzfassung / Executive Report

## 1.1 Hintergrund

Thermische Bauteilaktivierung, namentlich Betonkernaktivierung bietet große Potenziale für den Einsatz erneuerbarer Energieträger für das Heizen und Kühlen von Gebäuden. Unter geeigneten Randbedingungen ermöglichen es der Wärmeinhalt und die thermische Trägheit von aktivierten Bauteilen in Verbindung mit Wärmepumpenheizungen, die Wärmezufuhr zu Gebäuden auf jene Zeiten zu beschränken, in denen erneuerbarer Strom im Überschuss und demnach kostengünstig zur Verfügung steht.

## 1.2 Fragestellungen

Die gegenständliche Studie untersucht in diesem Kontext die folgenden drei Fragestellungen:

- > Erstens wird der Umfang von Veränderungen des Heizenergiebedarfs von Gebäuden mit energieflexibler Beheizung zur bestmöglichen Nutzung volatiler erneuerbarer Endenergieangebote untersucht. Die Beheizung von Gebäuden mit Betonkernaktivierung in Verbindung mit der Ausnutzung der thermischen Speicherwirkung des Betons ermöglicht strukturell das „Vorheizen“ unter Nutzung volatiler Überschussenergie aus erneuerbaren Ressourcen. Das führt jedoch systemimmanent zu temporär höheren Innenraumtemperaturen und kann damit zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs (HWB). Diese systemimmanente Steigerung des HWB soll untersucht werden.
- > Als Zusatzergebnis aus der Bearbeitung der ersten Frage wird auch das Ausmaß des „Erfolgs“ der Energieflexibilität untersucht, nämlich der Anteil, zu dem der Heizenergiebedarf mit billigem und sauberem Überschussstrom aus Windkraft gedeckt werden kann.
- > Zweitens wird der ökologische Rucksack thermischer Energiespeicherung in Betonbauteilen bewertet. Die Beheizung und Kühlung von Gebäuden mit Betonkernaktivierung bietet die Grundlage zur Steigerung deren Energieflexibilität. Dazu ist eine Erhöhung thermisch wirksamer Speichermasse eine adäquate unterstützende Maßnahme. Neben den thermischen Vorteilen werden durch die Erhöhung des Baustoffeinsatzes aber auch die ökologischen Wirkungen umfangreicher. Diese zusätzlichen ökologischen Belastungen werden dem ökologischen Nutzen des erhöhten Einsatzes sauberer Energie gegenübergestellt.
- > Drittens wird als Alternative zur thermischen Energiespeicherung die elektrische Energiespeicherung in Betracht gezogen und der ökologische Rucksack elektrochemischer Energiespeicher untersucht. Dazu werden für den stationären Anwendungsfall geeignete Batteriespeicher vergleichend betrachtet.

## 1.3 Methode

Zur Untersuchung der drei Fragestellungen werden Referenzgebäude sowie deren Untersuchungsrandbedingungen definiert. Daraus werden als Ergebnis das thermische Verhalten, der zeitliche Verlauf des Wärmeleistungsbedarfs und die Energiemengen zur Beheizung während und außerhalb der zeitlichen Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom ermittelt. Auf diesen Ergebnissen aufbauend werden die drei angeführten Forschungsfragen untersucht.

## 1.4 Ergebnisse

### 1.4.1 Mehrbedarf an Heizwärme durch energieflexible Beheizung mit BTA

Bauteilaktivierung schafft die Voraussetzungen für wirksame Energieflexibilität.

Nach unseren Berechnungsergebnissen ist die energieflexible Betriebsweise mit Raumtemperatur-Sollwerten von  $22^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ K}$  in Verbindung mit Bauteilaktivierung zwar sehr hoch wirksam für die Nutzung erneuerbaren Überschussstroms aus Windkraft, weist aber gegenüber anderen Varianten eine um bis zu 10% erhöhten HWB auf.

Die Ursache dieser Erhöhung liegt in der strukturellen Eigenschaft der BTA, dass nämlich durch die vorsorgliche thermische Beladung von Bauteilen deren verfügbare Wärmespeicherfähigkeit sinkt. Das erklärt auch umgekehrt den niedrigeren HWB der Varianten mit hybrider Bauweise und ebenfalls energieflexiblem Betrieb, aber mit Radiatorheizung. Wobei diese Varianten gegenüber jenen mit BTA nur einen erheblich niedrigeren Anteil von Überschussstrom nutzen können.

Ob der erhöhte HWB auch tatsächlich auftritt, hängt von zahlreichen Randbedingungen ab, insbesondere von (a) dem thermischen Verhalten des Gebäudes (Wärmeschutz, solare Gewinne), (b) der Regelung der BTA (Temperatur in den Schwachlastzeiten) und (c) der zeitlichen Abfolge der Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom.

Die konkreten Ergebnisse der Variantenanalysen sind in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt. Die zartgrünen Balken kennzeichnen die Bandbreiten von  $\pm 2\text{ K}$  Temperaturschwankung und von 10% HWB-Schwankung. Detaillierte Erläuterungen dazu enthält das Kapitel 4.1.

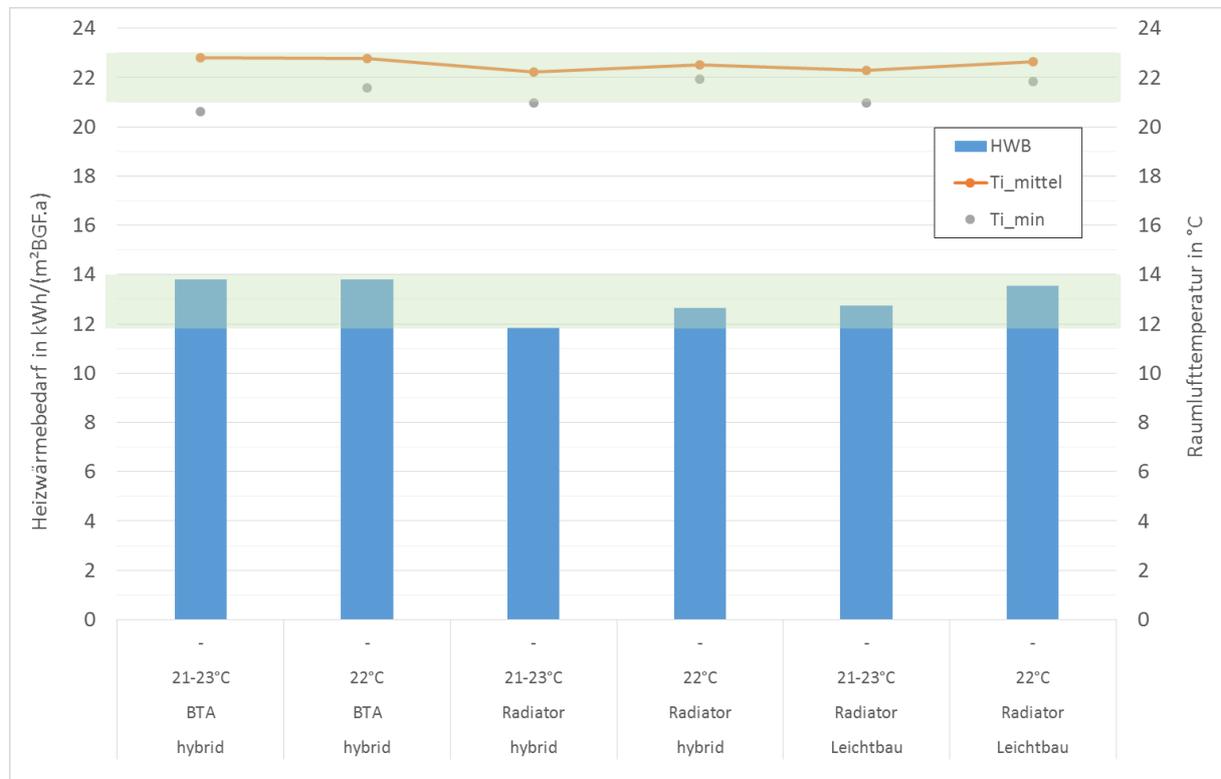


Abbildung 1-1 Bandbreiten der HWB-Veränderungen und der Raumtemperaturen für das EFH

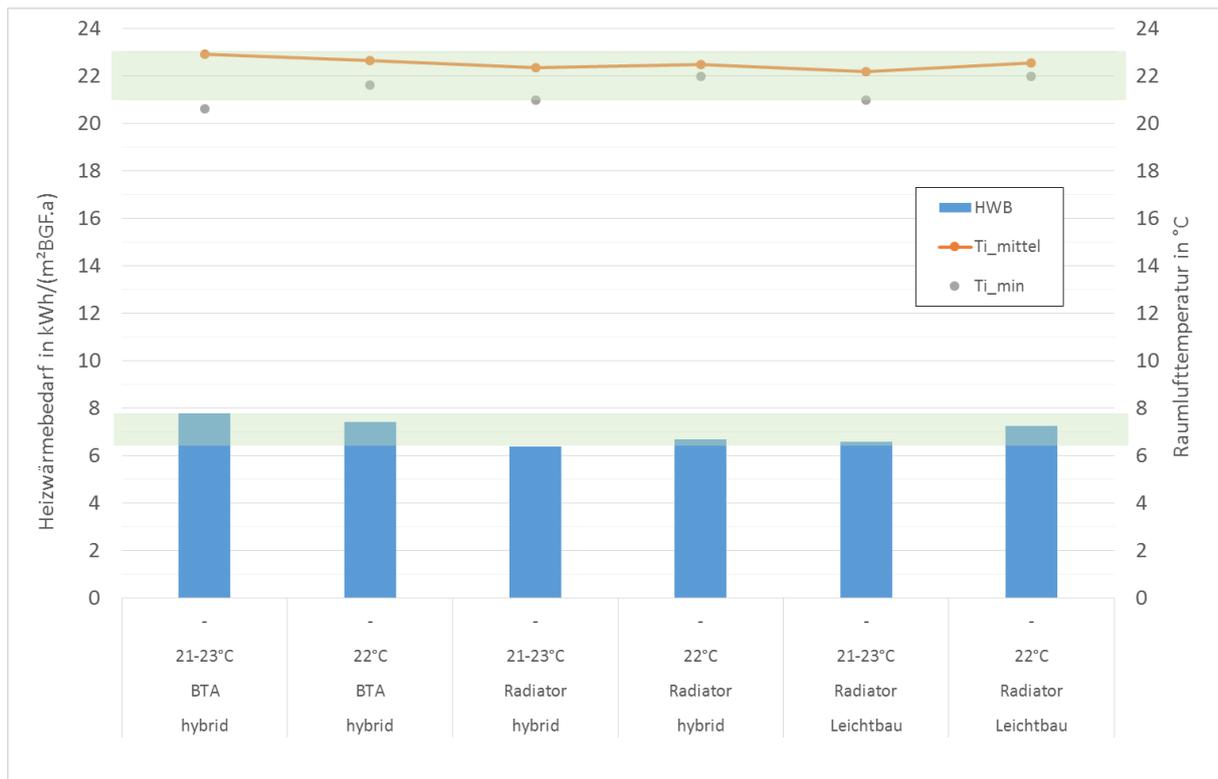


Abbildung 1-2 Bandbreiten der HWB-Veränderungen und der Raumtemperaturen für das MFH

#### 1.4.2 Heizen mit bis zu 80% Anteil an erneuerbarem Überschussstrom aus Windkraft

Der „Erfolg“ der energieflexiblen Betriebsweise besteht in dem Anteil, zu dem der Strombedarf für die Raumheizung aus billigem und sauberem Überschussstrom aus der Windkraft gedeckt werden kann. Dieses Ergebnis wird für je zehn Varianten im EFH und im MFH ausgewertet und in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Innerhalb der Gruppe der Gebäude ohne Batteriespeicher zeigt sich:

Die Varianten mit hybrider Bauweise, also schweren Decken, mit Bauteilaktivierung und energieflexibler Betriebsweise weisen den höchsten Anteil an Nutzung von Überschussstrom aufweisen, nämlich 71% beim EFH und 80% beim MFH.

Bereits deutlich weniger Überschussstrom können die Varianten mit weiterhin hybrider Bauweise und energieflexibler Betriebsweise, aber mit Radiatoren nutzen, nämlich 52% beim EFH und 59% beim MFH.

Die schlechteste Nutzung von Überschussstrom weisen unter den Varianten ohne Batteriespeicher erwartungsgemäß trotz energieflexibler Betriebsweise jene in Leichtbauweise auf, nämlich 45% beim EFH und 47% beim MFH.

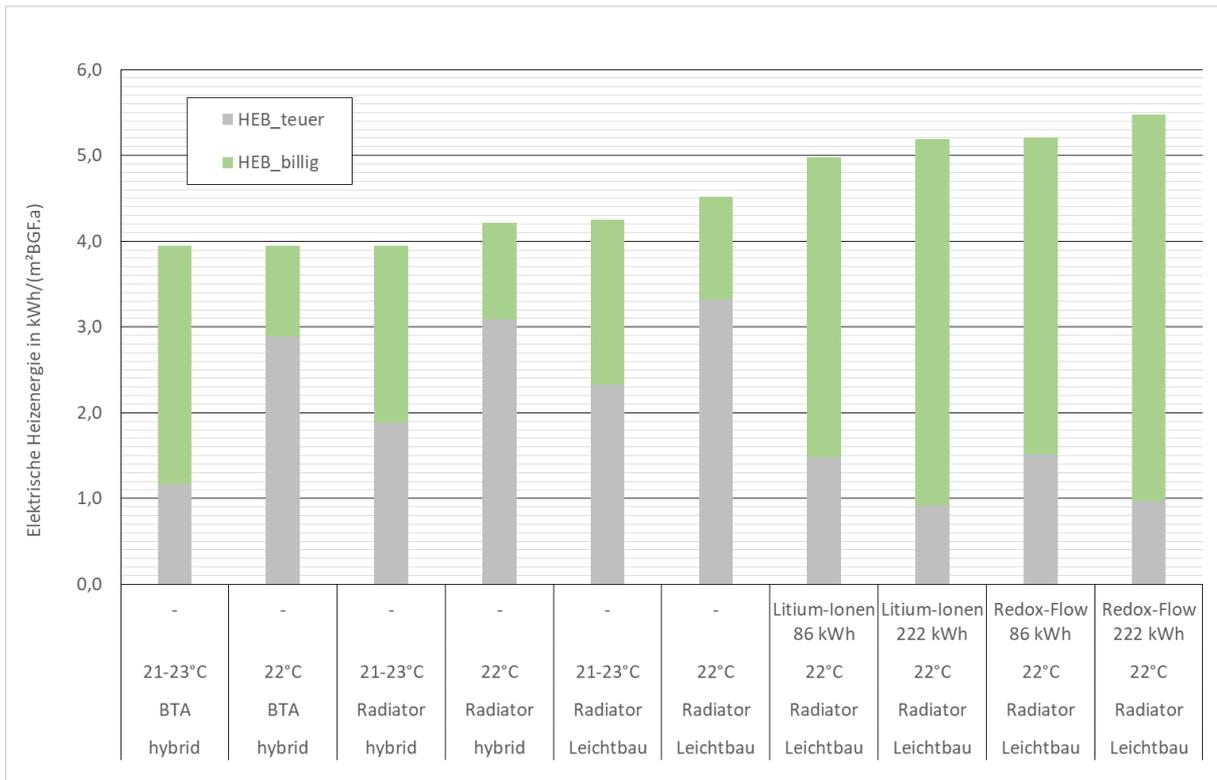


Abbildung 1-3 Strombedarf (HEB) der Varianten des EFH gegliedert nach Wind- und Netzstrom



Abbildung 1-4 Strombedarf (HEB) der Varianten des MFH gegliedert nach Wind- und Netzstrom

### **1.4.3 Ökologischer Rucksack thermischer Speicherung in aktivierten Betondecken**

Der ökologische Rucksack der thermischen Speicherung in den Betondecken ist differenziert zu betrachten: Die Betondecken sind statisch ohnehin erforderliche Bauteile. Sie müssen für die hier herausgearbeiteten Ergebnisse eines wirkungsvollen energieflexiblen Betriebs nicht verstärkt ausgeführt werden. Insofern ist es jedenfalls zulässig, die ökologischen Belastungen ihrer Herstellung nicht der Zusatzfunktion der Speicherung zuzurechnen. Ein Zugang könnte es auch sein, nur die Differenz gegenüber den ökologischen Belastungen der Decke in Leichtbauweise der Speicherfunktion anzurechnen.

Wenn dennoch die gesamte ökologische Belastung der Herstellung der Betondecken der Speicherwirkung angelastet wird, dann ergibt sich ein ökologischer Rucksack jeder thermischen Wärmeeinheit aus dem Betonspeicher von 0,32 bis 0,46 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>Nutzwärme</sub> und von 68 bis 99 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh<sub>Nutzwärme</sub>, wobei die kleineren Werte stets für das EFH gelten, bei dem der thermische Speicher der Decken stärker ausgenutzt wird. Unter den gegebenen Randbedingungen Siehe im Detail Kapitel 5.1 und 7.1.

### **1.4.4 Ökologischer Rucksack elektrochemischer Speicherung in Batterien**

Der ökologische Rucksack der elektrochemischen Speicherung in Batterien, in Dimensionierungen, die zu denselben hohen Anteilen erneuerbarer Überschussstrom-Nutzung führen, ist nennenswert höher als jener der Speicherung im Beton, selbst wenn dessen ökologische Belastungen vollständig der Speicherfunktion zugerechnet werden. Unter den gegebenen Randbedingungen ergibt sich ein ökologischer Rucksack jeder elektrischen Energieeinheit aus dem Batteriespeicher von 1,3 bis 1,8 kWh<sub>PE</sub>/kWh bzw. von 290 bis 489 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh, abhängig vom Gebäudetyp (MFH oder EFH) und vom Batterietyp (Lithium-Ionen oder Redox-Flow).

Eine Verkleinerung der Batteriespeicher kann diesen ökologischen Rucksack erheblich reduzieren, würde sich aber auch in einer Verringerung des nutzbaren Anteils erneuerbaren Überschussstroms auswirken. Dahingehende Varianten, mit einer Speicherkapazität für nur eine Eintagesperiode, wurden berechnet. Siehe im Detail Kapitel 6.1 und 7.1.

Als weiterführende Indikatoren ökologischer Wirkungen werden jene der Bilanzierungsmethode IMPACT 2002+ herangezogen. Bezogen auf IMPACT 2002+ liegen sowohl für die Lithium-Ionen Batterien als auch für die Vanadium-Redox-Flow-Batterien Auswertungen vor. Darüber hinaus können auch Wirkungsindikatoren entsprechender Wirkungskategorien für den Beton in der Literatur gefunden werden. Es ist aber anzumerken, dass keineswegs für alle untersuchten Speicher beziehungsweise für sämtliche weiterführenden Wirkungsindikatoren entsprechende abgesicherte Werte vorliegen. Im groben Überblick einer Ampel-Bewertung ergeben sich Vorteile für den thermischen Energiespeicher Beton. Es besteht jedoch noch umfangreicher weiterer Forschungsbedarf, um diese Aussagen im Detail verifizieren zu können.

Abschließend werden wesentliche Aspekte sozialer Wirkungen der Produktion der Ausgangsstoffe Zement beziehungsweise Lithium sowie Vanadium vergleichend gegenübergestellt. Ausgegangen wird von den drei Indikatoren Human Development Index (HDI), Gini-Koeffizient der Einkommensverteilung und Anteil der nationalen Gesundheitsausgaben am Bruttoinlandprodukt, jeweils bezogen auf die Hauptproduktionsländer. Diese sind für Lithium Chile, Australien und Argentinien und für Vanadium Südafrika, China und Russland. Dass ein Großteil des in Österreich verwendeten Zements im Inland produziert wird, bildet sich in besseren Indikatorwerten ab. Einzig der gemittelte Human Development Index für die Lithiumproduktion ist gleich hoch wie jener für die Zementproduktion. Der Gini-Index für die Zementproduktion liegt hingegen im Mittel um 40% besser als jener für die Produktion von Lithium oder Vanadium.

## 1.5 Schlussfolgerungen

- > Erstens ist der ökologische Rucksack von Beton im Einsatz als Bauteilaktivierung dann relevant, wenn der Beton tatsächlich zusätzlich und nur für die thermische Nutzung eingesetzt wird. In diesem Fall beaufschlägt der Beton die durch ihn gespeicherte und abgegebene Energie in Größenordnungen von bis zu  $100 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}_{\text{thermisch}}$ . Bei thermischer Nutzung einer ohnehin vorhandenen Betondecke besteht im Rahmen der Bilanzgenauigkeit der gegenständlichen Studie kein ökologischer Rucksack des Betons.
- > Zweitens beaufschlägt der ökologische Rucksack von Batteriespeichern im gegenständlich angenommenen Einsatzszenario die gespeicherte und abgegebene Energie in einer Größenordnung von bis zu  $500 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{äqu}}/\text{kWh}_{\text{elektrisch}}$ .<sup>1</sup>
- > Die Unterstützung einer energieflexiblen Betriebsweise von Gebäuden mittels thermischer Speicherung in Betonbauteilen erweist sich insbesondere bei Nutzung von statisch ohnehin erforderlichen Bauteilen als sehr vorteilhafte Lösung. In diesem Fall ist sie hinsichtlich ökologischer Auswirkungen der elektrochemischen Speicherung in Batterien weit überlegen.
- > Wird allerdings Beton extra als thermischer Speicher hergestellt, so erweist sich unter den berücksichtigten Randbedingungen der ökologische Rucksack der Betonherstellung, bezogen auf die daraus beziehbare Speicherenergie, gegenüber jenem von Lösungen mit elektrochemischer Speicherung als nur geringfügig kleiner. Diese Aussage gilt dann, wenn die Betonspeicher mit relativ kleinen Temperaturdifferenzen (hier: 2 – 3 K) bewirtschaftet werden, wie sie für raumzugeordnete Bauteile typisch sind. Wenn Betonbauteile extra als Speichermedium gebaut werden, sollten sie mit gezielt höheren Temperaturdifferenzen beaufschlagt werden, was ihre ökologische Bilanz erheblich verbessert.

---

<sup>1</sup> Werden Batteriespeicher nicht für Energieflexibilität im gegenständlichen Sinn, sondern etwa nur als Tag/Nacht-Ausgleich eingesetzt, verbessert sich der ökologische Rucksack erheblich auf unter  $30 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{äqu}}/\text{kWh}_{\text{elektrisch}}$ .

## 2 Einleitung

### 2.1 Hintergrund

Thermische Bauteilaktivierung, namentlich Betonkernaktivierung bietet große Potenziale für den Einsatz erneuerbarer Energieträger für das Heizen und Kühlen von Gebäuden.

Hervorragend sind dabei die Möglichkeiten der Heizung mit niedrigen Vorlauftemperaturen, der Kühlung mit hohen Vorlauftemperaturen und nicht zuletzt der Nutzung thermischer Speichermassen zur gezielten Ausnutzung volatiler erneuerbarer Energieangebote.

Die Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie hat die Technologie der Betonkernaktivierung in den vergangenen Jahren mit umfangreicher Forschungstätigkeit begleitet und mit experimenteller Anwendung untersucht.<sup>2,3</sup>

Ein aktueller Fokus dieser Entwicklungstätigkeit betrifft den Einsatz der Bauteilaktivierung als Heizsystem für energieflexible Gebäude: Unter geeigneten Randbedingungen ermöglichen es der Wärmeinhalt und die thermische Trägheit von aktivierten Bauteilen aus Beton in Verbindung mit Wärmepumpenheizungen, die Wärmezufuhr zu Gebäuden auf jene Zeiten zu beschränken, in denen erneuerbarer Strom im Überschuss und demnach kostengünstig zur Verfügung steht.

Ein Musterhaus, bezeichnet als „Einfamilienhaus H“, wurde mit der Unterstützung der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie in Niederösterreich, Weinviertel, errichtet und wird seit 2016 messtechnisch ausgewertet. Es bestätigen sich weitestgehend die Planungsziele, das Gebäude mit Strom aus der Überschussproduktion von Windparks zu beheizen.

Auch mehrere Projekte des Planungsbüros FIN - Future is Now des Salzburger Planers Harald Kuster, bestätigen die Machbarkeit, mit Betonkernaktivierung ein System zur vollständig erneuerbaren Beheizung von Gebäuden verschiedenster Nutzungen zu verwirklichen.<sup>4</sup>

Das Heizen und Kühlen mit Bauteilaktivierung unter Nutzung erneuerbar erzeugtem Überschussstrom erweist sich demnach als technisch machbar und auch als wirtschaftlich attraktiv.

---

<sup>2</sup> Friembichler et al., Energiespeicher Beton. Planungsleitfaden Thermische Bauteilaktivierung, bmvit, Berichte aus der Umweltforschung 9/2016

<sup>3</sup> Friembichler et al., Thermische Bauteilaktivierung - Entwicklung eines Rechenkerns (TBA-CALC), bmvit, Berichte aus der Umweltforschung 11/2014

<sup>4</sup> FIN Future is Now Kuster Energielösungen GmbH, Anif, <http://www.kuster.co.at> (letzte Abfrage 18.05.2018)

## 2.2 Fragestellungen

Vor dem Hintergrund der möglichen und wünschenswert erscheinenden breiten Anwendung von Bauteilaktivierung als Heizsystem energieflexibler Gebäude werden in der gegenständlichen Studie drei kritische Fragestellungen zur ökologischen Einordnung dieser Technologie untersucht:

- > Erstens wird der Umfang von Veränderungen des Heizenergiebedarfs von Gebäuden mit energieflexibler Beheizung zur bestmöglichen Nutzung volatiler erneuerbarer Endenergieangeboten ermittelt.
- > Zweitens wird der ökologische Rucksack thermischer Energiespeicherung in Betonbauteilen erhoben.
- > Drittens wird der ökologische Rucksack elektrochemischer Energiespeicherung untersucht.

Zu 1.: Die Beheizung von Gebäuden mit Betonkernaktivierung in Verbindung mit der Ausnutzung der thermischen Speicherwirkung des Betons ermöglicht strukturell das „Vorheizen“, und damit die Nutzung volatiler Überschussenergie aus zum Beispiel Wind oder Solartechnik. Damit bestehen reale Möglichkeiten, Gebäude vollständig mit erneuerbaren Ressourcen zu versorgen und gleichzeitig einen Beitrag zur Dekarbonisierung der Energiewirtschaft zu leisten. Das „Vorheizen“ bedingt aber die systematische Notwendigkeit, temporär höhere Innenraumtemperaturen zuzulassen, was zwangsläufig in eine Erhöhung der thermischen Verluste und damit des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes mündet. Diese systemimmanente Steigerung des Heizwärmebedarfs soll untersucht werden.

Zu 2.: Die Beheizung und Kühlung von Gebäuden mit Betonkernaktivierung bietet die Grundlage zur Steigerung der Energieflexibilität dieser Gebäude. Dazu ist eine systematische Erhöhung thermisch wirksamer Speichermasse aus Beton eine adäquate unterstützende Maßnahme. Neben diesen unbestrittenen Vorteilen werden mit der thermisch bedingten Erhöhung des mineralischen Baustoffeinsatzes jedoch auch die ökologischen Wirkungen des Gebäudes erhöht. Es sollen diese zusätzlichen ökologischen Belastungen dem ökologischen Nutzen der erneuerbaren Energieaufbringung gegenübergestellt werden.

Zu 3.: Der thermischen Energiespeicherung in Gebäudemassen zur Ausnutzung volatiler erneuerbarer Energieressourcen steht grundsätzlich die Möglichkeit der elektrischen Energiespeicherung als Alternative gegenüber. Das betrifft sowohl den Heizfall als auch den Kühlfall. Bezugnehmend auf den zuvor erörterten Aspekt des ökologischen Rucksacks, sind die ökologischen Wirkungen der Batteriespeicher erst zu untersuchen. Dabei wird auf Batteriespeicher in der stationären Anwendung der Gebäude-Energiepufferung für Heizen und Kühlen fokussiert.

## 2.3 Methodik

Zur Untersuchung der drei Fragestellungen wird nach folgender Methodik vorgegangen.

Im ersten Teil der Arbeit werden Referenzgebäude sowie deren Untersuchungsrandbedingungen definiert. Daraus werden als Ergebnis das thermische Verhalten, der zeitliche Verlauf des Wärmeleistungsbedarfs und die Energiemengen zur Beheizung während und außerhalb der zeitlichen Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom ermittelt.

Im zweiten Teil der Arbeit werden darauf aufbauend die drei spezifischen Forschungsfragestellungen untersucht:

- (1) In welchem Umfang bilden sich Veränderungen des Heizenergiebedarfs als Folge der thermischen Speicherung volatiler Endenergieangebote ab?
- (2) In welchem Umfang bildet sich ein ökologischer Rucksack verstärkter Masseinbringung zur Steigerung der Energieflexibilität ab?
- (3) In welchem Umfang bildet sich vergleichend dazu der ökologische Rucksack einer elektrochemischen anstelle der thermischen Energiespeicherung ab?

Insbesondere für die dritte Fragestellung wurden dazu eine umfangreiche systematische Analyse und Bewertung der aktuellen Batteriespeichertechnologien auf Basis der vorliegenden Literatur vorgenommen. Alle methodischen Schritte werden nachfolgend kurz beschrieben und sind in eigenen Kapiteln dieser Arbeit vollumfänglich dokumentiert und erläutert.

### 2.3.1 Methodik Teil 1 – Ermittlung des Thermischen Gebäudeverhaltens

#### **Festlegung des exemplarischen Klimastandorts**

Sämtliche thermischen Analysen werden für den Klimastandort Wien durchgeführt, wofür ein halb-synthetischer Jahresklimadatensatz aus der internationalen Klimadatenbank METEONORM zur Anwendung kommt, basierend auf langjährigen Messreihen der ZAMG.<sup>5,6</sup>

#### **Festlegung exemplarischer Dauern der Heizunterbrechung**

Aus der Analyse von Klimadatensätzen werden Dauern von Heizunterbrechungen ermittelt, die sich für eine Nutzung erneuerbaren Überschussstroms aus Windparks oder aus Photovoltaikanlagen als erforderlich erweisen. Es wird festgelegt, erstens eine eintägige und zweitens eine dreitägige Heizunterbrechung zu untersuchen.

#### **Festlegung exemplarischer Referenzgebäude**

Es werden zwei exemplarische Referenzgebäude definiert, anhand derer die thermisch-energetischen und materialökologischen Zusammenhänge analysiert werden. Als Referenzgebäude zur Anwendung kommen dabei der geometrische Typ des Einfamilienhauses und des Mehrfamilienhauses aus dem Validierungsbeispiel zur ÖNORM B 8110-6, im thermischen Standard des luftbeheizbaren Niedrigstenergiegebäudes (Passivhaus).

---

<sup>5</sup> METEONORM, Internationale Klimadatenbank, [www.meteotest.ch](http://www.meteotest.ch) (letzte Abfrage 19.05.2018)

<sup>6</sup> ZAMG, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, [www.zamg.ac.at](http://www.zamg.ac.at) (letzte Abfrage 19.05.2018)

## **Festlegung exemplarischer Baukonstruktionen**

Diesen beiden Gebäuden wurden unterschiedliche Kombinationen von Baukonstruktionen zugewiesen. Nach Vorversuchen fiel die Wahl für die weiteren Analysen auf eine Außenwandkonstruktion in Holzleichtbauweise und auf zwei alternativ eingesetzte Deckenkonstruktionen, nämlich erstens eine Holzbalkendecke mit Trittschalldämmung und Estrich und zweitens eine 20 cm Stahlbetondecken mit ebenfalls Trittschalldämmung und Estrich.

## **Festlegung der Gebäudetechnik**

Zur weiteren Untersuchung der energieflexiblen Beheizung wird eine Wärmepumpenheizung in Verbindung mit Bauteilaktivierung in den Betondecken definiert. Für die Vergleichsuntersuchung einer kontinuierlichen Beheizung wird ebenfalls eine Wärmepumpenheizung mit einer Wärmeabgabe über Radiatoren modelliert.

## **Ermittlung der zeitlichen Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom**

Aus der Leistungscharakteristik von Windturbinen wird eine Grenzwindgeschwindigkeit von 7m/s ermittelt, ab der diese Windstromanlagen einen Wert von 30% ihrer Nennleistung überschreiten.

Ab dieser Grenzleistung stellen Windstromerzeuger ihren Strom sehr kostengünstig zur Verfügung.

Aus dem Klimadatensatz eines typischen Windkraftstandorts im östlichen Wiener Umland wird die zeitliche Verteilung von Perioden mit Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit größer und kleiner 7 m/s auf der typischen Nabenhöhe der am häufigsten verbauten 3 MW Windkraftanlagen von 100 m ermittelt. Diese werden als Perioden mit niedrigpreisigem Windstrom oder hochpreisigem Netzstrom definiert.

## **Festlegung exemplarischer Heizsysteme und Regelungsstrategien**

Als Wärmeabgabesysteme werden die Bauteilaktivierung der Decken und alternativ dazu eine Radiatorheizung festgelegt. Die Bauteilaktivierung wird während der Stunden mit zeitlicher Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom mit einer Solltemperatur des Raumes von 23°C betrieben, außerhalb dieser Zeiten mit einer Solltemperatur von 21°C. Die konvektive Heizung wird konstant mit einer Solltemperatur von 22°C betrieben.

Als System der Wärmeerzeugung wird einheitlich eine Wärmepumpe mit realistisch, aus Vorberechnungen ermittelter, begrenzter Heizleistung angenommen.

## **Untersuchung des Auskühlverhaltens der Referenzgebäude**

Mittels dynamischer thermischer Gebäudesimulation wird das Auskühlverhalten der beiden Referenzgebäude in ihren unterschiedlichen Baukonstruktionen und Wärmeabgabesystemen innerhalb der eintägigen und der dreitägigen Heizunterbrechung untersucht. Es stellt sich dabei heraus, dass bereits die konstruktive Ausführung mit Außenwänden in Holzleichtbauweise und Decken in 20 cm Stahlbeton eine ausreichende Speichermasse für eine dreitägige Heizunterbrechung zur Verfügung stellt. Auf die Untersuchung einer noch schwereren Variante wird daher verzichtet.

## **Festlegung der Speichergrößen und der Speicherbewirtschaftung**

Für die relevanten Kombinationen aus Referenzgebäude, Baukonstruktion und Wärmeabgabesystem inkl. Regelungsstrategie werden das thermische Gebäudeverhalten und der Heizenergiebedarf im Jahresverlauf ermittelt. Ausgewertet werden die Raumlufthtemperaturen und der Wärmeleistungsbedarf während und außerhalb der zeitlichen Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom. Ermittelt wird weiters der Wärmebedarf des konstant beheizten Leichtbaus zur Kompensation der eintägigen und der dreitägigen Heizungsunterbrechung, der für die dritte Fragestellung die Grundlage zur Dimensionierung der alternativen elektrochemischen Energiespeicherung bildet.

### **2.3.2 Methodik Teil 2 – Ergebnisauswertung der drei Fragestellungen**

#### **Ergebnisauswertungen zu den Veränderungen des Heizenergiebedarfs**

Ausgewertet wird, in welcher Größenordnung sich der Nutzenergiebedarf für Raumheizung verändert, wenn anstelle einer ideal auf 22°C geregelten Luftheizung eine energieflexibel auf maximale Ausnutzung erneuerbaren Überschussstroms auf eine Bandbreite von 21°C bis 23°C geregelte Bauteilaktivierung angewandt wird.

#### **Ergebnisauswertung zum ökologischen Rucksack thermischer Energiespeicherung**

Ausgewertet wird, in welcher Größenordnung sich die ökologischen Wirkungen der Gebäudeerrichtung verändert, wenn ausgehend von der Gebäudeausführung mit ausschließlich Holzleichtbaukonstruktionen die Gebäudemassen soweit erhöht werden, wie sich das für eine energieflexible Beheizung mit Bauteilaktivierung und mit Heizunterbrechungen von ein sowie von drei Tagen als erforderlich erweist. Als die grundlegenden Charakterisierungsfaktoren kommen der Primärenergiebedarf und das Treibhausgaspotenzial zur Anwendung.

#### **Ergebnisauswertung zum ökologischen Rucksack elektrochemischer Energiespeicherung**

Es wird eine eingehende Recherche der aktuell verfügbaren elektrochemischen Speichertechnologien durchgeführt. Aus dieser werden die Lithium-Ionen Batteriespeicher und die Vanadium-redox-flow Batteriespeicher als die derzeit für die stationäre Energiespeicherung in Gebäuden relevanten Anwendungen abgeleitet. Für diese beiden Technologien wird eine Dimensionierung der erforderlichen Batteriespeichergrößen zur Kompensation von ein- oder dreitägigen Heizunterbrechungen vorgenommen. Anschließend werden die von diesen Batteriespeichern ausgehenden ökologischen Wirkungen ermittelt. Als die grundlegenden Charakterisierungsfaktoren kommen auch hier wieder der Primärenergiebedarf und das Treibhausgaspotenzial zur Anwendung.

### 3 Grundlagen

#### 3.1 Klimastandort

Sämtliche thermischen Analysen werden für den Klimastandort Wien Innere Stadt durchgeführt.

Für die dynamischen thermischen Simulationsrechnung wird ein halbsynthetischer stündlicher Klimadatensatz des Standorts Wien Innere Stadt verwendet, aus der Quelle der internationalen Klimadatenbank METEONORM, basierend auf langjährigen Messreihen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

Die folgende Abbildung 3-1 zeigt den Verlauf der Lufttemperatur aus dem nämlichen Klimadatensatz. Dargestellt werden erstens mit der mittleren, dick ausgezogenen Linie die Monatsmittelwerte der Lufttemperatur, zweitens mit den einhüllenden, ebenfalls dick ausgezogenen Linien die mittleren maximalen und minimalen Tagestemperaturen in dem jeweiligen Monat und drittens mit den einhüllenden dünn gezeichneten Linien die absoluten Maxima und Minima der stündlichen Lufttemperatur im jeweiligen Monat.

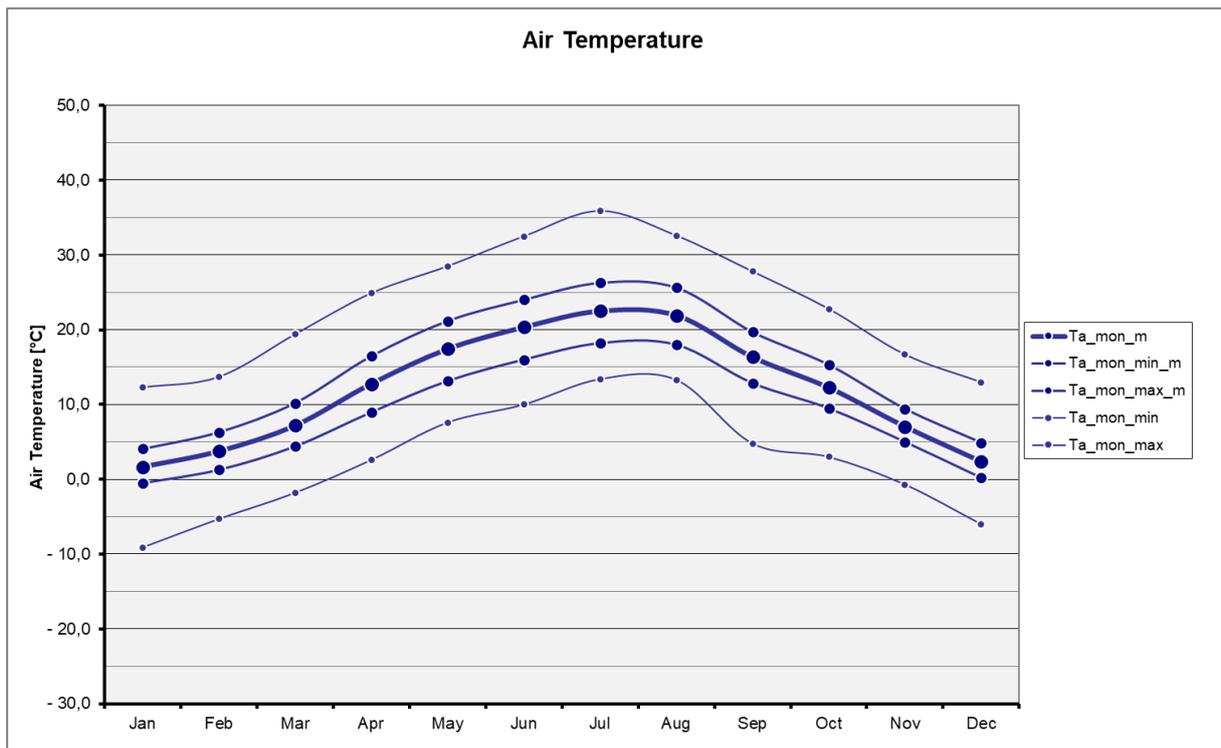


Abbildung 3-1: Außentemperaturen, Klimadatensatz Wien Innere Stadt

In diesem halbsynthetischen Klimadatensatz wurde eine Kälteperiode im Jänner, konkret die drei Tage von 6. Jänner bis 8. Jänner, bei gleichzeitig mäßiger Globalstrahlung, als kritische Periode für die Auskühlung der Referenzgebäude identifiziert. Sie wird den folgenden Untersuchungen der Heizungsunterbrechung zugrunde gelegt.

Die folgende Abbildung 3-2 zeigt den Verlauf der Außentemperatur und der Globalstrahlungsintensität für den Monat Jänner. Darin grafisch durch einen Rahmen hervorgehoben ist die betreffende Dreitagesperiode von 6. Jänner (Tagesbeginn in Stunde 120) und 9. Jänner (Tagesende in Stunde 192).

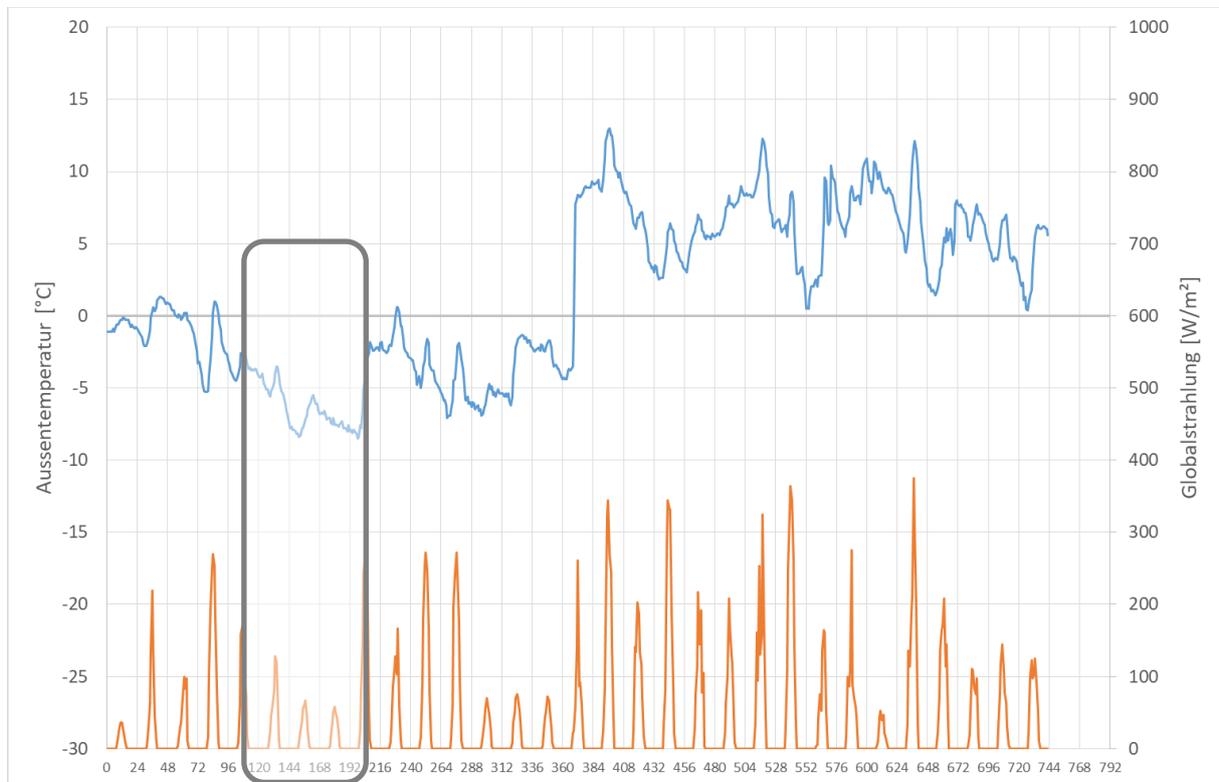


Abbildung 3-2 Außentemperatur u. Globalstrahlung, Jänner, Klimadatensatz Wien Innere Stadt

## 3.2 Dauern der Heizunterbrechung

Das Konzept energieflexibler Gebäude strebt an, die Notwendigkeit des Bezugs von Heizenergie auf jene Zeitspannen zu beschränken, in denen erneuerbare Überschussenergie zur Verfügung steht. Im Fokus der Forschung und auch der gegenständlichen Studie stehen dabei Kombinationen aus Wärmepumpen und Bauteilaktivierung, oder alternativ Kombinationen aus elektrochemischen Energiespeichern, Wärmepumpen und konventionellen, schnell reagierenden Wärmeabgabesystemen.

Die Frage nach der notwendigen oder wünschenswerten Dauer von Heizunterbrechungen muss demnach aus einer Analyse der Verfügbarkeit von Überschussstrom aus erneuerbaren Quellen heraus beantwortet werden. Zu diesem Zweck wird der zeitliche Verlauf der erneuerbaren Anteile an der Stromerzeugung analysiert. Von Interesse sind dabei erstens die Stromerzeugung aus Windkraftanlagen und zweitens jene aus Photovoltaikanlagen.

Windkraftanlagen an Standorten in Ostösterreich weisen typischerweise bis zu dreitägige Perioden mit deutlich unterdurchschnittlicher Produktion auf. Photovoltaikanlagen wiederum sind dominant charakterisiert durch die Tag-Nacht-Schwankung der Stromproduktion.

Aus diesem Sachverhalt wird abgeleitet, in der gegenständlichen Studie die Energieflexibilität von Gebäuden mit der Fähigkeit des Gebäudes für eine eintägige oder dreitägige Heizunterbrechung bei denkbar ungünstigen klimatischen Bedingungen, aber bei normaler Gebäudenutzung, zu definieren.

Die folgenden Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 illustrieren diese Festlegung:

Das Diagramm in Abbildung 3-3 stellt den zeitlichen Verlauf der erneuerbaren Stromproduktion in Niederösterreich dem Stromverbrauch, ebenfalls in NÖ, gegenüber. Dargestellt werden Photovoltaik, Wind, Biomasse und Wasser im Zeitraum Jänner 2018. Erkennbar ist in hellem Blaugrün die Stromproduktion aus Wind. Sie weist ein erheblich unregelmäßiges Profil auf, wobei sich aber Phasen deutlich unterdurchschnittlicher Produktion auf Zeitspannen von bis zu drei Tagen beschränken.<sup>7</sup>

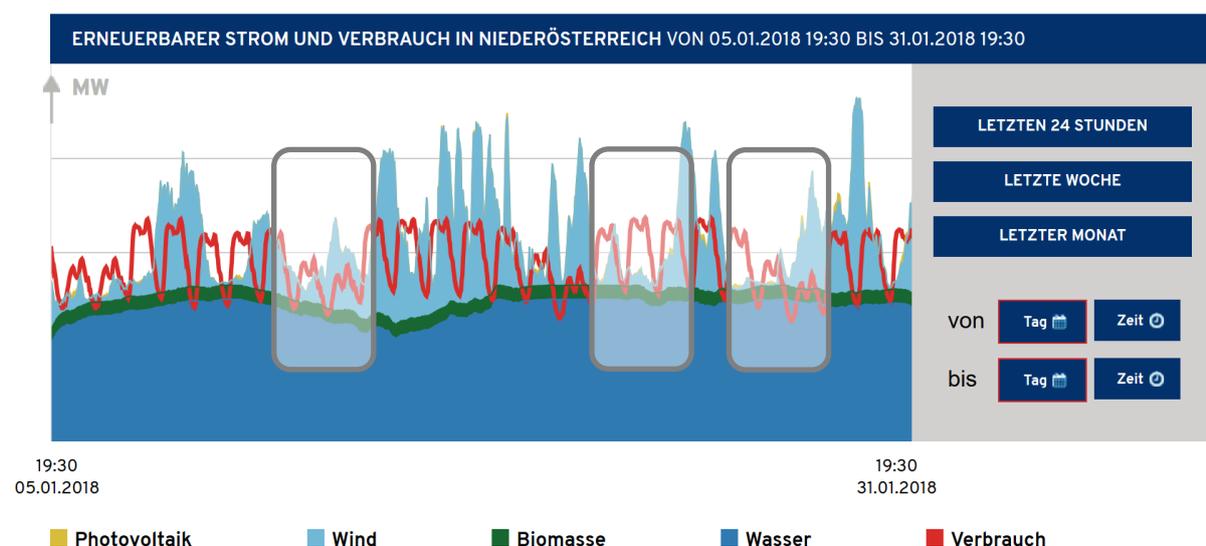


Abbildung 3-3: Zeitlicher Verlauf erneuerbarer Stromproduktion, NÖ, Jänner 2018

<sup>7</sup> Quelle: <https://www.energiebewegung.at> (letzte Abfrage 18.05.2018)

Ein vergleichbares Bild zeigt die folgende Abbildung 3-4, gültig für Deutschland. Sie stellt die tägliche Stromproduktion aus Wind (graue und grüne Farbtöne) und jene aus Photovoltaik (gelbe und rote Farbtöne) in Deutschland dar, wieder für den Jänner 2018. Mit der horizontalen blauen Linie ist der Medianwert, bezogen auf ausschließlich die Produktion aus Wind, markiert. Im Jänner traten demnach sogar Perioden von bis zu 5 Tagen auf, in denen die Stromproduktion aus Windkraft deutlich unter dem Medianwert des Monats Jänner lag.<sup>8</sup>

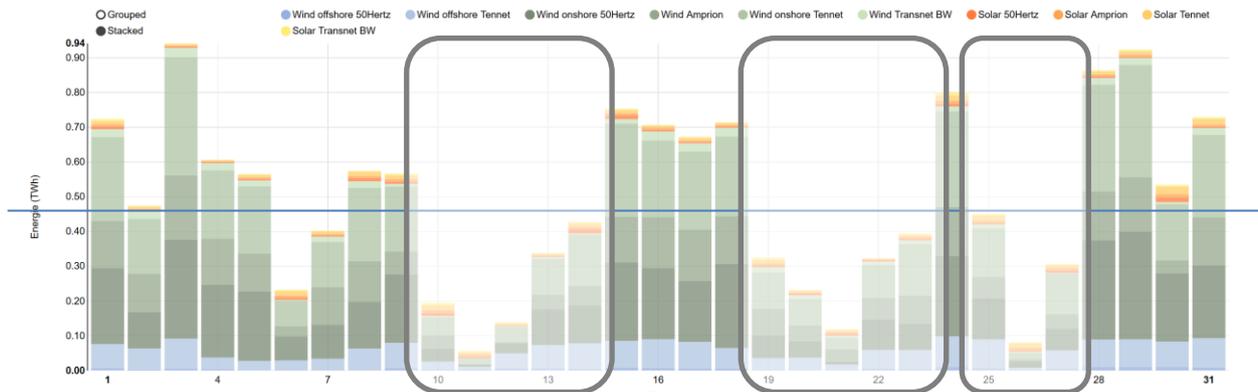


Abbildung 3-4: Zeitlicher Verlauf der Stromproduktion aus Wind und PV, D, Jänner 2018

Der Beitrag aus Photovoltaik ist in beiden Abbildungen ebenfalls dargestellt, ist aber gegenüber der Stromproduktion aus Wind verschwindend gering. Es wird in der gegenständlichen Studie dennoch auch die Energieflexibilität gegenüber der Stromproduktion aus Photovoltaik definiert, und zwar mit der Fähigkeit des Heizsystems zum Ausgleich der typischen Tag-Nacht-Schwankung der Stromproduktion aus Photovoltaik, demnach mit einer eintägigen Heizungsunterbrechung.

<sup>8</sup> Quelle: Stromproduktion in Deutschland, Fraunhofer ISE, [https://www.energy-charts.de/energy\\_de.htm](https://www.energy-charts.de/energy_de.htm) (letzte Abfrage 18.05.2018)

### 3.3 Referenzgebäude

Für die gegenständliche Studie wird ein Referenzgebäude in zwei geometrischen Typologien, jener des Einfamilienhauses (im Folgenden auch kurz als EFH bezeichnet) und jener des Mehrfamilienhauses (im Folgenden auch kurz als MFH bezeichnet), definiert.

Basis für diese Definition ist die ÖNORM B 8110-6 Heizwärmebedarf und Kühlbedarf mit den in ihren Beiblättern verwendeten Validierungsbeispielen.

- ÖNORM B 8110-6: 2011 Bbl 1: Einfamilienhaus – Validierungsbeispiele für den Heizwärmebedarf
- ÖNORM B 8110-6: 2011 Bbl 2: Mehrfamilienhaus – Validierungsbeispiele für den Heizwärmebedarf
- ÖNORM B 8110-6: 2011 Bbl 4: Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus – Validierungsbeispiel für die Berechnung des Heizwärmebedarfs eines luftbeheizbaren Niedrigstenergiegebäudes (Passivhaus)

Der Wärmeschutzstandards der Referenzgebäude wird hochwertig, im Einklang mit der baubehördlichen Mindestanforderung für 2020 laut OIB-Dokument zur RL 6 „Nationaler Plan“, definiert. Der maximal zulässige Heizwärmebedarf im Referenzklima bei angenommener Fensterlüftung, also der  $HWB_{RK,Ref}$  ergibt sich aus  $HWB_{Ref,RK} = 10 * \left(1 + \frac{3}{lc}\right)$ .<sup>9</sup>

Für das EFH ergibt sich daraus ein maximal zulässiger  $HWB_{RK,Ref}$  von 32,5 kWh/m<sup>2</sup>a, für das MFH ergibt sich daraus einer von 22,7 kWh/m<sup>2</sup>a.

Die beiden Referenzgebäude der gegenständlichen Studie werden außerdem mit einer Wohnraumlüftung mit hochwertiger Wärmerückgewinnung ausgestattet, womit ihr tatsächlicher  $HWB_{RK}$  den Wert des  $HWB_{RK,Ref}$  um ca. 20 kWh/m<sup>2</sup>a unterschreitet.

---

<sup>9</sup> OIB, 2014, OIB-Dokument zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem „Nationalen Plan“ gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU. Österreichisches Institut für Bautechnik

### 3.3.1 Geometrie

#### 3.3.1.1 Abmessungen

Sowohl das Einfamilienhaus als auch das Mehrfamilienhaus werden im Einklang mit ÖNORM B 8110-6 Bbl 1 und 2 (2015) als quaderförmige Volumina definiert:

- Das Einfamilienhaus zweigeschoßig mit Aussenmaßen von 12 m x 8 m x 6 m (L x B x H).
- Das Mehrfamilienhaus dreigeschoßig mit Aussenmaßen von 9,4 m x 10,7 m x 9,35 m (L x B x H).

Wobei die unterste Geschoßdecke an Erdreich anliegend, sowie die oberste Geschoßdecke an Außenluft grenzend, definiert wird.

#### 3.3.1.2 Fensterflächen

Die Fensterflächenanteile werden ebenfalls auf Basis von ÖNORM B 8110-6 Bbl 1 und 2 (2015) festgelegt.

Im Einfamilienhaus kommt ein Fensteranteil an der gesamten Fassadenfläche von 20% zur Anwendung, mit der folgenden Aufteilung in Himmelsrichtungen:<sup>10</sup>

- 50 % oder 24 m<sup>2</sup> Süd orientiert
- je 20 % oder je 9,6 m<sup>2</sup> Ost- und West orientiert
- 10 % oder je 4,8 m<sup>2</sup> Nord orientiert

Im Mehrfamilienhaus kommt ein Fensteranteil an der gesamten Fassadenfläche von 19% zur Anwendung, mit der folgenden Aufteilung in Himmelsrichtungen:<sup>11</sup>

- 57,2 % oder 208 m<sup>2</sup> Süd orientiert
- 2,3 % oder 8 m<sup>2</sup> Ost-orientiert
- 38,2 % oder 139 m<sup>2</sup> Nord orientiert
- 2,3 % oder 8 m<sup>2</sup> West-orientiert

Die geometrischen und ausgewählte bauphysikalische Kennwerte dieser beiden Gebäudetypologien sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

---

<sup>10</sup> Im Beiblatt 1 werden drei Varianten für Fensterflächenanteile mit 10 %, 20 % oder 30 % angeführt. In dieser Studie wird die Variante mit 20 % Fensterflächenanteile an der Außenwandfläche gewählt.

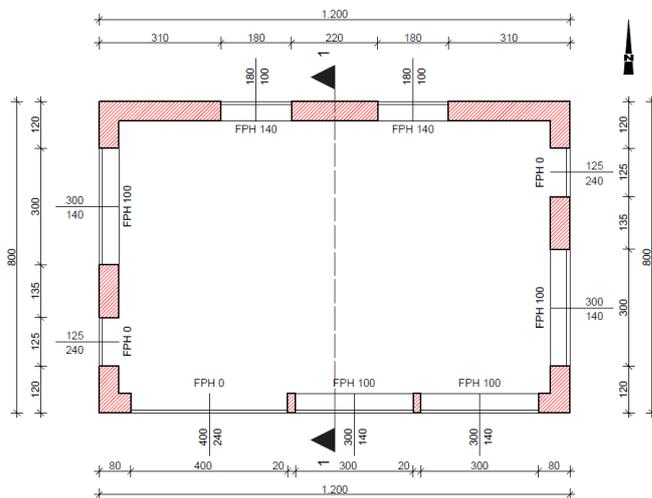
<sup>11</sup> Die Ausrichtung des Gebäudes und damit der Fensterflächen wird in der gegenständlichen Studie mit den Hauptfassaden in Süd- und Nordorientierung festgelegt, was eine Abweichung von ÖNORM B 8110-6 Beiblatt 2 darstellt.

**Tabelle 3-1 Referenzgebäude geometrische Kennwerte**

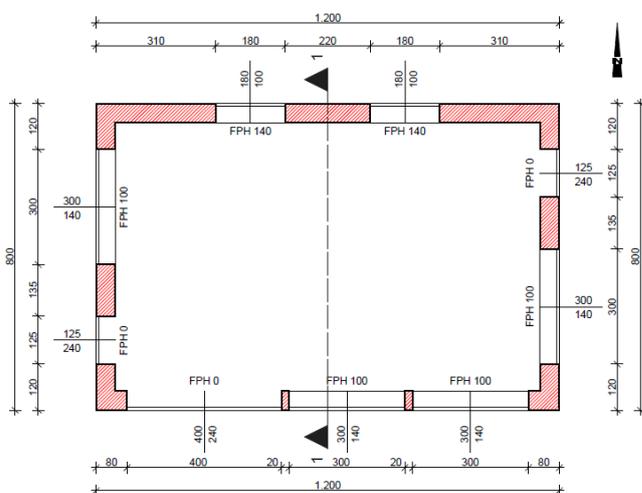
	EFH	MFH
Brutto- Grundfläche [ m <sup>2</sup> ]	192	2.945
Brutto- Volumen [ m <sup>3</sup> ]	576	9.177
Anzahl Geschosse [ - ]	2	3
Geschosshöhe [ m ]	3	3
Charakteristische Länge, l <sub>c</sub> [ m ]	1,3	2,4
HWB <sub>RK,Ref</sub> gemäß 10er-Linie [ kWh/m <sup>2</sup> a ]	32,5	22,7

Die nachfolgenden Abbildungen, Abbildung 3-5, Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7 zeigen Grundrisse und einen Schnitt des Referenzgebäudes im Typ EFH.

Zwischenwände wurden nicht berücksichtigt, weder in den Plandarstellungen, noch als thermische Trennung von Zonen innerhalb eines Geschosses, aber auch nicht als thermische Speichermassen.



**Abbildung 3-5 Referenzgebäude Grundriss EG**



**Abbildung 3-6 Referenzgebäude Grundriss OG**

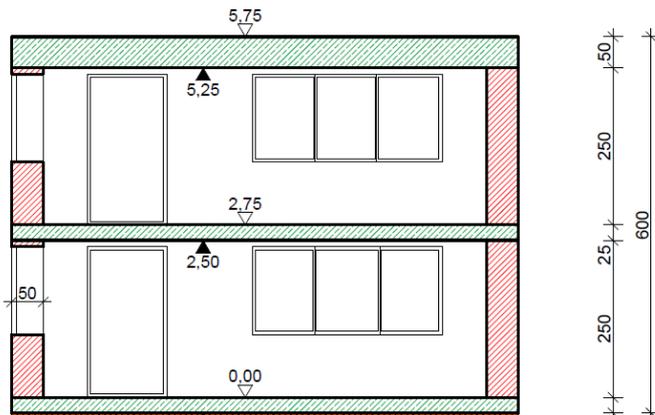


Abbildung 3-7 Referenzgebäude Schnitt

### 3.3.2 Bauphysik

#### 3.3.2.1 Glasanteile der Fenster und Verschattungsfaktoren

Der Glasanteil der Fenster wird in der gegenständlichen Studie mit dem pauschalen Glasanteil  $f_g$  von 70 % angesetzt.<sup>12</sup>

Für das EFH wird mit einem Verschattungsfaktor  $F_s = 0,85$  und bei dem MFH mit einem Verschattungsfaktor  $F_s = 0,75$  gerechnet.<sup>13</sup>

#### 3.3.2.2 Luftdichtigkeit

Der  $n_{50}$  Wert für die Luftdichtigkeit des Gebäudes wird in Übereinstimmung mit den Beiblättern 1 und 2 bei beiden Gebäudetypen (EFH und MFH) mit  $0,6 \text{ h}^{-1}$  berücksichtigt.

#### 3.3.2.3 Wärmeschutz

Die U-Werte der Bauteilaufbauten werden so festgelegt, dass sich daraus gerade die Erfüllung der zuvor genannten Mindestanforderung an den  $\text{HWB}_{\text{Ref,RK}}$  im Jahr 2020 gemäß Nationalem Plan für Neubauten ergibt. Nachdem in diesem die Wärmeschutzanforderungen mit dem Formelzusammenhang der „10er-Linie“ definiert sind, ergibt sich folgerichtig ein und dasselbe U-Werte-Ensemble, mit dem die Mindestanforderungen sowohl des EFH als auch des MFH gerade erfüllt werden:

- |                                        |                                                     |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| - Oberste Geschoßdecke gegen Außenluft | $U_{\text{OD}} = 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$        |
| - Außenwand                            | $U_{\text{AW}} = 0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$        |
| - Fenster                              | $U_{\text{W}} = 0,88 \text{ W/m}^2\text{K}; g=0,55$ |
| - Unterste Geschoßdecke gegen Erdreich | $U_{\text{EB}} = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$        |

<sup>12</sup> Diese Festlegung des Glasanteils entspricht der dahingehenden Festlegung in ÖNORM B 8110-6:2014, Kap. 8.3.1.1, Formel (41).

<sup>13</sup> Diese Festlegung des Verschattungsfaktors entspricht der dahingehenden Festlegung in ÖNORM B 8110-6:2014, Kap. 8.3.1.2.2.

### 3.4 Baukonstruktionen

In den Forschungsfragestellungen 2 und 3 wird der ökologische Rucksack verstärkter Masseinbringung in Gebäude bzw. als Alternative dazu jener einer elektrochemischen anstelle der thermischen Energiespeicherung untersucht.

Demgemäß werden die beiden Referenzgebäude mit Variationen in deren Baukonstruktionen festgelegt und untersucht. Es werden zwei konstruktive Typen definiert und mit „Leichtbau“ und mit „Hybridbau“ bezeichnet.

Die Aufbauten werden unverändert für das EFH und für das MFH verwendet.

Sie erfüllen stets die zuvor definierten U-Werte-Ensembles.

Als Ausgangspunkt der baukonstruktiven Variationen wird der Typ „Leichtbau“ definiert:<sup>14</sup>

- Außenwände als Holzleichtbaukonstruktion mit Gipskartonplatten innen
- Zwischendecke als Holzbalkendecke mit TDP und Estrich oben und Gipskartonplatten unten
- Oberste Geschoßdecke als Holzbalkendecke mit WD und Gipskartonplatten innen
- Kellerdecke als Stahlbetonplatte mit WD, TDP und Estrich

Als Variation wird der Typ „Hybridbau“ definiert: Er ist charakterisiert von weiterhin denselben leichten Außenwandkonstruktionen, aber dem Wechsel auf eine 20 cm Stahlbetonplatte als Zwischendecke und als oberste Geschoßdecke. Demnach:<sup>15</sup>

- Außenwände unverändert als Holzleichtbaukonstruktion mit Gipskartonplatten innen
- Zwischendecke als 20 cm Stahlbetonplatte mit TDP und Estrich oben und verspachteltem STB unten
- Oberste Geschoßdecke als 20 cm Stahlbetonplatte mit WD und verspachteltem STB innen
- Kellerdecke unverändert als Stahlbetonplatte mit WD, TDP und Estrich innen

In Vorberechnungen hat sich gezeigt, dass bereits der Schritt zu den massiven Decken, also zum konstruktiven Typ „Hybridbau“, ausreichende Speichermassen für die Anforderungen der Energieflexibilität bereitstellt: Mit dem Wechsel auf 20 cm Stahlbetondecken und deren Betrieb als Betonkernaktivierung wird bereits ein ausreichend träges Auskühlverhalten erreicht. Auf die Definition weiterer baukonstruktiver Varianten konnte daher im Zuge der gegenständlichen Studie verzichtet werden.

---

<sup>14</sup> Mit TDP für Trittschalldämmplatte und WD für Wärmedämmung

<sup>15</sup> Mit TDP für Trittschalldämmplatte, und WD für Wärmedämmung und STB für Stahlbeton

### 3.4.1 Außenwände

Der Außenwandaufbau laut Tabelle 3-2 wird unverändert in beiden konstruktiven Typen, also „Leichtbau“ und „Hybridbau“ eingesetzt.

Tabelle 3-2 Außenwand Leichtbau und Hybridbau

	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Außen, Hinterlüftungsebene</b>			
<b>Windbremse</b>			
<b>OSB-Platte</b>	0,025	0,130	680
<b>85% Mineralwolle / 15% Holz<sup>16</sup></b>	0,320	0,035/0,130	200/600
<b>OSB-Platte</b>	0,025	0,130	680
<b>Gipskartonplatte</b>	0,013	0,470	1.000
<b>Gesamt</b>	<b>0,373</b>		

<sup>16</sup> Angenommen werden 15% Wandquerschnitt Konstruktionsholz und 85% Wandquerschnitt Dämmmaterial aus Mineralwolle

### 3.4.2 Oberste Geschoßdecken

Tabelle 3-4 geben den jeweiligen Aufbau der obersten Geschoßdecke der beiden konstruktiven Typen an.

Tabelle 3-3 Oberste Geschoßdecke Leichtbau

Bezeichnung	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Holz	0,020	0,130	600
85% Mineralwolle / 15% Holz <sup>37</sup>	0,380	0,048	260
Holz	0,020	0,130	600
Gipskartonplatten	0,028	0,250	1.000
<b>Gesamt</b>	<b>0,448</b>		

Tabelle 3-4 Oberste Geschoßdecke Hybridbau

Bezeichnung	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
XPS	0,260	0,032	19
STB	0,200	2,500	2.400
Spachtelung	0,002	0,800	1.300
<b>Gesamt</b>	<b>0,462</b>		

<sup>37</sup> Angenommen werden 15% Wandquerschnitt Konstruktionsholz und 85% Wandquerschnitt Dämmmaterial aus Mineralwolle

### 3.4.3 Geschoßdecken EG/OG

Tabelle 3-5 und Tabelle 3-6 geben den Aufbau der Geschoßdecke der beiden konstruktiven Typen an.

Tabelle 3-5 Geschoßdecke EG/OG Leichtbau

Bezeichnung	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Estrich	0,060	1,110	1.800
Trennlage	0,001	0,500	1.100
Trittschalldämmung (EPS-T)	0,030	0,044	11
Holz	0,020	0,130	600
85% Luft / 15% Holz <sup>18</sup>	0,180	0,882	90
Holz	0,020	0,130	600
Gipskartonplatten	0,028	0,250	1.000
<b>Gesamt</b>	<b>0,339</b>		

Tabelle 3-6 Geschoßdecke EG/OG Hybridbau

Bezeichnung	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Estrich	0,060	1,110	1.800
Trennlage	0,001	0,500	1.100
Trittschalldämmung (EPS-T)	0,030	0,044	11
Gebundene Schüttung	0,050	0,060	100
Stahlbetondecke	0,200	2,500	2.400
Spachtelung	0,002	0,800	1.300
<b>Gesamt</b>	<b>0,343</b>		

<sup>18</sup> Angenommen werden 15% Deckenquerschnitt Konstruktionsholz und 85% Deckenquerschnitt als Deckenholraum

### 3.4.4 Geschoßdecken gegen Erdreich

Der Geschoßdeckenaufbau laut Tabelle 3-7 wird unverändert in beiden konstruktiven Typen, also „Leichtbau“ und „Hybridbau“ eingesetzt.

Tabelle 3-7 Geschoßdecke gegen Erdreich

Bezeichnung	d [m]	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Estrich	0,060	1,110	1.800
Trennlage	0,001	0,500	1.100
Trittschalldämmung (EPS-T)	0,030	0,044	11
Gebundene Schüttung	0,050	0,060	100
Stahlbeton	0,200	2,500	2.400
Abdichtung	0,001	0,500	1.100
XPS	0,100	0,032	19
Sauberkeitsschicht	0,060	1,700	2.300
<b>Gesamt</b>	<b>0,502</b>		

## 3.5 Gebäudetechnik

### 3.5.1 Lüftung

Das Gebäude wird in den beiden Geometrien EFH und MFH mit einer mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung ausgestattet. Der Wärmerückgewinnungsgrad wird für beide Gebäudetypen mit 70 % festgelegt.<sup>19</sup>

### 3.5.2 Wärmespeicherung, -verteilung und -abgabe

Für die thermische Modellierung und auch Beschreibung der Regelungstechnik wird das dafür vorgesehene Modul innerhalb der dynamischen Simulationssoftware IDA-ICE verwendet. Mit den folgenden Einstellungen:<sup>20</sup>

Die BTA ist im untersten Drittel, 6,7 cm unter der Oberfläche angeordnet. Sie wird mit konstantem Durchfluss von 4 l/m<sup>2</sup>h betrieben bei einer maximalen Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf von 5 K. Ein PI-Controller regelt anhand der IST- und SOLL-Raumlufttemperatur, über ein Dreiwegeventil, die an die Stahlbetondecke abgegebene Wärmeleistung.

Die Wärmeabgabe der Bauteilaktivierung wird thermodynamisch korrekt nach unten und auch nach oben berücksichtigt. Zusätzliche Wärmeverluste einer Wärmeverteilung oder -speicherung werden nicht modelliert.

### 3.5.3 Wärmeerzeugung

Als Heizsystem wird in allen Varianten eine Wärmepumpe angenommen. Ihre kalkulatorische Arbeitszahl (JAZ) wird für alle weiteren Berechnungsschritte mit dem Wert von 3,0 für Radiatoren-Systeme und 3,5 für Betonkernaktivierung (BTA) festgelegt.<sup>21</sup>

Die installierte Wärmeleistung der Wärmepumpe wird in beiden Gebäudetypen anhand der normgerechten Heizlastberechnung festgelegt.

Im EFH entspricht das einer installierten Wärmeleistung von 20 W/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>.

Im MFH entspricht das einer installierten Wärmeleistung von 12 W/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>.

---

<sup>19</sup> Der Wert von 70% Wärmerückgewinnungsgrad stimmt überein mit dem Defaultwert für ein Kompaktgerät Gegenstromwärmetauscher laut ÖNORM B 8110-6, Beiblatt 2 für MFH. Er wird der besseren Nachvollziehbarkeit halber auch auf das EFH angewandt, obwohl das im Widerspruch zu Bbl 1 steht.

<sup>20</sup> Die folgend verwendete Abkürzung BTA steht für Bauteilaktivierung und die Abkürzung PI steht für Proportional-Integral.

<sup>21</sup> Die Festlegung von Fixwerten stellt die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher. Der Wert von 3,0 entspricht der Mindestanforderung an die Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen der Wiener Bauordnung.

### 3.6 Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom

Das zentrale Potenzial der energieflexiblen Beheizung von Gebäuden liegt in der Ausnutzung volatiler erneuerbarer Energieangebote, konkret von Strom aus Windkraftanlagen oder Photovoltaikanlagen. Für die gegenständliche Studie ist eine Festlegung zu treffen, wie jene Zeiten definiert werden, in denen ein Überschuss an erneuerbar erzeugtem Strom angenommen werden kann.

Die Festlegung wird anhand der Auslastung der Windenergieanlagen durchgeführt, in Übereinstimmung mit dem Versorgungsmodell des Einfamilienhaus H, betreut durch den Auftraggeber. Ab einer Leistungsabgabe der Windenergieanlagen von rund einem Drittel der Nennleistung wird niederpreisiger Windstrom, als verfügbar angenommen. Der größte Einflussfaktor auf die Leistung einer Windenergieanlage ist die Windgeschwindigkeit. Es soll eine Windgeschwindigkeit als Grenzwindgeschwindigkeit definiert werden, anhand derer das Erreichen, bzw. Überschreiten eines Drittels der Nennleistung einer Windenergieanlage und damit von Zeiten mit niederpreisigem Strom, eingrenzbare ist. Über Stundenwerte des Klimadatensatz (die Windgeschwindigkeit) des Windparks, dessen Strom bezogen werden soll, sowie der Grenzwindgeschwindigkeit wird die Verfügbarkeit von sauberen niederpreisigem Strom, für jede Stunde des Jahrs festgelegt.

Die Korrelation der Windgeschwindigkeit mit der elektrischen Leistung einer Windenergieanlage bildet sich in ihrer Leistungskurve ab. Im folgenden Diagramm (Abbildung 3-8) sind Leistungskurven für Windenergieanlagen dreier unterschiedlicher Hersteller (Enercon E101, Nordex N117 3.0, Vestas V126-3.0), der am meisten verbauten 3 MW-Leistungsklasse, mit Rotordurchmessern zwischen 101 m und 126 m und typischen Nabenhöhen von ca. 100 m abgebildet.<sup>22</sup>

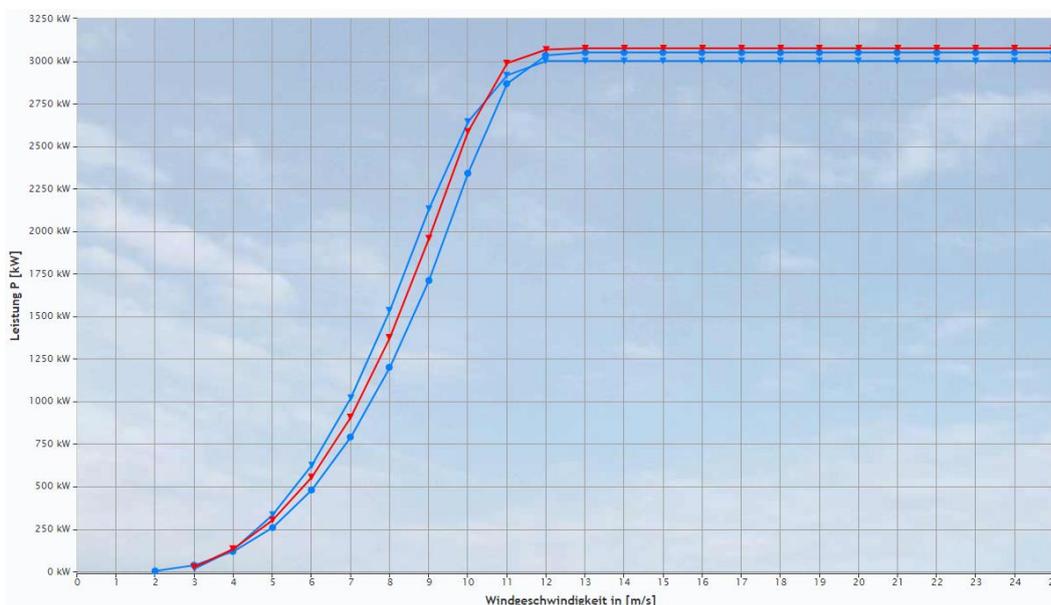
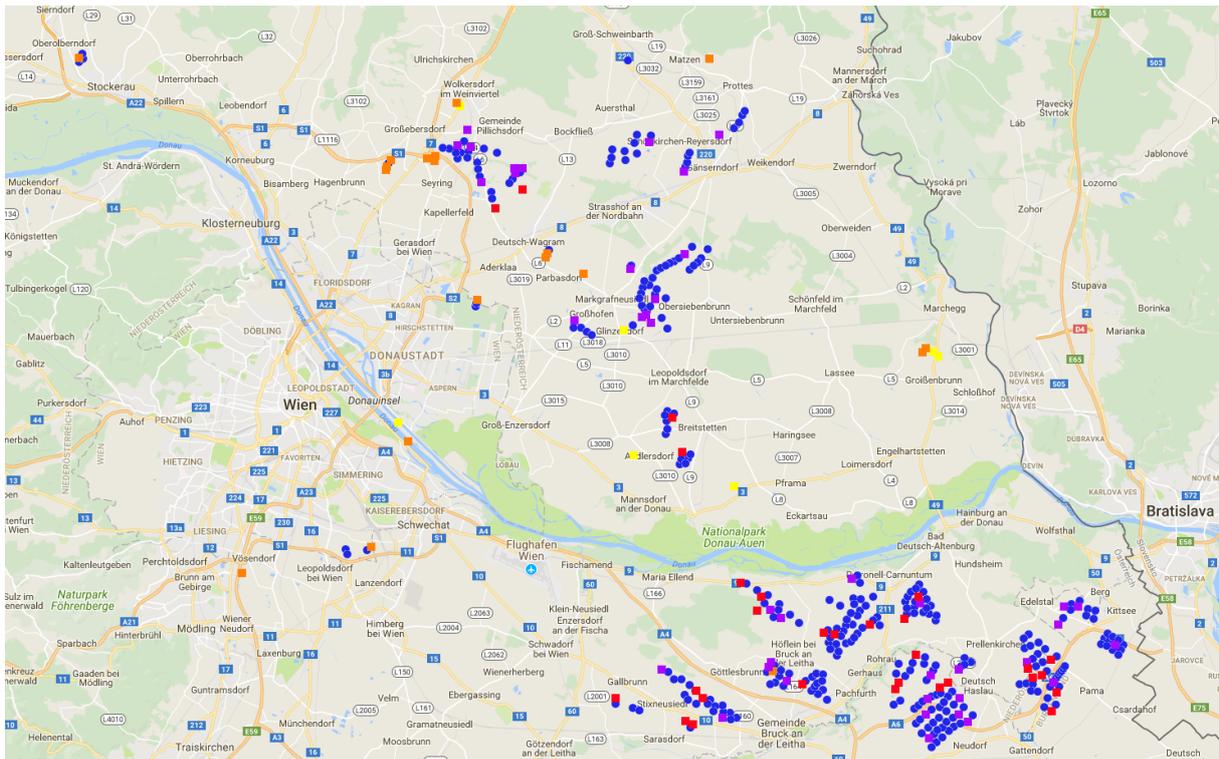


Abbildung 3-8 Leistungskurven von Windenergieanlagen der 3 MW-Leistungsklasse

<sup>22</sup> Quelle: S. Kopp, 2018, Windenergie im Binnenland. <http://www.windenergie-im-binnenland.de/impresum.php>; (letzte Abfrage 22.06.2018)

Aus diesen Leistungskurven ist ersichtlich, dass bei einer Windgeschwindigkeit von 7 m/s ein Drittel der Nennleistung abgegeben wird, also 1 MW der 3 MW Nennleistung. 7 m/s Windgeschwindigkeit auf Nabenhöhe wird somit als Grenzwindgeschwindigkeit, für die Unterteilung in Zeiten mit nieder- und hochpreisigem, festgelegt.

Die folgende Abbildung 3-9 zeigt Windenergieanlagen und Windparks im Umland von Wien. Für diese Studie werden die Windenergieanlagen in Obersiebenbrunn, als Stromversorger in Niederpreis-Zeiten, definiert.<sup>23</sup>



**Abbildung 3-9 Windenergieanlagen, nach Leistungsklassen eingefärbt, im Wiener-Umland**

Zur Abschätzung der Windgeschwindigkeiten wird ein Test Referenz Jahr mithilfe von Meteonorm für Obersiebenbrunn erstellt. Hierfür werden die in Obersiebenbrunn gemessenen Wetterdaten aus den Jahren 1991 bis 2010 herangezogen. Die so ermittelte Windgeschwindigkeit entspricht einer Messung 10 m über Grund. In einem nächsten Schritt wird diese anhand der Rauigkeitsklasse des Geländes auf die Nabenhöhe der Windenergieanlagen von 100 m umgerechnet.

Der Standort der Windenergieanlagen um Siebenbrunn entspricht der Rauigkeitsklasse 1,5, „Landwirtschaftliches Gelände mit einigen Häusern und 8 m hohen Hecken im Abstand von mehr als 1 km“ und einer Rauigkeitslänge  $z_0$ , die Höhe über Grund, in der die Windgeschwindigkeit gleich Null ist, von 0,055 m.<sup>24</sup>

<sup>23</sup> Quelle: Interessengemeinschaft Windkraft Österreich, 2018, Windrad-Landkarte. [https://www.igwindkraft.at/?xmlval\\_ID\\_KEY%5b0%5d=1055](https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY%5b0%5d=1055); (letzte Abfrage 22.06.2018)

<sup>24</sup> Quelle: Wind-Data, 2018, Windprofil-Rechner. <https://wind-data.ch/tools/profile.php?h=100&v=5&z0=0.055&abfrage=Aktualisieren>; (letzte Abfrage 06.08.2018)

Anhand der folgenden Formel werden die Windgeschwindigkeiten in 10 m über Grund auf die Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe in 100 m über Grund umgerechnet.

$$v_{Nabenhöhe} = v_{ref} * \frac{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{Nabenhöhe}}{z_0}\right)}$$

Die Windgeschwindigkeit ist in auf Nabenhöhe, 100 m über Grund, um 44 % höher als in der Messhöhe, 10 m über Grund.

Die folgende Abbildung 3-10 und Abbildung 3-3-11 zeigen die Windgeschwindigkeit, in 10 m über Grund und hochgerechnet auf die Nabenhöhe von 100 m, im Jänner und über ein gesamtes Jahr in Obersiebenbrunn, sowie die Grenzwindgeschwindigkeit.<sup>25</sup>

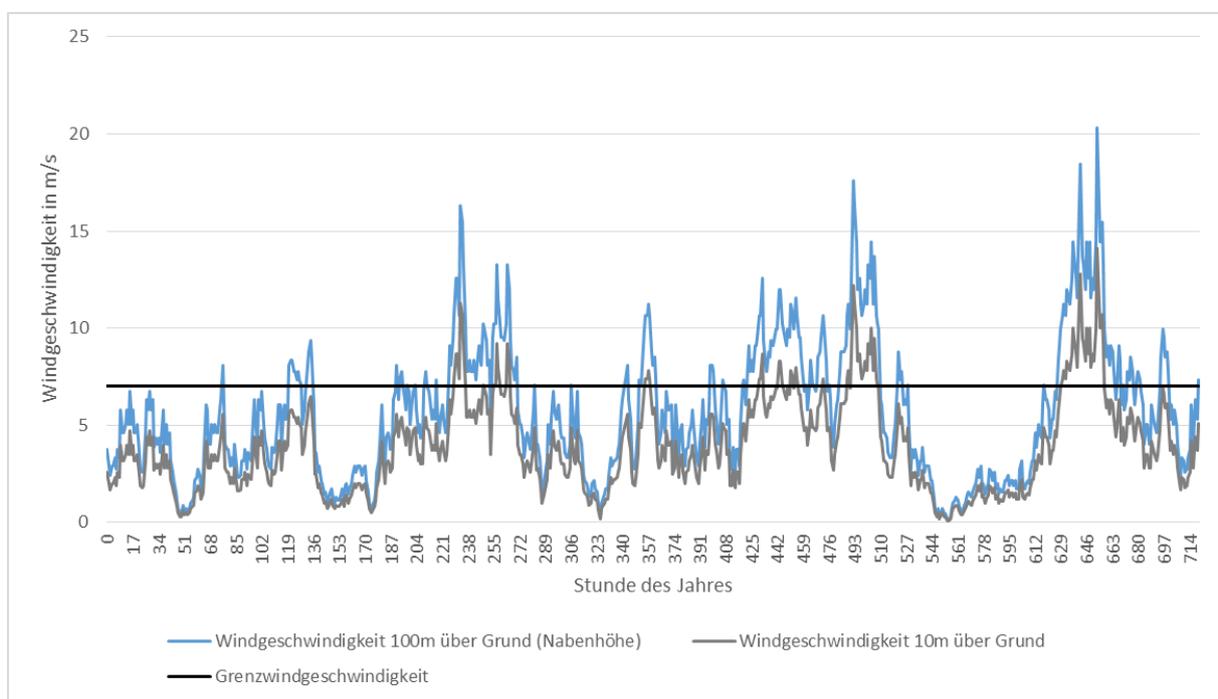
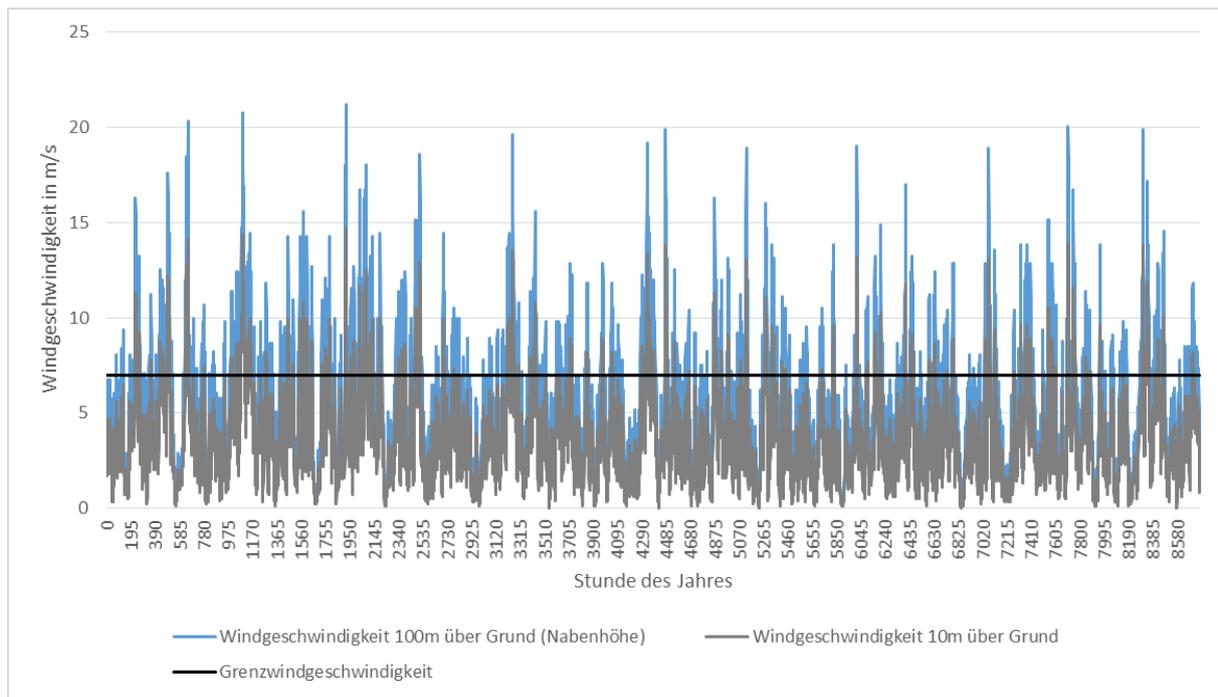


Abbildung 3-10 Windgeschwindigkeit in Obersiebenbrunn, in 10 und 100 m über Grund, Jänner

<sup>25</sup> Quelle: aus dem TRY aus dem Zeitraum 1991 bis 2010, Meteotest, 2015



**Abbildung 3-3-11 Windgeschwindigkeit in Obersiebenbrunn, in 10 und 100 m über Grund, Jahr**

Daraus folgernd wird der Zusammenhang von Windgeschwindigkeit und Strompreis als Indikator für eine erneuerbare Stromerzeugung in der gegenständliche Studie wie folgt abgebildet:

Liegt der Stundenwert der Windgeschwindigkeit in Obersiebenbrunn in 100 m Höhe über der Grenzwindgeschwindigkeit, soll die Wärmeerzeugung stets freigeschaltet werden, eine Versorgung erfolgt in diesen Zeiten mit erneuerbarem Überschussstrom aus den Windenergieanlagen in Obersiebenbrunn, welcher niedrige spezifische Umweltbelastungen aufweist.

Liegt der Stundenwert der Windgeschwindigkeit in Obersiebenbrunn in 100 m Höhe unter der Grenzwindgeschwindigkeit, soll die Wärmeerzeugung nur aktiviert werden, wenn das Gebäude und seine thermischen oder elektrischen Speicher entladen sind. Eine Versorgung erfolgt in diesen Zeiten mit nicht erneuerbarem Netzstrom, welcher hohe spezifische Umweltbelastungen aufweist.

### 3.7 Ökologische Qualitäten von Netzstrom und erneuerbarem Überschussstrom

Netzstrom wird mit einem Mittelwert der Konversionsfaktoren des Zeitraums November bis Februar laut OIB RL6, Entwurf 2019 festgelegt:

$$f_{PE_{gesamt}} = 1,95 \text{ kWh}_{PE} / \text{kWh}$$

$$f_{CO_2} = 300 \text{ g}_{CO_2} / \text{kWh}$$

Erneuerbarer Überschussstrom wird nach GEMIS 4.95, Datensatz 'Wind-KW-DE-2020\_Binnenland' festgelegt:

$$f_{PE_{gesamt}} = 1,04 \text{ kWh}_{PE} / \text{kWh}$$

$$f_{CO_2} = 10 \text{ g}_{CO_2} / \text{kWh}$$

## 3.8 Heizsysteme und Regelungsstrategien

### 3.8.1 Wärmeabgabesystem

Als Wärmeabgabesystem werden die Bauteilaktivierung der Decken und alternativ dazu eine Radiatorheizung definiert.

Die Bauteilaktivierung wird als Rohrlage in der Mitte der 20 cm starken Deckenplatte aus Beton angenommen.

Die Radiatorheizung wird als ideal geregelte Wärmeabgabe modelliert.

### 3.8.2 Regelung

Der Betrieb der Bauteilaktivierung erfolgt bei variablem Durchfluss und einer konstanten Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf von 5 K. Die Leistungsregulierung erfolgt nach der Regelgröße der Raumlufttemperatur. Die Führungsgröße ist der Sollwert der Raumlufttemperatur, der in den Varianten ohne energieflexiblem Gebäudebetrieb über die gesamte Heizperiode auf einem Wert von 22°C fixiert ist.

In den Varianten mit energieflexiblem Gebäudebetrieb wird der Sollwert mit dem Strompreis verändert: Während der Stunden mit zeitlicher Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom wird die Solltemperatur des Raumes auf 23°C eingestellt, außerhalb dieser Zeiten auf 21°C.

In den Varianten mit konstanter Beheizung wird die Leistung, welche für eine Einhaltung des konstanten Sollwerts der Raumlufttemperatur erforderlich ist, entsprechend zur Verfügung gestellt.

### 3.8.3 Wärmeerzeugung

Als System der Wärmeerzeugung wird einheitlich eine Wärmepumpe mit einer maximalen Heizleistung laut Heizastberechnung angenommen.

## 3.9 Dimensionierung der Speicher

Mittels dynamischer thermischer Gebäudesimulation wird das Auskühlverhalten der beiden Referenzgebäude mit ihren unterschiedlichen Baukonstruktionen und Wärmeabgabesystemen innerhalb der eintägigen und der dreitägigen Heizunterbrechung untersucht.

Es stellt sich dabei heraus, dass bereits die konstruktive Ausführung mit Außenwänden in Holzleichtbauweise und Decken in 20 cm Stahlbeton eine ausreichende Speichermasse für eine dreitägige Heizunterbrechung zur Verfügung stellt. Auf die Untersuchung einer noch schwereren Variante wird daher verzichtet.

### 3.9.1 Auskühlverhalten der Referenzgebäude im Dreitagesvergleich

Die folgende Abbildung 3-12 sowie Abbildung 3-13 zeigt das Auskühlverhalten in der gewählten, ungünstigsten Dreitagesperiode von Stunde 120 bis 192, also von 6. bis 9. Jänner, für das EFH, beziehungsweise folgen für das MFH.

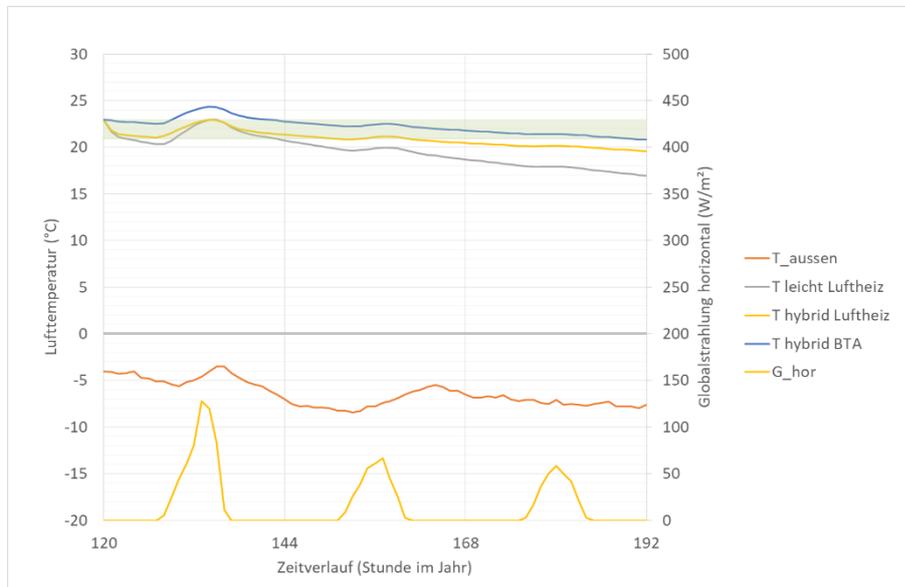


Abbildung 3-12 Zeitverlauf des Auskühlens für das EFH

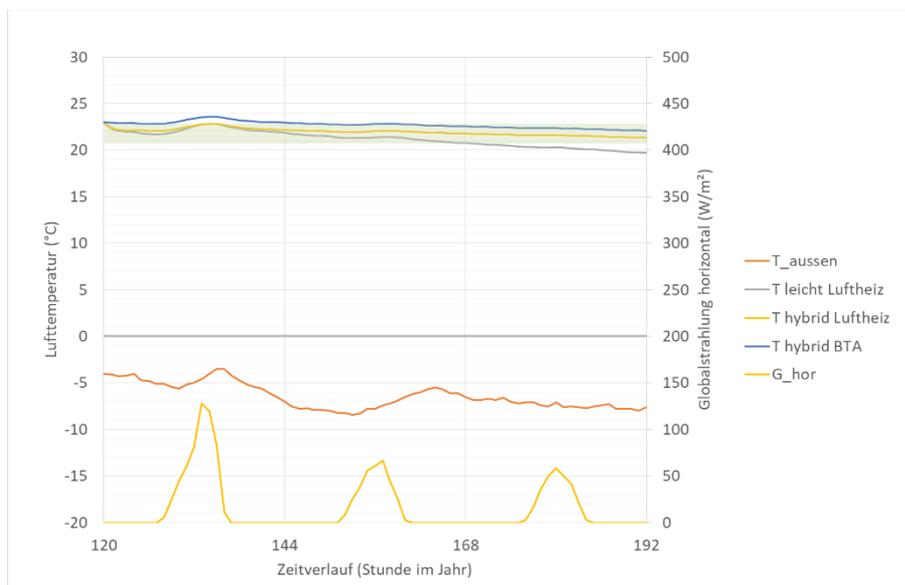


Abbildung 3-13 Zeitverlauf des Auskühlens für das MFH

Im Vergleich der beiden Gebäudetypen, EFH und MFH, erweist sich erwartungsgemäß das EFH in Hinblick auf zu rasches Auskühlen als kritischer:

Nur in der Variante mit BTA und demnach auch mit Betondecke bleibt dort die Raumlufttemperatur innerhalb der dreitägigen Heizunterbrechung gerade noch im angestrebten Band von 23°C bis 21°C Lufttemperatur.

Wird dasselbe Gebäude mit einer Luftheizung betrieben, zeigt sich trotz Speichermassen der massiven Decken ein Auskühlverhalten mit einem Temperaturabfall auf 19,5°C Lufttemperatur. Die Bauteilaktivierung bildet also ein zentrales Element der Energieflexibilität, weil sie mit der direkten Wärmezufuhr die baulichen Wärmespeicher wesentlich besser ausnutzt, als es die indirekte Bewirtschaftung der Massenspeicher aus der Raumluft vermag.

### 3.9.2 Ermittlung der erforderlichen Speichergrößen

Die erforderliche Speichergröße wird aus der Anforderung einer bis zu dreitägigen und alternativ einer eintägigen Heizunterbrechung definiert. Unter „Speichergröße“ wird dabei die genutzte Speicherkapazität in kWh verstanden, also jene Energie, die unter den gegebenen Randbedingungen maximal aus dem Speicher, elektrisch oder thermisch, entnommen wird.

Es wird dazu für beide Gebäude im konstruktiven Typ des Leichtbaus und bei Radiatorheizung auf konstant 22°C Lufttemperatur jene Heizwärme ermittelt, die im Jahresverlauf während einer Dreitäges- bzw. Eintagesperiode maximal zugeführt werden muss.

Für den thermischen Speicher aus Beton sind diese Wärmemengen gleich der erforderlichen bzw. genutzten Speichergröße. Für den Batteriespeicher ergibt sich angesichts des Wärmepumpenbetriebs mit einer Arbeitszahl von 3,0 die erforderliche Speicherkapazität als ein Drittel dieser Wärmemengen. Entsprechend liegen die folgenden erforderlichen Speichergrößen laut

Tabelle 3-8 vor:

**Tabelle 3-8:** Thermische und elektrische Speichergrößen

	Thermischer Speicher		Batterie	
	kWh	Wh/m <sup>2</sup> BGF	kWh	Wh/m <sup>2</sup> BGF
<b>Einfamilienhaus</b>				
Überbrückung der Eintagesperiode	33	173	11	58
Überbrückung der Dreitägesperiode	80	415	27	138
<b>Mehrfamilienhaus</b>				
Überbrückung der Eintagesperiode	257	88	86	30
Überbrückung der Dreitägesperiode	666	227	222	76

Für das EFH ergibt sich zur Überbrückung der Dreitägesperiode eine erforderliche Wärmespeicherung von 80 kWh<sub>th</sub> bei einer eingebrachten Masse von Stahlbeton in den beiden Decken von 192 m<sup>2</sup> \* 0,2 m \* 2.400 kg/m<sup>3</sup> = 92.160 kg. Es errechnet sich somit ein massenbezogenes genutztes Wärmespeichervermögen des Stahlbetons von 80.000 Wh<sub>th</sub> / 92.160 kg = **0,868 Wh<sub>th</sub>/kg** = 3.125 J/kg. Für das Mehrfamilienhaus ergibt sich eine erforderliche Wärmespeicherung von 666 kWh<sub>th</sub>, bei einer eingebrachten Masse von Stahlbeton in den Decken von 2.934 m<sup>2</sup> \* 0,2 m \* 2.400 kg/m<sup>3</sup> =

1.408.320 kg. Es errechnet sich somit ein massenbezogenes genutztes Wärmespeichervermögen des Stahlbetons von  $666.000 \text{ Wh}_{\text{th}} / 1.408.320 \text{ kg} = \mathbf{0,473 \text{ Wh}_{\text{th}}/\text{kg}} = 1.702 \text{ J/kg}$

Die Speicherbewirtschaftung ergibt sich aus dem energieflexiblen Betrieb der Heizung:

- > Im Fall des thermischen Speichers wird abhängig vom Strompreis ein unterschiedlicher Sollwert der Raumlufttemperatur eingestellt: Während der Stunden mit zeitlicher Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom wird die Solltemperatur des Raumes auf 23°C eingestellt, außerhalb dieser Zeiten auf 21°C.
- > Im Fall des Batteriespeichers wird die Wärmepumpe in Stunden mit hochpreisigem Strom solange aus dem Batteriespeicher betrieben, als dieser Energie zur Verfügung stellen kann. Erst wenn der Ladezustand des Batteriespeichers unter die nutzbare Grenze sinkt, bezieht die Wärmepumpe den hochpreisigen Netzstrom. In Stunden mit niederpreisigem Netzstrom wird die Wärmepumpe direkt aus dem Netz betrieben. Zusätzlich wird der Batteriespeicher während dieser Zeit bei Bedarf mit derselben Ladeleistung wie der maximalen Stromaufnahmeleistung der Wärmepumpe geladen. Der Netzanschluss muss daher auf die doppelte maximale elektrische Leistung der Wärmepumpe ausgelegt werden.

Die Spitzenleistung in der Entladung des Batteriespeichers wird festgelegt mit jener elektrischen Leistung, welche der Wärmepumpe zugeführt werden muss, um die Norm-Heizlast des Gebäudes zu decken, was identisch ist mit der Nennleistung der Wärmepumpe.

- > Im EFH entspricht das einer installierten Wärmeleistung von 20 W/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> und demnach einer elektrischen Leistung der Batterie von 1,3 kW.
- > Im MFH entspricht das einer installierten Wärmeleistung von 12 W/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> und demnach einer elektrischen Leistung der Batterie von 11,7 kW.

#### *Exkurs: Wirksame Speicherkapazität der Betondecke ohne Aktivierung*

Wie im gegenständlichen Kapitel bereits dargestellt, reicht die thermische Speichermasse allein der Betondecken bei Bewirtschaftung mit Bauteilaktivierung aus, um eine dreitägige Heizunterbrechung abzupuffern. Die rechnerisch erforderliche Wärmespeicherkapazität der Betondecken zur Überbrückung dieser dreitägigen Heizunterbrechung beträgt demnach für das Einfamilienhaus 80 kWh<sub>th</sub> oder 415 Wh<sub>th</sub>/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> sowie für das Mehrfamilienhaus 666 kWh<sub>th</sub> oder 227 Wh<sub>th</sub>/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>.

Aufbauend auf diesen beiden Ergebnissen wird im gegenständlichen Exkurs eine vergleichende Analyse der Wärmespeicherkapazität der Betondecke mit bauphysikalischen Formelapparaten vorgenommen.

Ein möglicher Zugang ist, die Wärmekapazität der Betondecke bei Veränderung ihrer Mitteltemperatur um zum Beispiel 3 K zu berechnen. 3 K erscheint als realistische Größenordnung der Temperaturveränderung der Decke bei Abschaltung der Bauteilaktivierung über eine Zeitspanne von 3 Tagen.

Es ergibt sich für das EFH eine Wärmespeicherkapazität von

$$(0,2 \text{ m}_{\text{Deckenstärke}} * 2.400 \text{ kg/m}^3 * 1 \text{ kJ/(kgK)} * 3 \text{ K} * 3.600^{-1} \text{ s/h}) = 400 \text{ Wh}_{\text{th}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$$

oder insgesamt 76,8 kWh<sub>th</sub>.

Dieser Wert stimmt mit erstaunlich guter Genauigkeit überein mit dem zuvor ermittelten genutzten Wärmespeichervermögen von 80 kWh<sub>th</sub>.

Ein weiterer Zugang ist die Abschätzung der möglichen Wärmeabgabe aus der Decke bei bloß passiver Nutzung der Speichermasse, also mit Radiatorheizung anstelle von Bauteilaktivierung. Es steht dazu der Formelapparat von ISO 13786 zur Verfügung. Die Amplitude der Lufttemperaturschwingung ist mit 2 K anzusetzen, also der Bandbreite der Energieflexibilität. Die Periodendauer ist mit 6 Tagen, also dem Doppelten der Heizunterbrechung, anzusetzen.

Für die Geschoßdecke aus Beton ergibt sich unter dieser Voraussetzung als Summe der oberen und der unteren Oberfläche eine wirksame Wärmekapazität von 443 kJ/m<sup>2</sup>K und somit bei einer Amplitude der Raumlufthtemperatur von 2 K eine Wärmeabgabe in den Raum von 246 Wh<sub>th</sub>/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> oder insgesamt 47,2 kWh<sub>th</sub>.

Dieser Wert ist demnach nur ca. halb so groß wie jener bei Anwendung der Bauteilaktivierung. Und dennoch ist er vor dem Hintergrund plausibel, dass ja das EFH in dieser Konstellation, also mit hybrider Baukonstruktion und mit Radiatorheizung, in der dreitägigen Referenzperiode bereits deutlich zu stark auskühlt. Was bedeutet, dass die verfügbare Wärmeleistung aus der bloß passiven Bewirtschaftung der Speichermassen somit deutlich zu gering ist.

Unter Berücksichtigung aller raumzugewandter Bauteilflächen, aber ohne Zwischenwände und Einrichtung, ergeben sich in der dreitägigen Auskühlperiode die folgenden, in Tabelle 3-9 dargestellten, verfügbaren Wärmekapazitäten, bezogen auf eine Temperaturamplitude der Raumlufthtemperatur von 1 K.

**Tabelle 3-9:** Wärmekapazitäten im EFH bezogen auf eine Lufttemperaturamplitude von 1 K

Bauweise			hybrid		leicht	
Bauteil	Oberfläche	Fläche [m <sup>2</sup> ]	c [kJ/m <sup>2</sup> K]	C [kJ/K]	c [kJ/m <sup>2</sup> K]	C [kJ/K]
oberste Geschoßdecke	unten	96	316,3	30 365	72,7	6 979
Zwischendecke oben	oben	96	133,8	12 845	130,0	12 480
Zwischendecke unten	unten	96	308,3	29 597	78,7	7 555
unterste Geschoßdecke	oben	96	119,5	11 472	119,5	11 472
Außenwand N	innen	67,2	75,8	5 094	75,8	5 094
Außenwand O	innen	38,4	75,8	2 911	75,8	2 911
Außenwand S	innen	48	75,8	3 638	75,8	3 638
Außenwand W	innen	38,4	75,8	2 911	75,8	2 911
Fensterglas	innen	33,6	18,0	605	18,0	605
Fensterrahmen	innen	14,4	49,1	706	49,1	706
Volumen		576 m <sup>3</sup>				
Nutzfläche		192 m <sup>2</sup>		100 143 kJ/K		54 351 kJ/K
				27 818 Wh/K		15 098 Wh/K
<b>f(BW)</b>				<b>48 Wh/m<sup>3</sup>K</b>		<b>26 Wh/m<sup>3</sup>K</b>
<b>NF bezogene wirksame Wärmekapazität</b>				<b>145 Wh/m<sup>2</sup>K</b>		<b>79 Wh/m<sup>2</sup>K</b>

Erkennbar ist wieder der dominante Einfluss der Decken und Fußböden:

Das EFH in Hybridbauweise weist eine um 84% höhere wirksame Wärmekapazität auf als das gleiche Gebäude in Leichtbauweise, selbst wenn dieses wie hier angenommen bereits mit einem mineralischen Estrich ausgestattet ist. Die Estriche alleine haben im leichten Gebäude einen Anteil von fast der Hälfte der gesamten wirksamen Wärmekapazität.

Unter der Randbedingung der Temperaturamplitude von 2 K ergeben sich demnach für das EFH mit Radiatorheizung in der dreitägigen Auskühlperiode wirksame Wärmeströme aus den Bauteilen in der Größenordnung von 290 Wh<sub>th</sub>/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> im Hybridbau und von 158 Wh<sub>th</sub>/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> im Leichtbau.

## 4 Energiebilanzen bei energieflexiblen Gebäudebetrieb

Im gegenständlichen Kapitel wird die erste Fragestellung der Studie beantwortet, ob und in welchem Maß energieflexibel beheizte Gebäude einen erhöhten Heizwärmebedarf erwarten lassen.

Darüber hinaus wird für alle untersuchten Varianten zusätzlich auch der erzielbare Erfolg der energieflexiblen Betriebsweise ausgewertet, also der nutzbare Anteil an billigem und sauberem Überschussstrom aus der Windkraft.

### 4.1 Heizenergie-Mehrbedarf bei energieflexiblen Gebäudebetrieb

Energieflexibel beheizte Gebäude, welche Bauteile als thermische Speichermassen einsetzen, weisen zwingend schwankende Raumlufttemperaturen auf. Und sie werden systemimmanent zu Zeiten der Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom mit Raumtemperaturen über dem Sollwert nicht energieflexibler Gebäude betrieben. Aus diesen Phänomenen ergibt sich, dass Energieflexibilität unter Nutzung thermischer Speichermassen gegenüber konstant beheizten Gebäuden strukturell zu einem Anstieg des HWB führen kann.

Der Umfang dieser Erhöhung des HWB aufgrund energieflexibler Bewirtschaftung von gebäudeintegrierten Speichermassen wird in der vorliegenden Studie für die beiden Referenzgebäude im Detail untersucht.

Für die relevanten Kombinationen aus Gebäudetyp, Baukonstruktion, Wärmeabgabesystem und Regelungsstrategie werden das thermische Gebäudeverhalten und der Heizenergiebedarf während der fünfmonatigen Heizperiode ermittelt. Ausgewertet werden:

- > Der stündliche Verlauf der Raumlufttemperatur
- > Der stündliche Verlauf des Wärmebedarfs für Raumheizung, unter Anwendung der in Kapitel 3.5 erläuterten Obergrenze der verfügbaren Wärmeleistung und unter Anwendung der in Kapitel 3.8 erläuterten Regelstrategie.
- > Der stündliche Verlauf des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe, auf Grundlage eines als fix angenommenen COP von 3,0 für Radiatoren-Systeme und einen COP von 3,5 für BTA, differenziert nach elektrischem Energiebedarf bei niederpreisigem Strom beziehungsweise bei hochpreisigem Strom.
- > In den Varianten mit Batteriespeicher auch der stündliche Verlauf, der aus der Batterie abgegebenen beziehungsweise von der Batterie aufgenommenen elektrischen Energie, unter Berücksichtigung der Kapazität der Batterie, unter Berücksichtigung ihrer Be- und Entladewirkungsgrade sowie ihrer Selbstentladung, sowie unter Berücksichtigung der Betriebsweise der Batterie, wie sie in Kapitel 6.5 beschrieben wird.

Die folgende Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 zeigen die Energiebilanzen und Temperaturstatistiken über die Heizperiode für die beiden Referenzgebäude nach Gebäudetyp, Baukonstruktion, Wärmeabgabesystem und Regelungsstrategie.

**Tabelle 4-1 Energiebilanzen und Temperaturstatistik über die Heizperiode für das EFH**

					kWh/m <sup>2</sup> a		%	kWh/m <sup>2</sup> a		°C	°C	°C
					HWB	HEB_billig	HEB_billig	HEB_teuer	Ti_mittel	Ti_min	Ti_max	
EFH	hybrid	BTA	21-23°C	-	13,8	2,8	71%	1,2	22,8	20,6	27,0	
	hybrid	BTA	22°C	-	13,8	1,1	27%	2,9	22,8	21,6	27,0	
	hybrid	Radiator	21-23°C	-	11,8	2,1	52%	1,9	22,2	21,0	27,0	
	hybrid	Radiator	22°C	-	12,6	1,1	27%	3,1	22,5	21,9	27,0	
	Leichtbau	Radiator	21-23°C	-	12,7	1,9	45%	2,3	22,3	21,0	27,0	
	Leichtbau	Radiator	22°C	-	13,6	1,2	26%	3,3	22,6	21,8	27,0	
	Leichtbau	Radiator	22°C	Litium-Ionen 11 kWh	13,6	3,5	70%	1,5	22,6	21,8	27,0	
	Leichtbau	Radiator	22°C	Litium-Ionen 27 kWh	13,6	4,3	82%	0,9	22,6	21,8	27,0	
	Leichtbau	Radiator	22°C	Redox-Flow 11 kWh	13,6	3,7	71%	1,5	22,6	21,8	27,0	
	Leichtbau	Radiator	22°C	Redox-Flow 27 kWh	13,6	4,5	82%	1,0	22,6	21,8	27,0	

**Tabelle 4-2 Energiebilanzen und Temperaturstatistik über die Heizperiode für das MFH**

					kWh/m <sup>2</sup> a		%	kWh/m <sup>2</sup> a		°C	°C	°C
					HWB	HEB_billig	HEB_billig	HEB_teuer	Ti_mittel	Ti_min	Ti_max	
MFH	hybrid	BTA	21-23°C	-	7,8	1,8	80%	0,4	22,9	20,6	26,4	
	hybrid	BTA	22°C	-	7,4	0,6	27%	1,5	22,7	21,6	26,4	
	hybrid	Radiator	21-23°C	-	6,4	1,3	59%	0,9	22,4	21,0	26,4	
	hybrid	Radiator	22°C	-	6,7	0,6	27%	1,6	22,5	22,0	26,4	
	Leichtbau	Radiator	21-23°C	-	6,6	1,0	47%	1,2	22,2	21,0	26,9	
	Leichtbau	Radiator	22°C	-	7,2	0,6	26%	1,8	22,5	22,0	26,8	
	Leichtbau	Radiator	22°C	Litium-Ionen 86 kWh	7,2	1,8	69%	0,8	22,5	22,0	26,8	
	Leichtbau	Radiator	22°C	Litium-Ionen 222 kWh	7,2	2,3	83%	0,5	22,5	22,0	26,8	
	Leichtbau	Radiator	22°C	Redox-Flow 86 kWh	7,2	1,9	70%	0,8	22,5	22,0	26,8	
	Leichtbau	Radiator	22°C	Redox-Flow 222 kWh	7,2	2,4	82%	0,5	22,5	22,0	26,8	

In den beiden Diagrammen der Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2 ist erkennbar, dass die Abweichungen im HWB für alle Varianten in einer Bandbreite von  $\pm 10\%$  liegen. Diese Bandbreite ist durch einen Hellgrün unterlegten Balken im Diagramm eingetragen. Ebenfalls erkennbar ist, dass sich in den einzelnen Varianten über die Heizperiode geringfügig unterschiedliche mittlere Raumlufttemperaturen einstellen, welche im Wesentlichen die Ursache der Unterschiede im HWB darstellen.

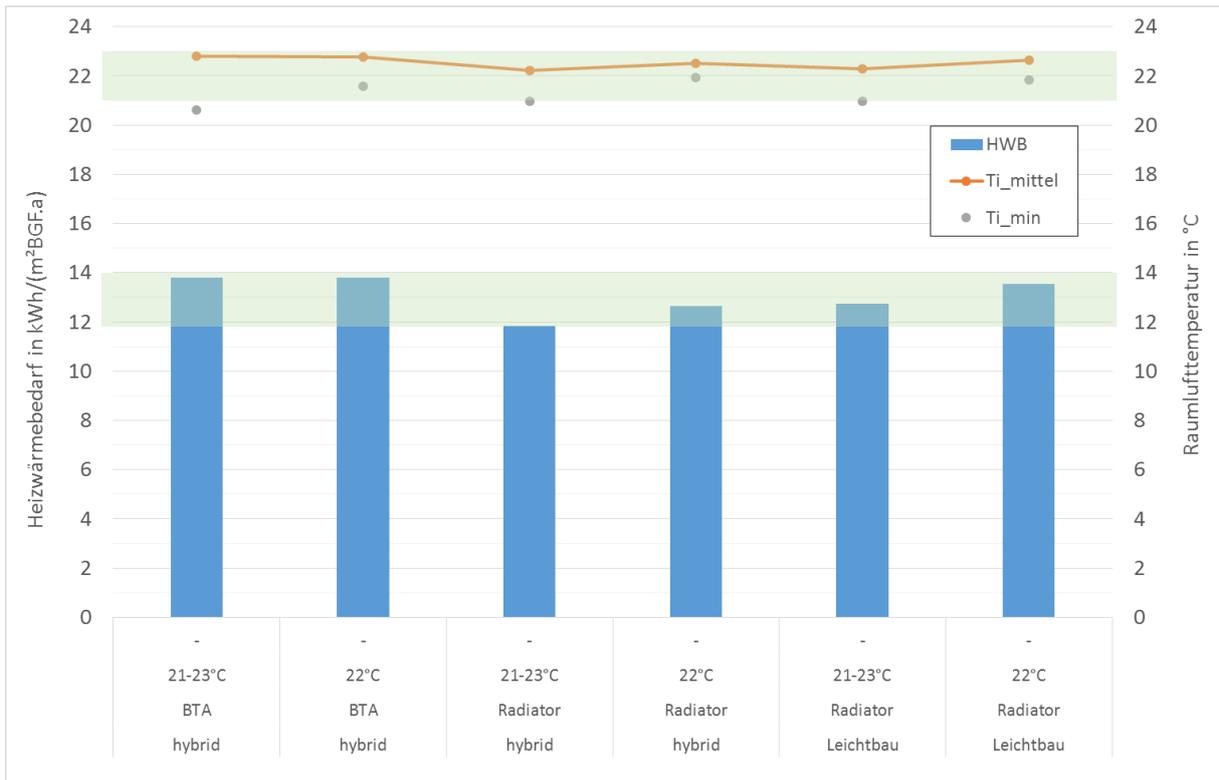


Abbildung 4-1 Wärmebilanzen über die Heizperiode für das EFH



Abbildung 4-2 Wärmebilanzen über die Heizperiode für das MFH

## 4.2 Ausmaß der Nutzbarkeit von Überschussstrom aus der Windkraft

Der „Erfolg“ der energieflexiblen Betriebsweise besteht in dem Anteil, zu dem der Strombedarf für die Raumheizung aus billigem und sauberem Überschussstrom aus der Windkraft gedeckt werden kann. Dieses Ergebnis wird für je zehn Varianten im EFH und im MFH ausgewertet und in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Varianten mit hybrider Bauweise, also schweren Decken, mit Bauteilaktivierung und energieflexibler Betriebsweise den höchsten Anteil an Nutzung von Überschussstrom aufweisen, nämlich 71% beim EFH und 80% beim MFH.

Bereits deutlich weniger Überschussstrom können die Varianten mit weiterhin hybrider Bauweise und energieflexibler Betriebsweise, aber mit Radiatoren nutzen, nämlich 52% beim EFH und 59% beim MFH.

Die schlechteste Nutzung von Überschussstrom weisen erwartungsgemäß trotz energieflexibler Betriebsweise die Varianten in Leichtbauweise auf, nämlich 45% beim EFH und 47% beim MFH.

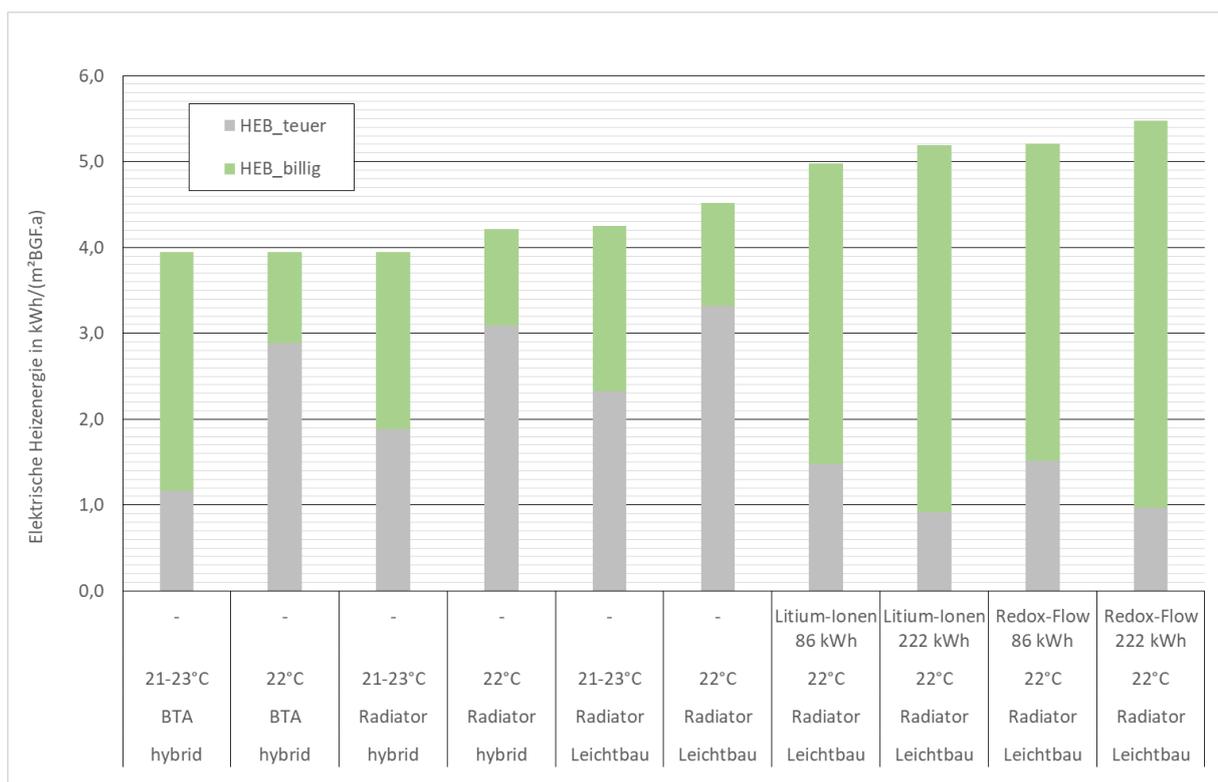


Abbildung 4-3 Strombedarf (HEB) der Varianten des EFH gegliedert nach Wind- und Netzstrom



Abbildung 4-4 Strombedarf (HEB) der Varianten des MFH gegliedert nach Wind- und Netzstrom

### 4.3 Energieflussbilder

Für alle Varianten wurden außerdem beschriftete Energieflussdarstellungen angefertigt, in denen anschaulich Art und Ausmaß der jährlichen Energieströme ersichtlich sind. Auch aus Ihnen kann das Maß der Nutzung von sauberem und billigem Überschussstrom aus Windenergieanlagen abgelesen werden.

#### 4.3.1 Erläuterung der Darstellung

In den Energieflussbildern werden die Energieflüsse als farblich gekennzeichnete und mit den Jahressummen des Energieflusses dargestellt. Abbildung 4-5 zeigt exemplarisch ein solches Energieflussbild: Dargestellt sind darin die folgenden Größen:

1. der gesamte Stromeinkauf (grau-strichliert)
2. der gesamte Stromeinkauf aufgeteilt auf:
  - a. „sauberen“ Netzstrom (hellgrau)
  - b. „schmutzigem“ Netzstrom (dunkelgrau)
3. die zugeführte Umweltenergie (grün)
4. die an die Innenräume abgegebene Wärmeenergie (orange)
5. die Sollraumtemperatur 22 °C (im Gebäude dargestellt)
6. die mittlere Raumtemperatur in der Heizperiode (unter dem Gebäude dargestellt)

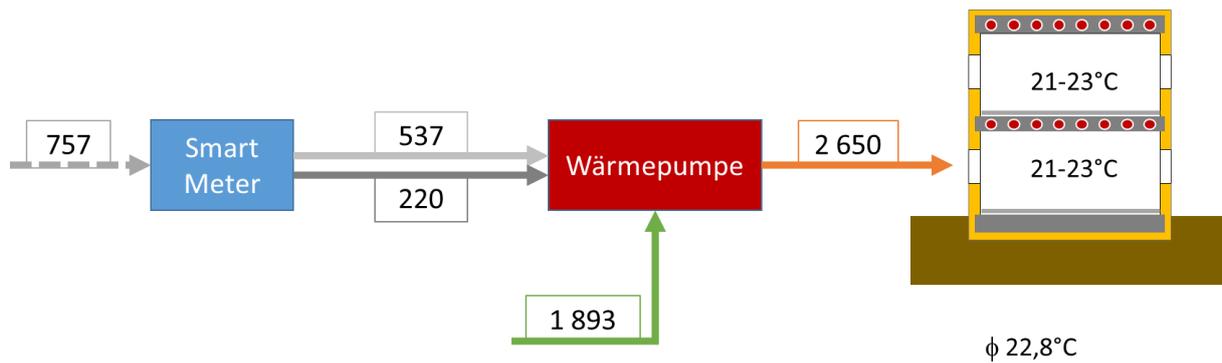


Abbildung 4-5 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C

Beinhaltet die Variante einen elektrischen Energiespeicher, kommen drei weitere Energieflüsse hinzu. Ein exemplarisches Energieflussbild für eine Variante mit elektrischem Speicher ist in Abbildung 4-6 ersichtlich. Die Werte in der Abbildung beschreiben die folgenden Energieflüsse, von links nach rechts:

1. der gesamte Stromeinkauf (grau-strichliert)
2. der gesamte Stromeinkauf aufgeteilt auf:
  - a. „sauberen“ Netzstrom direkt genutzt (hellgrau)
  - b. „sauberen“ Netzstrom in die Batterie eingespeist (hellgrau)
  - c. „schmutzigen“ Netzstrom (dunkelgrau)
3. Batterie-Verluste
4. Wärmepumpenstrom aus der Batterie
5. die zugeführte Umweltenergie (grün)
6. die an die Innenräume abgegebene Wärmeenergie (orange)
7. die Sollraumtemperatur 22 °C (im Gebäude dargestellt)
8. die mittlere Raumtemperatur in der Heizperiode (unter dem Gebäude dargestellt)

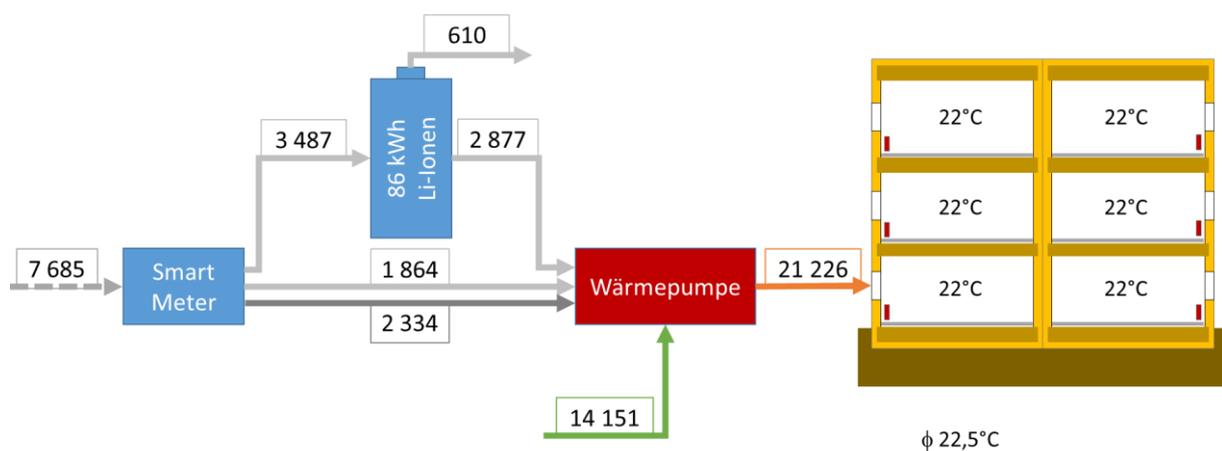


Abbildung 4-6 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konst. Raumtemp.-Sollwert von 22°C und einer 86 kWh Li-Ionen Batterie

### 4.3.2 Energieflussbilder EFH

Im Folgenden sind Energieflussbilder der zehn verschiedenen Varianten mit dem Gebäudetyp EFH ersichtlich.

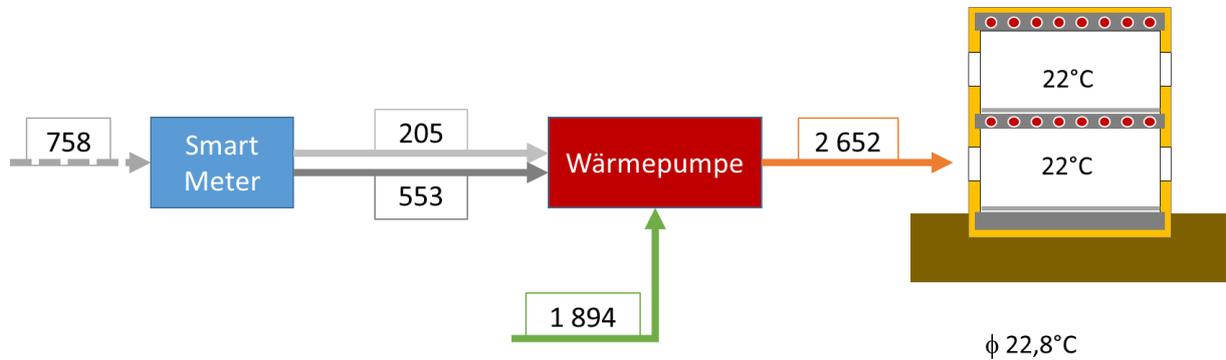


Abbildung 4-7 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C

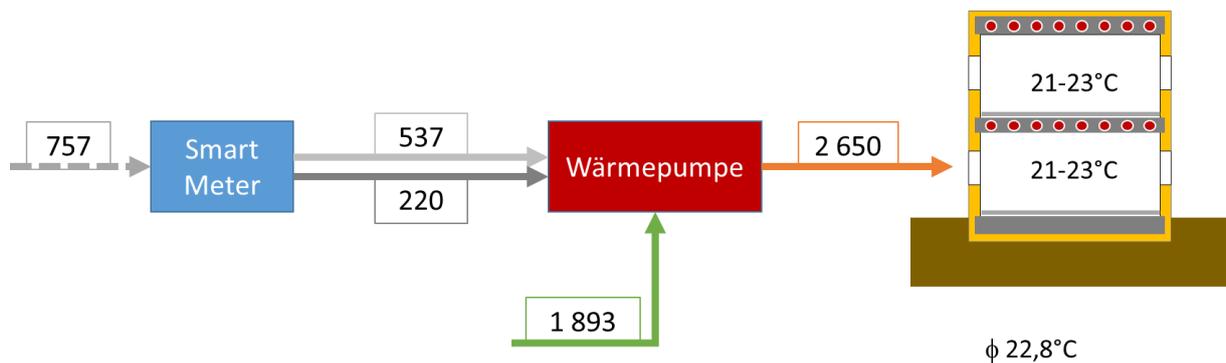


Abbildung 4-8 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C

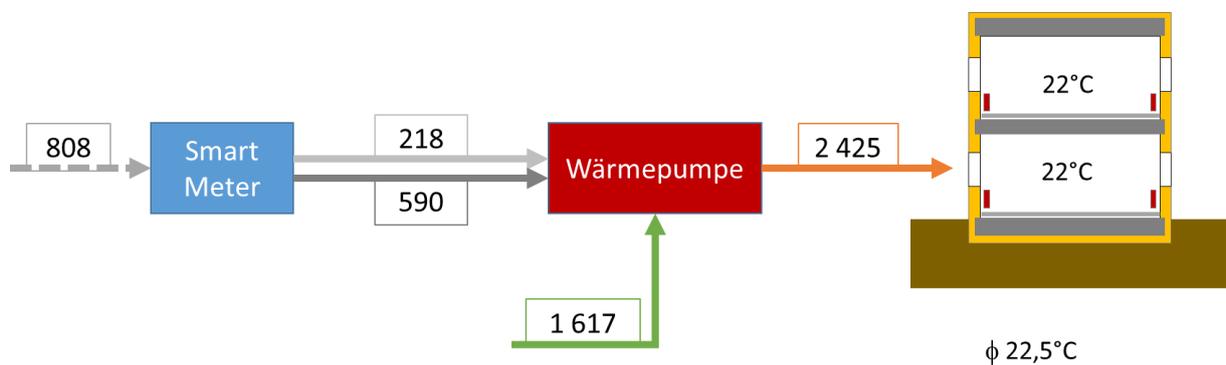


Abbildung 4-9 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C

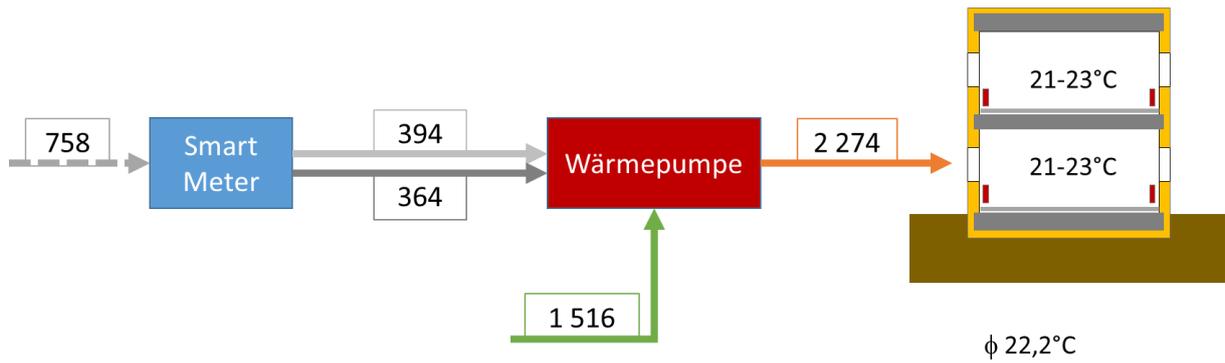


Abbildung 4-10 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit Radiatoren und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C

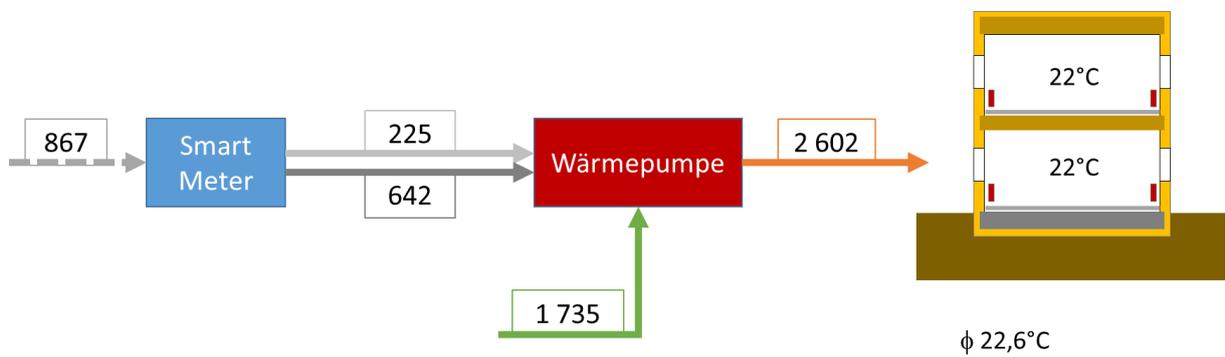


Abbildung 4-11 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C

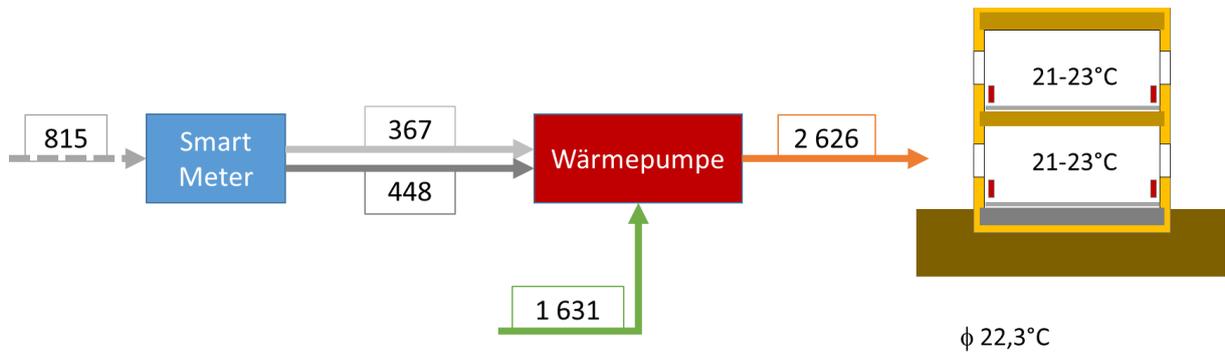


Abbildung 4-12 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C

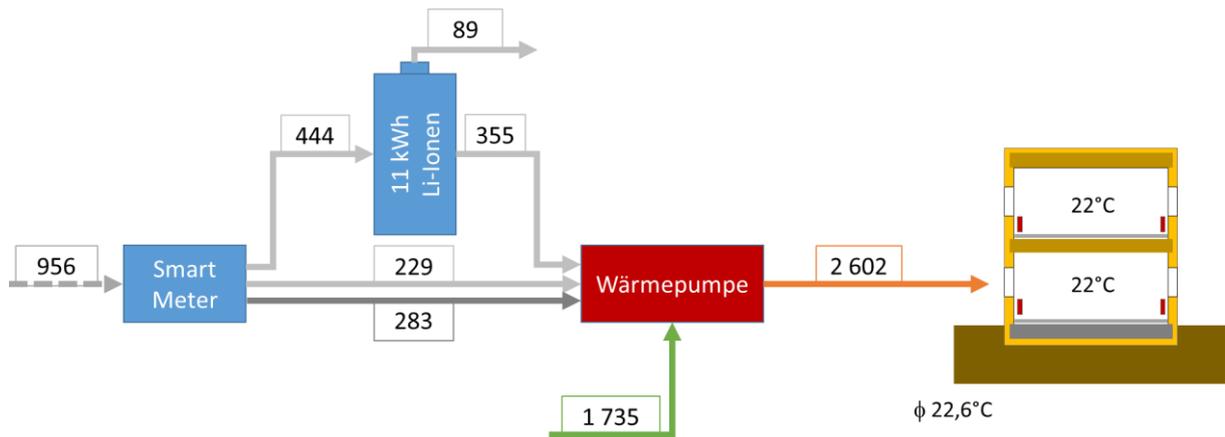


Abbildung 4-13 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 11 kWh Li-Ionen-Batterie

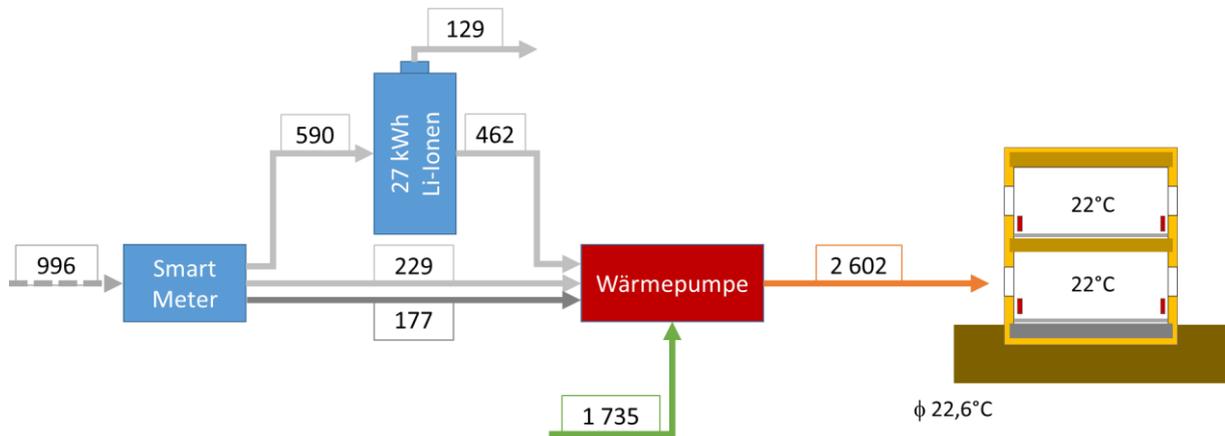


Abbildung 4-14 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 27 kWh Li-Ionen-Batterie

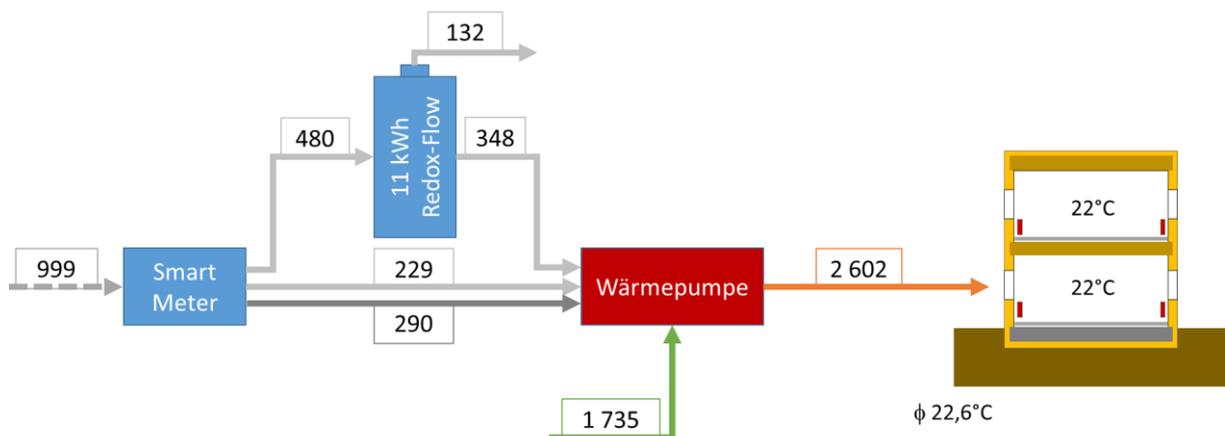


Abbildung 4-15 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 11 kWh Redox-Flow-Batterie

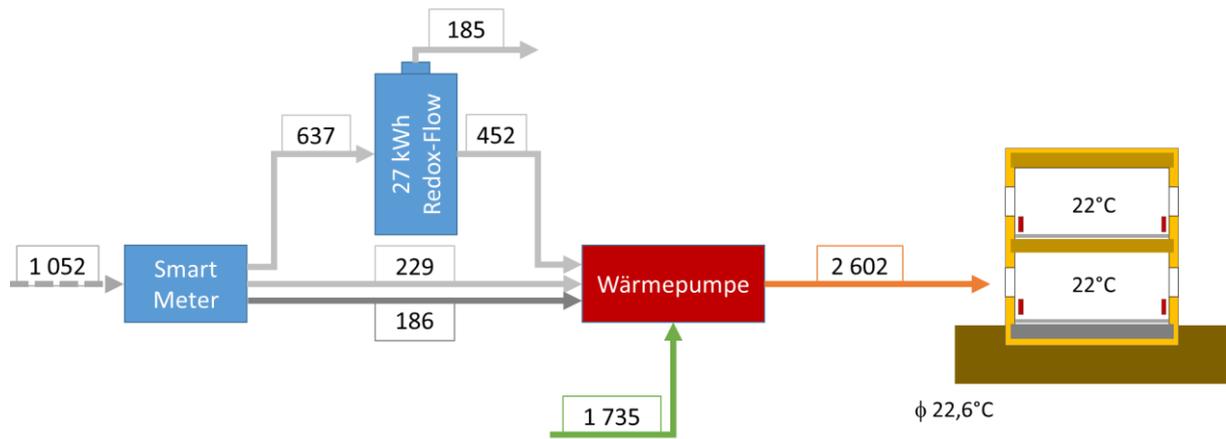


Abbildung 4-16 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 27 kWh Redox-Flow-Batterie

### 4.3.3 Energieflussbilder MFH

Im Folgenden sind Energieflussbilder der zehn verschiedenen Varianten mit dem Gebäudetyp MFH ersichtlich.

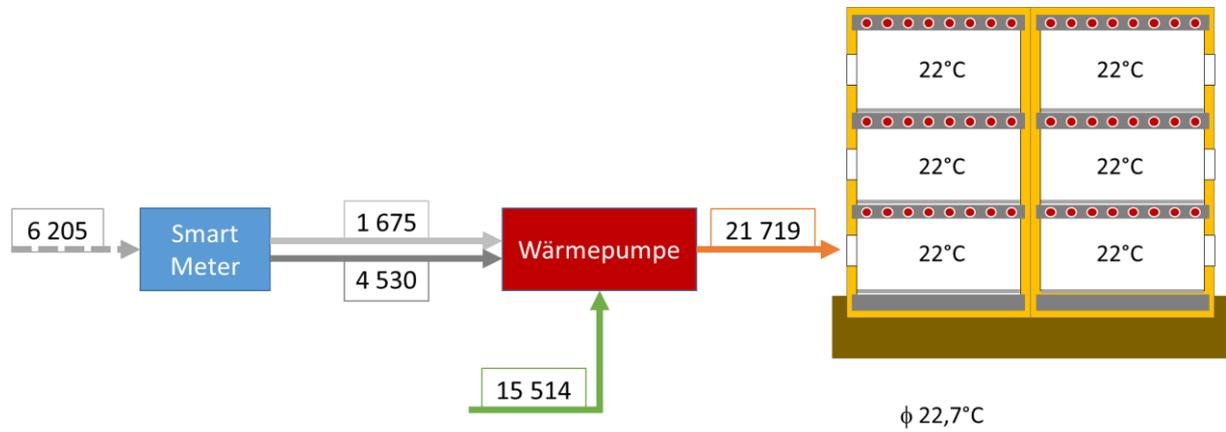


Abbildung 4-17 Energieflussbild MFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C

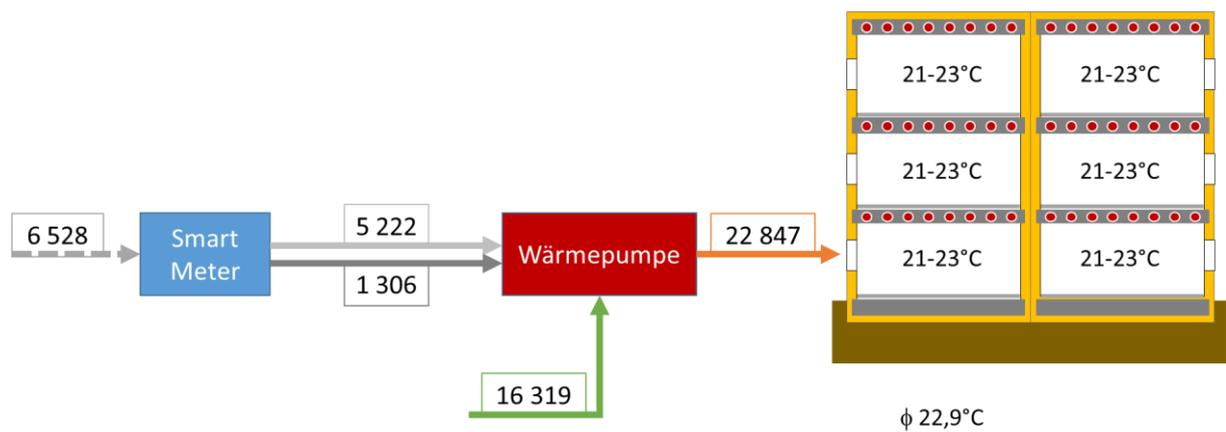


Abbildung 4-18 Energieflussbild MFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C

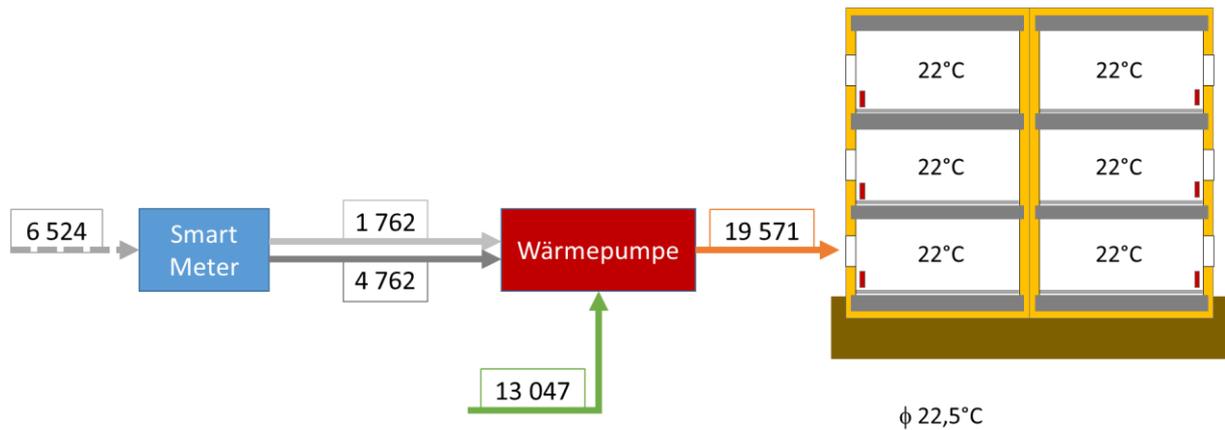


Abbildung 4-19 Energieflussbild MFH in Hybrid-Bauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C

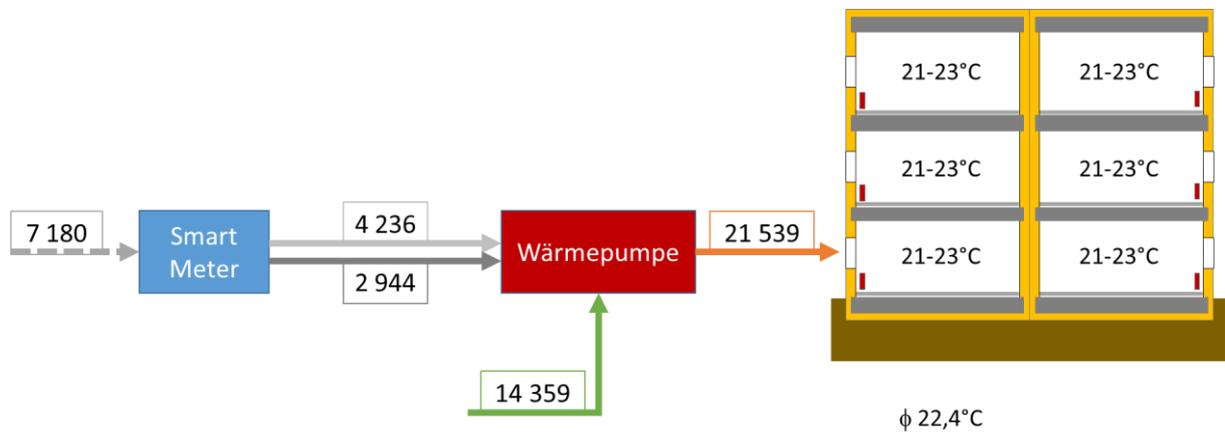


Abbildung 4-20 Energieflussbild MFH in Hybrid-Bauweise mit Radiatoren und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C

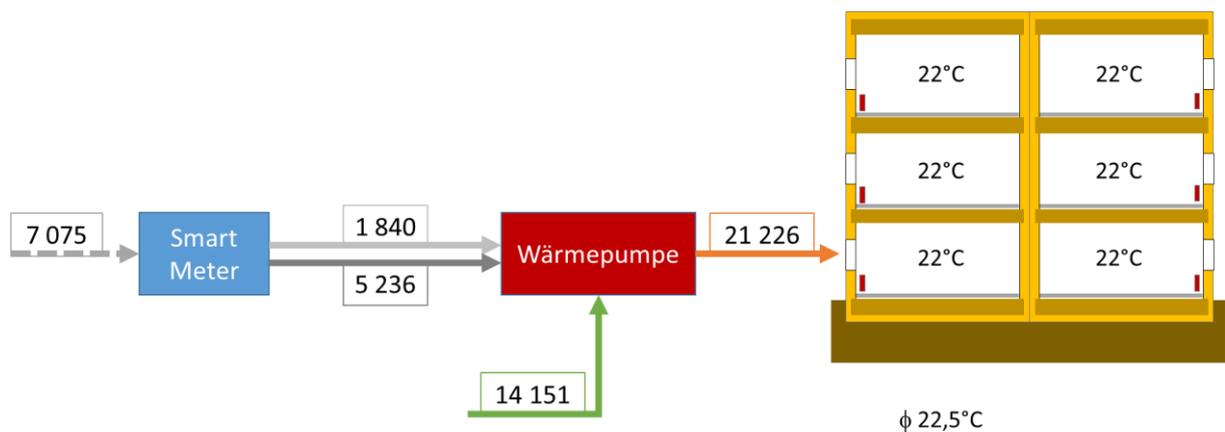


Abbildung 4-21 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C

Abbildung 4-22 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C

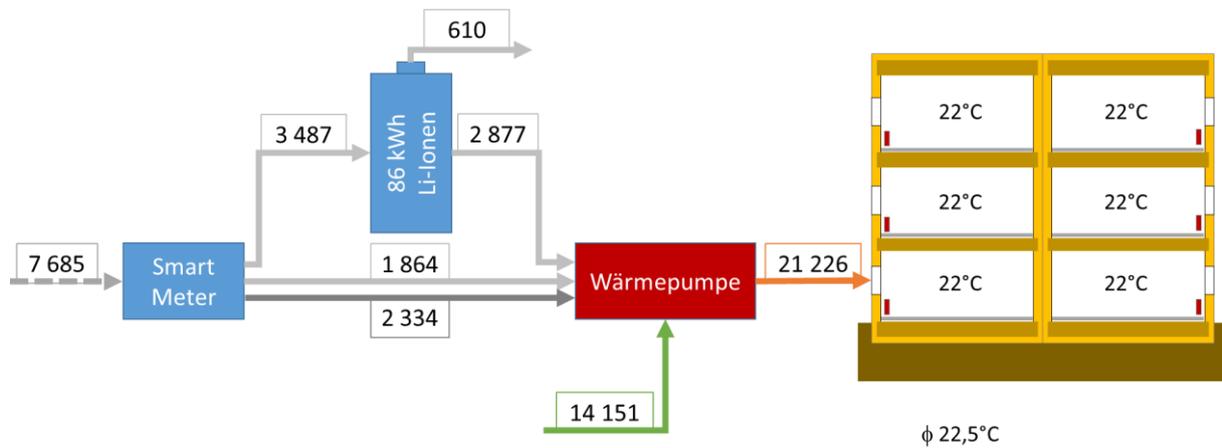


Abbildung 4-23 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 86 kWh Li-Ionen-Batterie

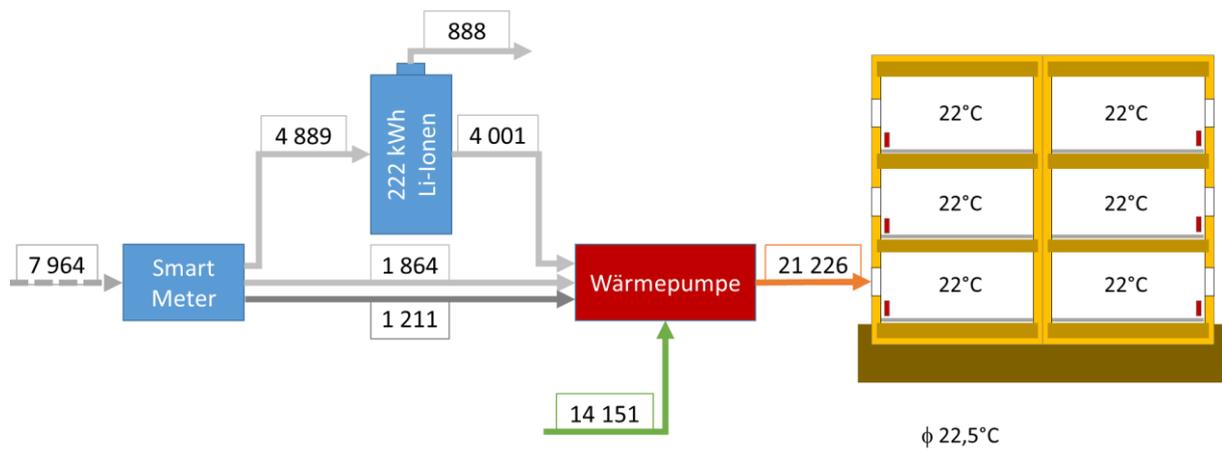


Abbildung 4-24 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 222 kWh Li-Ionen-Batterie

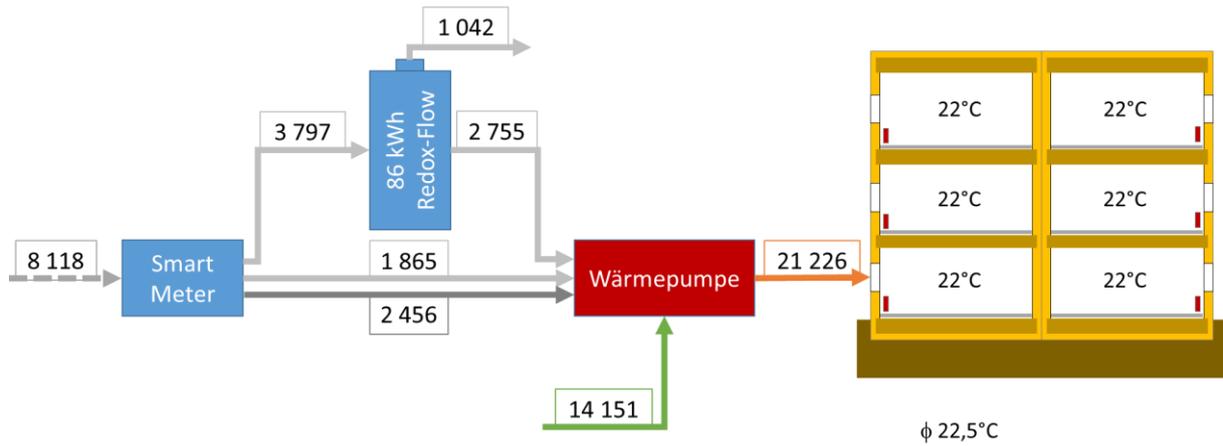


Abbildung 4-25 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 86 kWh Redox-Flow-Batterie

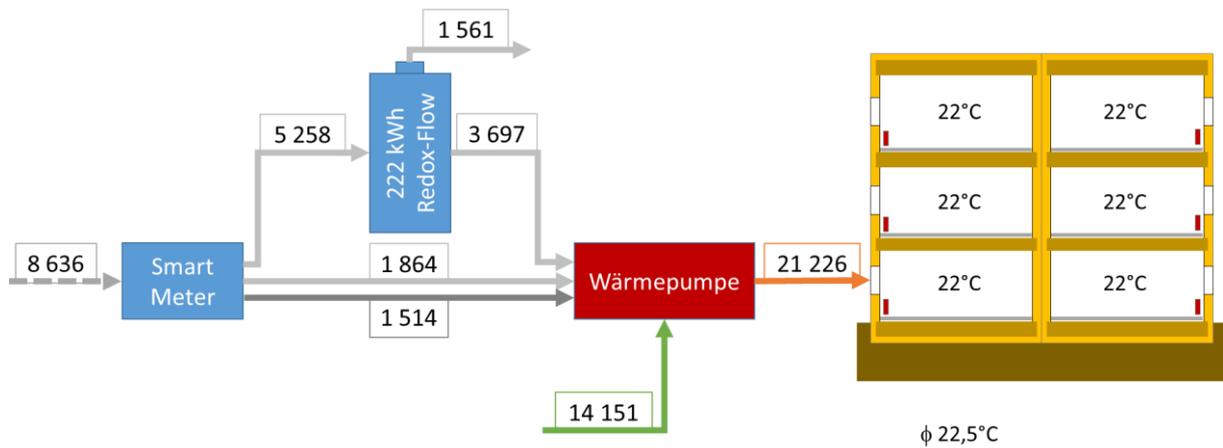


Abbildung 4-26 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 222 kWh Redox-Flow-Batterie

## 5 Ökologischer Rucksack thermischer Energiespeicherung in Beton

In den folgenden Kapiteln wird der ökologische Rucksack der thermischen Energiespeicherung in Beton erörtert.

Für das gegenständlich verwendete Referenzgebäude hat sich bereits die Ausführung der Geschoßdecke und des Flachdachs aus 20 cm Stahlbetonplatten als ausreichende Speichermasseneinbringung ergeben. Es ist daher in Frage zu stellen, ob diese Masseinbringung überhaupt als ökologischer Rucksack zu bewerten ist, da sie ja die Alternativkonstruktion der Holzbalkendecke ersetzt.

Die Fragestellung der vergleichenden Ökobilanz der Stahlbetonplatte und der Holzbalkendecke führt zur gegenwärtig noch ungelösten Frage, ob im GWP von Holz das im Holzwachstum gebundene CO<sub>2</sub> als negativer Summand angesetzt werden darf oder nicht.

Angesichts des Umfangs des folgenden Kapitels werden jene Ergebnisse, die direkt für den Vergleich der „ökologischen Rucksäcke“ verwendet werden, in einer vorangestellten Zusammenfassung, Kapitel Zusammenfassung 5.1, dokumentiert. Die weiteren Kapitel 5.2 bis 5.4 enthalten die Herleitungen dieser Ergebnisse sowie weiterführende Informationen.

### 5.1 Zusammenfassung

Die folgenden Ergebnisse gelten für die konservative Annahme, dass die Herstellaufwendungen des Betons für die Trenndecken und Oberste Geschoßdecke tatsächlich der thermischen Speicherung angelastet werden.

Bei der Ableitung von Kennzahlen der ökologischen Belastung thermischer Speicherung im Beton besteht die grundsätzliche Herausforderung, dass die Betriebsweise des Speichers maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis hat: Es ist entscheidend, wie oft in seiner Lebensdauer der Speicher genutzt wird. Im Fall des thermischen Speichers Beton ist auch noch relevant, mit welcher Intensität der Beton genutzt wird, also mit welchem Temperaturhub der Speicher beaufschlagt wird.

Für die gegenständlichen Anwendungen kann festgehalten werden:

Zur thermischen Kapazität der thermischen Speicherung:

- Bereits die Speicherwirkung der aktivierten Betondecken (Trenndecken und oberste Geschoßdecke) reicht aus, um eine dreitägige Heizunterbrechung sicherzustellen. Bei 20 cm Stärke der Betonplatten entspricht das einer eingebrachten Masse von 460 kg<sub>Beton</sub>/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>.
- Im EFH ist für diese Überbrückung einer Heizunterbrechung in ungünstigen Winterbedingungen eine thermische Speicherkapazität von 80 kWh oder 417 Wh/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> erforderlich, im MFH eine von 666 kWh oder 227 Wh/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>.
- Demnach wird der thermische Speicher Beton im EFH mit einer Kapazität von 0,91 Wh/kg<sub>Beton</sub> ausgenutzt, jener im MFH mit 0,49 Wh/kg<sub>Beton</sub>. Das entspricht einem maximalen Temperaturhub des gesamten Speichers von 3,3 K im EFH und von 1,8 K im MFH.

Zur ökologischen Relevanz der Speicherproduktion:

- Für die beiden Basisindikatoren der ökologischen Belastung aus der Betonproduktion werden aus der Fachliteratur die folgenden Werte abgeleitet. (Im Detail siehe Kapitel 5.2.): PEB = 1.039 kWh/m<sup>3</sup>, CO<sub>2</sub> = 223 kg/m<sup>3</sup>. Die Herstellung des Betons für die 20 cm starken Rohbetondecken verursacht in beiden Haustypen demnach einen Primärenergiebedarf von 2,1 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> und CO<sub>2</sub>-Emissionen von 0,45 kg/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>.

- Aus den thermischen Gebäudesimulationen ergibt sich die vom Beton tatsächlich jährlich gespeicherte und wieder abgegebene Wärmemenge, nämlich als jene Nutzwärme für Heizen, die bei energieflexiblem Betrieb mit BTA in der hybriden Bauweise zusätzlich aus erneuerbarem Überschussstrom gedeckt werden kann, verglichen mit derselben Bauweise bei ebenfalls Beheizung mit BTA, aber bei starrem Temperatur-Sollwert. Im EFH ergibt sich diese aus dem Speicher abgegebene Nutzwärme zu 1.259 kWh/a oder 6,6 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGFa</sub> und im MFH zu 13.258 kWh/a oder 4,5 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGFa</sub>. Das entspricht im EFH ca. 16 und im MFH ca. 20 vollständigen Ladezyklen des thermischen Speichers.
- Unter der Annahme einer 100-jährigen Nutzungsdauer ergibt sich somit eine ökologische Belastung der aus dem Speicher gelieferten Nutzwärmeeinheit: Im EFH belastet die Errichtung des thermischen Speichers aus Beton demnach jede im Lebenszyklus aus diesem Speicher gelieferte kWh mit einem PEB von 0,32 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>Nutzwärme</sub> und einer CO<sub>2</sub>-Emission von 68 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh<sub>Nutzwärme</sub> sowie im MFH mit einem PEB von 0,46 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>Nutzwärme</sub> und einer CO<sub>2</sub>-Emission von 99 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh<sub>Nutzwärme</sub>.

## 5.2 Ökologische Wirkungen – Basisindikatoren

Um größtmögliche Klarheit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, wird in der vorliegenden Studie die Betrachtung des ökologischen Rucksacks wie folgt vorgenommen:

- > Als wesentliche Quelle der ökologischen Kennzahlen werden in der gegenständlichen Studie die Umweltproduktdeklarationen für Beton des InformationsZentrums Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014 herangezogen, zitiert aus den Erläuterungen von Alice Becke, Jochen Reiners und Ceyda Sülün.<sup>26</sup>
- > Als Referenzmaterial wird die Betonqualität C20 herangezogen, ohne Bewehrungsstahl.
- > Für die beiden Basisindikatoren Global Warming Potential (GWP) und Primärenergiebedarf (PEB) werden die ökologischen Wirkungen ausschließlich der Betonherstellung (Module A1 – A3 nach EN 15804, also „Cradle to Gate“) berücksichtigt, da diese Bilanzgrenze auch in der weitaus überwiegenden Zahl der Studien zum ökologischen Rucksack der Batterieproduktion angewandt wird.
- > Für die weiterführenden Indikatoren werden auch darüber hinausgehende Module berücksichtigt. Auf die angewandten Bilanzgrenzen wird an der jeweiligen Stelle der gegenständlichen Studie stets eindeutig hingewiesen.
- > In den vergleichenden Bilanzen der Energieflexibilität mit Batteriespeichern und mit thermischer Speicherung in Beton wird der ökologische Rucksack der Betonherstellung stets vollständig ausgewiesen, mit stets dem Hinweis darauf, dass diesen Belastungen die Belastungen durch Ersatzkonstruktionen allenfalls entgegensetzen wären.

Im ersten Teil der Analyse werden als Basisindikatoren die beiden grundlegenden Charakterisierungsfaktoren Primärenergiebedarf und Treibhausgaspotenzial ermittelt. Wie auch später im Kapitel 6 für die Batterien, werden zunächst für den Beton die Kennzahlen der Umweltwirkungen bezogen auf die wirksame Wärmespeicherkapazität und auf die „delivered energy“ herausgearbeitet.

Als Basisdaten herangezogen werden, in der folgenden

---

<sup>26</sup> Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, InformationsZentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014

Tabelle 5-1 dokumentiert, die Umweltwirkungen aus den Umweltproduktdeklarationen für Beton der InformationsZentrum Beton GmbH.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014

**Tabelle 5-1 Umwelteinwirkungen Basisindikatoren für 1 m<sup>3</sup> Beton C20 <sup>28</sup>**

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1–B5 <sup>3)</sup>	C1 – C3 <sup>3)</sup>	D <sup>3)</sup>
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	223 <sup>1)</sup>	4	1	0 <sup>2)</sup>	5	-23 <sup>2)</sup>
Primärenergie erneuerbar (PE <sub>em</sub> )	MJ	81	2	0,4	0	3	-47
Primärenergie nicht erneuerbar (PE <sub>nem</sub> )	MJ	958	54	19	0	68	-319
<sup>1)</sup> Zahlenwert enthält einen Anteil CO <sub>2</sub> -Äq. aus der Verbrennung von Abfällen bei der Herstellung von Zementklinker. Weitere Hinweise siehe Fußnoten in den Anhängen. <sup>2)</sup> Ein mögliches negatives Treibhauspotenzial aus der Carbonatisierung des Betons ist hier nicht erfasst. <sup>3)</sup> Die Umweltwirkungen in den Modulen sind unabhängig von der Betondruckfestigkeitsklasse.							

Als Rechenwerte werden jene für die cradle-to-gate Bilanz, also Module A1 – A3 herangezogen.

- > Primärenergiebedarf erneuerbar + nicht erneuerbar:  $PEB = (81 + 958) = 1.039 \text{ MJ}_{PE}/\text{m}^3_{\text{Beton}}$
- > Treibhausgaspotenzial:  $GWP = 223 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{äqu}}/\text{m}^3_{\text{Beton}}$

Mit einem spezifischen Gewicht von 2.300 kg/m<sup>3</sup> ergeben sich diese Werte massebezogen zu

- > Primärenergiebedarf erneuerbar + nicht erneuerbar:  $PEB = 0,452 \text{ MJ}_{PE}/\text{kg}_{\text{Beton}}$
- > Treibhausgaspotenzial:  $GWP = 0,097 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{äqu}}/\text{kg}_{\text{Beton}}$

Betreffend die Bewertung der Batteriespeicher werden die ökologischen Wirkungen auf die Energiespeicherkapazität bezogen gebildet und im folgenden Kapitel 6 dargestellt. Dieser Bezug kann für die Wärmespeicherung nur bedingt angewandt werden, weil die Speicherkapazität des Betons erheblich mit der Art seiner Bewirtschaftung variiert. Für den gegenständlichen Fall der Bewirtschaftung mittels Bauteilaktivierung und energieflexibler Betriebsweise wird in Kapitel 3.9.2 die massebezogene genutzte Wärmespeicherkapazität von Beton hergeleitet:

- > für das EFH zu 0,91 Wh<sub>th</sub>/kg
- > für das MFH zu 0,49 Wh<sub>th</sub>/kg

Es ergeben sich somit die folgenden ökologischen Wirkungen ausgedrückt durch den Charakterisierungsfaktor Primärenergiebedarf bezogen auf die genutzte Wärmespeicherkapazität:

- > PEB für das EFH  
**PEB = 139 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>capacity</sub>**
- > PEB für das MFH  
**PEB = 254 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>capacity</sub>**

Weiters ergeben sich die folgenden ökologischen Wirkungen ausgedrückt durch den Charakterisierungsfaktor Treibhausgaspotenzial bezogen auf die genutzte Wärmespeicherkapazität:

- > CO<sub>2</sub> für das EFH  
**CO<sub>2</sub> = 107 kg<sub>CO2äqu</sub>/ kWh<sub>capacity</sub>**
- > CO<sub>2</sub> für das MFH  
**CO<sub>2</sub> = 196 kg<sub>CO2äqu</sub>/ kWh<sub>capacity</sub>**

<sup>28</sup> Alice Becke, Jochen Reiners, Ceyda Sülün, Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014

### 5.3 Ökologische Wirkungen – Weiterführende Indikatoren

Auf Basis der Module A-C der Umweltproduktdeklaration (Abkürzung EPD) von Beton werden weitere ökologisch relevante Wirkungen der Betonerzeugung dargestellt.<sup>29</sup> Die Module A1-A3 umfassen das Produktionsstadium, von der Rohstoffbereitstellung (A1), dem Transport ins Werk (A2) bis zur Herstellung im Werk (A3). Die Module A4-A5 umfassen die Errichtungsphase, Transport des Betons zur Baustelle (A4) und den Einbau von Transportbeton und Fertigteilen auf der Baustelle (A5). Die Module B1-B5 umfassen die Nutzungsphase und verursachen bei Bauteilen aus Beton in der Regel keine Umweltlasten. Die Module C1-C4 behandeln die Entsorgungsphase, wobei der Rückbau (C1), Transport von Betonabbruch (C2) und die Deponierung (C4) detailliert behandelt werden. Das Modul C3 bietet die Möglichkeit, Betonrecycling abzubilden.

Die größten Umweltwirkungen im Lebenszyklus von Beton fallen in den Modulen A1-A3 an, wobei deren überwiegender Teil wiederum auf die Zementherstellung zurückgeht. Dabei wirken sich insbesondere das Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP), das Eutrophierungspotenzial (EP) sowie das Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADP<sub>el</sub>) beschleunigend auf Biodiversitätsverluste aus.<sup>30</sup>

Für in Deutschland produzierten Beton liegen detaillierte Daten vor. In der folgenden

---

<sup>29</sup> Alice Becke, Jochen Reiners, Ceyda Sülün, Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014

<sup>30</sup> Das ADP<sub>el</sub> bezieht sich grundsätzlich auf die Extraktion von seltenen nicht fossilen Rohstoffen. Die Ausgangsstoffe von Beton können nicht vollständig in dieser Klassifizierung abgebildet werden, obwohl deren Gewinnung teils massive Eingriffe mit sich bringt.

Tabelle 5-2 werden Umwelteinwirkungen weiterführende Indikatoren für 1 m<sup>3</sup> für einen rechnerisch ermittelten Durchschnittsbeton anhand von neun Charakterisierungsfaktoren dargestellt.<sup>31</sup>

---

<sup>31</sup> Ein auf den Ökobilanzen der unterschiedlichen Druckfestigkeitsklassen nach Produktionsvolumen in Deutschland gewichteter Referenzbeton. Dieser stellt kein EPD verifiziertes Produkt dar.

Tabelle 5-2: Umwelteinwirkungen weiterführende Indikatoren für 1 m<sup>3</sup> „Durchschnittsbeton“ <sup>32</sup>

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1-B5 <sup>3)</sup>	C1 – C3 <sup>3)</sup>	D <sup>3)</sup>
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	223 <sup>1)</sup>	4	1	0 <sup>2)</sup>	5	-23 <sup>2)</sup>
Abbau Potenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	kg CFC11-Äq.	7,2E-7	2,1E-10	3,1E-9	0	1,0E-10	-9,6E-8
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	kg SO <sub>2</sub> -Äq.	0,3	0,01	0,009	0	0,05	-0,04
Eutrophierungspotenzial (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> -Äq.	0,05	0,003	0,002	0	0,01	-0,006
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	kg Ethen-Äq.	0,04	1,6E-3	6,5E-4	0	6,1E-3	-4,1E-3
Potenzial f. d. abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADP <sub>a</sub> )	kg Sb-Äq.	4,0E-4	1,8E-7	5,2E-8	0	2,2E-7	-1,9E-6
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADP <sub>fossil</sub> )	MJ	822	54	18	0	68	-243
Primärenergie erneuerbar (PE <sub>erm</sub> )	MJ	81	2	0,4	0	3	-47
Primärenergie nicht erneuerbar (PE <sub>nerm</sub> )	MJ	958	54	19	0	68	-319
<sup>1)</sup> Zahlenwert enthält einen Anteil CO <sub>2</sub> -Äq. aus der Verbrennung von Abfällen bei der Herstellung von Zementklinker. Weitere Hinweise siehe Fußnoten in den Anhängen. <sup>2)</sup> Ein mögliches negatives Treibhauspotenzial aus der Carbonatisierung des Betons ist hier nicht erfasst. <sup>3)</sup> Die Umwelteinwirkungen in den Modulen sind unabhängig von der Betondruckfestigkeitsklasse.							

In den Modulen A1-A3 fallen mit Abstand die gewichtigsten Anteile der Umweltwirkungen an. Für diese Module wird das Versauerungspotenzial von Boden und Wasser mit 0,3 kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Kubikmeter Beton angegeben. Das Eutrophierungspotenzial liegt bei 0,05 kg (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>-Äquivalent und das Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen wird mit 0,0004 kg Sb-Äquivalent angegeben.

Im Folgenden werden die Module A1 bis A5 genauer betrachtet.

<sup>32</sup> Alice Becke, Jochen Reiners, Ceyda Sülün, Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014

### 5.3.1 Förderung und Produktion der Betonausgangsstoffe (Modul A1)

Tabelle 5-3 zeigt die durchschnittliche Zusammensetzung von Beton nach seinen primären Ausgangsstoffen. Der Anteil der Förderung dieser primären Betonausgangsstoffe an der gesamten Förderung von mineralischen Rohstoffen in Österreich ist hoch. Österreichweit wurden 2015 etwa 77 Mio. t mineralische Rohstoffe (exklusive Erdöl und Naturgas) gefördert. Davon entfallen gesamt etwa 34% auf Lockergesteine<sup>33</sup>, den massenmäßig größten Primärrohstoffanteilen von Beton.

Tabelle 5-3: Durchschnittliche Zusammensetzung von Beton (gewichtetes Mittel aus Transportbeton und Betonfertigteilen für Deutschland) [Angaben in kg/m<sup>3</sup> Beton] <sup>34</sup>

	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
Zement	260	290	320	356	385	405
Flugasche	4	60	78	47	57	25
Gesteinskörnung	1.880	1.820	1.790	1.808	1.813	1.852
davon Kies	836	810	795	796	777	824
davon Sand	649	628	621	635	668	652
davon Splitt	376	364	358	362	363	371
davon rezyklierte GK	19	18	16	15	5	5
Wasser	170	176	170	165	157	141
Betonzusatzmittel	1,3	1,2	1,3	1,8	3,0	4,6

Die Produktion von Zement verursacht den Großteil der Umweltwirkungen von Beton. Die in Steinbrüchen gewonnenen Ausgangsstoffe, wie etwa Ton und Kalkmergel, müssen in Ofenanlagen bei Temperaturen bis 1.400°C zu Zementklinker gebrannt werden, bevor sie anschließend vermahlen werden. Der Energieaufwand für diesen Produktionsschritt ist hoch und zudem fallen beim Brennvor-gang stofflich- und prozessbedingt CO<sub>2</sub> Emissionen an. Im Jahr 2016 wurden österreichweit 3,3 Mio. t Zementklinker und 4,78 Mio. t Zement produziert.<sup>35</sup> Die daraus resultierenden CO<sub>2</sub> Emissionen belau-fen sich auf 2,59 Mio. t.<sup>36</sup>

<sup>33</sup> Österreichisches Montan-Handbuch, Bergbau Rohstoffe Grundstoffe Energie, Bundesministerium für Wis-senschaft, Forschung und Wirtschaft (Hrsg.) 2016

<sup>34</sup> Alice Becke, Jochen Reiners, Ceyda Sülün, Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014

<sup>35</sup> Nachhaltigkeitsbericht 2016 der österreichischen Zementindustrie, Vereinigung der Österreichischen Ze-mentindustrie (VÖZ) (Hrsg.) 2017

<sup>36</sup> Gerd Mausnitz, Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2016, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften Technische Universität Wien, 2017, S.19

Über den Bedarf an primären Rohstoffen für die Produktion von Zement liegen detaillierte Daten vor. So wurden im Jahr 2016 4,4 Mio t Calcium-Träger (Kalkstein, Mergel etc.), ca. 237.000 t Silizium-Aluminium-Träger (Lehm, Ton, Kaolin, Bauxit, etc.), ca. 66.000 t Silizium-Träger (Quarzsand, etc.), 21.000 t Eisen-Träger (Eisenerz, etc.) und 101 t sonstige Rohstoffe (Flussmittel, etc.) an primären Rohstoffen eingesetzt.<sup>37</sup> Insgesamt beläuft sich die Einsatzmenge an primären Rohstoffen auf 4.763.073 t, was einem Anteil von etwa 6% der gesamten mineralischen Rohstoffproduktion (exklusive Erdöl und Naturgas) entspricht. Zusammen mit der Gewinnung von Lockergesteinen ergibt dies für Betonausgangsstoffe einen Anteil von ca. 40% an der Gesamtfördermenge mineralischer Rohstoffe (exklusive Erdöl und Naturgas) in Österreich.<sup>38,39</sup>

### 5.3.2 Transport der Rohstoffe zum Betonwerk (Modul A2)

Das Ausmaß der Transportwege der Betonbestandteile ist sehr unterschiedlich. Der massenmäßig größte Anteil, Gesteinskörnungen, wird vorwiegend lokal produziert, beziehungsweise siedeln sich Betonwerke meist in der Nähe von Rohstoffstätten an. Für Deutschland vorliegende Daten weisen einen Transportweg zwischen 30 und 60 km bis zum verarbeitenden Werk aus.<sup>40</sup> Dieselbe Quelle gibt eine durchschnittliche Transportdistanz für Zement zum Werk von ca. 180 km und für Flugasche und Betonzusatzmittel von ca. 100 km bis zum Betonwerk an. Das benötigte Anmachwasser wird fast ausschließlich aus den lokalen Leitungsnetzen bezogen, daher werden hierfür keine Transportwege angegeben.

Für Österreich liegen aggregierte Daten von Input-Strömen, welche alle für die Herstellung von Beton notwendigen Einsatzstoffe umfassen, und Output-Strömen, alle daraus erzeugten Produkte, der Massivbaustoffherstellung vor. Diese ermöglichen keine differenzierte Analyse der einzelnen Ausgangsstoffe bilden jedoch eine gute Grundlage zur detaillierten Betrachtung des Transportaufkommens. Die durchschnittlichen Radien der Inputströme für die Beton- und Fertigteilherstellung werden mit 49 km und für Transportbetonherstellung mit 46 km angegeben.<sup>41</sup>

### 5.3.3 Betonherstellung (Modul A3)

Die Herstellung von Frischbeton erfolgt im Betonwerk durch Mischen der Ausgangsstoffe. Hierbei werden durch den werksinternen Transport durch Radlader und andere Transportmittel fossile Treibstoffe und elektrischer Strom verbraucht. Die hierfür anfallenden Umweltlasten werden im Vergleich zu den Modulen A1 und A2 gering bewertet. Der größte Anteil der Umweltlasten des Moduls A3 wird dem Verbrauch von Strom und Gas im Betonwerk, zugeschrieben. Der daraus resultierende Teil trägt aber nur 6,9% des gesamten Verbrauchs von nicht erneuerbarer Primärenergie ( $PE_{\text{nerm}}$ ). Interne

---

<sup>37</sup> Gerd Mauschwitz, Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2016, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften Technische Universität Wien, 2017, S.19

<sup>38</sup> Österreichisches Montan-Handbuch, Bergbau Rohstoffe Grundstoffe Energie, Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (Hrsg) 2016

<sup>39</sup> Nachhaltigkeitsbericht 2016 der österreichischen Zementindustrie, Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ) (Hrsg.) 2017

<sup>40</sup> Alice Becke, Jochen Reiners, Ceyda Sülün, Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014, S.14

<sup>41</sup> Österreichische Massivbaustoffherstellung Impulsgeber für Regionen, Analyse sozial- und regionalwirtschaftlicher Effekte österreichischer Werksstandorte, Wolfgang E. Baaske, Forschungsverein Steine-Keramik des Fachverbands der Stein- und keramischen Industrie.2016, s.44

Transporte im Betonwerk tragen mit 4,9% zum Eutrophierungspotenzial (EP) bei, was den zweitgrößten Anteil dieses Moduls am jeweiligen Gesamtpotential darstellt.<sup>42</sup>

#### 5.3.4 Transport des Betons zur Einbaustelle (Modul A4)

Die Transportwege für Beton müssen differenziert betrachtet werden. Beim Einsatz von Transportbeton fallen die Wege vom Betonwerk bis zum Ort des Einbaus aufgrund der Verarbeitungszeit von Frischbeton von 90 Minuten gering aus. Die aus Daten für Deutschland hervorgehende, durchschnittliche Distanz liegt hier bei ca. 17 km. Für Betonfertigteile, welche über längere Distanzen bis zur Einbaustelle transportiert werden, wird eine durchschnittliche Transportentfernung von cirka 180 km angegeben.<sup>43</sup>

Die für Österreich vorliegenden Daten weisen Output-Transportlängen für die Betonherstellung beziehungsweise die Betonfertigteilherstellung von 132 km sowie für die Transportbetonherstellung von 17 km aus.<sup>44</sup>

#### 5.3.5 Einbau des Betons (Modul A5)

Transportbeton wird mittels Betonpumpen oder Betonkübel mithilfe von Kränen auf der Baustelle in die Schalung eingebracht, nachverdichtet und nach dem Erhärten ausgeschalt. Fertigbetonteile hingegen werden mittels Auto- oder Turmdrehkran auf die Baustelle gehoben und dort montiert. Das Schalen und Nachverdichten des Betons wird deshalb auch bereits bei der Herstellung im Werk bilanziert.

Der größte Anteil der Umweltwirkungen dieses Moduls entfällt auf den abiotischen Abbau von fossilen Brennstoffen ( $ADP_{foss}$ ), dieser ist mit 7% jedoch gering.<sup>45,46</sup>

---

<sup>42</sup> Alice Becke, Jochen Reiners, Ceyda Sülün, Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014, S.18

<sup>43</sup> Alice Becke, Jochen Reiners, Ceyda Sülün, Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014, S.15

<sup>44</sup> Österreichische Massivbaustoffherstellung Impulsgeber für Regionen, Analyse sozial- und regionalwirtschaftlicher Effekte österreichischer Werksstandorte, Wolfgang E. Baaske, Forschungsverein Steine-Keramik des Fachverbands der Stein- und keramischen Industrie.2016, s.44

<sup>45</sup> In der EPD wird der Anteil an abiotischem Abbau fossiler Brennstoffe für Beton c20/25 für beide Model A4 und A5 gesamt angegeben, daraus ergibt sich eine Unschärfe die einen noch geringeren Anteil des Moduls A5 zur Folge hat.

<sup>46</sup> Alice Becke, Jochen Reiners, Ceyda Sülün, Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, Informations Zentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014, S.17

## 5.4 Ökologische Wirkungen – Biodiversitätsverluste

Ausgehend vom methodischen Ansatz der IUCN - CMP Unified Classification of Direct Threats zur Beschreibung von Ursache-Wirkungsbeziehungen von Biodiversitätsverlusten wurde im Rahmen einer zeitgleich laufenden Studie eine Normierung für Österreich als lokales Teilsystem der global angelegten IUCN - CMP Klassifikation durchgeführt.<sup>47</sup> Es ist vorab anzumerken, dass für die Hauptproduktionsländer, in denen die Gewinnung von für Batteriespeicher relevanten Ausgangsstoffen wie Lithium und Vanadium erfolgt, aktuell keine derartige Normierung vorliegt. Ein entsprechender Vergleich zwischen dem Massespeicher Beton und den elektrochemischen Batteriespeichern nach dieser Methode kann in Kapitel 7 daher nicht vorgelegt werden.

Für die Bewertung der Auswirkungen auf die Biodiversität werden in der vorliegenden Studie ausschließlich die Module A1-A3 analysiert. Die nachfolgende Tabelle 5-4 gibt Aufschluss über den Einflussbereich dieser Module in Bezug auf die jeweilige Kategorie der IUCN CMP Unified Classification of Direct Threats.

**Tabelle 5-4 Einflussbereich der Betonerzeugung auf Kategorien der IUCN CMP Klassifikation**

IUCN CMP Kategorie	EPD Module		
	A1	A2	A3
Landwirtschaft und Aquakultur			
Nutzung biogener Ressourcen			
Wohn- und Gewerbebebauung	X		X
Modifikation von Ökosystemen	X		X
Invasive oder in anderer Weise problembehaftete Spezies, Gene oder Krankheiten			
Klimawandel und Extremwetterereignisse			
Menschliches Eindringen und Zerstörung			
Energieproduktion und Bergbau	X		X
Umweltverschmutzung	X		
Transport- und Servicekorridore		X	
Geologische Ereignisse			
Andere Bedrohungen			

Ausgehend von den in der IUCN - CMP Unified Classification of Direct Threats global angesetzten Werte für die einzelnen IUCN CMP Kategorien werden die aus den EPD-Modulen ermittelten Umweltwirkungen auf das Teilsystems Österreich normiert. Alle Kalkulationen beziehen sich dabei auf die Masse von 1 m<sup>3</sup> Beton mit durchschnittlicher Zusammensetzung und eine rechnerische Jahresproduktion von Beton von 14,25 Mio m<sup>3</sup> in Österreich.

Die Jahresproduktionsmenge von Beton wurde auf Basis der Abbaumengen primärer Rohstoffe, welche jährlich vom Bundesministerium für Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstand-

<sup>47</sup> Renate Hammer, Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Einführung der Wirkungskategorien Biodiversitätsverlust in die Ökobilanzierung, Institute of Building Research & Innovation, 2018

ort erhoben werden, und deren mittleren Massenanteilen aus Zement sowie aus Gesteinskörnung errechnet. Das Ergebnis wurde durch den Vergleich der Jahresproduktionsmenge von Zement<sup>48</sup> und dessen mittleren Massenanteil auf Plausibilität geprüft.

#### 5.4.1 Wohn- und Gewerbebebauung

Die Produktionsstätten von Betonausgangstoffen und die Betonwerke sind Teil dieser Kategorie und haben Anteil am Gesamtausmaß des Gebäudebestands und der verbauten Fläche. In ganz Österreich sind derzeit 12 Zementwerke und 372 Betonwerke in Betrieb. Rechnerisch ergibt dies einen Flächenverbrauch von etwa 3,9 Mio. m<sup>2</sup>. Normiert auf die gesamte Flächeninanspruchnahme von Lager- und Industriearealen von 139,5 Mio.m<sup>2</sup> und 19,16% der IUCN CMP Unified Classification „Wohn- und Gewerbebebauung“ entfallen auf 1 m<sup>3</sup> Beton somit 3,84E-08% dieser Kategorie.

#### 5.4.2 Energieproduktion und Bergbau

Die Bereitstellung von primären Rohstoffen ist essentieller Teil der Betonherstellung. Aus dem Abbau von Betonausgangstoffen ergeben sich folgende Werte. Normiert auf die Jahresproduktion (exklusive Rohöl- und Naturgasförderung) von 30,8 Mio t und 3,9% der IUCN CMP Unified Classification „Energieproduktion und Bergbau“ entfallen auf 1 m<sup>3</sup> Beton 1,09E-07% dieser Kategorie.<sup>49</sup> Zur Produktion bereitgestellte Energie aus Wasserkraft ist in der Kategorie „Modifikation von Ökosystemen“ zu verbuchen.

#### 5.4.3 Modifikation von Ökosystemen

Der Verbrauch von Wasser für die Betonherstellung fällt in die Kategorie „Modifikation von Ökosystemen“. Aufgrund fehlender eindeutiger Entnahmengaben werden die jährlichen Entnahmemengen von Oberflächen und Grundwasser herangezogen. Für Oberflächenwasser werden 2.074 Mio. m<sup>3</sup> und für Grundwasser 549 Mio. m<sup>3</sup> angesetzt. Normiert auf diesen Jahresverbrauch und 0,59% der IUCN CMP Unified Classification entfallen auf 1 m<sup>3</sup> Beton Umweltwirkungen im Umfang von 3,67E-11%.<sup>50</sup>

---

<sup>48</sup> Gerd Mauschwitz, Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2016, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften Technische Universität Wien, 2017, S.25

<sup>49</sup> Renate Hammer, Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Einführung der Wirkungskategorien Biodiversitätsverlust in die Ökobilanzierung, Institute of Building Research & Innovation, 2018, S.65

<sup>50</sup> Renate Hammer, Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Einführung der Wirkungskategorien Biodiversitätsverlust in die Ökobilanzierung, Institute of Building Research & Innovation, 2018, S.43f

#### 5.4.4 Umweltverschmutzung

Als Schlüsselindikator der Normierung des Teilsystems Österreich der IUCN CMP Unified Classification wird die PM<sub>10</sub> Konzentration herangezogen, da keine weiteren Differenzierungen in der Unterkategorie „Luftschadstoffe“ vorliegen. Die bei der Betonproduktion anfallenden Schwebstaubemissionen fallen in diese Kategorie. Für die österreichweit emittierte Menge an Schwebstaub werden im Emissionsbericht der Zementindustrie 23,747 t/a veranschlagt.<sup>51</sup> In Österreich sind keine eigenen Grenzwerte für PM<sub>10</sub> Emissionen vorgesehen, da sich gezeigt hat, dass bei Anwendung von Staubminderungsmaßnahmen, welche gesetzlich verpflichtend vorzusehen sind, der überwiegende Teil der Gesamtstaubemissionen als PM<sub>10</sub> emittiert wird.<sup>52</sup> In Bezug auf die Gesamtfläche von Österreich macht dies eine PM<sub>10</sub> Konzentration von 0,28 µg/m<sup>3</sup> aus. Normiert auf diese Menge an Gesamtstaubemissionen und 0,24% der IUCN CMP Unified Classification<sup>53</sup> entfallen auf 1 m<sup>3</sup> Beton Umweltwirkungen im Umfang 1,75E-10%.

#### 5.4.5 Transport und Servicekorridore

Das gesamte mit der Betonherstellung in Verbindung stehende Transportaufkommen fällt unter die Kategorie „Transport- und Servicekorridore“. Für die österreichweit gefahrene Jahresgesamtleistung für den Güterverkehr werden 38.509 Mio. t km<sup>54</sup> und für den Personenverkehr 77 Mrd. Personenkilometer<sup>55</sup> angenommen. Normiert auf diese Menge an gesamt zurückgelegten Kilometer und 8,41% der IUCN CMP Unified Classification<sup>56</sup> entfallen auf den Transport von 1 m<sup>3</sup> Beton gesamt<sup>57</sup> 8,18E-10%. Dieser Wert umfasst die Module A2 und A3.

---

<sup>51</sup> Gerd Mauschwitz, Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Technische Universität Wien, 2016, S.6a

<sup>52</sup> Umweltbundesamt, SCHWEBESTAUB IN ÖSTERREICH, Kurzfassung, 2005, S.16

<sup>53</sup> Renate Hammer, Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Einführung der Wirkungskategorien Biodiversitätsverlust in die Ökobilanzierung, Institute of Building Research & Innovation, 2018, S.74

<sup>54</sup> STATISTIK AUSTRIA, Verkehrsstatistik 2016, S.20

<sup>55</sup> VCÖ: „Kfz-Verkehr ist in Österreich seit 1990 massiv gestiegen“ <https://www.vcoe.at/news/details/vcoe-kfz-verkehr-ist-in-oesterreich-seit-1990-massiv-gestiegen> (letzter Zugriff: 24.04.2018)

<sup>56</sup> Renate Hammer, Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Einführung der Wirkungskategorien Biodiversitätsverlust in die Ökobilanzierung, Institute of Building Research & Innovation, 2018, S.79

<sup>57</sup> Die unterschiedlichen Distanzen der Input- und Outputströme für Betonfertigteile und Transportbeton wurden, bezogen auf ihre Jahresproduktionsmenge gewichtet, gemittelt.

### 5.4.6 Ökologische Wirkungen mit Biodiversitätsindikatoren nach IUCN - CMP Unified Classification of Direct Threats

Die in den Kapitel 5.3.1 bis 5.3.5 für den Beton ermittelten Midpoint-Wirkungskategorien lassen sich zu einer Endpoint-Schadenskategorie Biodiversitätsverlust in Österreich zusammenführen. Eine Übersicht dazu bietet Tabelle 5-5. Die dort angegebenen Werte beziehen sich auf 1 m<sup>3</sup> Beton.

**Tabelle 5-5:** Summierung zur Endpoint Schadenskategorie Biodiveristätsverlust durch Betonerzeugung in Österreich normiert nach IUCN CMP Klassifikation

IUCN CMP Kategorie	EPD Module			
	A1	A2	A3	Σ <sub>Teil</sub> [%]
Landwirtschaft und Aquakultur				
Nutzung biogener Ressourcen				
Wohn- und Gewerbebebauung	X		X	3,84E-8 %
Modifikation von Ökosystemen	X		X	2,91E-10%
Invasive oder in anderer Weise problembehaftete Spezies, Gene oder Krankheiten				
Klimawandel und Extremwetterereignisse				
Menschliches Eindringen und Zerstörung				
Energieproduktion und Bergbau	X		X	1,09E-07%
Umweltverschmutzung	X			1,75E-10%
Transport- und Servicekorridore		X		8,18E-10%
Geologische Ereignisse				
Andere Bedrohungen				
<b>Σ [%]</b>				<b>1,49E-07%</b>

## 5.5 Aspekte sozialer Wirkungen

Zur Analyse ausgewählter Aspekte sozialer Wirkungen der Betonherstellung werden drei wesentliche Indikatoren herangezogen, welche eine Abschätzung des sozialen Impacts ermöglichen. Die gewählten Indikatoren sind:

- Human Development Index (HDI)
- Gini-Koeffizient der Einkommensverteilung der Hauptproduktionsländer
- Nationale Gesundheitsausgaben in % des Bruttoinlandprodukts

Der Human Development Index oder auch Index der menschlichen Entwicklung, wird seit 1990 jährlich im Human Development Report der Vereinten Nationen publiziert. Er errechnet sich aus Lebenserwartungsindex, Bildungsindex und Angaben zum Lebensstandard.<sup>58</sup>

<sup>58</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, [https://de.wikipedia.org/wiki/Index\\_der\\_menschlichen\\_Entwicklung](https://de.wikipedia.org/wiki/Index_der_menschlichen_Entwicklung) [Letzter Zugriff 30.5.2018]

Der Gini Koeffizient ist ein statistisches Maß zur Darstellung von Ungleichverteilungen. In der Wohlfahrtsökonomie kommt er zum Einsatz zur Darstellung der Ungleichheit der Verteilung von Einkommen oder Vermögen. Der hier herangezogene Gini-Index beschreibt die Ungleichheit der Verteilung von Einkommen.<sup>59</sup>

Die Ausgaben für das nationale Gesundheitswesen gemessen an der nationalen Wirtschaftsleistung werden unter diesem Punkt erfasst.<sup>60</sup>

Im Unterschied zur Produktion von Batteriespeicher werden die Ausgangsstoffe für österreichischen Beton beinahe zur Gänze regional produziert. So beträgt der durchschnittliche Transportweg sämtlicher Stoffe für die Massivbaustoffherstellung vom Produzenten der Einsatzstoffe bis zum Abnehmer der Endprodukte etwa 84 km.<sup>61</sup> Dies ist auf deren gute lokale Verfügbarkeit wie auch auf die Unwirtschaftlichkeit von längeren Transportwegen zurückzuführen. Bei einer Inlandsproduktion von 4,4 Mio. t wurden 2016 lediglich etwa 600.000 t Zement importiert.<sup>62</sup> Importe kommen zum größten Teil aus den Ländern Slowakei, Rumänien und Tschechien.<sup>63</sup> Die entsprechenden sozialen Indikatorwerte dieser Länder werden anteilig gewichtet in die Bewertung einbezogen.

Die Werte der einzelnen Produktionsländer sind nachfolgend aufgelistet:

**Human Development Index:** Österreich 0,89; Slowakei 0,85; Rumänien 0,80<sup>64</sup>

**Gini Index:** Österreich 26,0%, Slowakei 25,8%, Rumänien 30,3%<sup>65</sup>

**Gesundheitsausgaben in % des BIP:** Österreich 11,2%, Slowakei 8,1%, Rumänien 5,6%<sup>66</sup>

Darauf abgeleitet ergeben sich die folgenden Kennwerte für soziale Wirkungen der Betonproduktion in Österreich.

**Human Development Index gemittelt:** 0,88

**Gini Index gemittelt:** 26,25 %

**Gesundheitsausgaben in % des BIP gemittelt:** 10,68%

---

<sup>59</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_L%C3%A4nder\\_nach\\_Einkommensverteilung](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Einkommensverteilung) [Letzter Zugriff 30.5.2018]

<sup>60</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_L%C3%A4nder\\_nach\\_Gesundheitsausgaben](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Gesundheitsausgaben) [Letzter Zugriff 30.5.2018]

<sup>61</sup> Österreichische Massivbaustoffherstellung Impulsgeber für Regionen, Analyse sozial- und regionalwirtschaftlicher Effekte österreichischer Werksstandorte, Wolfgang E. Baaske, Forschungsverein Steine-Keramik des Fachverbands der Stein- und keramischen Industrie.2016, s.45

<sup>62</sup> Branchenbericht Bauzulieferer 2016, UniCredit Bank Austria AG Economics & Market Analysis Austria, S.10

<sup>63</sup> APA OTS Presseausendung, Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, [https://www.ots.at/presseausendung/OTS\\_19990526\\_OTSo104/oesterreichs-zementindustrie-haelt-internationalem-wettbewerbsdruck-stand](https://www.ots.at/presseausendung/OTS_19990526_OTSo104/oesterreichs-zementindustrie-haelt-internationalem-wettbewerbsdruck-stand) [Letzter Zugriff 30.05.2018]

<sup>64</sup> United Nations Development Programme, Human Development Data, <http://hdr.undp.org/en/data> [Letzter Zugriff 29.5.2018]

<sup>65</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_L%C3%A4nder\\_nach\\_Einkommensverteilung](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Einkommensverteilung) [Letzter Zugriff 30.5.2018]

<sup>66</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_L%C3%A4nder\\_nach\\_Gesundheitsausgaben](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Gesundheitsausgaben) [Letzter Zugriff 29.5.2018]

## 6 Ökologischer Rucksack elektrischer Energiespeicherung

Im Folgenden werden marktverfügbare für den haustechnischen Einsatz geeignete elektrische Energiespeichersysteme gegenüberstellend betrachtet. Identifiziert werden sollen jene Systeme, die für den Vergleich des ökologischen Rucksacks elektrischer und thermischer Speicherung besonders relevant erscheinen. Kriterien der Bewertung sind dabei zunächst technische und marktspezifische Kenngrößen.

Angesichts des Umfangs des folgenden Kapitels werden jene Ergebnisse, die direkt für den Vergleich der „ökologischen Rucksäcke“ verwendet werden, in einer vorangestellten Zusammenfassung, Kapitel Zusammenfassung 6.1, dokumentiert. Die weiteren Kapitel 6.2 bis 6.6 enthalten die Herleitungen dieser Ergebnisse sowie weiterführende Informationen.

### 6.1 Zusammenfassung

Für die Batterien wird eine Übersicht der aktuell verfügbaren Batterietechnologien durchgeführt. Aus heutiger Sicht scheinen im Wesentlichen vier Technologien, nämlich die Blei-Säure-Batterie, die Lithium-Ionen-Batterie, die Natrium-Batterie und die Redox-Flow-Batterie potentiell geeignet, ein relevantes Marktsegment im Bereich der stationären Einbindung in haustechnische Anlagen zu besetzen.

Im Rahmen der Ökobilanzierung werden zunächst die grundlegenden Charakterisierungsfaktoren des Primärenergiebedarfs und des Treibhausgaspotenzials vergleichend untersucht. Auf Grund der in der Literatur diesbezüglich verfügbaren Daten wird die Betrachtung der Batteriespeichertechnologien auf jene der Lithium-Ionen-Batterien sowie der Vanadium-Redox-Flow-Batterie eingeeengt.

Mit folgenden Ergebnissen zur erforderlichen Speichergröße:

- Die erforderliche wirksame elektrische Speicherkapazität zur Überbrückung einer dreitägigen Phase ohne erneuerbarem Überschussstrom unter ungünstigen Winterbedingungen ergibt sich aus der thermischen Gebäudesimulation im EFH zu 27 kWh und im MFH zu 222 kWh.

Mit folgenden Ergebnissen zur ökologischen Relevanz der Speicherproduktion:

- Die ökologischen Belastungen aus der Batterieproduktion ergeben sich weitgehend proportional zur wirksamen elektrischen Speicherkapazität.
  - Für Lithium-Ionen-Batteriespeicher ergibt sich aus vergleichendem Fachliteraturstudium:  $PEB = 515 \text{ kWh}_{PE}/\text{kWh}_{\text{capacity}}$  und  $CO_2 = 170 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}_{\text{capacity}}$
  - Für Vanadium-Redox-Flow-Batteriespeicher ergibt sich aus vergleichendem Fachliteraturstudium:  $PEB = 625 \text{ kWh}_{PE}/\text{kWh}_{\text{capacity}}$  und  $CO_2 = 119 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}_{\text{capacity}}$

Aus den thermischen Gebäudesimulationen ergibt sich die von den Batteriespeichern tatsächlich jährlich gespeicherte und wieder abgegebene elektrische Energie. Als Referenzfall werden die Gebäude in Leichtbauweise und mit konstanter Raumtemperatur herangezogen. Berechnet und in Kapitel 7.1 dargestellt wurden aber auch die Ergebnisse für etwa gleitende Raumlufttemperaturen.

Im EFH wird von der 27 kWh-Batterie eine jährliche Energiemenge von 462 kWh/a oder 2,4 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGFA</sub> geliefert, im MFH eine von 4.001 kWh/a oder 1,4 kWh/m<sup>2</sup><sub>BGFA</sub> geliefert. Das entspricht im EFH ca. 17 und im MFH ca. 18 vollständigen Ladezyklen des elektrischen Speichers. Unter der Annahme einer 20-jährigen Nutzungsdauer ergibt sich somit eine ökologische Belastung der aus dem Speicher gelieferten elektrischen Energieeinheit:

- Bei Verwendung eines 27 kWh Batteriespeichers im EFH belastet die Errichtung des elektrischen Speichers im Falle eines Lithium-Ionen-Batteriespeichers jede im Lebenszyklus aus diesem Speicher gelieferte kWh mit einem PEB von 1,5 kWh<sub>PE</sub>/kWh und einer CO<sub>2</sub>-Emission von 489 g/kWh sowie im Fall eines Redox-Flow-Batteriespeichers mit einem PEB von 1,8 kWh<sub>PE</sub>/kWh und einer CO<sub>2</sub>-Emission von 343 g/kWh.
- Bei Verwendung eines 222 kWh Batteriespeichers im MFH belastet die Errichtung des elektrischen Speichers im Falle eines Lithium-Ionen-Batteriespeichers jede im Lebenszyklus aus diesem Speicher gelieferte kWh mit einem PEB von 1,3 kWh<sub>PE</sub>/kWh und einer CO<sub>2</sub>-Emission von 414 g/kWh sowie im Fall eines Redox-Flow-Batteriespeichers mit einem PEB von 1,5 kWh<sub>PE</sub>/kWh und einer CO<sub>2</sub>-Emission von 290 g/kWh.

## 6.2 Charakterisierung marktverfügbarer elektrischer Energiespeicher

Die speziell durch die aktuell rasche Evolution der Elektromobilität vorangetriebenen Entwicklungen elektrischer Energiespeicher haben zu einer gewissen Verschleifung ursprünglich klar abgegrenzter Bezeichnungen wie Zelle, Batterie oder Akkumulator geführt. Entsprechend wird eine kurze grundsätzliche Begriffsklärung vorangestellt. In weiterer Folge werden die jeweils marktetablierten Bezeichnungen verwendet, es sei denn, es ergibt sich daraus eine Unklarheit in Bezug auf die Fragestellung der vorliegenden Untersuchung. In diesem Fall wird explizit auf eine eventuell bestehende Unschärfe hingewiesen.

### 6.2.1 Begriffsklärung

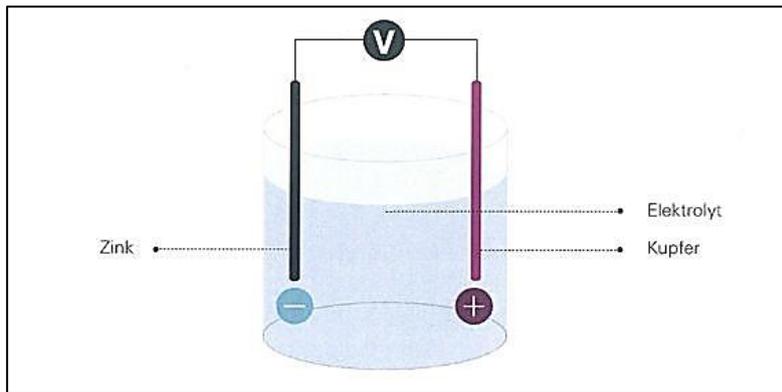
#### 6.2.1.1 Galvanische Zelle

Eine galvanische Zelle<sup>67</sup> ist eine Vorrichtung zur spontanen Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie. Dieser Energieumwandlung liegt ein Reduktions-Oxidationsprozess zu Grunde. Eine galvanische Zelle besteht grundsätzlich aus einer Kombination von zwei unterschiedlichen Elektroden und einem Elektrolyten. Die Elektrode, welche Elektronen über den elektrischen Anschluss aufnimmt wird als Kathode bezeichnet, die Gegenelektrode, die Elektronen freisetzt als Anode. Die folgende Abbildung 6-1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer galvanischen Zelle.<sup>68</sup>

---

<sup>67</sup> Alternative Bezeichnungen: galvanisches Element, galvanische Kette, Volta-Zelle oder Daniellsches Element

<sup>68</sup> <https://www.verbund.com/de-at/blog/blog-artikel/2011/11/07/erfindung-batterie-volt> [letzter Zugriff: 13.03.2018]



**Abbildung 6-1:** Exemplarischer Aufbau einer galvanischen Zelle

Galvanische Zellen bei denen die Reduktions-Oxidationsprozesse nicht umkehrbar ablaufen und es entsprechend zu einem Erliegen des Elektronenstroms kommt, sobald die Ladungsdifferenz zwischen Anode und Kathode ausgeglichen ist, werden als Primärzellen bezeichnet. Sind die elektrochemischen Vorgänge innerhalb einer galvanischen Zelle hingegen umkehrbar, wird von einer Sekundärzelle gesprochen. Sekundärzellen können durch Zuführen von elektrischer Energie wieder aufgeladen werden.

### 6.2.1.2 Brennstoffzelle

Die Brennstoffzelle stellt eine Sonderform der galvanischen Zelle dar, bei der die Umwandlung von chemischer in elektrische Energie kontinuierlich erfolgen kann. Dazu muss chemische Energie in Form eines Brennstoffs sowie ein entsprechendes Oxidationsmittel laufend in die Zelle nachgeführt werden. Als reversibel werden Brennstoffzellen bezeichnet, wenn deren Arbeitsprozesse umkehrbar sind. Verbraucht eine Brennstoffzelle beispielsweise Wasserstoff als Brennstoff und Sauerstoff als Oxidationsmittel zur Erzeugung von Elektrizität wobei Wasser anfällt, würde in einer reversiblen Wasserstoff-Brennstoffzelle aus dem angefallenen Wasser unter dem Einsatz elektrischer Energie wiederum Wasserstoff und Sauerstoff produziert werden.

Die folgende Abbildung 6-2 zeigt das gemeinsame Grundprinzip der Energieumwandlungsprozesse in einer primären und einer sekundären galvanischen Zelle sowie in einer Brennstoffzelle und ihrer reversiblen Erweiterung.<sup>69</sup>

<sup>69</sup> Darstellung bearbeitet auf Basis der Quelldaten aus:  
<http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2008/woche35/woche35.html> (letzter Zugriff: 13.03.2018)

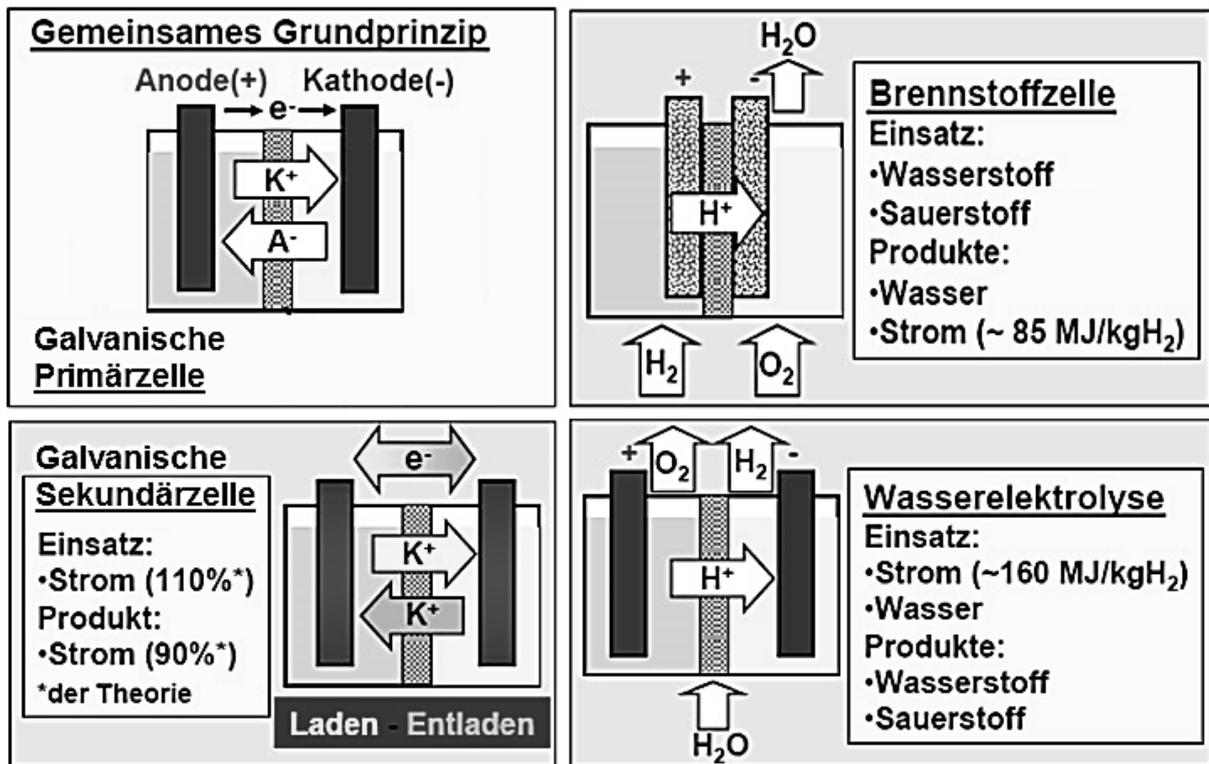


Abbildung 6-2: Gemeinsames Grundprinzip der Energieumwandlungsprozesse

### 6.2.1.3 Batterie

Als Batterie bezeichnet man ein Speicherelement, das aus mehreren gleichartigen in Reihe geschalteten galvanischen Zellen zusammengestellt ist. Es gibt Batterien die aus Primärzellen bestehen und solche die aus Sekundärzellen aufgebaut sind.

Umgangssprachlich werden häufig auch Einzelzellen als Batterien bezeichnet. Ebenso wird unter Batterie zumeist ein nicht wiederaufladbarer Speicher verstanden. Aufladbare Zellen oder Batterien werden hingegen häufig als Akkumulatoren bezeichnet.

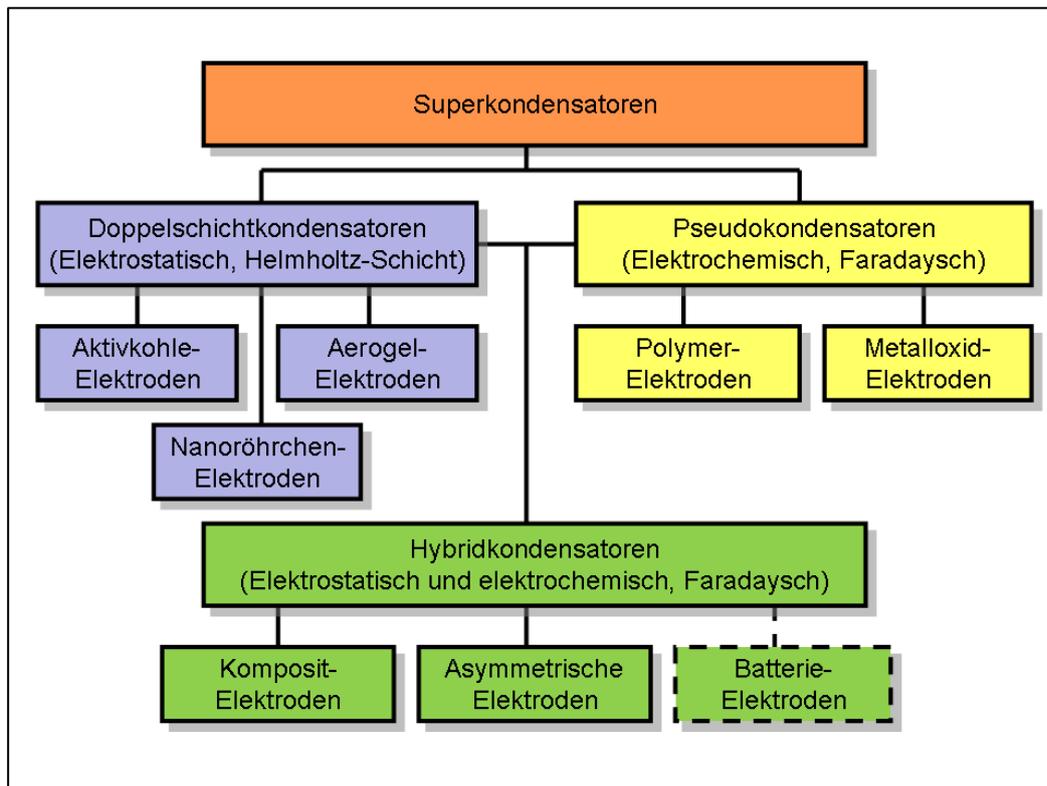
### 6.2.1.4 Akkumulator

Im Zuge der Entwicklung von Sekundärzellen wurde der Begriff Akkumulator zunächst für die Einzelzelle und in weiterer Folge auch für wiederaufladbare Batterien im Grunde als zusätzliche Bezeichnung eingeführt. Dadurch hat sich eine umgangssprachliche Unschärfe etabliert.

### 6.2.1.5 Kondensator

Ein Kondensator ist ein elektrotechnisches Bauelement, das in einem Gleichstromkreis elektrische Ladung statisch in einem elektrischen Feld speichert. Der Kondensator besteht grundsätzlich aus zwei elektrisch leitfähigen Elektrodenflächen, die durch ein isolierendes Material voneinander getrennt sind. Derart kann ein Kondensator elektrische Energie speichern und wieder abgeben. Allerdings wird die Energie nicht in chemischer Form gespeichert, sondern in einem elektrischen Feld gebunden. Ein Kondensator ist daher keine galvanische Zelle.

Die aktuell dynamische technische Weiterentwicklung von Kondensatoren zu sogenannten Superkondensatoren, auch als Ultrakondensatoren oder Supercaps bezeichnet, führt jedoch zu einer Aufweichung der scharfen Grenze von Kondensator und galvanischer Zelle wie die folgende Abbildung 6-3 zeigt.<sup>70</sup>



**Abbildung 6-3:** Gruppierung von Superkondensatoren nach Art der Energiespeicherung

### 6.2.2 Ausgewählte Kriterien zum technischen Vergleich

Im Folgenden werden einige wesentliche Kriterien definiert, die eine Grundlage für den technischen Vergleich von Batteriespeichern teils sehr unterschiedlicher elektrochemischer Materialität und Funktionalität bieten können. Es wird deutlich, dass durch den aktuell raschen technischen Fortschritt und die zunehmende Überlappung traditionell getrennter Entwicklungsbereiche begriffliche Unschärfen entstanden sind. An dieser Stelle wird versucht, in der Literatur häufig verwendete Bezeichnungen sinngemäß richtig zusammenzuführen und in Hinsicht auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit möglichst einfach und klar zu erläutern.

<sup>70</sup> Elcap; Familienstammbaum der Superkondensatoren, Dezember 2010  
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/Superkondensatoren-%C3%9Cbersicht.png> (letzter Zugriff: 13.03.2018)

### 6.2.2.1 Lebensdauer

Mit der Zeit bauen Batterien bezüglich vieler Leistungsmerkmale wie Energiespeichervermögen, elektrische Leistung oder Sicherheit durch mechanische und thermische Belastungen sowie chemische Reaktionen ab. Die Lebensdauer einer Batterie ist demnach begrenzt und erstreckt sich von der Inbetriebnahme bis zum Zeitpunkt des Speicherausfalls.<sup>71</sup>

Lebensdauer nach Anzahl der (Voll-)Zyklen

Die Lebensdauer nach Anzahl der (Voll-)Zyklen oder Zyklenfestigkeit oder Haltbarkeit nach Zyklen ist eine dimensionslose Zahl, die angibt, wie oft eine Batterie be- und entladen werden kann, bevor ihre nutzbare Kapazität unter eine für den praktischen Einsatz nötige Grenze fällt.<sup>72</sup> Diese Grenze ist erreicht, wenn die Speicherfähigkeit der Batterie auf weniger als 80 % der Nennkapazität gesunken ist.<sup>73</sup> Dabei wird zwischen Voll- und Teilzyklen unterschieden. Ein Vollzyklus bezeichnet die Entladung bis auf eine Restkapazität von 20 % mit anschließender Wiederaufladung bis 100 %. Findet hingegen lediglich eine Teilent- oder Teilbeladung statt, spricht man von einem Teilzyklus.<sup>74</sup>

Kalendarische Lebensdauer [a]

Die kalendarische Lebensdauer oder Alterungsfestigkeit oder Brauchbarkeitsdauer gibt die Anzahl der zu erwartenden Jahre an,<sup>75</sup> in der die Batterie einsatzfähig sein wird. Der Alterungsprozess wird in besonderem Maße durch die Umgebungstemperatur und die Güte des Batteriemanagementsystems beeinflusst und ist dann weitgehend unabhängig von der Nutzung.<sup>76</sup>

### 6.2.2.2 Spezifische Ladung [Ah/kg] und Ladungsdichte [Ah/l]

Die Zahl der beim elektrochemischen Umsatz in der Batterie an den Elektroden freigesetzten oder aufgenommenen Elektronen pro Masse- beziehungsweise Volumeneinheit bestimmt die Speicherfähigkeit des aktiven Elektrodenmaterials und wird als spezifische Ladung beziehungsweise Ladungsdichte angegeben.<sup>77</sup>

---

<sup>71</sup> Dinger A.; Ripley M.; Mosquet X.; Rabl M.; Rizoulis D.; Russo, M.; Sticher, G.(2010): Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. The Boston Consulting Group, 2010

<sup>72</sup> Anmerkung aus: Fachverband Batterien; Definition verschiedener Lebensdauerbegriffe für Batterien; ZVEI Merkblatt Nr. 23, August 2013 „In Normen, ZVEI Merkblättern, technischen Unterlagen und Prospekten sind zu Aussagen bezüglich der Lebensdauer von Batterien die verschiedensten Begriffe zu finden. Ohne Kenntnis der Definitionen können diese fachspezifischen Begriffe leicht zu Missverständnissen und Fehlinterpretationen führen.“

<sup>73</sup> DIN EN 60896-11:2003-07; Titel (Deutsch): Ortsfeste Blei-Akkumulatoren - Teil 11: Geschlossene Batterien; Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren; 2003

<sup>74</sup> Schulz C.; Optimierung der Leistungsaufnahme eines solarbetriebenen Ad-Hoc-Netzwerk-Knotens, Hamburg, Diplomica Verlag GmbH., 2008

<sup>75</sup> Anmerkung aus: Fachverband Batterien; Definition verschiedener Lebensdauerbegriffe für Batterien; ZVEI Merkblatt Nr. 23, August 2013 „In Normen, ZVEI Merkblättern, technischen Unterlagen und Prospekten sind zu Aussagen bezüglich der Lebensdauer von Batterien die verschiedensten Begriffe zu finden. Ohne Kenntnis der Definitionen können diese fachspezifischen Begriffe leicht zu Missverständnissen und Fehlinterpretationen führen.“

<sup>76</sup> Dinger A.; Ripley M.; Mosquet X.; Rabl M.; Rizoulis D.; Russo, M.; Sticher, G.(2010): Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. The Boston Consulting Group, 2010

<sup>77</sup> Möller K., Winter M.; Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien, Script zum Praktikum Anorganisch-Chemische Technologie; Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe, TU Graz; 2005

### 6.2.2.3 Zellspannung [V]

Die Zellspannung wird dadurch bestimmt, wie weit die Redox-Spannung<sup>78</sup> der elektrochemischen Reaktionen von negativer und positiver Elektrode auseinander liegen. Umso größer die Differenz dieser Potentiale ist, desto höher ist die Zellspannung.<sup>79</sup>

### 6.2.2.4 Nennspannung [V]

Als Nennspannung oder Nominalspannung oder nominelle Spannung einer Batterie wird der zumeist vom Hersteller teilweise in einem Toleranzbereich angegebene Nennwert für den Normalbetrieb bezeichnet. Unter Normalbetrieb wird die weitgehend kontinuierliche Entladung über einen längeren Zeitraum unter dem Speicher entsprechenden Abnahmebedingungen verstanden. Im tatsächlichen Betrieb liegt die Spannung einer vollgeladenen Batterie im Regelfall deutlich über der Nennspannung, gegen Ende der Entladung deutlich darunter. Die Nennspannung ist kleiner als die Leerlaufspannung, die sich bei Stromentnahme durch den Innenwiderstand der Batterie ergibt.<sup>80</sup>

### 6.2.2.5 Entladetiefe [%]

Die Entladetiefe,<sup>81</sup> auch als Entladungsgrad oder Ladezustand SoC (englisches Akronym für State of Charge) bezeichnet, gibt den Ladezustand des Speichers an. Sie beschreibt das Verhältnis der entnommenen Menge an elektrischer Ladung zur nutzbaren Gesamtladung in Prozent. 100 % Entladegrad liegen bei Erreichen der vom Hersteller definierten Entladeschlussspannung vor.<sup>82</sup>

### 6.2.2.6 Entladeschlussspannung [V]

Die Entladeschlussspannung ist festgelegt als Grenzwert der Spannung der Zellen zum in Abbildung 6-4 dargestellten Tiefentladungsbereich.<sup>83</sup> Eine Unterschreitung der Entladeschlussspannung führt zumeist zu einer Verkürzung der Lebensdauer der Batterie.<sup>84</sup>

---

<sup>78</sup> Die Redox-Spannung, oft auch als Redoxpotential bezeichnet, beschreibt die Potentialdifferenz zwischen einem Halbelement der jeweiligen Batterie und dem international standardisierten Bezugselement, der Normal-Wasserstoffelektrode. Das Bezugselement besteht aus einer Platinelektrode, welche bei 25 °C von Wasserstoffgas mit einem Druck von 1013 hPa umspült wird und in eine Salzsäurelösung der Stoffmengen-Konzentration 1 mol/l, somit bei pH 0 taucht. Zur Beurteilung biologisch basierter Redox-Spannungen wird ein pH-Wert von 0,7 herangezogen.

<sup>79</sup> International Union of Pure and Applied Chemistry; Compiled by McNaught A., Wilkinson A.; Compendium of Chemical Terminology; Blackwell Scientific Publications, Oxford 2nd ed.; 1997 <http://goldbook.iupac.org/html/R/RT06783.html> (letzter Zugriff: 20.03.2018)

<sup>80</sup> Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018 <http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/elektrische-spannung/> (letzter Zugriff: 20.03.2018)

<sup>81</sup> Englisch: Depth of Discharge; Abbreviation: DoD

<sup>82</sup> Energieversorgung Niederösterreich AG; 24-Stunden-Sonnenstrom: Batteriespeicher im Vergleich; April 2016 <https://www.evn.at/EVN-Group/Uberblick/Aktuelles/Archiv/2016/Batteriespeicher-im-Vergleich.aspx> (letzter Zugriff: 20.03.2018)

<sup>83</sup> Darstellung aus: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Photovoltaik und Batteriespeicher. Technologie, Integration, Wirtschaftlichkeit, Januar 2017, Seite 6.

<sup>84</sup> Energieversorgung Niederösterreich AG; 24-Stunden-Sonnenstrom: Batteriespeicher im Vergleich; April 2016 <https://www.evn.at/EVN-Group/Uberblick/Aktuelles/Archiv/2016/Batteriespeicher-im-Vergleich.aspx> (letzter Zugriff: 20.03.2018)

### 6.2.2.7 Nennkapazität [kWh]

Eine vom Hersteller angegebene Kapazität, die unter festgelegten Entladebedingungen innerhalb einer definierten Entladedauer zur Verfügung steht. Sie bezeichnet damit die Energie, die unter den festgelegten Bedingungen aus dem Speicher entnommen werden kann.<sup>85</sup>

### 6.2.2.8 Nutzkapazität [kWh]

Die Nutzkapazität oder nutzbare Kapazität bezeichnet den Teil der Gesamtkapazität, der nach Einberechnung der Entladetiefe und der Alterungsreserve tatsächlich im Betrieb zur Verfügung steht, wie Abbildung 6-4 verdeutlicht.<sup>86</sup>

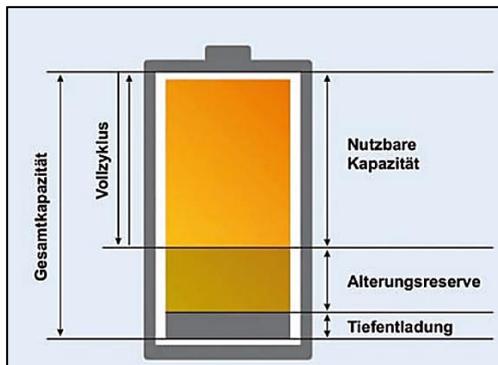


Abbildung 6-4: Anteil der Nutzkapazität an der Gesamtkapazität einer Batterie

### 6.2.2.9 Maximale Entladeleistung [kW] und C-Rate

Die maximale Entladeleistung, manchmal auch nur als Entladeleistung bezeichnet, gibt die Leistung an, die dem Speicher maximal entzogen werden kann. Die maximale Entladeleistung zeigt damit, ob eine Lastspitze vom Batteriespeicher vollständig abgedeckt werden kann. Wie schnell die Batterie dabei im Verhältnis zur Nutzkapazität entladen wird, gibt die sogenannte dimensionslose C-Rate an. Entlädt sich ein Batteriespeicher binnen einer Stunde völlig, so liegt der Wert bei 1C.<sup>87</sup>

<sup>85</sup> Energieversorgung Niederösterreich AG; 24-Stunden-Sonnenstrom: Batteriespeicher im Vergleich; April 2016 <https://www.evn.at/EVN-Group/Uberblick/Aktuelles/Archiv/2016/Batteriespeicher-im-Vergleich.aspx> (letzter Zugriff: 20.03.2018)

<sup>86</sup> Darstellung aus: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Photovoltaik und Batteriespeicher. Technologie, Integration, Wirtschaftlichkeit, Januar 2017, Seite 6.

<sup>87</sup> Forschungszentrum Jülich GmbH; EnArgus: Zentrales Informationssystem Energieforschungsförderung, Version 2.0, ab 2017 [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d3450429-2/\\*/\\*/Entladeleistung.html?op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d3450429-2/*/*/Entladeleistung.html?op=Wiki.getwiki) (letzter Zugriff: 20.03.2018)

#### 6.2.2.10 Gravimetrische bzw. volumetrische Energiedichte [Wh/kg] oder [Wh/L]

Die Energiedichte, auch als spezifische Energie bezeichnet, gibt den gespeicherten Energieinhalt pro Masse der Batterie beziehungsweise pro Volumen der Batterie an. Sie kann als Produkt der Ladungsmenge im Speicher [Ah] mit der Zellspannung [V] pro Masseinheit [kg] beziehungsweise pro Volumeneinheit [L] errechnet werden.<sup>88</sup>

#### 6.2.2.11 Gravimetrische bzw. volumetrische Leistungsdichte [W/kg] oder [W/L]

Die Leistungsdichte, auch als spezifische Leistung bezeichnet, stellt die kurzzeitig maximal verfügbare Batterieleistung dar. Sie beschreibt, wieviel Leistung pro Batteriemasse beziehungsweise Batterievolumen abgegeben werden kann. Entscheidend für die Leistung der Batterie ist die Reaktionsgeschwindigkeit des Elektronen- und des Ionentransfers, wobei große Reaktionsflächen zwischen Elektrode und Elektrolyt diesen Prozess beschleunigen.<sup>89,90</sup>

#### 6.2.2.12 Temperaturbereich [°C]

Leistungsfähigkeit und Lebensdauer handelsüblicher Batterien sind temperaturabhängig. Je geringer die Temperatur einer Batterie ist, desto höher wird ihr Innenwiderstand. Durch diesen erhöhten Widerstand nimmt der Spannungsabfall unter Last zu, so dass bei gleicher Last eine geringere nutzbare Kapazität zur Verfügung steht. Bei steigender Temperatur sinken die Verluste aufgrund der erhöhten Reaktionsgeschwindigkeiten, jedoch kommt es bei zu hohen Betriebstemperaturen zu chemischen Reaktionen welche die Batterie entweder unmittelbar schädigen oder zu einer rascheren Alterung beitragen. Daher werden für Batterien Betriebstemperaturbereiche angegeben. Zur Orientierung werden Temperaturbereiche zwischen 0 °C und 45 °C für das Laden und zwischen 20 °C und 55 °C für die Entladung in der Literatur genannt. Die tatsächlichen Temperaturbereiche sind jedoch stark von der jeweiligen Speichertechnologie abhängig.<sup>91,92</sup>

#### 6.2.2.13 Wirkungsgrad [-] oder [%]

Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist eine dimensionslose Größe. Er beschreibt in der Regel das Verhältnis der entnehmbaren Energie zur zugeführten Energie. Er gibt somit Auskunft darüber, wie effizient eine Batterie Energie speichern kann. Ist die Energiemenge sehr groß, die man zum Laden einer Batterie aufwenden muss, die Energiemenge, die man technisch abrufen kann, aber gering, ist der Wirkungsgrad klein. Es sind verschiedene Wirkungsgrade eingeführt.

---

<sup>88</sup> Braun W., Birke P., Schiemann M.; Batterien für Elektromobilität, Leibnitz Universität Hannover, Vortrag Folie: 22., Jänner 2010  
[http://www.neue-energien.org/downloads/Vortragsreihen/0910/continental\\_elektromobilitaet.pdf](http://www.neue-energien.org/downloads/Vortragsreihen/0910/continental_elektromobilitaet.pdf)  
(letzter Zugriff: 20.03.2018)

<sup>89</sup> Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018  
<http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/leistungsdichte/> (letzter Zugriff: 21.03.2018)

<sup>90</sup> Energieversorgung Niederösterreich AG; 24-Stunden-Sonnenstrom: Batteriespeicher im Vergleich; April 2016 <https://www.evn.at/EVN-Group/Uberblick/Aktuelles/Archiv/2016/Batteriespeicher-im-Vergleich.aspx>  
(letzter Zugriff: 20.03.2018)

<sup>91</sup> Lu L. et al.; A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles; Journal of Power Sources 226, S. 272-288, 2013

<sup>92</sup> Hopp H.; Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug, Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle, Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik, Universität Stuttgart, 2016

### Coulombscher Wirkungsgrad

Der coulombsche Wirkungsgrad auch als Ladewirkungsgrad bezeichnet entspricht dem Verhältnis von entnommenen Amperestunden zu den eingeladenen Amperestunden und gibt damit Aufschluss über die Ladungsverluste der Batterie beim Laden und Entladen.

### Energetischer Wirkungsgrad

Der energetische Wirkungsgrad schließt im Gegensatz zum coulombschen Wirkungsgrad nicht nur die Ladungsverluste, sondern auch Spannungsverluste und thermische Verluste bei Stillstand des Batteriespeichers ein. Er gibt so das Verhältnis von entnommener Energie zu eingeladener Energie an und kann auch als eine Art Gesamtwirkungsgrad der Batterie verstanden werden.<sup>93</sup>

## **6.2.2.14 Kennzeichnungen betreffend die Eignung zur Notstromversorgung**

### Notstromfähigkeit N

Der Speicher versorgt eine einzelne zumeist speicherintegrierte Steckdose, die bei Stromausfall genutzt werden kann

### Backupfähigkeit B

Der Speicher kann die Stromversorgung im Gebäude aufrechterhalten, allerdings nicht unterbrechungsfrei

### Unterbrechungsfreie Stromversorgung U beziehungsweise USV

Die Anlage stellt die elektrische Versorgung bei Störungen im Stromnetz zu 100 % sicher. Der Speicher wird ohne Unterbrechung zugeschaltet.<sup>94</sup>

## **6.2.2.15 Energieinstallationskosten [€/kWh<sub>gespeichert</sub>]**

Zur überblicksmäßigen Ermittlung der Kosten des Energiespeichers und als Grundlage für einen annäherungsweisen Kostenvergleich unterschiedlicher Speicher kann die folgende Beziehung herangezogen werden:<sup>95,96</sup>

Kosten pro gespeicherter Energieeinheit =

Anschaffungskosten / (Theoretische Speicherkapazität • Wirkungsgrad • Entladetiefe • Ladezyklen)

---

<sup>93</sup> Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018 <http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/wirkungsgrad/> (letzter Zugriff: 21.03.2018)

<sup>94</sup> Für alle Kennwerte: Energieversorgung Niederösterreich AG; 24-Stunden-Sonnenstrom: Batteriespeicher im Vergleich; April 2016 <https://www.evn.at/EVN-Group/Überblick/Aktuelles/Archiv/2016/Batteriespeicher-im-Vergleich.aspx> (letzter Zugriff: 20.03.2018)

<sup>95</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>96</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/hochvoltbatterie.html> (letzter Zugriff: 16.03.2017)

Um die Anschaffungskosten zu ermitteln, die für den tatsächlichen Betrieb eines Abnehmers notwendig sind, müssen die Energieinstallationskosten um die Leistungsinstallationskosten sämtlicher notwendiger technischer Komponenten wie beispielsweise Wechselrichter, Batteriemanagementsystem, etc. ergänzt werden.

### 6.2.3 Vergleich von elektrischen Energiespeichersystemen nach Betriebsstromart

Auf Grundlage der Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden umgesetzt im Dokument des Österreichischen Instituts für Bautechnik zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem „Nationalen Plan“ vom März 2014 sind die Anforderungen an zukünftige Gebäude sowohl was deren Primärenergiebedarf als auch deren Kohlendioxidemissionen betrifft stringent festgelegt.<sup>97,98</sup> Darüber hinaus wird definiert, dass bei Wohngebäuden auch der Haushaltsstrombedarf beziehungsweise bei Nicht-Wohngebäuden der Betriebsstrombedarf in die Gesamtbetrachtung einzufließen hat und zur Energiemenge, die für Heizung, Kühlung, Lüftung, Warmwasserbereitung und Beleuchtung im Rahmen der üblichen Nutzung des Gebäudes hinzuzuzählen sind.

Das bedeutet einerseits, dass energetische Verluste jeglicher Art, explizit also nicht nur Wärmeverluste sondern auch elektrische Umwandlungsverluste zu minimieren sind und andererseits alternative emissionsarme Energiebereitstellung forciert einzubinden ist.

Gleichzeitig benötigt eine ständig wachsende Zahl elektronische Endgeräte wie LED-Lampen, Computer, Bildschirme,... Gleichstrom zum Betrieb. In Folge muss der im Netz angebotenen Wechselstrom unter energetischen Verlusten in einer Vielzahl von Schaltnetzteilen entsprechend transformiert, gleichgerichtet, gesiebt und geregelt werden.

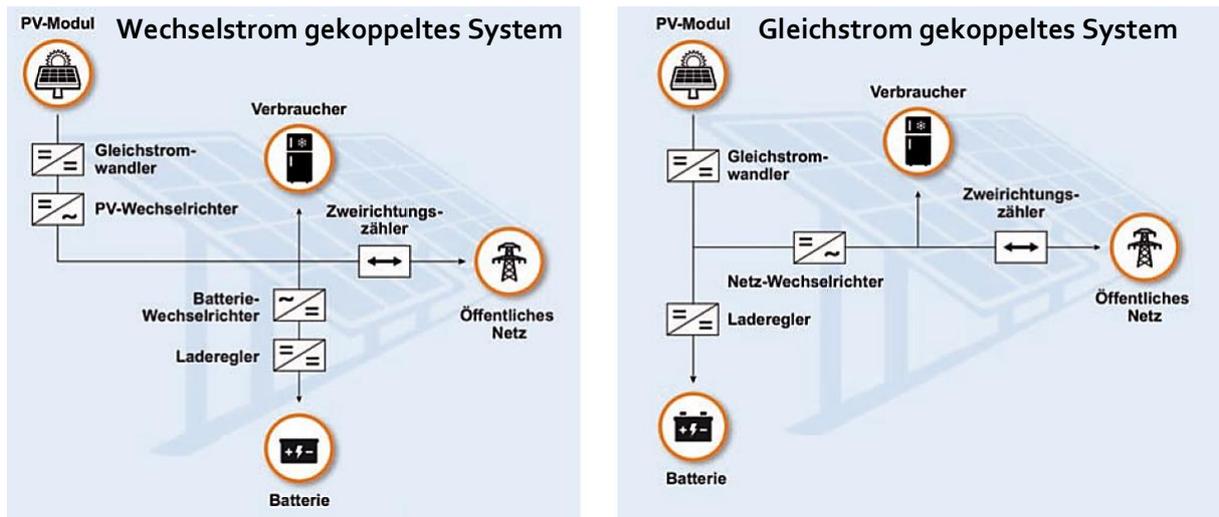
Dem Gegenüber verlangt die Einbindung von beispielsweise photovoltaisch erzeugtem Gleichstrom in gängige wechselstrombetriebene haustechnische Anlagen, das öffentliche Netze und oft auch in Ladestellen für Batterien je nach Anordnung, den Einsatz von ein oder zwei Wechselrichtern wie die folgende Abbildung 6-5 zeigt. Das begründet entsprechend Energieverluste.<sup>99</sup>

---

<sup>97</sup> Kommission der europäischen Union, Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012 der Kommission vom 16. Januar 2012 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden durch die Schaffung eines Rahmens für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Gebäudekomponenten;2012

<sup>98</sup> Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), SVBBTRL des OIB Untergruppe Energieeinsparung und Wärmeschutz, Länderexpertengruppe in der Verbindungsstelle der Bundesländer: OIB-Dokument zum Nachweis der Kostenoptimalität der Anforderungen der OIB-RL6 bzw. des Nationalen Plans gemäß Artikel 4 (2) zu 2010/31/EU, Wien März 2013

<sup>99</sup> Darstellung bearbeitet auf Basis der Quelldaten aus: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Photovoltaik und Batteriespeicher. Technologie, Integration, Wirtschaftlichkeit, Januar 2017, Seite 9.



**Abbildung 6-5:** Anordnung von Wechselrichtern bei der Einkopplung von PV-Modulen

Weiters führen wesentliche Veränderungen im Energiesektor führen aktuell zu einer grundsätzlichen Neubetrachtung beziehungsweise –bewertung der elektrischen Betriebsarten von Wechselstrom und Gleichstrom. So bedingt der Aufbau von Netzen, die unter Einspeisung alternativer Energien etwa aus Windkraftanlagen oder Solarkraftwerken die Subsistenz eines Versorgungsgebiets ermöglichen, oft weite Übertragungswege. Die Wechselstrom-Technik erweist sich dabei als nachteilig. So gehen beispielsweise bei der Stromleitung auf Basis von 380.000 V Wechselspannung und einer Leitungsdistanz von 800 km auf Grund der ständigen Umpolungen rund 9,4 % der elektrischen Leistung verloren. Dabei steigen diese Verluste proportional zur Länge der Stromleitung. Gegebenenfalls werden daher bereits heute langen Leitungsdistanzen mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung betrieben. Hier sind diese Verluste um zumindest 30 % geringer.<sup>100</sup> Ergänzend ermöglichen Entwicklungen auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie den Bau von entsprechend leistungsfähigen Gleichstromtransformatoren.

Vor dem Hintergrund dieser ambivalenten Entwicklungen wurden bei der im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführten Sondierung marktverfügbarer für den haustechnischen Einsatz geeigneter elektrischer Energiespeichersysteme sowohl Gleichstrom- wie Wechselstrombatterien berücksichtigt.

### 6.2.3.1 Gleichstrombatterien

In aller Regel wandeln galvanische Zellen chemisch gebundene Energie derart in elektrische Energie um, dass sich Fließrichtung und Betrag des von der Zelle abgegebenen elektrischen Stroms über einen längeren Betrachtungszeitraum nicht ändern. Es wird Gleichstrom abgegeben. Entsprechend sind in Abhängigkeit von den in der Zelle eingesetzten Materialien und den vorhältbaren elektrischen Spannungen unterschiedliche Gleichstrombatterien am Markt verfügbar. Diese werden im Kapitel 6.2.5 vergleichend gegenübergestellt.

<sup>100</sup> Siemens, Fact sheet: Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), Juli 2012  
<https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2012/energy/2012-07-wismar/factsheet-hgue-d.pdf>  
 (letzter Zugriff: 14.03.2017)

### 6.2.3.2 Wechselstrombatterien

Aktuell liegen zwei grundsätzlich unterschiedliche technologische Ansätze zur Herstellung von Wechselstrombatterien vor, einer auf der analogen Basis der elektrochemischen Oszillation, der andere auf digitaler Basis elektronischer Schaltmechanismen.

#### Analoge Technologie

Unter bestimmten Materialkonstellationen kommt es in der galvanischen Zelle zu einer elektrochemischen Oszillation und es entsteht eine pulsierende Spannung, beispielsweise wenn Elektroden aus einem Eisen- und Kupferblech mit einem Elektrolyten aus einer Kaliumbromatlösung in verdünnter Schwefelsäure unter Belastung gebracht werden. Dabei wird zunächst Eisen zu Eisen(II)-ionen oxidiert, wobei die Bromationen zu Bromidionen reduziert werden. Die Eisenelektrode wird dabei kurzfristig durch eine hauchdünne Oxidschicht überzogen und damit passiviert. Dies führt zu einem sprunghaften Potentialanstieg. Die entstandene Oxidschicht wird jedoch umgehend wieder durch das Einwirken von Wasserstoffionen aufgelöst, wodurch das Eisen wieder aktiviert wird und das Potential sinkt. Da dieser Zyklus mehrmals durchlaufen wird, pulsiert die abgenommene Spannung und eine entsprechend dimensionierter Verbraucher beispielsweise eine Leuchte flackert im Rhythmus des Pulses.<sup>101</sup> In derartigen auf die spezielle Zellchemie zurückgehenden Sonderfällen kann man von einer Wechselstrombatterie sprechen.

#### Digitale Technologie

Digitale Wechselstrombatterien liegen bis dato in erster Linie als Prototypen vor. Exemplarisch soll an dieser Stelle ein Batterietyp beschreiben werden der als Speichermedium aktuell noch über zu geringe Energiedichten verfügt, um konkurrenzfähig zu sein. Der Batterietyp zeichnet sich jedoch dadurch aus, dass sämtliche seiner technischen Einzelkomponenten am Markt eingeführt sind und die aktuellen Entwicklungen dieser Komponenten rasch vor sich geht, wodurch eine Umsetzung entsprechender Energiedichten in absehbarer Zeit realistisch erscheint. Die Batterie besteht aus Halbleiterkondensatoren die zum Be- und Entladen über Gyrator-Schaltungen akkumuliert sind. Die Kondensatoren und die Schaltelement sind gemeinsam auf einem Chip angeordnet, und in hoher Packungsdichte und viellagiger Anordnung integriert, sodass sie entsprechend zusammenwirken.<sup>102</sup> Abbildung 6-6 zeigt eine derartige Anordnung mit einer Vielzahl von Speicherzellenschichten übereinander. Dargestellt wird wie eine 600 lagige Wechselstrombatterie auf einem Chip aufgebaut werden kann.<sup>103</sup>

---

<sup>101</sup> Oetken M., Ducci M.; Eine unmögliche Batterie – die Wechselstrombatterie, Praxis der Naturwissenschaften Chemie 1/49. Jahrg. 2000, S. 16.

<sup>102</sup> Dreyer D., Wechselstrombatterie, Elektronische Energiespeicherung auf dem Chip; Elektronik, Fachmedium für industrielle Anwender und Entwickler, 18.11.2014

<sup>103</sup> Darstellung: Elektronik power ©

<https://www.elektroniknet.de/elektronik/power/elektronische-energiespeicherung-auf-dem-chip-114723-Seite-4.html> (letzter Zugriff: 15.03.2017)

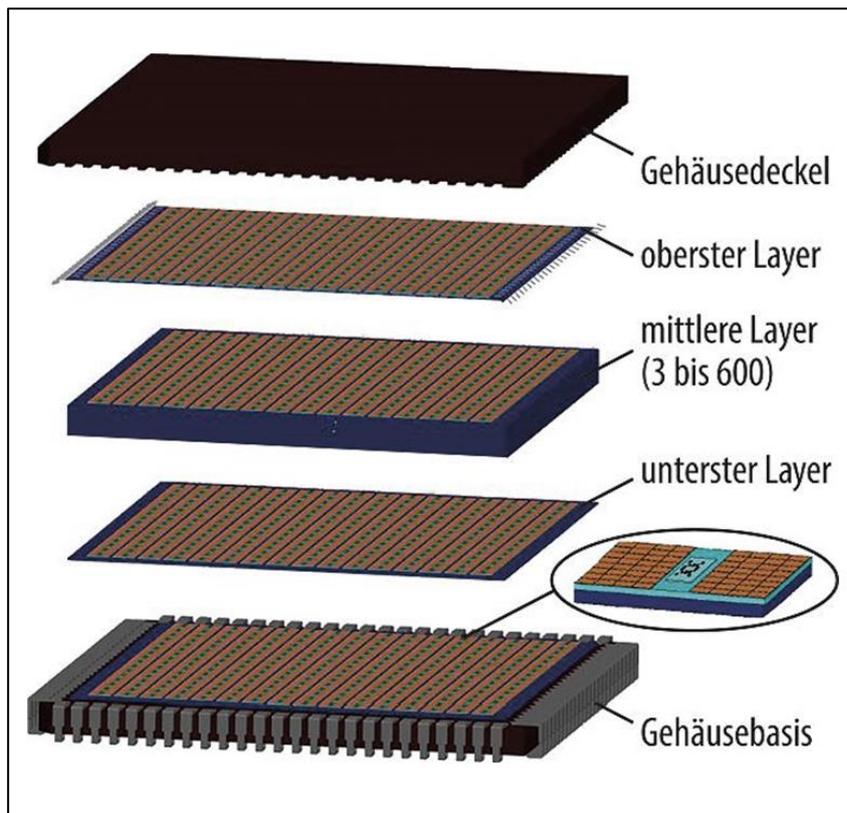


Abbildung 6-6: Multilayer-Anordnung einer Chip-Wechselstrombatterie

#### 6.2.4 Vergleich von elektrischen Energiespeichersystemen nach Nennspannung

Die Richtlinie 2014/35/EU, umgangssprachlich als Niederspannungsrichtlinie bezeichnet, dient dazu, ein hohes Schutzniveau für Gesundheit sowie Sicherheit in Umgang und Betrieb von elektrischen Geräten und Anlagen festzulegen. Sie gilt für elektrische Betriebsmittel zur Verwendung bei einer Nennspannung zwischen 50 V und 1.000 V Wechselstrom sowie zwischen 75 V und 1.500 V Gleichstrom.<sup>104</sup> Elektrische Betriebsmittel mit Nennspannungen kleiner gleich 50 V Wechselstrom beziehungsweise kleiner gleich 120 V Gleichstrom fallen nach EN 61140 in den Spannungsbereich I.<sup>105</sup> Grundlage dieser Werte ist die dauernd zulässige Berührungsspannung für erwachsene Menschen unter normalen Anwendungsfällen, die in der festgeschriebenen Höhe als nicht lebensbedrohlich gilt. Im Gegensatz zur in der Richtlinie 2014/35/EU normierten Niederspannung liegen für den Hochspannungsbereich keine einheitliche Normierung und somit auch keine verbindliche Eingrenzung vor.<sup>106</sup>

Im Allgemeinen und sinngemäß anschließend an die Nennspannungen für elektrische Betriebsmittel zur Verwendung im Niederspannungsbereich mit einer Nennspannung zwischen 50 V und 1000 V Wechselstrom sowie zwischen 75 V und 1500 V Gleichstrom, spricht man ab einer Nennspannung von

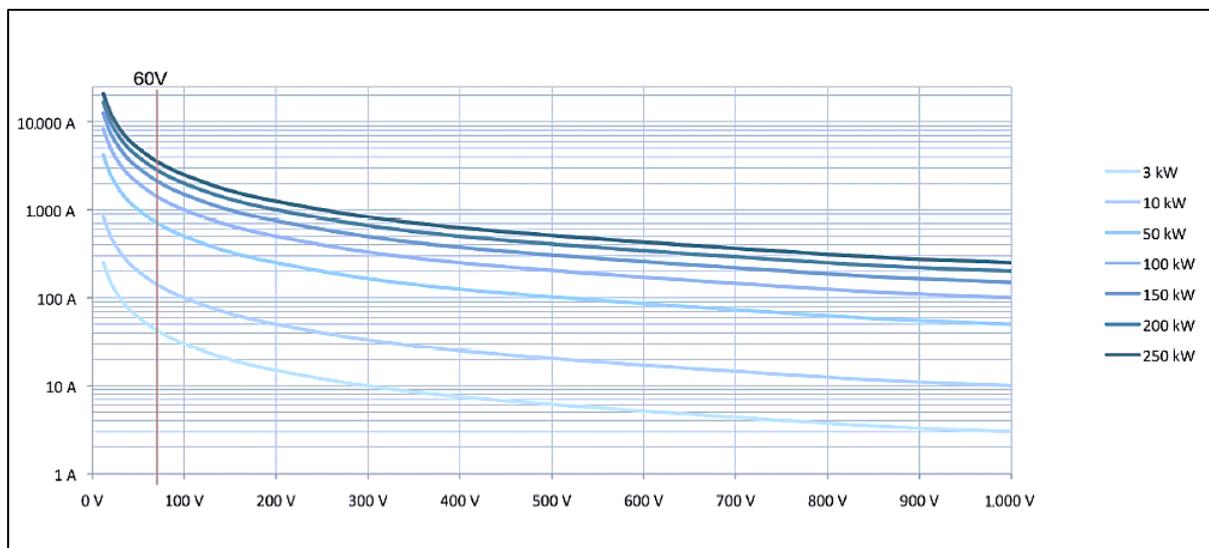
<sup>104</sup> Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt

<sup>105</sup> EN 61140: 2016-11; Schutz gegen elektrischen Schlag, Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel

<sup>106</sup> Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt

über 1000 V beziehungsweise 1 kV vom elektrischen Betrieb unter Hochspannung. Höchstspannungen etwa von 110 kV, 220 kV oder 380 kV bis zu 1 MV werden zur Übertragung von Strom über große Distanzen erzeugt, da die Leistungsverluste umso geringer sind, je höher die zur Übertragung verwendete elektrische Spannung ist.

Im Bereich der Speicherung von elektrischer Energie in Batterien hat sich, aus der Haustechnik und hier speziell aus der genauen Definition von Qualitäten der elektrischen Erdung kommend, jedoch eine differenzierte Skalierung im Niederspannungsbereich etabliert.<sup>107,108</sup> Speziell in der Elektromobilität und in weiterer Folge auch bei batterieintegrierenden haustechnischen Anlagen kommt diese zur Anwendung und man spricht hier folglich von Niederspannungsbatterien beziehungsweise häufiger von Niedervolt-Batterien bei einer Nennspannung unter 60 V sowie von Hochvoltbatterien ab einer Nennspannung von 60 V. Die folgende Abbildung 6-7 zeigt das Verhältnis von Batterienennspannung zu abnehmbarer Stromstärke für verschiedene Leistungsniveaus sowie die Charakteristik dieses Verhältnisses im für die Elektromobilität beziehungsweise batterieintegrierenden Haustechnik wichtigen Niederspannungsbereich.<sup>109</sup>



**Abbildung 6-7:** Verhältnis Spannung zu Stromstärke für Batterien bei verschiedenen Leistungsniveaus

### 6.2.4.1 Niedervolt-Batterien

Im Zuge der Entwicklung der Elektromobilität etablieren sich zunehmend drei Spannungsebenen im Bereich der Niedervolt-Batterien mit 12 V beziehungsweise 24 V sowie auch mit 48 V. Letztere sollen auch Leistungen größer 3 kW bedienen können.<sup>110</sup> Ein typischer Anwendungsbereich von Niedervolt-Batterien sind Startvorgänge wo mit niedrigen Spannungen etwa von 24 Volt Kurzzeitströmen von

<sup>107</sup> ÖVE/ÖNORM; E 8001-1 Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis  $\sim 1000$  V und  $\leq 1500$  V; Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen); 2000 - 03 - 01

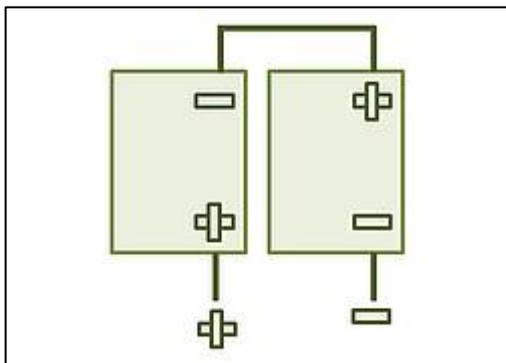
<sup>108</sup> ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. (Hrsg.); Spannungsklassen in der Elektromobilität; Dezember 2013

<sup>109</sup> Darstellung Quelldaten lt. ZVEI, 2013; Lenze Schmidhauser <http://www.lenze-schmidhauser.com/de-ch/>

<sup>110</sup> ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. (Hrsg.); Spannungsklassen in der Elektromobilität; Dezember 2013

mehreren tausend Ampere Stromstärke bereitgestellt werden. Darüber hinaus werden sie zur direkten Versorgung von mobilen Niedervolt- Gleichspannungsgeräten wie Lampen, Computern, Audio-geräten und Ähnlichem... verwendet.

In haustechnischen Anlagen kommen Niedervolt-Batterien häufig als stationäre Stromspeicher von kleinen Solaranlagen zum Einsatz. Dabei werden zumeist mehrere gleichartige Batterien miteinander verschaltet und so zu einer Batteriebank zusammengefasst. Bei der Reihen- oder Serienschaltung wie sie Abbildung 6-8 zeigt, erhöht sich die Betriebsspannung.<sup>111</sup>

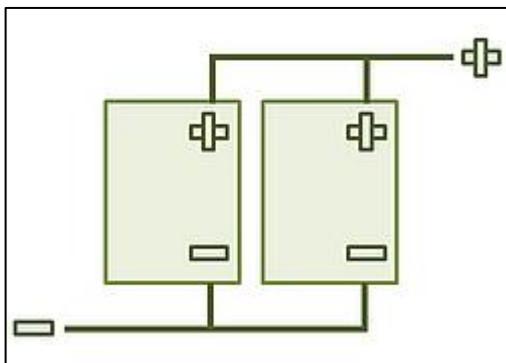


Werden zwei Batterien mit jeweils 200 Ah und 12 V in Reihe geschaltet, ergibt sich eine Ausgangsspannung von 24 V mit einer Kapazität von 200 Ah.

Ah ... Amperestunden  
V ... Volt

**Abbildung 6-8:** Zwei Batterien in Reihenschaltung

Ist eine Erhöhung der Kapazität des Stromspeichers erforderlich, sind die Batterien durch eine Parallelschaltung zu verbinden, wie in Abbildung 6-9 dargestellt.<sup>112</sup>



Werden zwei Batterien mit jeweils 200 Ah und 12V parallel geschaltet, so ergibt sich eine Ausgangsspannung von 12V und eine Gesamtkapazität von 400Ah.

Ah ... Amperestunden  
V ... Volt

**Abbildung 6-9:** Zwei Batterien in Parallelschaltung

In der Praxis kommen zunehmend Kombinationen von Reihen- und Parallelschaltung zur Anwendung, was die Flexibilität der Speicher erhöht. Um das Auftreten unterschiedlicher Belastungen einzelner Batterien innerhalb einer Batteriebank und damit ein vorzeitiges Versagen des gesamten Speichers zu verhindern, werden Komponenten zur Spannungsregelung eingebaut. Diese technologische Praxis ist für die Einbindung von stationären Batterien in den Kontext einer haustechnischen Anlage wesentlich.

<sup>111</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org  
<https://www.energie-experten.org/erneuerbareenergien/photovoltaik/stromspeicher/reihenschaltung.html>  
(letzter Zugriff: 15.03.2017)

<sup>112</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org  
<https://www.energie-experten.org/erneuerbareenergien/photovoltaik/stromspeicher/reihenschaltung.html>  
(letzter Zugriff: 15.03.2017)

### 6.2.4.2 Hochvolt-Batterien

Elektrische Strangleistungen größer 12 kW werden durch den Einsatz von Hochvolt-Batterien erreicht, wobei sich die benötigte Spannung aus der Größe der zu übertragenden Strömen ableitet.<sup>113</sup> Für den Hochvoltbetrieb kommen vorwiegend Metall-Hydrid-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz, deren einzelne Zellen mit einer Spannung von 1 V bis 2 V in Reihe geschaltet in Summe die benötigte Hochvoltspannung erzeugen.

Hochvolt-Batterien stellen eine technische Schlüsselkomponente der Elektromobilität dar.<sup>114</sup> Im Bereich der Gebäudetechnik werden Hochvolt-Batterien in Photovoltaikanlagen integriert und ermöglichen die optimierte Umsetzung des Gleichstrom-gekoppelten Speichersystems. Dabei werden die Hochvolt-Batterie parallel zu den Solarmodulen unmittelbar am Gleichstrom-Eingang des Netzwechselrichters anschließen, was durch das entsprechend hohe Spannungsniveau dieser Speicher ermöglicht wird. Die Einbindung eines Batteriewechselrichters kann entfallen, wodurch sich die Wandlungsverluste verringern. Der weite Eingangsspannungsbereich des Hochvolt-Batteriespeichers von 150 V bis 1.000 V und eine Leistungsentnahme am optimalen Betriebspunkt<sup>115</sup> erlauben den Anschluss unterschiedlichster Verschaltungskombinationen von Solarmodulen. Dadurch können insbesondere Solaranlagen auf tageszeitlich teilverschatteten Dächern oder mit divergierenden Ausrichtungen optimiert genutzt werden.<sup>116</sup>

### 6.2.5 Vergleich nach Speichertechnologien - Marktübersicht

Im Folgenden werden unterschiedliche Batteriespeichertechnologien dargestellt, die im Kontext der vorliegenden Arbeit von Bedeutung sind. Wesentlich ist dabei die Eignung der Batteriespeicher für die Einbindung in stationäre, haustechnische Anlagen und deren aktuelle oder realistisch in naher Zukunft erwartbare Marktverfügbarkeit. So werden beispielsweise Lithium-Iodid-Batterien auf Grund ihrer eingeschränkten Wiederaufladbarkeit an dieser Stelle nicht abgehandelt. Ebenfalls nicht behandelt werden Kombinationstechnologien wie sie etwa in Metall-Metalloxid-Batterie zur Anwendung kommen.<sup>117</sup>

---

<sup>113</sup> ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. (Hrsg.); Spannungsklassen in der Elektromobilität; Dezember 2013

<sup>114</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org  
<https://www.energie-experten.org/erneuerbareenergien/photovoltaik/stromspeicher/hochvoltbatterie.html>

(letzter Zugriff: 16.03.2017)

<sup>115</sup> Verfahren des Maximum Power Point Trackings, bei dem die elektrische Belastung eines Solarmoduls so angepasst wird, dass die größte mögliche Leistung entnommen werden kann.

<sup>116</sup> Braam F., Projekt HEIPHOSS - Hocheffizienter und intelligenter Photovoltaik-Strom-Speicher : Teilprojekt Energiemanagement, Abschlussbericht, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, September 2015

<sup>117</sup> Konzept eines stationären Speichers als Kombination aus Brennstoffzelle und Metalloxidspeicher

### 6.2.5.1 Blei-Säure-Batterien

Blei-Säure-Batterien bedienen sich der ältesten und am weitesten entwickelten markteingeführten Batterietechnologie. Den prinzipiellen Aufbau dieses Batterietyps zeigt Abbildung 6-10.<sup>118</sup>

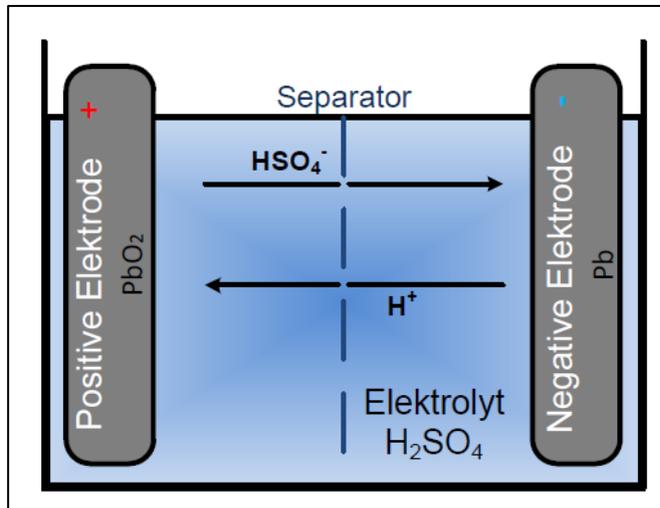


Abbildung 6-10: Aufbauprinzip einer Blei-Säure-Batterie

Blei-Säure-Batterien werden vor allem als kurz- und mittelfristige Energiespeichersysteme verwendet. Es handelt sich hierbei um die Batterietechnologie mit der größten installierten Kapazität und mit langjährigem Betriebseinsatz in entsprechenden Anlagen. Aktuell sind die größten Märkte für Blei-Säure-Batterien Starterbatterien für Fahrzeuge und Systeme zur Sicherstellung der unterbrechungsfreien Stromversorgung im Telekommunikationsbereich. Darüber hinaus sind diese Batteriespeicher in Inselnetzsysteme eingebunden und zunehmend auch in die Moderation von Verbundnetzen.<sup>119,120</sup> Exemplarisch zeigt Abbildung 6-11 eine 2014 zur Regelenergie-Lieferung konzipierte modulare Blei-Säure-Batterieeinheit mit einer Nennkapazität von 2.000 kWh für das Solarkraftwerken in Alt Daber in Brandenburg, Deutschland.<sup>121</sup>

<sup>118</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>119</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>120</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org  
<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/bleiakku.html>  
(letzter Zugriff: 22.03.2018)

<sup>121</sup> BELECTRIC GmbH; Data-sheet: Battery Storage Belectric EBU; Jänner 2016  
[http://www.belectric.com/fileadmin/MASTER/pdf/datasheet/BEL\\_EBU-datasheet\\_2016-01-18\\_EN\\_e-book.pdf](http://www.belectric.com/fileadmin/MASTER/pdf/datasheet/BEL_EBU-datasheet_2016-01-18_EN_e-book.pdf) (letzter Zugriff: 27.03.2017)



**Abbildung 6-11:** Modulare Blei-Säure-Batterieeinheit, Alt Daber, Deutschland

Vor dem Hintergrund, dass beim Laden einer Blei-Säure-Batterie Wasserstoff und Sauerstoff und damit zwei miteinander hochreaktive Komponenten anfallen, wurde die Bauart von Blei-Säure-Batterien weiterentwickelt und es liegen heute drei grundsätzlich unterschiedliche Typen ausdifferenziert vor.

### **Blei-Säure-Nass-Batterie**

Bei der Nass-Batterie, auch als offene Batterie bezeichnet, entweichen Wasserstoff, Sauerstoff und der laufend verdunstende Wasseranteil des Elektrolyten durch eine Belüftungsöffnung. Entsprechend muss destilliertes Wasser nachgefüllt werden. Das bedeutet, dass eine Blei-Säure-Batterie dieser Bauart eine gewisse Wartung benötigt und entsprechend leicht zugänglich sein muss. Darüber hinaus darf keine unkontrollierte Wasserstoffabgabe in geschlossene Räume erfolgen. Ein Vorteil dieser Bauart ist der rasche Ionenfluss im Elektrolyt, wodurch die Batterie beispielsweise als Starterbatterie geeignet ist.<sup>122</sup> Den spezifischen Aufbau einer Blei-Säure-Nass-Batterie zeigt Abbildung 6-12.<sup>123</sup>

---

<sup>122</sup> Industrial Power; Handbuch für stationäre Bleibatterien, Teil 1 - Grundlagen, Konstruktion, Betriebsarten und Anwendungen, Februar 2012

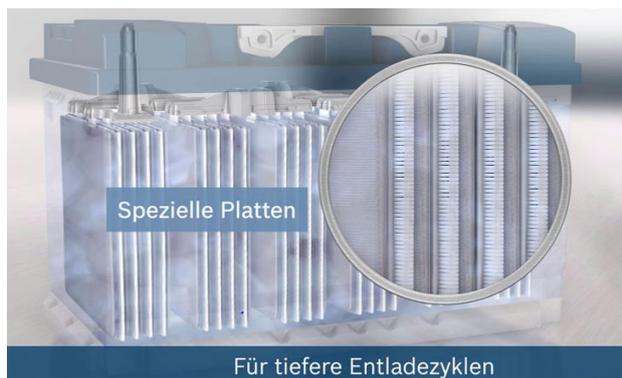
<sup>123</sup> Abbildung bearbeitet nach: <http://www.lakritz-film.de/bosch2.html> (letzter Zugriff: 27.03.2017) dort gezeigtes Produkt aus dem Batterien-Programm von Bosch; Robert Bosch GmbH



**Abbildung 6-12:** Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-Nass-Batterie

### Blei-Säure-EFB-Batterie

Eine Weiterentwicklung der offenen Bauart stellt die EFB-Batterie (englisches Akronym für Enhanced Flooded Battery) dar, deren positive Elektroden mit einem Polyestergeflecht abgeschirmt sind. Dadurch wird das aktive Bleioxid an der Elektrode gehalten, was eine widerstandsarme schnelle Entladung ermöglicht, die zum Starten eines Verbrauchers nötig ist.<sup>124</sup> Den spezifischen Aufbau einer Blei-Säure-EFB-Batterie zeigt Abbildung 6-13.<sup>125</sup>



**Abbildung 6-13:** Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-EFB-Batterie

### Blei-Säure-Gel-Batterie

In einer Gel-Batterie wird dem Elektrolyt aus Schwefelsäure und Wasser Kieselgur zugesetzt. Dadurch geht der Elektrolyt in eine geleeartige Konsistenz über. Die Batterie wird dadurch auslaufsicher. Es muss kein Wasser mehr nachgefüllt werden. Allerdings besitzt das Gel einen höheren elektrischen Widerstand wodurch Be- und Entladevorgänge langsamer erfolgen.<sup>126</sup> Den spezifischen Aufbau einer Blei-Säure-Gel-Batterie zeigt Abbildung 6-14.<sup>127</sup>

<sup>124</sup> Industrial Power; Handbuch für stationäre Bleibatterien, Teil 1 - Grundlagen, Konstruktion, Betriebsarten und Anwendungen, Februar 2012

<sup>125</sup> Abbildung bearbeitet nach: <http://www.lakritz-film.de/bosch2.html> (letzter Zugriff: 27.03.2017) dort gezeigtes Produkt aus dem Batterien-Programm von Bosch; Robert Bosch GmbH

<sup>126</sup> Industrial Power; Handbuch für stationäre Bleibatterien, Teil 1 - Grundlagen, Konstruktion, Betriebsarten und Anwendungen, Februar 2012

<sup>127</sup> Abbildung bearbeitet nach: <http://www.lakritz-film.de/bosch2.html> (letzter Zugriff: 27.03.2017) dort gezeigtes Produkt aus dem Batterien-Programm von Bosch; Robert Bosch GmbH



**Abbildung 6-14:** Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-Gel-Batterie

### Blei-Säure-AGM-Batterie

Den jüngsten Bautyp der Blei-Säure-Batterie stellt die AGM (englisches Akronym für Absorbent Glass Mat) Batterie dar. Hier liegt der Elektrolyt in ein Glasfaservlies gebunden vor. Der Ionenfluss kann rascher erfolgen als im Gel-Elektrolyt und entsprechend können Verbraucher mit größeren Strommengen versorgt werden.<sup>128</sup> Den spezifischen Aufbau einer Blei-Säure-AGM-Batterie zeigt Abbildung 6-15.<sup>129</sup>



**Abbildung 6-15:** Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-AGM-Batterie

### Blei-Säure-Spiral-Batterie

Eine Optimierung der AGM-Batterie stellt die Spiral Batterie, auch als Wickelzellenbatterie bezeichnet, dar. Hierin sind die beiden Elektroden als extrem feine Gitter aufgebaut und durch ein mit Elektrolyt getränktes Glasfaservlies getrennt spiralförmig umeinander gewickelt eingebaut. Diese Batterien zeigen eine besonders hohe spezifische Energie.<sup>130</sup> Den spezifischen Aufbau einer Blei-Säure-AGM-Spiral-Batterie zeigt Abbildung 6-16.<sup>131</sup>

<sup>128</sup> Industrial Power; Handbuch für stationäre Bleibatterien, Teil 1 - Grundlagen, Konstruktion, Betriebsarten und Anwendungen, Februar 2012

<sup>129</sup> Abbildung bearbeitet nach: <http://www.lakritz-film.de/bosch2.html> (letzter Zugriff: 27.03.2017) dort gezeigtes Produkt aus dem Batterien-Programm von Bosch; Robert Bosch GmbH

<sup>130</sup> Wilhelm J., Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems; Forschungszentrum Jülich, Schriftenreihe Energie & Umwelt, 2010 Seite 19.

<sup>131</sup> Abbildung bearbeitet nach: <http://www.lakritz-film.de/bosch2.html> (letzter Zugriff: 27.03.2017) dort gezeigtes Produkt aus dem Batterien-Programm von Bosch; Robert Bosch GmbH



**Abbildung 6-16:** Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-Spiral-Batterie

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind stationäre Blei-Säure-Batterien etwa als Speicherkomponente von gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen von speziellem Interesse. Durch eine Steigerung der Produktionsmengen auch von größeren stationären Blei-Säure-Batterieeinheiten konnte in diesem Segment eine erhebliche Kostenreduktion realisiert werden, was die Lebenszyklus-Kosten dieser Speichertechnologie nun vergleichsweise niedrig macht. Auch die Recyclingrate von Blei-Säure-Batterien ist, getrieben durch die begrenzten Verfügbarkeit und Toxizität von Blei, bereits sehr hoch. Mittelfristig erscheint daher ein vermehrter Einsatz von Blei-Säure-Batterie als elektrochemisches Speichermedium im Kontext der Gebäudetechnik als durchaus denkbar.<sup>132</sup>

### Übersicht - Kenngrößen und Charakteristika von Blei-Säure-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-1 fassen marktgängige Produkte zusammen und verstehen sich als Grundlage für den Technologievergleich. Einzelproduktwerte können von diesen Angaben abweichen. Die Entwicklungsperspektive bezieht sich auf einen Zeitraum von etwa 10 Jahren.<sup>133,134</sup>

**Tabelle 6-1:** Kenngrößen und Charakteristika von Blei-Säure-Batterien

Kenngröße Charakteristikum	aktuell	Entwicklungsperspektive
Wirkungsgrad <small>mit Umrichter</small>	70 % bis 75 %	73 % bis 78 %
Energiedichte	50 Wh/L bis 100 Wh/L	50 Wh/L bis 130 Wh/L
Leistungsdichte	10 W/L bis 500 W/L <small>entspricht im Mittel 350 W/kg</small>	10 W/L bis 1.000 W/L
Lebensdauer <small>nach Zyklen</small>	500 bis 2.000	1.500 bis 5.000
Lebensdauer <small>kalendärisch</small>	5 bis 15 Jahre <small>je nach Temperatur- und Entladezustandsmanagement</small>	10 bis 20 Jahre <small>je nach Temperatur- und Entladezustandsmanagement</small>
Entladetiefe <small>bis Schlussspannung</small>	70 %	80 %

<sup>132</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>133</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>134</sup> Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. – VDE (Hrsg.); Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene, Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Studie der Energietechnischen Gesellschaft- ETG im VDE; Mai 2015

Selbstentladung	0,1 % bis 0,4% pro Tag	0,05 % bis 0,2% pro Tag
Energieinstallationskosten	100 €/kW bis 250 €/kW	50 €/kW bis 80 €/kW
Leistungsinstallationskosten	150 €/kW bis 200 €/kW	35 €/kW bis 85 €/kW
Reaktionszeit	3 ms bis 5 ms	keine Veränderungen erwartet
Betriebsvoraussetzungen	Belüftung und Zugänglichkeit je nach Bauart	keine Veränderungen erwartet
Hauptanwendungsbereiche	Startvorgänge, Frequenzregelung, Spitzenlastregelung, Lastausgleich, Inselnetze, Speicherung von Photovoltaik- oder Windstrom, Notstromversorgung	keine Veränderungen erwartet

### Stärken-Schwächen-Analyse von Blei-Säure-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-2 beziehen sich auf marktgängige Produkte und greifen eine Auswahl von charakteristischen Eigenschaften als Grundlage für den Technologievergleich auf. <sup>135,136</sup>

**Tabelle 6-2:** Stärken-Schwächen Übersicht zu Blei-Säure-Batterien

<b>Blei-Säure-Batterien</b>	
<b>Stärken</b>	<b>Schwächen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Breite und langzeitige Erfahrung</li> <li>▪ Produktion in großer Stückzahl</li> <li>▪ Inhärente Sicherheit durch kontrollierte Überladereaktion</li> <li>▪ Einfaches Zellmanagement möglich</li> <li>▪ Kombination zu Großspeichern möglich</li> <li>▪ Geringe Investitionskosten und rasche Amortisation</li> <li>▪ Viele Hersteller weltweit</li> <li>▪ Rezyklierbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lade- und Entladefähigkeit nicht gleichwertig</li> <li>▪ Belüftung und Zugänglichkeit je nach Bauart notwendig</li> <li>▪ Vergleichsweise geringe Zyklenlebensdauer</li> <li>▪ Vergleichsweise rasche Selbstentladung beschleunigt mit steigender Temperatur</li> <li>▪ Toxizität</li> <li>▪ Vergleichsweise großes Gewicht und Volumen</li> </ul>
<b>Möglichkeiten</b>	<b>Bedrohungen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kostensenkung durch Vollautomatisation der Produktion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbot der Verwendung des Schwermetalls Blei</li> <li>▪ Konkurrenz mit Lithium-Ionen-Batterien</li> <li>▪ Ressourcen begrenzt</li> </ul>

<sup>135</sup> Fuchs G., Lenz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>136</sup> Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. – VDE (Hrsg.); Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene, Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Studie der Energietechnischen Gesellschaft- ETG im VDE; Mai 2015

## Produktbeispiele von für den haustechnischen Einsatz geeigneten Blei-Säure-Batterien

Die in Abbildung 6-17 gezeigten Produkte sollen lediglich die Marktverfügbarkeit im haustechnischen Segment demonstrieren, können im Rahmen der vorliegenden Studie aber in keiner Weise eine Marktübersicht bieten. Die Auswahl der Produkte strebt eine hinlängliche technische Vergleichbarkeit der gezeigten Produkte untereinander an und erfolgt ansonsten zufällig.<sup>137,138,139,140</sup>



Abbildung 6-17: Produktbeispiele von Blei-Säure-Batterien für den stationären haustechn. Einsatz

### 6.2.5.2 Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien liegen in unterschiedlichen Materialkonfigurationen am Markt vor. Zumeist bestehen sie aus einer positiven Elektrode aus mit Lithium-dotiertem Metalloxid und einer negativen Elektrode aus geschichtetem Graphit. Als Elektrolyt dient eine organische Lösung von Lithiumsalzen.

<sup>141</sup> Abbildung 6-18 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie.<sup>142</sup>

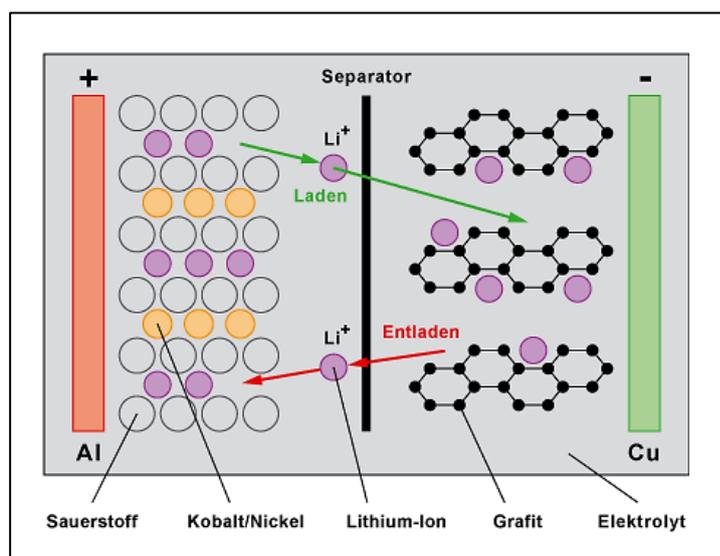


Abbildung 6-18: Aufbauprinzip einer Lithium-Ionen-Batterie

<sup>137</sup> <https://www.victronenergy.de/upload/documents/Datasheet-AGM-Super-Cycle-battery-DE.pdf> (letzter Zugriff: 29.03.2017)

<sup>138</sup> <https://www.batteriespezialist.de/Solarbatterien/Langzeit-Solar-280Ah-Versorgungsbatterie::451.html> (letzter Zugriff: 29.03.2017)

<sup>139</sup> <http://www.solarbatterie.com/SIGA-Batterien::4.html> (letzter Zugriff: 29.03.2017)

<sup>140</sup> <https://www.batteriespezialist.de/Solarbatterien/Solar-280Ah-Versorgungsbatterie::104.html> (letzter Zugriff: 29.03.2017)

<sup>141</sup> Fuchs G., Lenz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>142</sup> Schnabel P.; Elektronik-Kompendium.de, Stand nach: Die Netzwerktechnik-Fibel, 4. Auflage, 2016

Lithium-Ionen-Batterien kommen vorwiegend als mittelfristige Energiespeicher zum Einsatz. Sie weisen auf Grund ihrer hohen Energiedichten im Vergleich zu Batterien mit anderen Speichertechnologien geringes Gewicht auf. Deshalb erlangten Lithium-Ionen-Batterien im Laufe der letzten Jahre zentrale Bedeutung in mobilen Anwendungsbereichen, etwa der Elektromobilität. In weiterer Folge wurden aber auch Lithium-Ionen-Batteriespeicher für den stationären Einsatz optimiert.<sup>143</sup> Anzumerken ist, dass die einzelnen Zellen innerhalb eines Batteriespeichers auf Grund ihrer materialspezifischen Zellchemie nur ausgewogenen Ladungsprozessen unterzogen werden dürfen. Werden mehrerer Zellen in Reihe geschaltet, müssen deren fertigungsbedingten Kapazitätsstreuungen durch ein Batteriemanagementsystems oder einen passenden Ausgleichsregler moderiert werden.

Als problematisch erweist sich, dass Lithium-Ionen-Batterien bestimmter Zellchemie Übertemperaturen, wie sie beispielsweise durch Überladung entstehen, nicht standhalten. Ab etwa 180 °C kann ein Effekt eintreten, der als thermisches Durchgehen bezeichnet wird. Dabei kommt es in der Regel durch Temperatur- und Druckbelastung zu explosionsartigem Zerbersten des Speichers. In Reaktion darauf werden Lithium-Ionen-Batterien mit unterschiedlichen optimaler Weise auch thermisch weniger empfindlichen, Materialkonfigurationen entwickelt und stehen mit entsprechend abweichenden Eigenschaften am Markt zur Verfügung.<sup>144</sup>

### **Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Graphit-Batterie**

Während des Ladevorgangs bewegen sich die Lithium-Ionen von der Anode weg und in Richtung der Katode, wo sie in eine vorgelagerte Schichte aus Graphit eingelagert werden. Beim Entladen bewegen sich die Lithiumionen zurück zur Anode. Dort werden sie in eine Kristallstruktur aus Materialien beziehungsweise Materialkombinationen von Kobalt und Nickel oder auch Mangan eingebracht. Insbesondere Nickeldioxid-Materialien sind überwärmungsempfindlich.<sup>145</sup> Unter Anwendung von entsprechendem Batteriemangement und Überhitzungsschutz kommt dieser Batterietyp bei stationären Anwendungen, etwa dem Lastausgleich innerhalb von Versorgungsnetzen zunehmend zum Einsatz. Beispielsweise sind im Jahr 2016 in Südkorea zwei Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid Großspeicher mit einmal 16 MW wie Abbildung 6-19 zeigt und einmal 24 MW Nennleistung in Betrieb genommen worden.<sup>146</sup>

---

<sup>143</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>144</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>145</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>146</sup> <https://www.smarterworld.de/smart-power/batterien/artikel/128186/>



**Abbildung 6-19:** Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid Energiespeichersysteme zur Netzmoderation, Non-Gong, Südkorea

#### **Lithium-Eisenphosphat-Graphit-Batterie**

Um dem thermischen Durchgehen vorzubeugen, wurden Batterien mit diesbezüglich robusteren Prozessabläufen entwickelt. Diese enthalten anodenseitig neben den bereits genannten Metalloxiden auch Eisenphosphate. Die Kapazität dieser Speicher ist im Vergleich zu jener von Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Graphit-Batterie jedoch geringer.<sup>147</sup>

#### **Lithium-Manganoxid-Titanat-Batterie**

Kaum anfällig für thermisches Durchgehen zeigen sich Lithium-Manganoxid-Titanat-Batterien. Sie stellen eine weiterentwickelte Bauart dar, bei der die Katode in gesinterter Form und ohne Graphitbeschichtung vorliegt, wodurch auch eine Verlängerung der Batterielebensdauer erreicht werden kann.<sup>148</sup>

---

<sup>147</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org

<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/nickel-mangan-cobalt-akku.html#c27255> (letzter Zugriff 05.04.2018)

<sup>148</sup> Harbusch G., Lithium Titanat Akkumulator, web-Bericht des Vereins Zukunftswerkstatt Verkehr, 2018  
<http://zukunftswerkstatt-verkehr.at/akku-lithium-titanat.html> (letzter Zugriff 05.04.2018)

## Übersicht - Kenngrößen und Charakteristika von Lithium-Ionen-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-3 fassen marktgängige Produkte zusammen und verstehen sich als Grundlage für den Technologievergleich. Einzelproduktwerte können von diesen Angaben abweichen. Die Entwicklungsperspektive bezieht sich auf einen Zeitraum von etwa 10 Jahren. <sup>149,150,151</sup>

**Tabelle 6-3:** Kenngrößen und Charakteristika von Lithium-Ionen-Batterien

Kenngröße Charakteristikum	aktuell	Entwicklungsperspektive
Wirkungsgrad <small>mit Umrichter</small>	80 % bis 85 %	85 % bis 90 %
Energiedichte	200 Wh/L bis 350 Wh/L <small>entspricht LiNixMnyCozO<sub>2</sub> im Mittel 160 Wh/kg LiFePO<sub>4</sub> im Mittel 110 Wh/kg Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> im Mittel 75 Wh/kg</small>	250 Wh/L bis 550 Wh/L
Leistungsdichte	100 W/L bis 3.500 W/L <small>entspricht LiNixMnyCozO<sub>2</sub> im Mittel 1.300 W/kg LiFePO<sub>4</sub> im Mittel 4.000 Wh/kg Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> im Mittel 4.000 Wh/kg</small>	100 W/L bis 5.000 W/L
Lebensdauer <small>nach Zyklen</small>	1.000 bis 5.000	3.000 bis 10.000
Lebensdauer <small>kalendarisch</small>	5 bis 20 Jahre <small>je nach Temperatur- und Entladezustandsmanagement</small>	10 bis 30 Jahre <small>je nach Temperatur- und Entladezustandsmanagement</small>
Entladetiefe <small>bis Schlussspannung</small>	bis 100 %	bis 100 %
Selbstentladung	0,2 % pro Tag	0,03 % pro Tag
Energieinstallationskosten	300 €/kW bis 800 €/kW	150 €/kW bis 300 €/kW
Leistungsinstallationskosten	150 €/kW bis 200 €/kW	35 €/kW bis 65 €/kW
Reaktionszeit	3 ms bis 5 ms	keine Veränderungen erwartet
Betriebsvoraussetzungen	keine	keine
Hauptanwendungsbereiche	Frequenzregelung, Spannungsregelung, Spitzenlastregelung, Lastausgleich, Inselnetze, Elektromobilität, Speicherung von Photovoltaik- oder Windstrom	keine Veränderungen erwartet

<sup>149</sup> Stockhammer U., URANUS Verlag (Hrsg.); Speicherspecial; Sonnenzeitung 3 und 4, 2012  
dort Original Quelle: Fraunhofer ISE

<sup>150</sup> Fuchs G., Lutz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>151</sup> Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. – VDE (Hrsg.); Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene, Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Studie der Energietechnischen Gesellschaft- ETG im VDE; Mai 2015

## Stärken-Schwächen-Analyse von Lithium-Ionen-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-4 beziehen sich auf marktgängige Produkte und greifen eine Auswahl von charakteristischen Eigenschaften als Grundlage für den Technologievergleich auf.<sup>152,153</sup>

**Tabelle 6-4:** Stärken-Schwächen Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Energiedichte und damit vergleichsweise leicht und kompakt</li> <li>▪ Lange Lebensdauer</li> <li>▪ Keine spezifischen Standortanforderungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sensibel gegen Überwärmung</li> <li>▪ Gegebenen Falls Kühlsystem nötig</li> <li>▪ Batteriemanagementsystem nötig</li> <li>▪ Hohe Kosten</li> <li>▪ Hoher Materialressourcenverbrauch</li> </ul>
Möglichkeiten	Bedrohungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Große Nachfrage im Bereich Elektromobilität führt zu reduzierten Preisen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lithiumabbau in wenigen wirtschaftlich schwach entwickelten Ländern mit entsprechenden sozialen Problemlagen</li> <li>▪ Hohe Energiedichte ist für mobile Anwendungen von Vorteil, für stationäre eher gleichgültig</li> </ul>

## Produktbeispiele von für den haustechn. Einsatz geeigneten Lithium-Ionen-Batterien

Die in Abbildung 6-20 gezeigten Produkte demonstrieren die breite Marktverfügbarkeit von Lithium-Ionen-Batteriespeichern im haustechnischen Segment ohne jeglichen Anspruch auf Vollständigkeit. Es ist angesichts der Angebotsvielfalt jedoch darauf hinzuweisen, dass die einzelnen Batterie-Zellen aus denen die Speicher zusammengestellt werden, von deutlich weniger Herstellern angeboten werden, als die Speichereinheiten selbst.

<sup>152</sup> Fuchs G., Lutz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>153</sup> Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. – VDE (Hrsg.); Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene, Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Studie der Energietechnischen Gesellschaft- ETG im VDE; Mai 2015

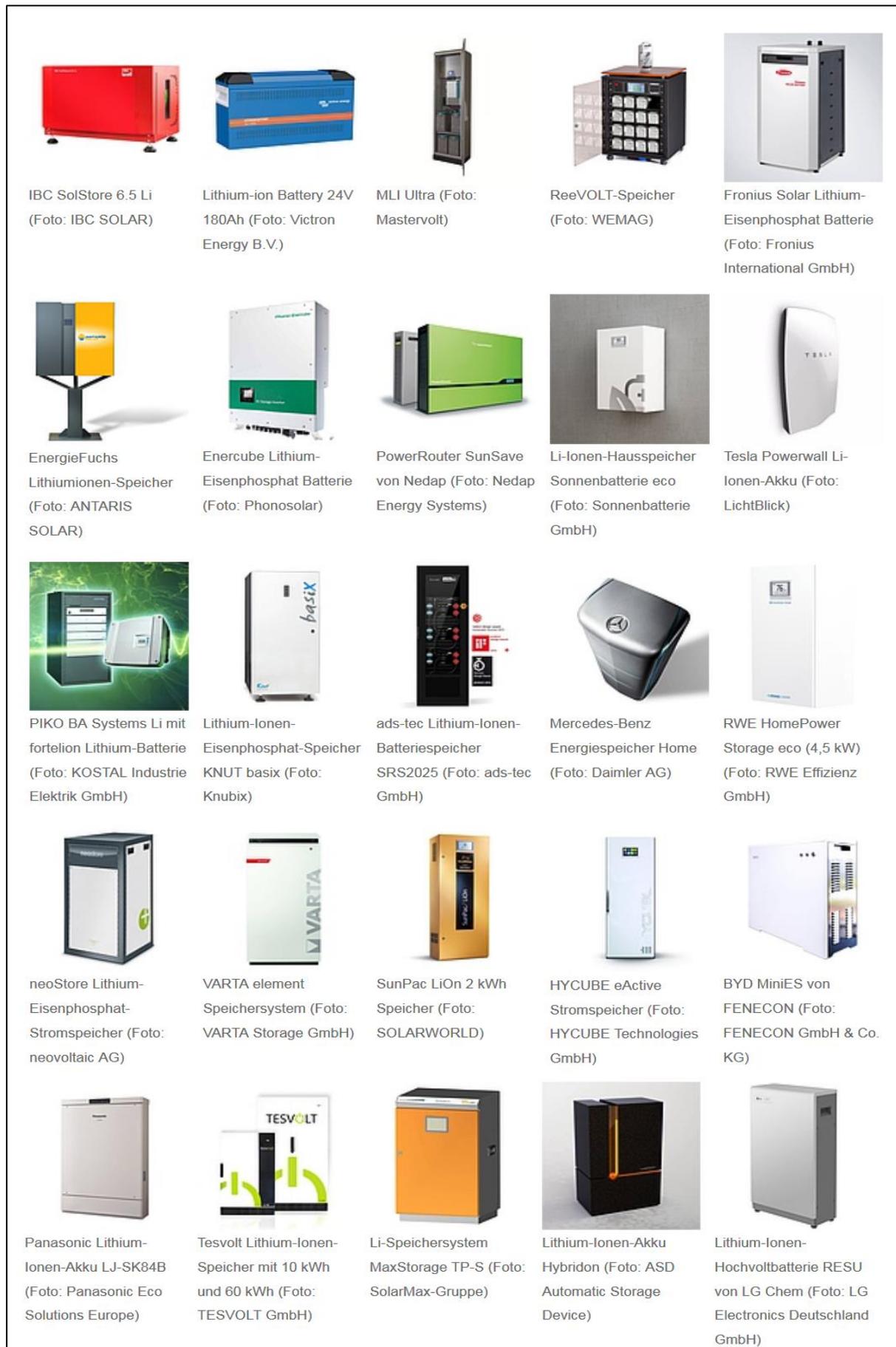


Abbildung 6-20: Auswahl an Lithium-Ionen-Batteriespeichern für haustechnische Anlagen

### 6.2.5.3 Metall-Luft-Batterien

Metall-Luft-Batterien beziehen Energie aus der Reaktion zwischen einer Metallanode etwa aus Eisen oder Nickel mit Sauerstoff, der aus der Umgebungsluft bezogen werden kann. Beispielsweise oxidiert Eisen dabei wie in alltäglichen Situationen beobachtbar an der Kathode zu Rost. Die Entnahme des Sauerstoffs aus der Umgebungsluft sorgt für Gewichtersparnis und ist der Grund, warum Metall-Luft-Batterien besonders hohe Energiedichten erzielen.<sup>154</sup> Abbildung 6-21 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Metall-Luft-Batterie.<sup>155</sup>

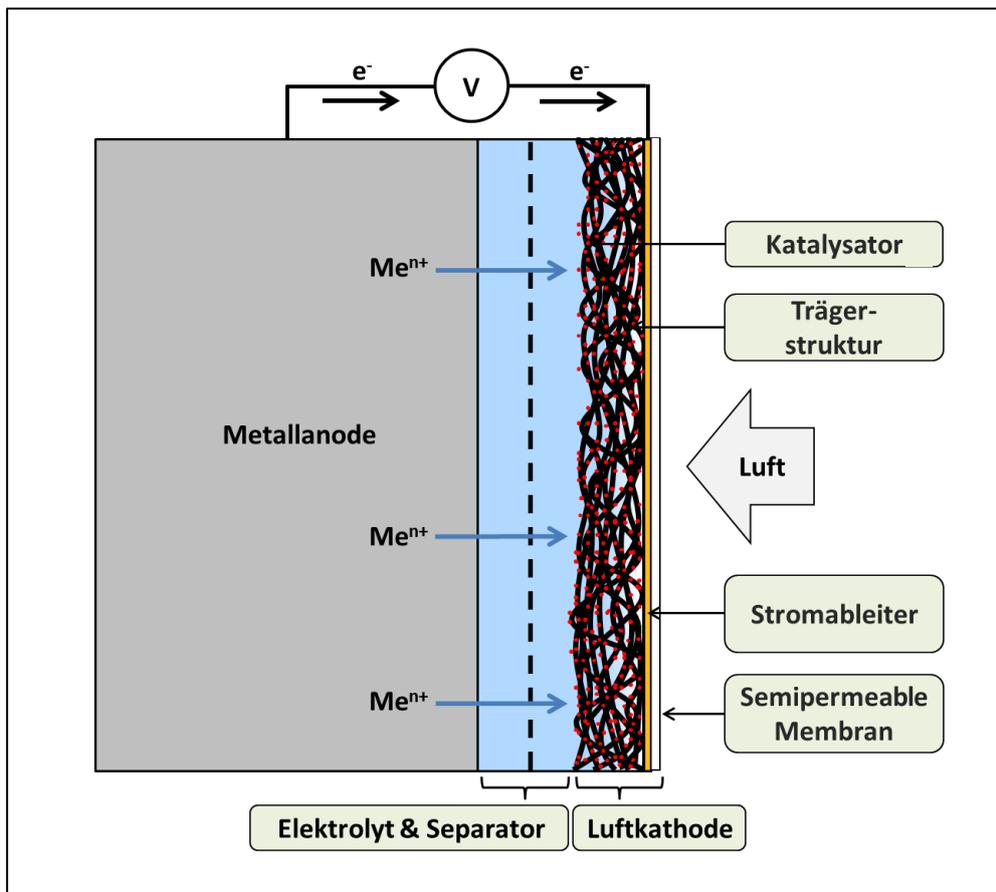


Abbildung 6-21: Aufbauprinzip einer Metall-Luft-Batterie

<sup>154</sup> Weinrich H.; Kathoden für ressourcen-effiziente Metall-Luft-Batterien, Dissertation am Lehrstuhl für Materialien und Prozesse für elektrochemische Energiespeicher und -wandler, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, (bei Zugriff Angabe noch laufend) 2018  
<http://www.iesw.rwth-aachen.de/cms/IESW/Forschung/Doktorarbeiten/~hbme/Henning-Weinrich/>  
(letzter Zugriff: 09.04.2018)

<sup>155</sup> Weinrich H.; Kathoden für ressourcen-effiziente Metall-Luft-Batterien, Dissertation am Lehrstuhl für Materialien und Prozesse für elektrochemische Energiespeicher und -wandler, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, (bei Zugriff Angabe noch laufend) 2018  
<http://www.iesw.rwth-aachen.de/cms/IESW/Forschung/Doktorarbeiten/~hbme/Henning-Weinrich/>  
(letzter Zugriff: 09.04.2018)

Beim Entladen verursachen elektrochemische Reaktionen an der Luftkatode und im elektrisch leitfähigen Elektrolyt jedoch irreversible Schäden. Die Batterie lässt sich daher kaum wiederaufladen. Aktuell sind unterschiedliche Verfahren in Erprobung, die versuchen entweder die Beschädigung der Luftkatode zu minimieren oder eine reversibel Reaktion beim Wiederaufladen zu realisieren.<sup>156,157</sup>

Aktuell werden Metall-Luft-Batterien häufig als Zink-Luft-Knopfzellen, also scheibenförmig ausgeführte Kleinbatterien, in Hörgeräten eingesetzt. Mit ihrer besonders hohe Energiedichte und eine annähernd gleichmäßigen Entladungskurve bei einer maximalen Spannung von 1,65 V bietet die Zink-Luft-Batterie für diese, aber auch für andere Klein- und Kleinstgeräte eine optimierte Stromversorgung.

## Übersicht Kenngrößen und Charakteristika von Metall-Luft-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-5 zeigen einerseits den Rahmen einer aktuellen Produktpalette an Zink-Luft-Knopfzellen<sup>158</sup> und einen wissenschaftlich begründbaren Ausblick für die Entwicklungsperspektive von Zink-Luft und Eisen-Luft-Batterien in den kommenden 10 Jahren.<sup>159,160,161,162</sup>

**Tabelle 6-5:** Kenngrößen und Charakteristika von Metall-Luft-Batterien

Kenngröße Charakteristikum	aktuell Knopfzelle	Entwicklungsperspektive stationärer Speicher
Wirkungsgrad <small>mit Umrichter</small>	<small>Knopfzelle ohne Umrichter</small>	80 %
Energiedichte	entspricht etwa 1,43 Wh/L bis 1,67 Wh/L 294 Wh/kg bis 442 Wh/kg	entspricht etwa 8Wh/L bis 35Wh/L 1.600 Wh/kg bis 8.600 Wh/kg
Leistungsdichte	120 W/kg	330 W/kg bis 2.000 W/kg
Lebensdauer <small>nach Zyklen</small>	<small>Knopfzelle als Primärzellen lediglich</small> einzyklisch	200 bis 10.000

<sup>156</sup> Weinrich H., Come J., Tempel H., Kungl H., Eichel R., Balke N.; Understanding the nanoscale redox-behavior of iron-anodes for rechargeable iron-air batteries; Nano Energy 41; 2017  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285517306262?via%3Dihub>  
(letzter Zugriff: 09.04.2018)

<sup>157</sup> Niederhäuser A.; Newsplattform für erneuerbare Energien und Energieeffizienz in der Schweiz, eecomm GmbH (Hrsg.); Luft-Batterien, Hightech-Lösung für die Energiewende oder Luftnummer?, Dezember 2013  
<https://www.ee-news.ch/de/solar/article/27703/luft-batterien-hightech-loesung-fuer-die-energiewende-oder-luftnummer> (letzter Zugriff: 09.04.2018)

<sup>158</sup> The Gillette Company; DURACELL® zinc-air cells; Technical Bulletin, 2004

<sup>159</sup> Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung, Grundlagen der Elektrochemie IEK-9: Energie sticht, Batteriequartett; April 2014  
[http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-9/DE/Batteriequartett.pdf?\\_\\_blob=publication-file](http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-9/DE/Batteriequartett.pdf?__blob=publication-file) (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<sup>160</sup> Anmerkung aus VDE, 2015, S.26: Der Hersteller EOS präsentierte 2013 die Entwicklung einer Zink-Luft-Batterie für 160 \$/kWh mit 10.000 Zyklen und 30 Jahren kalendarischer Lebensdauer. Im Jahr 2014 sollte die kommerzielle Produktion hochlaufen und erste Systeme ins Feld gebracht werden. Trotz aller positiven Meldungen befinden sich derzeit keine Metall-Luft-Batteriesysteme auf dem freien Markt.

<sup>161</sup> Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. – VDE (Hrsg.); Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene, Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Studie der Energietechnischen Gesellschaft- ETG im VDE; Mai 2015

<sup>162</sup> Deutsches Clean Tech Institute (Hrsg.); Speichertechnologien 2014, Technologien, Anwendungsbereiche, Anbieter; Mai 2014 [https://www.ibesalliance.org/fileadmin/content/download/presentation/DCTI\\_Speicher-technologiestudie.pdf](https://www.ibesalliance.org/fileadmin/content/download/presentation/DCTI_Speicher-technologiestudie.pdf) (letzter Zugriff: 11.04.2018)

Lebensdauer <small>kalendrisch</small>	40 bis 50 Tage	15 bis 30 Jahre
Entladetiefe <small>bis Schlussspannung</small>	100 %	keine Angaben
Selbstentladung	0,005 % pro Tag <small>wenn versiegelt sonst 2% pro Tag bis zur Erschöpfung</small>	bis 2% pro Tag
Energieinstallationskosten	<small>Knopfzelle nicht haustechnisch integriert</small>	ab 130 €/kW
Leistungsinstallationskosten	<small>Knopfzelle nicht haustechnisch integriert</small>	35 €/kW bis 65 €/kW
Reaktionszeit	<small>Unerheblich da Knopfzellen zum Betrieb unter konstanter Dauerentladung</small>	Millisekunden-Bereich <sup>163,164</sup>
Betriebsvoraussetzungen	<small>Performance benötigt Luftzufuhr daher abhängig von Luftfeuchte und -temperatur</small>	<small>Luftzufuhr bzw. Sauerstoffabtransport</small> Betriebstemperatur rund 60°C
Hauptanwendungsbereiche	Klein- und Kleinstverbraucher	Elektromobilität und stationärer haustechnischer Einsatz vorstellbar

### Produktbeispiele von für den haustechnischen Einsatz geeigneten Metall-Luft-Batterien

Auf Grund der theoretisch erreichbaren extrem hohen Energiedichten von Metall-Luft-Batterien gilt diese Speichertechnologie für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche, auch den stationären Einsatz, als zukunftspotenzialträchtig. Allerdings befinden sich derzeit keine wiederaufladbares Metall-Luft-Batteriesysteme auf dem Markt, das den technischen Einsatz erlaubt.<sup>165</sup>

#### 6.2.5.4 Natrium-Batterien

Natrium-Schwefel-Batterien und Natrium-Nickelchlorid-Batterien<sup>166</sup> arbeiten mit einem festen natriumhaltigen Aluminium-Oxid Elektrolyten, was sie grundsätzlich von anderen elektrochemischen Speicherzellen unterscheidet, die mit flüssigen Elektrolyten ausgestattet sind. Abbildung 6-22 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Natrium-Schwefel-Batterie,<sup>167</sup> Abbildung 6-23 jenen einer Natrium-Nickelchlorid-Batterie.<sup>168,169,170</sup>

<sup>163</sup> Anmerkung in Khammas A., 2017 : Das Team um Pucheng Pei berichtet außerdem von Reaktionszeiten in Millisekunden, womit die neuen ZAFCS auch in Fahrzeugen mit schnellen, dynamischen Anforderungen angewendet werden könnten.

<sup>164</sup> Khammas A., Das Buch der Synergie, 2017  
Privates elektronisches Kompendium, - wissenschaftliche Qualität nicht zweifelsfrei evaluierbar  
[http://www.buch-der-synergie.de/c\\_neu\\_html/c\\_10\\_o3\\_batterien\\_u.htm](http://www.buch-der-synergie.de/c_neu_html/c_10_o3_batterien_u.htm) (letzter Zugriff: 11.04.2018)

<sup>165</sup> Anmerkung aus VDE, 2015, S.26: Der Hersteller EOS präsentierte 2013 die Entwicklung einer Zink-Luft-Batterie für 160 \$/kWh mit 10.000 Zyklen und 30 Jahren kalendrischer Lebensdauer. Im Jahr 2014 sollte die kommerzielle Produktion anlaufen und erste Systeme ins Feld gebracht werden. Trotz aller positiven Meldungen befinden sich derzeit aber keine derartigen Metall-Luft-Batteriesysteme auf dem freien Markt.

<sup>166</sup> Auch als ZEBRA-Batterie bezeichnet als englische Akronym für Zero Emission Battery Research Activities

<sup>167</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org  
<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/natrium-schwefel-batterie.html> (letzter Zugriff: 27.03.2018)

<sup>168</sup> Abbildung zusammengeführt und bearbeitet aus: EASE, 2016 und Lichtenberger, 2016

<sup>169</sup> European Association for Storage of Energy - EASE (Ed.), Energy Storage Technology Descriptions: Sodium-Nickel-Chloride Battery, 2016  
[http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE\\_TD\\_Electrochemical\\_NaNiCl2.pdf](http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Electrochemical_NaNiCl2.pdf)  
(letzter Zugriff: 03.04.2018)

<sup>170</sup> Lichtenberger W., Elektrochemische Speicher, Hochtemperatur-Batterien, 2016  
<http://docplayer.org/1841407-Elektrochemische-speicher-hochtemperatur-batterien.html>  
(letzter Zugriff: 03.04.2018)

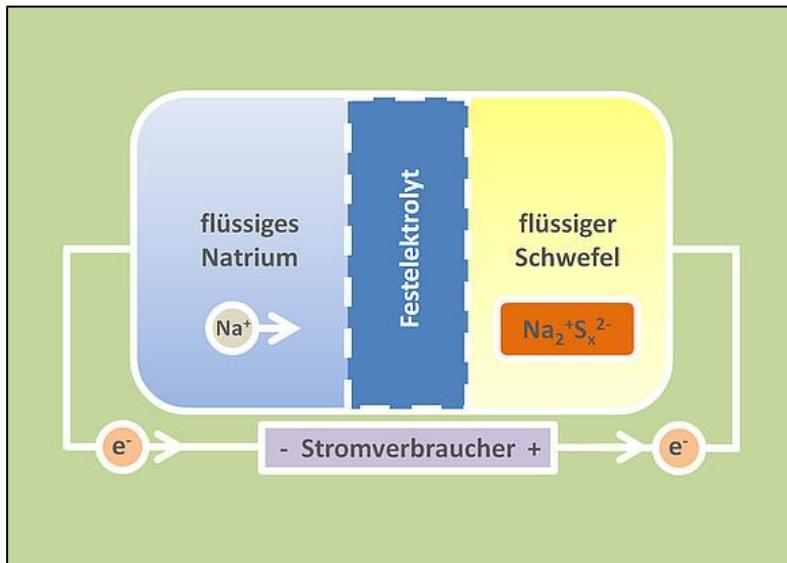


Abbildung 6-22: Aufbauprinzip einer Natrium-Schwefel-Batterie

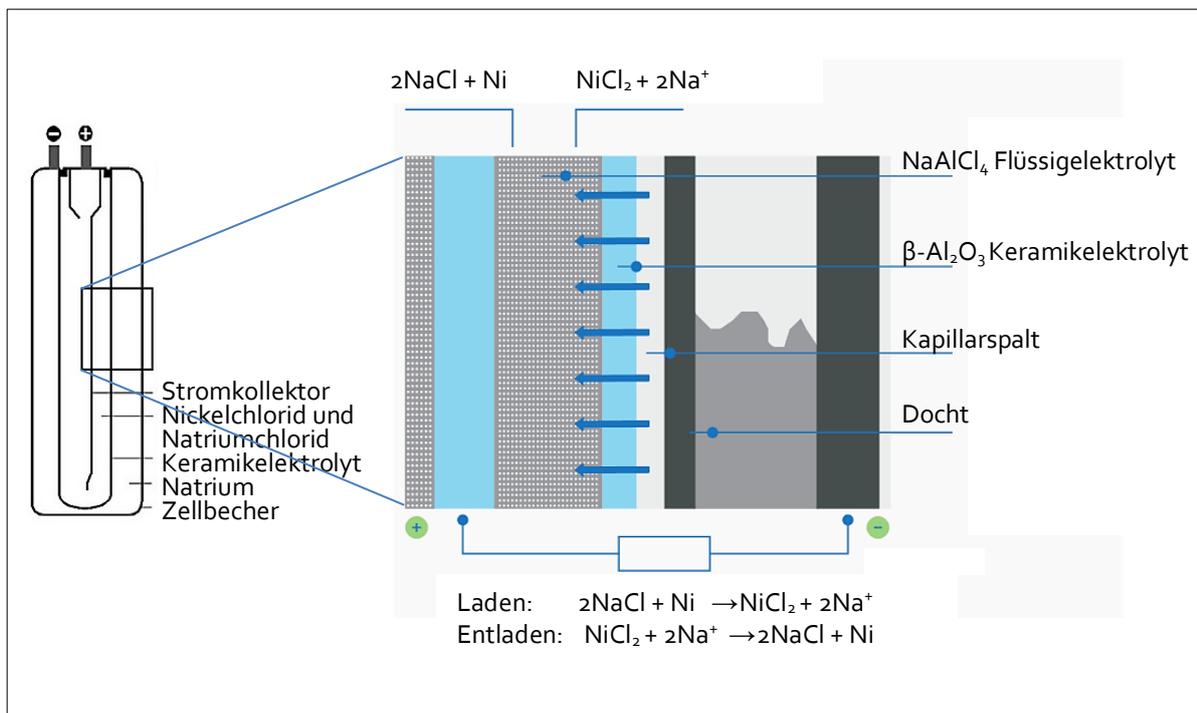


Abbildung 6-23: Aufbauprinzip einer Natrium-Nickelchlorid-Batterie

Um eine ausreichend hohe Ionenleitfähigkeit zu erzielen und Strom speichern beziehungsweise abzugeben zu können, müssen die aktiven Massen in flüssigen Zustand versetzt werden. Dazu wird eine Betriebstemperatur zwischen 270 °C und 350 °C benötigt. Entsprechend zählen Natrium-Schwefel-Batterien und Natrium-Nickelchlorid-Batterien zur Gruppe der sogenannten Thermal- beziehungsweise Hochtemperaturbatterien. Kühlt eine Natrium-Schwefel- oder eine Natrium-Nickelchlorid-Batterie ab, kommt der Lade- oder Entladevorgang zum Erliegen. Darüber hinaus besteht die Gefahr der Rissbildung im Elektrolyten. Bei täglicher Verwendung kann die Batterie durch ihre eigene Reaktions-

wärme und eine passend ausgelegte Isolation auf Betriebstemperatur gehalten werden. Entsprechend eignen sich Batterien dieses Typs für Anwendungen mit täglichen Zyklen, nicht jedoch für Einsätze mit langen Perioden ohne Nutzung etwa zur Notstromversorgung.<sup>171</sup>

Die Natrium-Schwefel-Batterie wurde zu Beginn der 1970er Jahre entwickelt und wegen ihrer hohen Leistungsdichte damals beispielsweise in der Satellitentechnik eingesetzt. Aktuell sind Natrium-Schwefel-Batterien und Natrium-Nickelchlorid-Batterien nur bei einzelnen Herstellern verfügbar. Weltweit ist eine Kapazität von rund 300 MWh Natrium-Schwefel-Batterien installiert. Vorwiegend in Japan kommt dieser Batterietyp bei stationären Anwendungen, etwa dem Lastausgleich von Windkraftanlagen zum Einsatz wie Abbildung 6-24 zeigt.<sup>172,173,174</sup>



**Abbildung 6-24:** Modulare Natrium-Schwefel-Batterieeinheiten, Windkraftanlage, Futamata, Japan

Typische Anwendungsbereiche für Natrium-Nickelchlorid-Batterien sind Antriebe für die Elektromobilität und stationäre Anwendungen im Bereich des Lastausgleichs etwa zur Spitzenlastregelung.

<sup>171</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>172</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org  
<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/natrium-schwefel-batterie.html> (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<sup>173</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>174</sup> [https://www.ngk.co.jp/nas/case\\_studies/rokkasho/](https://www.ngk.co.jp/nas/case_studies/rokkasho/) (letzter Zugriff: 04.04.2018)

## Übersicht - Kenngrößen und Charakteristika von Natrium-Schwefel- und Natrium-Nickelchlorid-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-6 fassen die wenigen am Markt verfügbaren Produkte zusammen und verstehen sich als Grundlage für den Technologievergleich. Einzelproduktwerte können von diesen Angaben abweichen. Die Entwicklungsperspektive bezieht sich auf einen Zeitraum von etwa 10 Jahren.<sup>175,176,177,178</sup>

**Tabelle 6-6:** Kenngrößen und Charakteristika von Natrium-Schwefel-Batterien und Natrium-Nickelchlorid-Batterien

Kenngröße Charakteristikum	aktuell	Entwicklungsperspektive
Wirkungsgrad <small>mit Umrichter</small>	68 % bis 75 %	78 % bis 83 %
Energiedichte	150 Wh/L bis 250 Wh/L	Veränderungen erwartet <small>jedoch nicht quantifizierbar</small>
Leistungsdichte	100 W/kg bis 120 W/kg	Veränderungen erwartet <small>jedoch nicht quantifizierbar</small>
Lebensdauer <small>nach Zyklen</small>	5.000 bis 10.000	5.000 bis 10.000
Lebensdauer <small>kalendrisch</small>	15 bis 20 Jahre	20 bis 30 Jahre
Entladetiefe <small>bis Schlussspannung</small>	100 %	100 %
Selbstentladung	10% pro Tag	Veränderungen erwartet <small>jedoch nicht quantifizierbar</small>
Energieinstallationskosten	500 €/kW bis 700 €/kW	80 €/kW bis 150 €/kW
Leistungsinstallationskosten	150 €/kW bis 200 €/kW	35 €/kW bis 65 €/kW
Reaktionszeit	3 ms bis 5 ms	keine Veränderungen erwartet
Betriebsvoraussetzungen	keine	keine
Hauptanwendungsbereiche	Frequenzregelung, Spitzenlastregelung, Lastausgleich, Inselnetze, Speicherung von Photovoltaik- oder Windstrom, Elektromobilität	Maximierung des Eigenstromverbrauchs Wohn- und Gewerbegebäude (Na-NiCl <sub>2</sub> )

<sup>175</sup> Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung, Grundlagen der Elektrochemie IEK-9: Energie sticht, Batteriequartett; April 2014  
[http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-9/DE/Batteriequartett.pdf?\\_\\_blob=publication-file](http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-9/DE/Batteriequartett.pdf?__blob=publication-file) (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<sup>176</sup> Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018  
<http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/batterie-kompendium/sekundaere-batterie/thermalbatterien/natrium-nickelchlorid-batterie/> (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<sup>177</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>178</sup> European Association for Storage of Energy - EASE (Ed.), Energy Storage Technology Descriptions: Sodium-Nickel-Chloride Battery, 2016  
[http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE\\_TD\\_Electrochemical\\_NaNiCl2.pdf](http://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/07/EASE_TD_Electrochemical_NaNiCl2.pdf) (letzter Zugriff: 03.04.2018)

## Stärken-Schwächen-Analyse von Natrium-Schwefel- u Natrium-Nickelchlorid-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-7 beziehen sich auf die wenigen am Markt verfügbaren Produkte und greifen eine Auswahl von charakteristischen Eigenschaften als Grundlage für den Technologievergleich auf.<sup>179</sup>

**Tabelle 6-7:** Stärken-Schwächen Übersicht zu Natrium-Schwefel-Batterien und Natrium-Nickelchlorid-Batterien

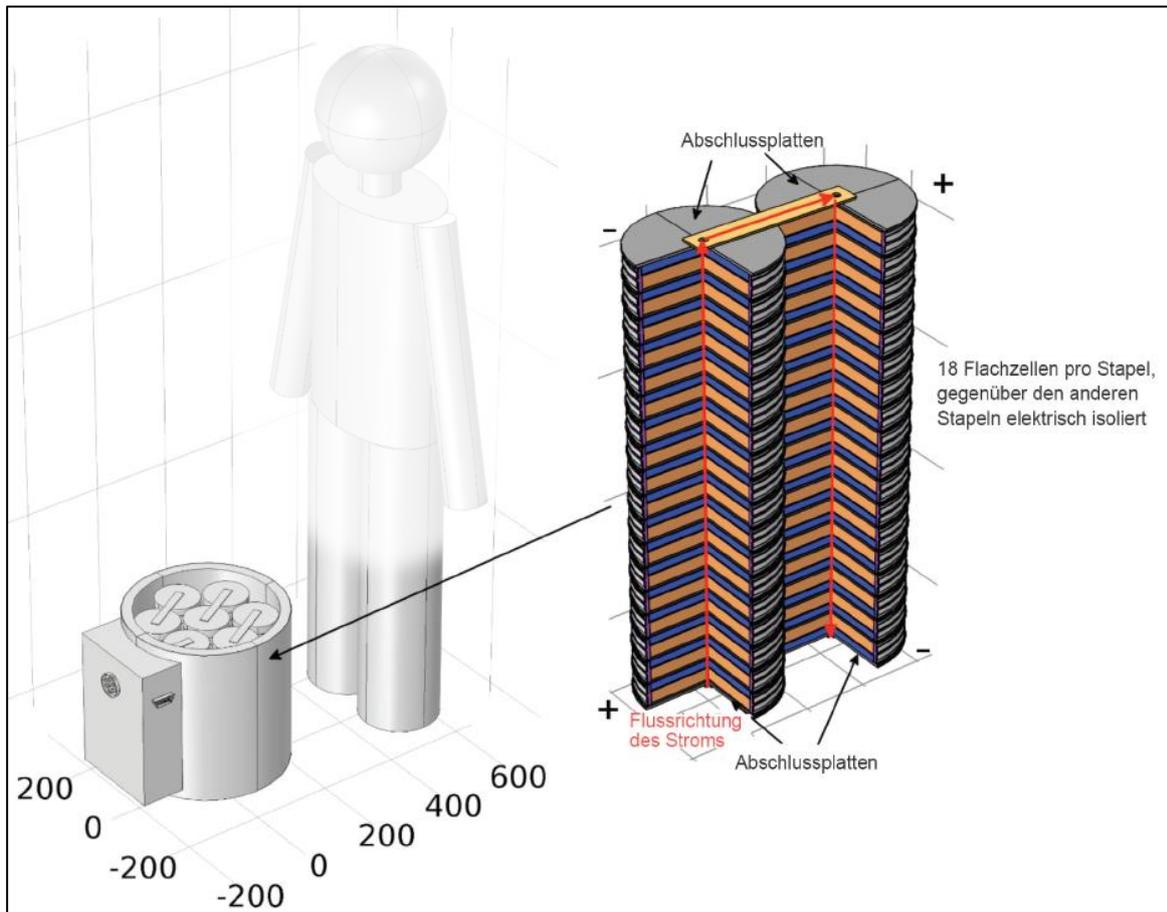
Natrium-Schwefel- und Natrium-Nickelchlorid-Batterien	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mittlere Energiedichte</li> <li>▪ Lange Lebensdauer</li> <li>▪ Kostengünstige und verfügbare Basisrohstoffe (NaS)</li> <li>▪ Erfahrungen mit stationären Anlagen</li> <li>▪ Keine lokalen Voraussetzungen</li> <li>▪ Tieftemperaturbeständigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe thermische Verluste im Standby-Modus</li> <li>▪ Gefahrenpotentiale durch hohe Betriebstemperaturen</li> <li>▪ Teurer Basisrohstoff Nickel (Na-NiCl<sub>2</sub>)</li> <li>▪ Nur wenige Hersteller</li> <li>▪ Gesundheitsgefährdung bei Leckage (NaS)</li> </ul>
Möglichkeiten	Bedrohungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Anbietererweiterung durch Auslaufen von Patenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konkurrenz mit Blei-Säure-Batterien</li> <li>▪ Konkurrenz mit Lithium-Ionen-Batterien</li> </ul>

## Produktbeispiele von für den haustechnischen Einsatz geeigneten Natrium-Schwefel- und Natrium-Nickelchlorid-Batterien

Auf Grund der angedeuteten Umbruchsituation am Markt konnten erste Batteriespeicher auf Natrium-Schwefel - beziehungsweise Natrium-Nickelchlorid Basis entwickelt und in haustechnische Anlagen von Wohngebäuden integriert werden. Eine breite Marktdurchdringung besteht derzeit jedoch nicht. Seit 2015 ist ein entsprechender aus 126 in Serie geschalteten Natrium-Nickelchlorid-Zellen aufgebauter Batteriespeicher in Bern, Schweiz im Einsatz. Bei einer Spannung von 325 V speichert diese Batterie insgesamt 7 kWh elektrischer Energie und ergänzt so eine photovoltaische Hausanlage mit rund 7 kWp Leistung. Abbildung 6-25 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Natrium-Nickelchlorid-Batteriespeichers.<sup>180</sup>

<sup>179</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>180</sup> Bundesamt für Energie BFE; Die Alternative zu Teslas 'Powerwall', Fachbeitrag zu den Erkenntnissen eines Entwicklerteams im Bereich Akkumulatoren und Superkondensatoren, August 2015



**Abbildung 6-25:** Aufbau des Natrium-Nickelchlorid-Batteriespeichers für haustechnische Anlagen

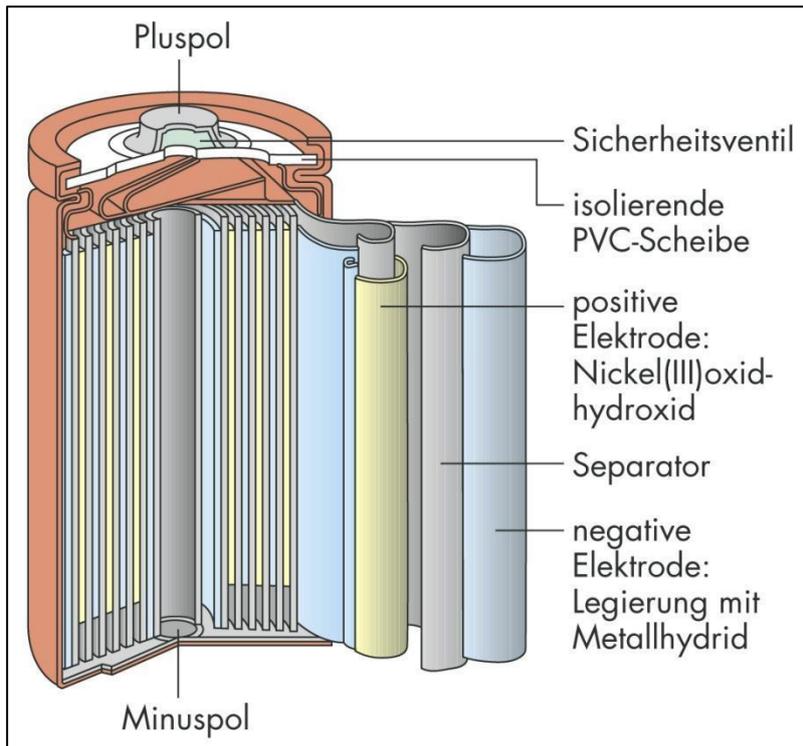
### 6.2.5.5 Nickel-Metallhydrid-Batterien

Die Nickel-Metallhydrid-Batterie kann als Weiterentwicklung der im Wesentlichen baugleichen Nickel-Cadmium-Batterie angesehen werden. Um die Umweltverträglichkeit der Nickel-Cadmium-Batterie in Folge einer Vorschriftenverschärfung entsprechend zu verbessern, wurde das toxische Cadmium durch alternative Metalllegierungen ersetzt. Gleichzeitig konnte eine Erhöhung der Energiedichte erreicht werden.

In Nickel-Metallhydrid-Batterien enthält die Katode Nickelhydroxid. Die Anode besteht oft aus einer Legierung aus Lanthan und geeigneten Metallen. Sie ist in der Lage, Wasserstoff zu binden oder diesen in Form positiv geladener Wasserstoffteilchen abzugeben. Die Elektrolyte sind in dem meisten Fällen verdünnte Kalilauge mit denen ein Separator durchtränkt wird.<sup>181</sup> Abbildung 6-26 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Nickel-Metallhydrid-Batterie mit der typischen gewickelten Innenstruktur.<sup>182</sup>

<sup>181</sup> Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018 <http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/batterie-kompendium/sekundaere-batterie/nickel-metallhydrid-batterien/> (letzter Zugriff: 10.04.2018)

<sup>182</sup> <http://docplayer.org/64807311-10-teil-redoxreaktionen.html> (letzter Zugriff: 10.04.2018)



**Abbildung 6-26:** Aufbauprinzip einer Nickel-Metallhydrid-Batterie

Herkömmliche Nickel-Metallhydrid-Batterien zeigen eine relativ rasche Selbstentladung. Um dieser entgegen zu wirken wurden Batterien mit erhöhtem inneren Widerstandes entwickelt, die unter der Bezeichnung LSD-Nickel-Metallhydrid-Batterien als englisches Akronym für Low Self Discharge im Markt eingeführt sind. In dieser Ausführung eignet sich die Nickel-Metallhydrid-Batterie für Geräte mit mittlerer Stromaufnahme wie Taschenlampen, schnurlose Festnetztelefone, elektrische Zahnbürsten und Ähnliches. Weltweit gibt es trotz der breiten Marktdurchdringung der Nickel-Metallhydrid-Batterie nur wenige Zellen-Hersteller.<sup>183,184</sup>

<sup>183</sup> Schnabel P.; Elektronik-Kompendium.de, Stand nach: Die Netzwerktechnik-Fibel, 4. Auflage, 2016  
<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/1101251.htm> (letzter Zugriff: 10.04.2018)

<sup>184</sup> Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018  
<http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/batterie-kompendium/sekundaere-batterie/nickel-metallhydrid-batterien/> (letzter Zugriff: 10.04.2018)

## Übersicht - Kenngrößen und Charakteristika von Nickel-Metallhydrid-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-8 fassen die wenigen am Markt verbliebenen Produkte zusammen und verstehen sich als Grundlage für den Technologievergleich. Einzelproduktwerte können von diesen Angaben abweichen. Aus aktueller Sicht besteht für die stationäre Anwendung keine wissenschaftlich fundierbare Entwicklungsperspektive.<sup>185,186,187,188</sup>

**Tabelle 6-8:** Kenngrößen und Charakteristika von Nickel-Metallhydrid-Batterien

Kenngröße Charakteristikum	aktuell	Entwicklungsperspektive
Wirkungsgrad <small>mit Umrichter</small>	70 % bis 80 %	
Energiedichte	40 Wh/kg bis 80 Wh/kg	
Leistungsdichte	100 W/kg bis 600W/kg	
Lebensdauer <small>nach Zyklen</small>	500 bis 2.000	
Lebensdauer <small>kalendarisch</small>	5 Jahre	
Entladetiefe <small>bis Schlussspannung</small>	100 %	
Selbstentladung	0,7% pro Tag	
Energieinstallationskosten	250 €/kW	
Leistungsinstallationskosten	150 €/kW bis 200 €/kW	
Reaktionszeit	3 ms bis 5 ms	
Betriebsvoraussetzungen	keine	
Hauptanwendungsbereiche	Taschenlampen, schnurlose Festnetztelefone, elektrische Zahnbürsten, Speicherung von Photovoltaik- oder Windstrom, Elektromobilität	Weitere Marktverdrängung im Bereich stationäre Speicher erwartet

<sup>185</sup> Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung, Grundlagen der Elektrochemie IEK-9: Energie sticht, Batteriequartett; April 2014  
[http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-9/DE/Batteriequartett.pdf?\\_\\_blob=publication-file](http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-9/DE/Batteriequartett.pdf?__blob=publication-file) (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<sup>186</sup> Stockhammer U., URANUS Verlag (Hrsg.); Speicherspecial; Sonnenzeitung 3 und 4, 2012  
 dort Original Quelle: Fraunhofer ISE

<sup>187</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>188</sup> Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018  
<http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/batterie-kompendium/sekundaere-batterie/nickel-metallhydrid-batterien/> (letzter Zugriff: 10.04.2018)

## Stärken-Schwächen-Analyse von Nickel-Metallhydrid-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-9 beziehen sich auf die wenigen am Markt verfügbaren Produkte und greifen eine Auswahl von charakteristischen Eigenschaften als Grundlage für den Technologievergleich auf.<sup>189,190</sup>

**Tabelle 6-9:** Stärken-Schwächen Übersicht zu Nickel-Metallhydrid-Batterien

Nickel-Metallhydrid-Batterien	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einfaches Batteriemangement</li> <li>▪ rasch aufladbar</li> <li>▪ Keine lokalen Voraussetzungen</li> <li>▪ umweltfreundlichere Zellchemie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Selbstentladungsrate (verringert bei LSD Bauart)</li> <li>▪ Teurer Basisrohstoff Nickel</li> <li>▪ Nur wenige Hersteller</li> <li>▪ Memory Effekt (Lademusterbildung)</li> </ul>
Möglichkeiten	Bedrohungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entwicklungen für Geräten mittlerer Stromabnahme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konkurrenz mit Blei-Säure-Batterien</li> <li>▪ Konkurrenz mit Lithium-Ionen-Batterien</li> </ul>

## Produktbeispiele von f. d. haustechn. Einsatz geeigneten Nickel-Metallhydrid-Batterien

Nickel-Metallhydrid-Batterien sind grundsätzlich für den stationären Einsatz in haustechnischen Anlagen geeignet. Auf Grund ihrer vergleichsweise langen Ladedauer und ihre geringen Zyklenlebensdauer sind sie jedoch in Hinsicht auf die Standardisierung der Batteriespeicher nicht mehr weiterentwickelt worden und folglich weitgehend aus dem Markt verschwunden.<sup>191,192</sup>



**Abbildung 6-27:** Exemplarische Nickel-Metallhydrid -Batteriespeichern für haustechnische Analgen

<sup>189</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

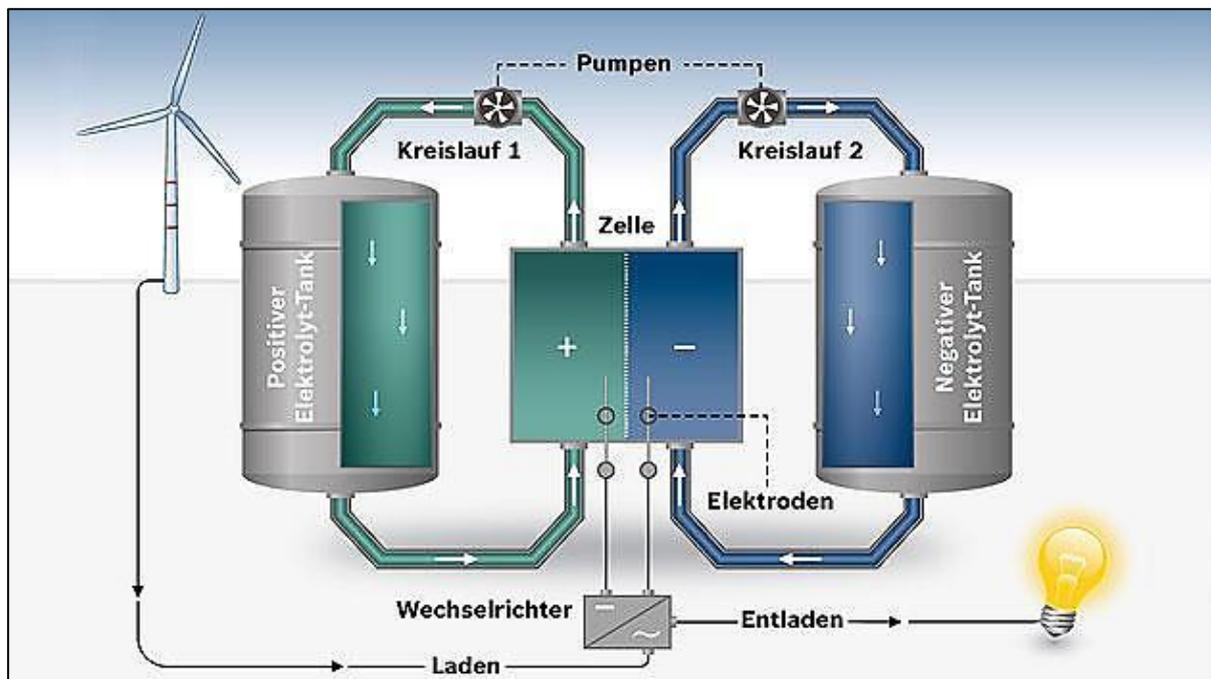
<sup>190</sup> Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018 <http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/batterie-kompendium/sekundaere-batterie/nickel-metallhydrid-batterien/> (letzter Zugriff: 10.04.2018)

<sup>191</sup> [https://www.akkuline.de/12v-akkupack-4-5ah-nimh-bf15947/15947\\_item.aspx](https://www.akkuline.de/12v-akkupack-4-5ah-nimh-bf15947/15947_item.aspx) (letzter Zugriff: 10.04.2018)

<sup>192</sup> <http://www.batteryspace.com/Custom-NiMH-Battery-Pack-18V-13-Ah-15xF-234-wh-Hump.aspx> (letzter Zugriff: 11.04.2018)

### 6.2.5.6 Redox-Flow-Batterien

Die Besonderheit von Redox-Flow-Batterien liegt in der Unterteilung der galvanischen Zelle durch eine Membran, sodass zwei Halbzellen entstehen. Die Elektrolyten fließen durch die beiden Halbzellen und an der Membran vorbei wo die eigentliche chemische Reaktion zur Energieumwandlung, entweder eine Reduktion oder eine Oxydation, stattfindet. Bei Redox-Flow-Batterien liegt die eigentliche elektrochemische Reaktionseinheit als isolierte Zelleinheit zumeist mehrfach und zu sogenannten Zellstacks zusammengebündelt vor. Diese Ausbildung bedingt und ermöglicht die Auslagerung der Elektrolyten in externe Tanks außerhalb dieser zentralen Reaktionseinheit. Die im Elektrolyten chemisch gespeicherte Energiemenge kann derart über die Tankgröße variiert werden. Selbstentladungen können auf Grund dieses speziellen Aufbaus weitgehend vermieden werden. Darüber hinaus sind mehr als 10.000 Ladezyklen und damit Lebensdauern von 20 Jahren und mehr möglich.<sup>193,194</sup> Abbildung 6-28 zeigt den beschriebenen Aufbau und das Einbindungsprinzip einer Redox-Flow-Batterie.<sup>195</sup>



**Abbildung 6-28:** Aufbau- und Einbindungsprinzip einer Redox-Flow-Batterie

Die Redox-Flow-Batterie zeigt einen hohen Wirkungsgrad. Sie kann ihre technologieimmanenten Vorteile speziell im stationären Betrieb im mittleren und großen Maßstab entfalten, da über das Fassungsvermögen der Tanks die Energiekapazität und damit die Fristigkeit der Speicherung gesteuert werden kann. Mit dieser Technologie wird es beispielsweise möglich wöchentliche Schwankungen der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auszugleichen. Die Energiedichte der Batterie wird

<sup>193</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org

<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/batterieforschung/batterieforschung-seite2.html> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<sup>194</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>195</sup> © Bosch

[https://www.smarterworld.de/smart-power/sonstige/?\\_aid=111973&gid=4809](https://www.smarterworld.de/smart-power/sonstige/?_aid=111973&gid=4809) (letzter Zugriff: 06.04.2018)

durch die Zellspannung und die Konzentration der Elektrolyten bestimmen. Häufig zur Anwendung kommen ionische Lösungen von Titan, Chrom, Vanadium oder Schwefel. Die Elektroden von Redox-Flow-Batterien bestehen zumeist aus Graphit.<sup>196,197</sup>

### Redox-Flow-Vanadium-Batterie

In Redox-Flow-Vanadium-Batterien sind die Redoxreaktionen in beiden Halbzellen Vanadium basiert. Die anodenseitige Elektrolytlösung enthält Vanadylsulfat, das zu fünfwertigen Vanadium-Ion oxidiert wird. Die katodenseitige Elektrolytlösung enthält Vanadium(III)-sulfat, welches zu zweiwertigem Vanadiumsalz reduziert wird. Stationäre Vanadium-Redox-Flow-Batterien sind in verschiedenen modular skalierbaren Größen erhältlich und stellen derzeit die größte installierte Leistung dieser Batteriespeichertechnologie.<sup>198,199</sup> Abbildung 6-29 zeigt eine japanische Anlage mit 15 MW Leistung zum Lastausgleich eines Solarkraftwerkes.<sup>200</sup>



**Abbildung 6-29:** Modulare Redox-Flow-Vanadium-Batterieeinheiten, Solarkraftwerk, Abira, Japan

<sup>196</sup> Doelling R. © Copyright energie-experten.org  
<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/batterieforschung/batterieforschung-seite2.html> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<sup>197</sup> Fuchs G., Lenz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>198</sup> Tübke J., Fischer P., Noack J.; Redox-Flow-Batterien als stationäre Energiespeicher, Stand und Perspektiven, Vortragsunterlagen Fraunhofer Institut für Chemische Technologie – ICT, März 2014  
[http://www.energie-und-chemie.de/fileadmin/downloads/Service\\_und\\_Informationen/Presse\\_Oeffentlichkeitsarbeit/Sonstige/Presentation\\_TAK-ENERGIE\\_\\_2014-03-27\\_Tuebke\\_FhG\\_ICT.pdf](http://www.energie-und-chemie.de/fileadmin/downloads/Service_und_Informationen/Presse_Oeffentlichkeitsarbeit/Sonstige/Presentation_TAK-ENERGIE__2014-03-27_Tuebke_FhG_ICT.pdf) (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<sup>199</sup> Fuchs G., Lenz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>200</sup> <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1404/21/news018.html> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

## Redox-Flow-Zink-Bromid-Batterie und Redox-Flow-Zink-Brom-Batterie

Neben der Redox-Flow-Vanadium-Batterie sind auch die Redox-Flow-Zink-Bromid-Batterie und die Redox-Flow-Zink-Brom-Batterie am Markt verfügbar. Die Redox-Flow-Zink-Brom-Batterie wird als Hybrid-Redox-Flow-Batterie bezeichnet, da während des Ladevorganges Zink an der Elektrode abgeschieden wird und das System in diesem Zustand und Teilbereich keinem Fluss unterliegt.<sup>201,202</sup>

## Weitere Redox-Flow-Batterietechnologien

Neben der Redox-Flow-Vanadium-Batterie und der Redox-Flow-Zink-Bromid-Batterie beziehungsweise Redox-Flow-Zink-Brom-Batterie liegen ausgehend von einer Vielzahl an Redoxreaktionspaaren weitere Redox-Flow-Batterien vor oder befinden sich in Entwicklung. Zu diesen zählen: die Redox-Flow-Vandium-Bromid-Batterie, die Redox-Flow-Polysulfid-Bromid-Batterie, die Redox-Flow-Vanadium-Luft-Batterie, die Redox-Flow-Natriumchlorid-Batterie, die Redox-Flow-Uran-Batterie, die Redox-Flow-Zink-Eisenzyanid-Batterie,...<sup>203,204</sup>

## Übersicht - Kenngrößen und Charakteristika von Redox-Flow-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-10 beziehen sich auf die vorwiegend am Markt verfügbaren Produkte Redox-Flow-Vanadium-Batterie und Redox-Flow-Zink-Brom-Batterie. Sie verstehen sich als Grundlage für den Technologievergleich. Einzelproduktwerte können von diesen Angaben abweichen. Die Entwicklungsperspektive bezieht sich auf einen Zeitraum von etwa 10 Jahren.<sup>205,206,207</sup>

---

<sup>201</sup> Hempelmann R., Baumgarten J., Britz A., Vijayaratnam V., Schley B.; Batterien als Speicher für regenerative Energien; in: Hannig M. (Hrsg.); Forschung, Magazin Universität des Saarlandes, 1/2014 S. 4-11., Mai 2014

[https://www.uni-saarland.de/fileadmin/user\\_upload/Campus/Forschung/forschungsmagazin/2014/Saarland\\_Forschungsmagazin1.pdf](https://www.uni-saarland.de/fileadmin/user_upload/Campus/Forschung/forschungsmagazin/2014/Saarland_Forschungsmagazin1.pdf) (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<sup>202</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>203</sup> Hempelmann R., Baumgarten J., Britz A., Vijayaratnam V., Schley B.; Batterien als Speicher für regenerative Energien; in: Hannig M. (Hrsg.); Forschung, Magazin Universität des Saarlandes, 1/2014 S. 4-11., Mai 2014

[https://www.uni-saarland.de/fileadmin/user\\_upload/Campus/Forschung/forschungsmagazin/2014/Saarland\\_Forschungsmagazin1.pdf](https://www.uni-saarland.de/fileadmin/user_upload/Campus/Forschung/forschungsmagazin/2014/Saarland_Forschungsmagazin1.pdf) (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<sup>204</sup> Shiokawa Y., Yamana H., Moriyama H.; An Application of Actinide Elements for a Redox Flow Battery; in: Journal of Nuclear Science and Technology. Band 37, Nr. 3, 2000, S. 253-256; 2000

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.2000.9714891> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<sup>205</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>206</sup> Hempelmann R., Baumgarten J., Britz A., Vijayaratnam V., Schley B.; Batterien als Speicher für regenerative Energien; in: Hannig M. (Hrsg.); Forschung, Magazin Universität des Saarlandes, 1/2014 S. 4-11., Mai 2014

[https://www.uni-saarland.de/fileadmin/user\\_upload/Campus/Forschung/forschungsmagazin/2014/Saarland\\_Forschungsmagazin1.pdf](https://www.uni-saarland.de/fileadmin/user_upload/Campus/Forschung/forschungsmagazin/2014/Saarland_Forschungsmagazin1.pdf) (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<sup>207</sup> Stockhammer U., URANUS Verlag (Hrsg.); Speicherspecial; Sonnenzeitung 3 und 4, 2012  
dort Original Quelle: Fraunhofer ISE

**Tabelle 6-10:** Kenngrößen und Charakteristika von Redox-Flow-Batterien

<b>Kenngröße Charakteristikum</b>	<b>aktuell</b>	<b>Entwicklungsperspektive</b>
Wirkungsgrad <small>mit Umrichter</small>	70 % bis 80 %	75 % bis 85 %
Energiedichte	20 Wh/L bis 70 Wh/L <small>entspricht etwa 45 Wh/kg</small>	100 Wh/L und darüber
Leistungsdichte	120 W/kg	Veränderungen erwartet <small>jedoch nicht quantifizierbar</small>
Lebensdauer <small>nach Zyklen</small>	größer 10.000	größer 12.000
Lebensdauer <small>kalendarisch</small>	10 bis 15 Jahre	15 bis 25 Jahre
Entladetiefe <small>bis Schlussspannung</small>	100 %	100 %
Selbstentladung	0,1 % bis 0,4 % pro Tag	0,05 % bis 0,2 % pro Tag
Energieinstallationskosten	200 €/kW bis 500 €/kW	70 €/kW bis 150 €/kW
Leistungsinstallationskosten	1.000 €/kW bis 1.500 €/kW	600 €/kW bis 1.000 €/kW
Reaktionszeit	Sekunden	keine Veränderungen erwartet
Betriebsvoraussetzungen	keine	keine
Hauptanwendungsbereiche	Frequenzregelung, Lastausgleich, Inselnetze, Speicherung von Photovoltaik- oder Windstrom	Maximierung des Eigenstromverbrauchs Wohn- und Gewerbegebäude

## Stärken-Schwächen-Analyse von Redox-Flow-Batterien

Die Angaben in Tabelle 6-11 beziehen sich auf die vorwiegend am Markt verfügbaren Produkte Redox-Flow-Vanadium-Batterie und Redox-Flow-Zink-Brom-Batterie und greifen eine Auswahl von charakteristischen Eigenschaften als Grundlage für den Technologievergleich auf.<sup>208</sup>

**Tabelle 6-11:** Stärken-Schwächen Übersicht zu Redox-Flow-Batterien

Redox-Flow-Batterien	
Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energie und Leistung sind unabhängig voneinander skalierbar</li> <li>▪ Hohe Zyklenlebensdauer</li> <li>▪ Keine lokalen Voraussetzungen</li> <li>▪ Wirtschaftlicher Einsatz auch über Tage hinweg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Säurehaltige Flüssigkeiten begünstigen Leckagen</li> <li>▪ Begrenzte Lebensdauer der Zellstacks</li> <li>▪ Teurer Basisrohstoff Vanadium</li> <li>▪ Wartungsaufwand des Gesamtsystems</li> <li>▪ Hoher Materialressourcenverbrauch</li> </ul>
Möglichkeiten	Bedrohungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Anbietererweiterung durch Auslaufen von Patenten</li> <li>▪ Kostenreduktion durch größere Zellstacks</li> <li>▪ Erforschung weiterer geeigneter Redoxtechnologien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konkurrenz mit Blei-Säure-Batterien und Hochtemperaturbatterien</li> <li>▪ Umweltrisiken durch Lagerung großer Säuremengen</li> </ul>

## Produktbeispiele von für den haustechn. Einsatz geeigneten Redox-Flow-Batterien

Aktuell sind nur wenige Redox-Flow-Batterien auf dem Markt, die in haustechnische Anlagen von Wohngebäude integriert werden können. Auf Grund des Auslaufens von Patentrechten ist aber mit einer Angebotserweiterung zu rechnen. Verfügbar ist aktuell etwa die in Abbildung 6-30 gezeigte für die Integration in photovoltaische Hausanlagen konzipierte Redox-Flow-Zink-Bromid-Batterie.<sup>209</sup>



**Abbildung 6-30:** Redox-Flow-Zink-Bromid-Batterie für haustechnische Anlagen

<sup>208</sup> Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012

<sup>209</sup> <http://www.energieleben.at/redflow-zcell/> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

Vorerst noch als Demonstrations- und Testanlage wird ein komplettes modulares System eines Redox-Flow-Vanadium-Batteriespeichers nach Abbildung 6-31 angeboten, der auch für den haustechnischen Einsatz geeignet skalierbar ist.<sup>210</sup>



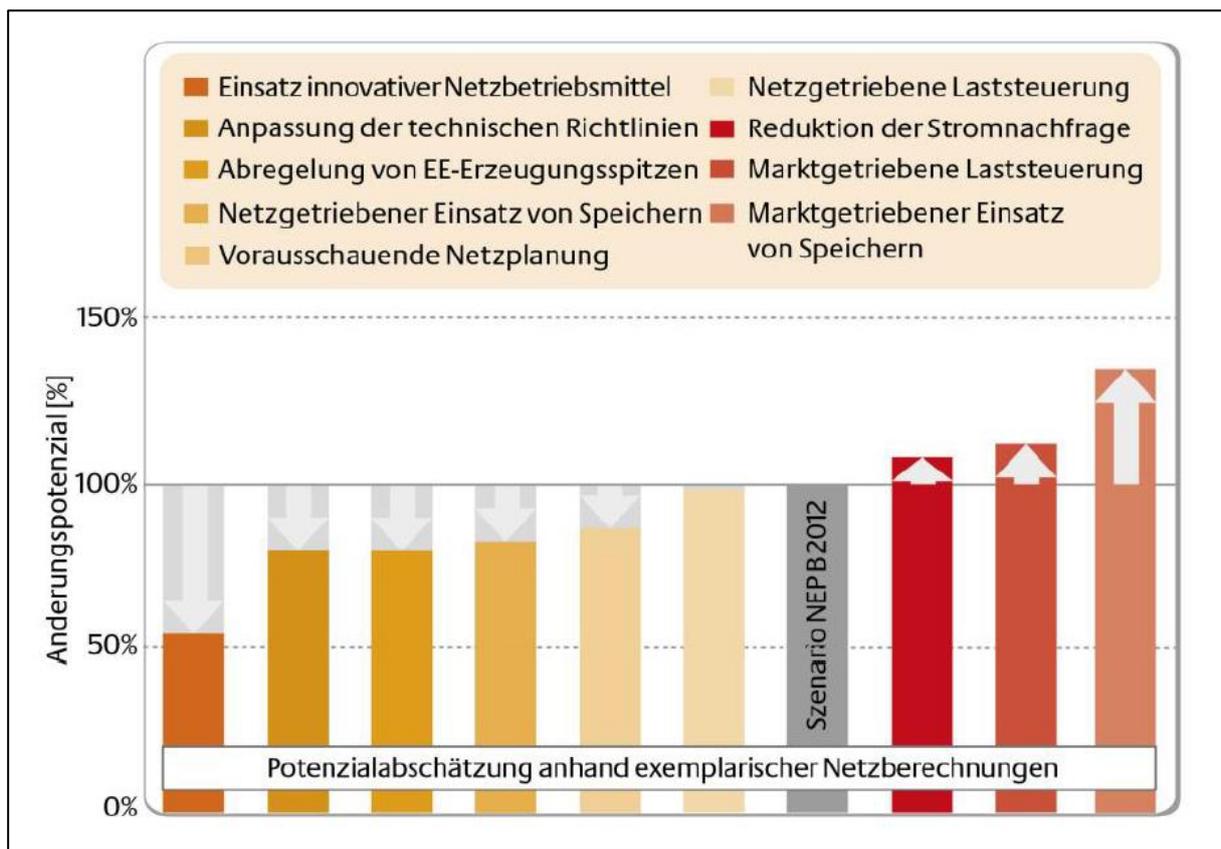
**Abbildung 6-31:** Redox-Flow-Vanadium-Batterie für haustechnische Anlagen

---

<sup>210</sup> <https://www.volterion.com/wp-content/uploads/2018/03/komplettsystem.jpg> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

### 6.3 Bewertung ausgewählter stationärer haustechnisch eingebundener Batteriespeicher

Wie aus Kapitel 6.1 hervorgeht, können elektrochemische Speicher als Technologie jedenfalls einen Beitrag zur Dekarbonisierung unserer Energieversorgung leisten. Die tatsächliche Marktabtastung elektrochemischer Speicher im Segment der stationären haustechnischen Einbindung kann aktuell in ihrer Ausprägung speziell auch auf Grund der rasanten technischen Entwicklung und zeitgleich zum Ausbau der Elektromobilität kaum abgeschätzt werden. Grundsätzlich zeichnet sich eine Etablierung von elektrochemischen Speichertechnologien jedoch ab und wird beispielsweise von deutschen Betreibern elektrischer Versorgungsnetze als Faktor mit dem größten Änderungspotential für den Netzbetrieb überhaupt eingeschätzt, wie die folgende Abbildung 6-32 zeigt.<sup>211</sup>



**Abbildung 6-32:** Änderungspotential durch Anwendung verschiedener Technologien in den Stromverteilnetzen bis 2030

Im Sinne der vorliegenden Studie ist abzuschätzen welche elektrochemischen Speichertechnologien für die stationäre Anwendung jedoch skaliert für die Einbindung in haustechnische Systeme besonders geeignet erscheinen. In weiterer Folge werden ökologische und soziale Aspekte des Einsatzes geeigneter elektrochemischer Batteriespeicher recherchiert und schließlich Speicherkapazität bezogen mit dem thermischen Massespeicher Beton verglichen.

<sup>211</sup> Deutsche Energieagentur – dena (Hrsg.); Ausbau- und Innovationsbedarf in den Stromverteilnetzen in Deutschland bis 2030, Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse der Studie, S. 10., Dezember 2012 [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen\\_und\\_Projekte/Energiesysteme/dena-Verteilnetzstudie/121210\\_denaVNS\\_Ergebniszusammenfassung\\_PSG\\_pdf.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Energiesysteme/dena-Verteilnetzstudie/121210_denaVNS_Ergebniszusammenfassung_PSG_pdf.pdf) (letzter Zugriff: 12.04.2018)

### 6.3.1 Auswahl von Batteriespeichertechnologien mit erwartbarem Zukunftspotential

Im Folgenden werden die sechs unter 6.2.5 vergleichend betrachteten Batteriespeichertechnologien in Hinsicht auf ihr erwartbares Zukunftspotential für den stationären haustechnisch integrierten Einsatz grundsätzlich eingeschätzt und gegenübergestellt.

#### **Blei-Säure-Batterien**

Diese Speichertechnologie eignet sich grundsätzlich gut für die stationäre Integration in haustechnischen Energieversorgungsanlagen. Blei-Säure-Batterien sind seit langem im Markt eingeführt und kostengünstig verfügbar. Das modulare Zusammenfügen der Zellen zu Speichern entsprechender Größe ist einfach und das Zellmanagement unaufwendig. Nachteilig sind die Toxizität und die begrenzte Verfügbarkeit der Ressource Blei. Demgegenüber steht ein mittlere Weile etabliertes und weitgehendes Recycling von Blei-Säure-Batterien. Die Energiedicht von Blei-Säure-Batterien konnte erheblich gesteigert werden, ist im Vergleich mit Batterien andere Technologien aber nach wie vor gering. Gerade das könnte die Blei-Säure-Batterie jedoch für den stationären Einsatz prädestinieren, da Batterien mit höheren Energiedichten jedoch auch höheren Kosten und gleichzeitig begrenzterer Verfügbarkeit, wie etwa Lithium-Ionen-Batterien, überwiegend vom Elektromobilitätsmarkt absorbiert werden.

#### **Lithium-Ionen-Batterien**

Lithium-Ionen-Batterien stellen aktuell die elektrochemische Speichertechnologie mit der höchsten Energiedichte dar und werden folglich in unterschiedlichen Marktsegmenten stark nachgefragt. Das vergleichsweise geringe Gewicht von Lithium-Ionen-Batterien stellt für die Anwendung im Elektromobilitätssektor einen entscheidenden Vorteil dar, ist für die stationäre Integration in haustechnischen Energieversorgungsanlagen jedoch von nachgeordneter Bedeutung. Beim modularen Zusammenfügen einzelner Zellen zu Speichern muss ein Batteriemanagementsystem oder eine passende Ausgleichsregelung vorgesehen werden, um ausgewogene Ladungsprozesse zu gewährleisten. Darüber hinaus sind Lithium-Ionen-Batterien bestimmter Bauarten vor Übertemperatur zu schützen. Und schließlich sind die Materialressourcen an technisch verwertbarem Lithium begrenzt. Folglich wird eine weitere Etablierung von Lithium-Ionen-Batterien im Bereich der stationären Speicherung an dieser Stelle auf mittlere bis längere Sicht eher in Zweifel gezogen.

#### **Metall-Luft-Batterien**

Metall-Luft-Batterien beziehen Energie aus einer Reaktion mit Sauerstoff, der aus der Umgebungsluft bezogen werden kann. Das sorgt für Gewichtersparnis und ist der Grund, warum Metall-Luft-Batterien enorme Energiedichten erzielen können. Aktuell bedingt allerdings die Zellchemie, dass sich Metall-Luft-Batterien kaum wiederaufladen lassen. Auch wenn die Metall-Luft-Speichertechnologie auf Grund der theoretisch erreichbaren extrem hohen Energiedichten für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche wie den stationären haustechnischen Einsatz, als zukunftspotentialträchtig gilt, befindet sich derzeit kein entsprechendes wiederaufladbares Metall-Luft-Batteriesystem auf dem Markt.

### **Natrium-Batterien**

Batterien dieser Speichertechnologie sind langlebig und zeigen eine vergleichsweise mittlere Energiedichte, wodurch sie grundsätzlich für den stationären Einsatz geeignet sind. Allerdings muss eine hohe Betriebstemperatur zwischen 270 °C und 350 °C konstant aufrecht gehalten werden. Daher sind die Speichereinheiten nur entsprechend thermisch isoliert und kontinuierlich zu betreiben. Folglich eignen sich Natrium-Batterien für Anwendungen mit täglichen Zyklen, was bei einer Einbindung in stationäre haustechnische Anlagen zumeist gewährleistet werden kann. Aktuell werden die installierten Kapazitäten überwiegend in technischen Großspeichern zur Netzstabilisierung eingesetzt. Es erscheint aber durchaus realistisch, dass Natrium-Batterien vermehrt auch in haustechnischen Anlagen zum Einsatz kommen könnten, speziell wenn andere elektrochemische Speicher mit höheren Energiedichten, jedoch höheren Kosten bei gleichzeitig begrenzter Verfügbarkeit, wie etwa Lithium-Ionen-Batterien, zunehmend vom Elektromobilitätsmarkt gebunden werden.

### **Nickel-Metallhydrid-Batterien**

Nickel-Metallhydrid-Batterien in der Ausführung mit erhöhtem inneren Widerstand eignen sich gut für mobile Geräte mit mittlerer Stromaufnahme. Im Bereich der stationären haustechnischen Anlagen war diese Speichertechnologie zwar im Einsatz, wird aktuell jedoch zunehmend vom Markt verdrängt. Eine technische Weiterentwicklung, die diese Tendenz aufhalten könnte zeichnet sich aktuell nicht ab.

### **Redox-Flow-Batterien**

Die Redox-Flow-Batterietechnologie bedingt und ermöglicht die Auslagerung der Elektrolyten in externe Tanks. Die im Elektrolyten chemisch gespeicherte Energiemenge kann derart über die Tankgröße variiert werden. Darüber hinaus können Selbstentladungen weitgehend vermieden werden und es sind vergleichsweise besonders lange Lebensdauern von 20 Jahren und mehr möglich. Redox-Flow-Batterien sind so für den stationären Einsatz gut geeignet. Da auch herkömmliche haustechnische Anlagen häufig Speichertanks benötigt haben, wird bei einer Umstellung auf Redox-Flow-Batterie gestützte Systeme zumeist ausreichend Platz für den Einbau vorgefunden. Darüber hinaus werden unterschiedlichste Entwicklungen im Bereich der Zellchemie vorangetrieben, um möglichst preisgünstige sowie ökologisch und gesundheitlich unbedenkliche Redox-Paare für ein breites Anwendungsspektrum einsatzfähig zu machen.

### **Gegenüberstellung**

Von den sechs betrachteten Batterietechnologien scheinen aus heutiger Sicht vier, nämlich die Blei-Säure-Batterie, die Lithium-Ionen-Batterie, die Natrium-Batterie und die Redox-Flow-Batterie potentiell geeignet, ein relevantes Marktsegment im Bereich der stationären Einbindung in haustechnische Anlagen zu besetzen. Die in der folgenden Abbildung 6-33 dargestellte Entwicklung der kumulierten weltweit installierten Leistung nach Batteriespeichertechnologien scheint diese Einschätzung zu unterstützen.<sup>212</sup>

---

<sup>212</sup> Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. – VDE (Hrsg.); Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene, Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Studie der Energietechnischen Gesellschaft- ETG im VDE; S. 54.; Mai 2015

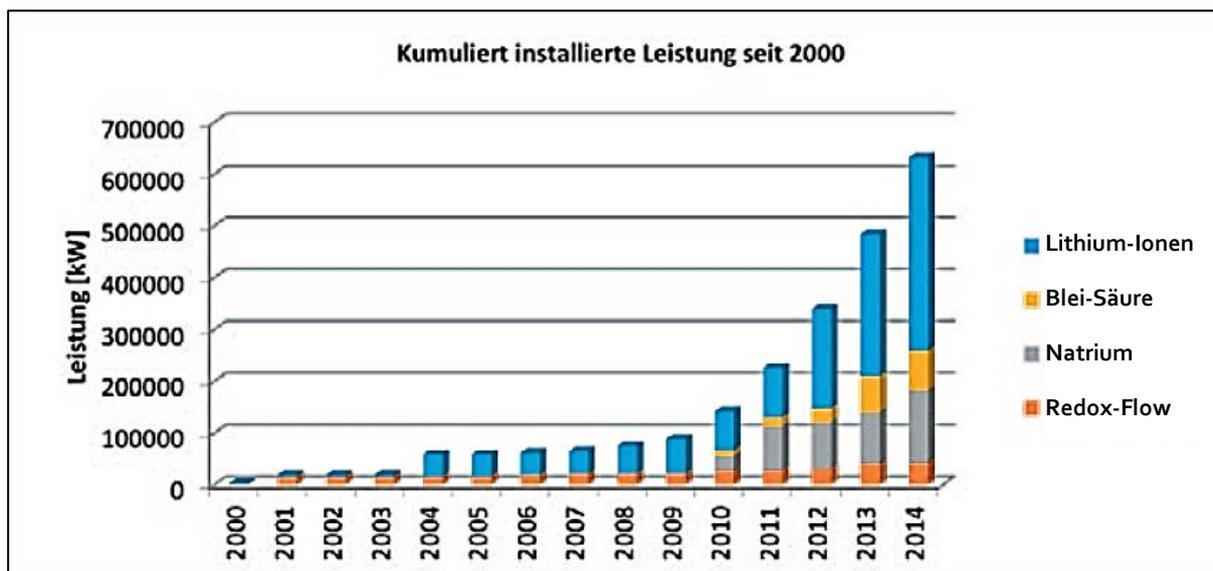


Abbildung 6-33: Entwicklung der kumulierten installierten Leistung nach Batterietechnologie weltweit

Für die Metall-Luft Batterietechnologie bestehen möglicherweise Entwicklungspotentiale, die allerdings aus heutiger Sicht für die weitere Betrachtung nicht adäquat eingeschätzt werden können. Schließlich scheint den Nickel-Metallhydrid-Batterien in Zukunft keine relevante Rolle mehr im Segment der stationären hautechnischen Anwendung zuzukommen. Entsprechend wird für die vier Batteriespeichertechnologien Blei-Säure-Batterie, Lithium-Ionen-Batterie, Natrium-Batterie und Redox-Flow-Batterie in weiterer Folge das Vorliegen von belastbaren Ökobilanzdaten recherchiert.

## 6.4 Ökologische Wirkungen - Basisindikatoren

Da im Rahmen der vorliegenden Studie keine Primärdaten ermittelt werden können, beruht die Darstellung von Ökobilanzen auf einer Kompilation der vorliegenden Literatur. Die Literaturrecherche macht deutlich, dass bei der Ökobilanzierung von Batteriespeichern noch auf keine spezifischen standardisierten Grundlagen zurückgegriffen werden kann. Speziell für den belastbaren Vergleich von Batteriespeichern wäre diese Standardisierung aber notwendig, da die Bewertungsergebnisse stark von den Systembedingungen des Einsatzes abhängen.<sup>213,214</sup> So wird die Ökobilanz eines Batteriespeichers beispielsweise maßgeblich davon bestimmt, in welchen zeitlichen Sequenzen und Intensitäten Ladung und Entladung des Speichers erfolgen, wie weitgehend die Speicherkapazität ausgeschöpft wird oder in welcher Weise der eingesetzte Ladestrom in die Bewertung einbezogen wird beziehungsweise dessen Qualität berücksichtigt wird. In den vorliegenden Studien werden zumeist unterschiedliche Rahmenbedingungen des Einsatzes betrachtet und entsprechend liegen wenig vergleichbare, teils auch abweichende Ergebnisse vor.

Quelldatenangabe dort. <http://www.energystorageexchange.org/projects> (letzter Zugriff: 08.01.2015)

<sup>213</sup> Hiremath M.; Comparative Life Cycle Assessment of Stationary Battery Storage Technologies for Balancing Fluctuations of Renewable Energy Sources; Postgraduate Programme Renewable Energy 14;2012

<sup>214</sup> Sullivan J., and Gaines L.; Status of life cycle inventories for batteries, Energy Conversion and Management 58: 134-148.;2012

Darüber hinaus divergieren die Materialzusammensetzungen von Batterien auch innerhalb einer Speichertechnologie oft erheblich. Anzumerken ist allerdings, dass der Einfluss der doch oft deutlich unterschiedlichen Zellchemie beispielsweise innerhalb der Lithium-Ionen-Batteriespeicher-technologie in Hinsicht auf die Indikatorwerte für gering und innerhalb des normalen Unsicherheitsbereichs von Ökobilanzen angesehen wird.<sup>215,216</sup> Eine Ausnahme in diesem Zusammenhang bilden Lithium-Ionen-Batteriespeicher mit einer Zellchemie basierend auf Nickel-Cobalt-Aluminum-Oxid Kathodenmaterial, die in allen betrachteten Umweltwirkungskategorien stärkere, teils deutlich stärkere Belastungen hervorrufen.<sup>217</sup> Lithium-Ionen-Nickel-Cobalt-Aluminum-Oxid Batteriespeicher sind in den folgenden Indikatorwerten der Lithium-Ionen-Batteriespeichertechnologie nicht, oder nur explizit ausgewiesen berücksichtigt.

Schließlich betrachten die meisten Studien den Einsatz von mobilen Batteriespeichern und nur wenige die stationäre Anwendung.<sup>218,219,220,221,222,223,224</sup> Im Folgenden vorangestellt zitiert wird daher die Metastudie von Hiremath, 2012, die für die vier Speichertechnologien Blei-Säure-Batterien, Lithium-Ionen-Batterien, Natrium-Batterien, Redox-Flow-Batterien zumindest betreffend die grundlegenden Charakterisierungsfaktoren Primärenergiebedarf und Treibhausgaspotenzial methodisch konsistent generierte und somit annähernd vergleichbare Ökobilanzergebnisse anbietet. Auf dieser Grundlage eines möglichst objektivierten Vergleichs werden die vier Batteriespeichertechnologien gereiht, um die aus ökologischer Sicht vorteilhaftesten zu identifizieren und im Anschluss ausgehend von spezifischen beziehungsweise detaillierteren Studien soweit wie möglich zu beschreiben.

Hiremath, 2012, differenziert in die Produktionsphase sowie den Betrieb der Batteriespeicher jedoch weitgehend ohne Berücksichtigung des Recyclings, da für letzteres noch zu wenig belastbare Realdaten vorliegen. Das bedeutet jedoch, dass die Ergebnisse für Batteriespeichertechnologien mit hoher Recyclfähigkeit tendenziell und im Vergleich zu hohe Werte zeigen. Lediglich für die schon am längsten im Markt eingeführte Blei-Säuretechnologie basierten Batteriespeicher werden zwei Szenarien

---

<sup>215</sup> Bauer C.; Ökobilanz von Lithium-Ionen Batterien, Analyse der Herstellung von Energiespeichern für den Einsatz in Batteriefahrzeugen; September 2010

<sup>216</sup> Anmerkung: Manchen vergleichenden Studien weisen innerhalb der Li-Ionen Batteriespeichertechnologie die Speicher mit der Zellchemie auf Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide Basis separat aus.

<sup>217</sup> Moshövel J., Magnor D., Sauer D., Gähns S., Bost M., Hirschl B., Cramer M., Özalay B., Matrose C., Müller C., Schnettler A.; PV-Nutzen; Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen und Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin; Dezember 2015

<sup>218</sup> Rantik M.; Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehicles under Different Charging Regimes, KFB- Kommunikationforschungsberedningen-Meddelande 28; 1999

<sup>219</sup> Rydh C.; Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage, Journal of power sources 80: 21–29; 1999

<sup>220</sup> Denholm P., Kulcinski G.; Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems; Energy Conversion and Management 45: 2153–2172.; 2004

<sup>221</sup> Rydh C., Sandén B.; Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements. Energy Conversion and Management 46: 1957–1979. Part II: Energy return factors and overall battery efficiencies. Energy conversion and management 46: 1980–2000.; 2005

<sup>222</sup> Longo S., Antonucci V., Cellura M., Ferraro M.; Life cycle assessment of storage systems: The case study of a sodium/nickel chloride battery; J. Clean. Prod.; 2013

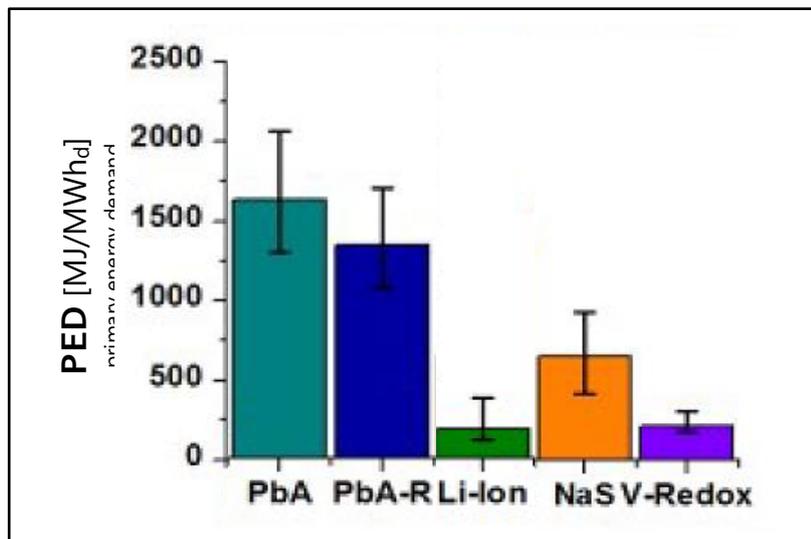
<sup>223</sup> Spanos C., Turney D., Fthenakis V.; Life-cycle analysis of flow-assisted nickel zinc-, manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction. Renewable Sustainable Energy Rev. 43: 478–494.; 2015

<sup>224</sup> Moshövel J., Magnor D., Sauer D., Gähns S., Bost M., Hirschl B., Cramer M., Özalay B., Matrose C., Müller C., Schnettler A.; Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern, Gemeinsamer Ergebnisbericht für das Projekt PV-Nutzen; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen ; 2015

vorgelegt. Das Szenario PbA geht dabei von einem erstmaligen Einsatz sämtlicher Materialien aus, das Szenario PbA-R von einem 70 % Anteil an rezykliertem Blei. Die Gegenüberstellung der Szenarien PbA und PbA-R macht deutlich, dass Rezyklierfähigkeit weitreichenden Einfluss auf die Ökobilanz von Batteriespeichern hat. Für das Rezyklieren von Lithium-Ionen Batteriespeichern werden aktuell unterschiedliche Verfahren entwickelt, wobei die Rückgewinnung von Mangan, Nickel, Kobalt oder anderen Metallen und Batteriekomponenten durchaus gelingt, Lithium selbst bis dato aber kaum wiederverwendbar extrahiert werden kann.<sup>225,226</sup> Aus dem Spektrum der Natrium-Batteriespeichertechnologie wird eine Natrium-Schwefelbatterie betrachtet, aus dem der Redox-Flow-Speichertechnologie eine Vanadium Redox-Flow Batterie.

#### 6.4.1 Vergleichende Ökobilanz der Batteriespeichertechnologien – Primärenergiebedarf und Treibhausgaspotenzial

Als funktionale Einheiten für die Bewertung werden bei Hiremath, 2012, sowohl die gravimetrische Einheit [kg Batteriespeicher] als auch die bereitgestellte Energie [MWh<sub>d</sub>] in einer lebenszyklusbezogenen Gegenüberstellung angeführt. Letztere wird im Folgenden für die Darstellung des Vergleichs der Wirkungen während der Produktionsphase herangezogen. Differenziert in die Indikatoren Primärenergiebedarf in Abbildung 6-34 und Treibhauspotenzial in Abbildung 6-35 werden jeweils alle vier Batteriespeichertechnologien verglichen.<sup>227</sup> Die Angaben gehen auf Datensätzen der Datenbank Ecoinvent in der Version 3.01 zurück.<sup>228</sup>



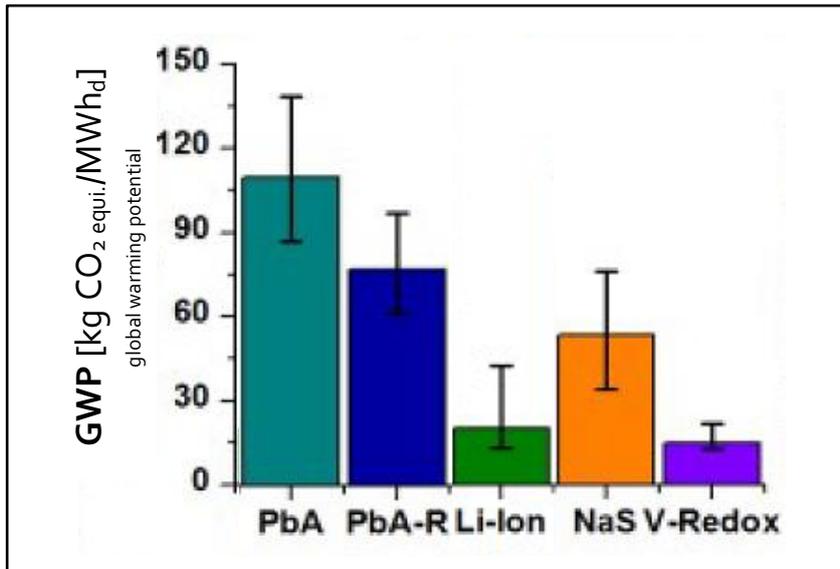
**Abbildung 6-34:** Vergleich Primärenergiebedarf der Produktionsphase je bereitgestellter Energieeinheit

<sup>225</sup> Xu J., Thomas H., Francis R., Lum K., Wang J., Liang B.; A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries; Journal of Power Sources, 177/2, March 2008, page 512-527.

<sup>226</sup> Kwade A., Bärwaldt G.; LithoRec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien; Abschlussbericht zum Verbundvorhaben; April 2012

<sup>227</sup> Darstellung bearbeitet nach Hiremath M.; Comparative Life Cycle Assessment of Stationary Battery Storage Technologies for Balancing Fluctuations of Renewable Energy Sources; Postgraduate Programme Renewable Energy 14;2012; Ausschnitt Figur 1a

<sup>228</sup> Ecoinvent; Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich, Switzerland



**Abbildung 6-35:** Vergleich Treibhausgaspotenzial der Produktionsphase je bereitgestellter Energieeinheit

Wie Tabelle 6-12 und Tabelle 6-13 zeigen, fällt bei der vergleichenden Betrachtung der Produktionsphase auf, dass der Lithium-Ionen Batteriespeicher und der Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher für beide ermittelten Indikatoren deutlich niedrigere Werte und damit geringere Umweltbelastung zeigen, als sämtliche andern Speichertechnologien. Am schlechtesten schneidet der Blei-Säure-Batteriespeicher ab, wobei durch die Anwendung des Szenarios PbA-R einen deutliche Verbesserung der Werte erreicht wird, was jedoch nicht ausreicht um in Konkurrenz mit einer der beiden anderen Speichertechnologien zu treten.

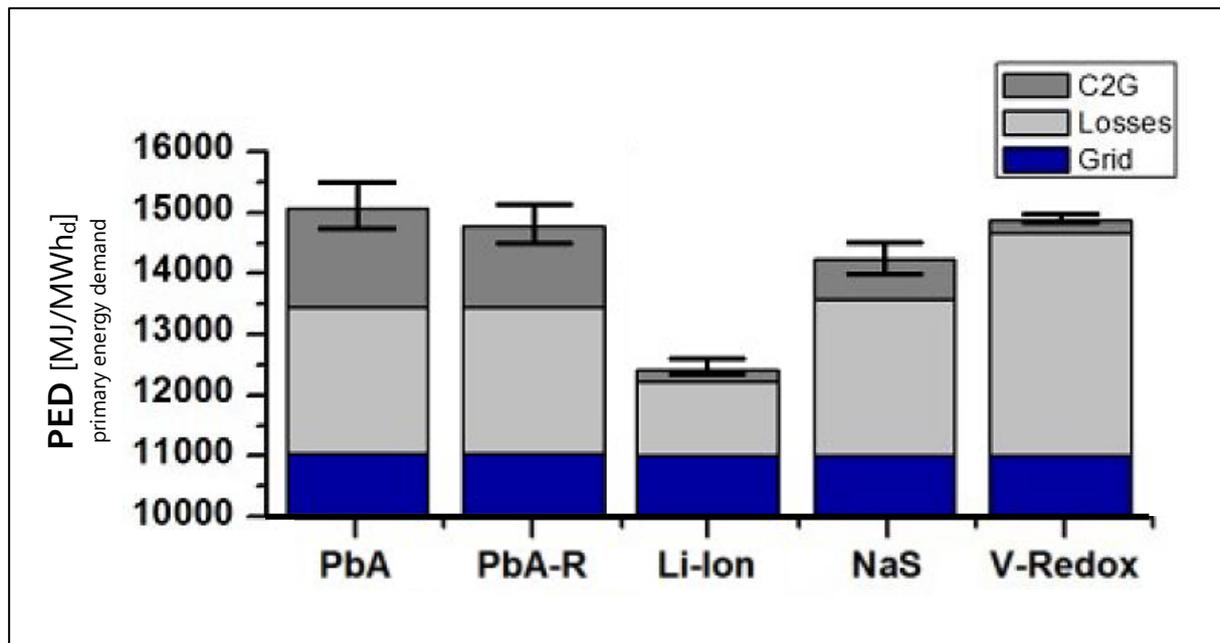
**Tabelle 6-12:** Primärenergiebedarf der Batterietechnologien Systemgrenze Batterie im Vergleich

PED [MJ/MWh <sub>d</sub> ] primary energy demand	PbA	PbA-R	Li-Ion	NaS	V-Redox-Flow
Produktion	1.610	1.330	200	650	220
Ranking	(5 od. 805%)	(4 od. 665%)	(1 od. 100%)	(3 od. 325%)	(2 od. 110%)

**Tabelle 6-13:** Treibhausgaspotenzial der Batterietechnologien Systemgrenze Batterie im Vergleich

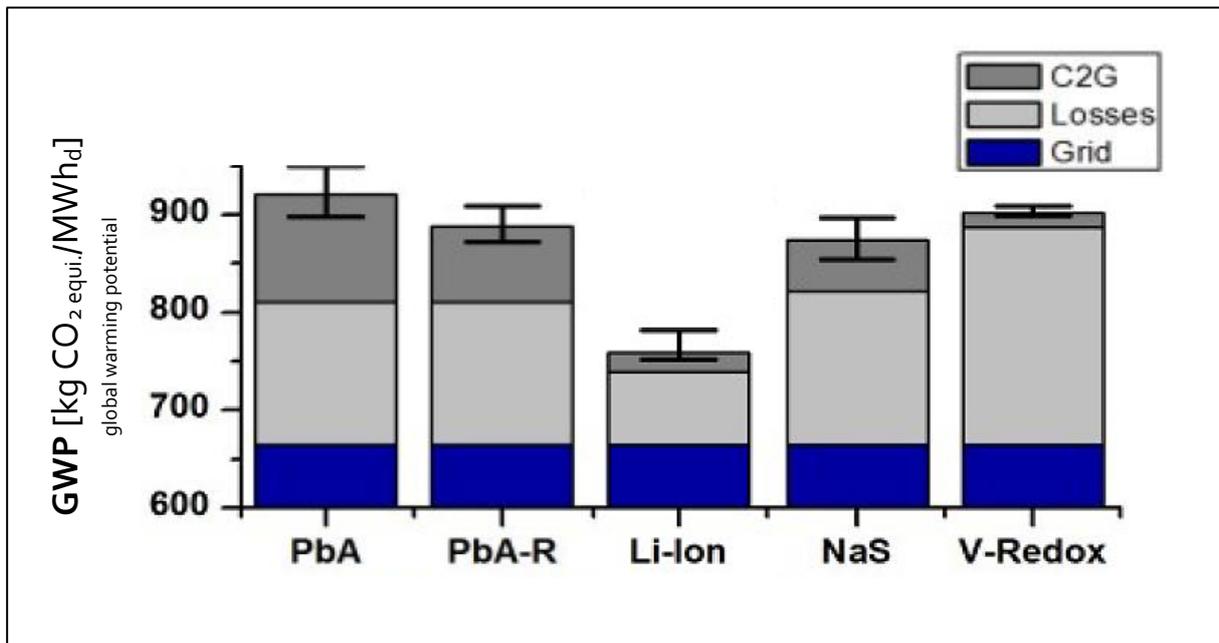
GWP [kg CO <sub>2</sub> eqi./MWh <sub>d</sub> ] global warming potential	PbA	PbA-R	Li-Ion	NaS	V-Redox-Flow
Produktion	110	77	20	54	15
Ranking	(5 od 733%)	(4 od 513%)	(2 od 133%)	(3 od 360%)	(1 od. 100%)

Für die vergleichende Ökobilanzierung der Produktions- und der Nutzungsphase nimmt Hiremath, 2012, eine kalkulatorische Nutzungsdauer von 20 Jahren an. Es ist anzumerken, dass diese Zeitspanne im betrachteten stationären Einsatzfall speziell die Blei-Säurebatteriespeichertechnologie über die aktuell erreichbaren Grenzen der Anzahl möglicher Ladezyklen und damit deren Lebensdauer hinaus ausreicht. Im Folgenden wird für die Nutzungsphase der vier Batteriespeichertechnologien der Charakterisierungsfaktor Primärenergiebedarf in Abbildung 6-36 und Treibhauspotenzial in Abbildung 6-37 zur vergleichenden Bewertung dargestellt.<sup>229</sup> Innerhalb der abgebildeten Säulen wird differenziert in die Fraktion die sich aus der Produktion ergibt in Dunkelgrau, jene die aus dem Ladestrom bezogen aus dem Netz resultiert in Blau und jene die durch Umwandlungsverluste anfällt in Hellgrau. Referenziert wird auf den deutschen Netzstrom. Zu beachten ist, dass die Skala nicht bei Null beginnt, und der blaue Balkenanteil entsprechend nicht in seiner vollen Länge zu sehen ist.



**Abbildung 6-36:** Vergleich Primärenergiebedarf je bereitgestellte Energieeinheit während des Lebenszyklus

<sup>229</sup> Darstellung bearbeitet nach Hiremath M.; Comparative Life Cycle Assessment of Stationary Battery Storage Technologies for Balancing Fluctuations of Renewable Energy Sources; Postgraduate Programme Renewable Energy 14; 2012; Ausschnitt Figur 1b



**Abbildung 6-37:** Vergleich Treibhausgaspotenzial je bereitgestellte Energieeinheit während des Lebenszyklus

Es wird deutlich, dass der Lithium-Ionen Batteriespeicher sowohl betreffend den Primärenergiebedarf als auch das Treibhausgaspotenzial in Summe den niedrigsten Indikatorwert aufweist und damit die geringste Umweltbelastung zeigt. Auffällig ist darüber hinaus, dass die durch die Energieumwandlung verursachten Umweltbelastungen beim Vanadium-Redox-Flow-Batteriespeicher deutlich am höchsten sind, wodurch diese Speichertechnologie trotz gutem Abschneiden in der Produktionsphase über den gesamten Lebenszyklus betrachtet vergleichsweise schlecht abschneidet.

In den folgenden Tabellen wird der Primärenergiebedarf beziehungsweise das Treibhausgaspotenzial der unterschiedlichen Batteriespeichertechnologien differenziert nach Produktionsphase, Umwandlungsverlusten und Netzstromverbrauch zusammenfassend dargestellt.

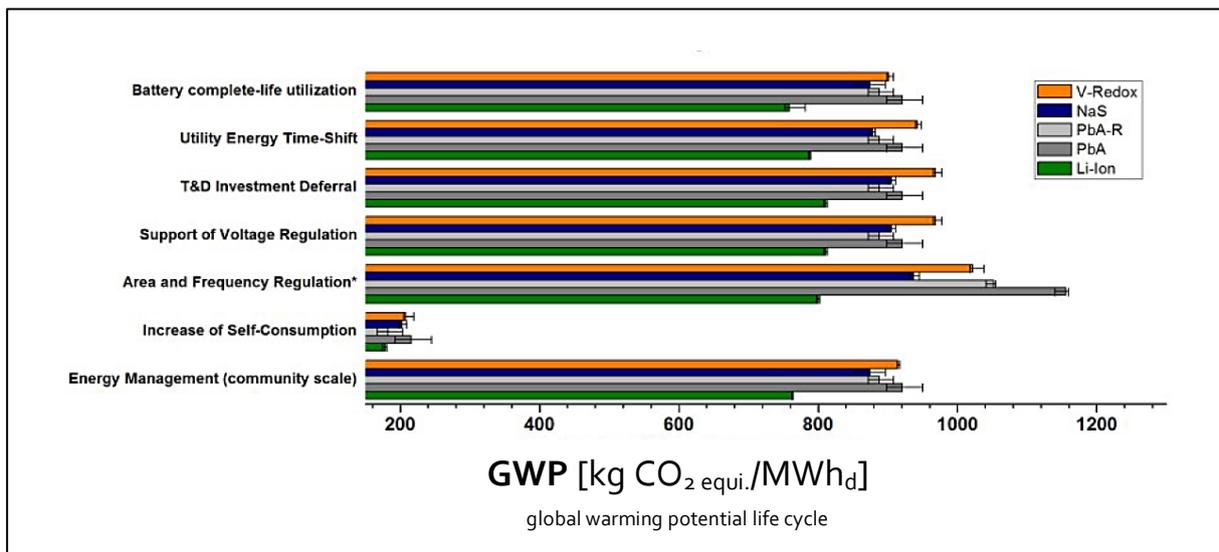
**Tabelle 6-14:** Primärenergiebedarf der Batterietechnologien im Vergleich

<b>PED</b> [MJ/MWh <sub>d</sub> ] primary energy demand	PbA	PbA-R	Li-Ion	NaS	V-Redox-Flow
Produktion	1.610	1.330	200	650	220
Umwandlung	2.400	2.400	1.200	2.600	3.670
Netzstrom	11.000	11.000	11.000	11.000	11.000
<b>Lebenszyklus</b> (Ranking)	<b>15.010</b> (5 od. 121%)	<b>14.730</b> (3 od. 119%)	<b>12.400</b> <b>(1 od. 100%)</b>	<b>14.250</b> <b>(2 od. 115%)</b>	<b>14.890</b> (4 od. 120%)

**Tabelle 6-15:** Treibhausgaspotential der Batterietechnologien im Vergleich

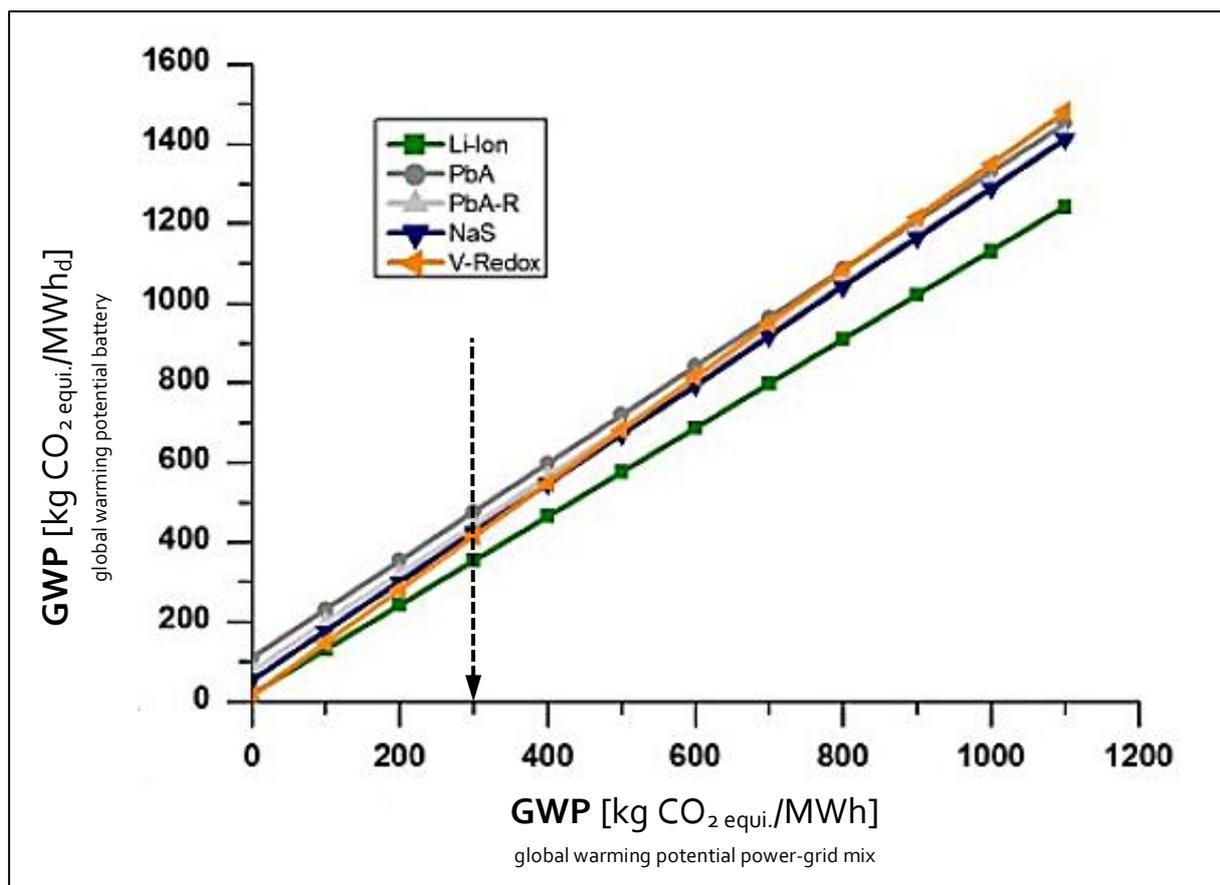
<b>GWP</b> [kg CO <sub>2</sub> equi./MWh <sub>d</sub> ] global warming po- tential	PbA	PbA-R	Li-Ion	NaS	V-Redox-Flow
Produktion	110	77	20	54	15
Umwandlung	145	145	75	155	220
Netzstrom	665	665	665	665	665
<b>Lebenszyklus</b> (Ranking)	<b>920</b> (5 od 121%)	<b>887</b> (3 od 117%)	<b>760</b> <b>(1 od 100%)</b>	<b>874</b> <b>(2 od. 115%)</b>	<b>900</b> (4 od. 118%)

Zwei für die weitere Betrachtung wesentliche Aspekte werden durch den tabellarisch aufgeschlüsselten Vergleich deutlich. Zunächst wird klar, dass die Umweltindikatorwerte der unterschiedlichen Batteriespeicher, wenn sie auf die bereitgestellte Energie normiert werden, überwiegend durch den Anteil des verbrauchten Netzstroms bestimmt sind. Daraus kann gefolgert werden, dass bei der Verwendung saubereren Netzstroms oder bei Integration des Batteriespeichers in eine entsprechend ausgelegten Photovoltaikanlage eine wesentliche Veränderung der Indikatorwerte eintreten wird. Die folgende Abbildung 6-38 in der das lebenszyklisch beizumessenden Treibhausgaspotential der unterschiedlichen Batteriespeichertechnologien unter sieben verschiedenen Betriebsszenarien dargestellt wird, verdeutlicht diesen Sachverhalt. Im sechsten Betriebsszenario *Increase of Self-Consumption* wird vom vergleichsweise saubersten Ladestrommix aus 50% Windstrom und 50% Solarstrom ausgegangen. Entsprechend ist das lebenszyklisch anfallende Treibhausgaspotential signifikant geringer als bei den sechs anderen Betriebsszenarien, in denen die Batteriespeicher vorwiegend mit dem durchschnittlichen deutschen Netzstrommix geladen werden.



**Abbildung 6-38:** Lebenszyklisch beizumessendes Treibhausgaspotential der Batteriespeichertechnologien bei unterschiedlichen Betriebsszenarien

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6-39 geometrisch dargestellt und mit Zahlenangaben zum Treibhausgaspotential ergänzt ausgewiesen.<sup>230</sup> Speziell der im Betrieb weniger effiziente Vanadium-Redox-Flow Batteriespeicher zeigt bei der Ladung mit saubererem Strom ein zunehmend geringeres Treibhausgaspotential, da der vergleichsweise niedrige Charakterisierungsfaktor aus dem Anteil Produktion an Bedeutung gewinnt. Der schwarze Pfeil markiert das Treibhausgaspotential des Netzstrommixes beziehungsweise des Ladestroms, unter dem die Batteriespeichertechnologien der Lithium-Ionen Batterien und der Vanadium Redox-Flow Batterien in der lebenszyklischen Betrachtung von Produktion und Betrieb besser abschneiden als die Blei-Säure-Batterien und die Natrium-Batterien.



**Abbildung 6-39:** Zusammenhang zwischen dem lebenszyklisch beizumessenden Treibhausgaspotential der Batteriespeichertechnologien und dem Treibhauspotential des herangezogenen Ladestroms

<sup>230</sup> Darstellung bearbeitet nach Hiremath M.; Comparative Life Cycle Assessment of Stationary Battery Storage Technologies for Balancing Fluctuations of Renewable Energy Sources; Postgraduate Programme Renewable Energy 14; 2012; Ausschnitt Figur 4

Im Kontext der Fragestellung der vorliegenden Studie werden unterschiedliche Ladestromszenarien definiert, um das daraus resultierende lebenszyklisch beizumessenden Treibhausgaspotenzial der Batteriespeichertechnologien durch Umwandlungsverluste rechnerisch zu ermitteln.<sup>231,232</sup> Die sich für den Ladestrom ergebenden Treibhausgaspotentiale liegen in sämtlichen betrachteten Szenarien deutlich unterhalb des in Abbildung 6-39 ausgewiesenen Grenzwerts von etwa 300 kg CO<sub>2equi</sub>./MWh beziehungsweise 300 g CO<sub>2equi</sub>./kWh. Unter diesem Grenzwert sind die Batteriespeichertechnologien der Lithium-Ionen Batterien und der Vanadium Redox-Flow Batterien in der lebenszyklischen Betrachtung von Produktion und Betrieb aus ökologischer Sicht zu bevorzugen. Daher werden sinnfälliger für die Fragestellung der vorliegenden Studie im Folgenden nur mehr diese beiden Batteriespeichertechnologien betrachtet.

## 6.5 Ökologische Wirkungen – Weiterführende Indikatoren

Die Normierung der Umweltwirkungen der Batterieherstellung auf die funktionale Einheit der bereitgestellten Energie, wie sie bei Hiremath, 2012 angewendet wird, erweist sich für die gegenständliche Studie als ungünstig, weil sie hochgradig von der Nutzungsintensität und Nutzungsdauer der Batterie abhängig ist. Es wird angenommen, dass die bereitgestellte Energie in der zitierten Studie von täglichen vollständigen Entladungen bis zum Erreichen der kalkulatorischen Lebensdauer nach Zyklen ausgeht. Für die Ökobilanz der Produktionsphase sind die günstigsten Betriebsbedingungen, wie sie marktüblich dimensionierten Ausgleichsbatteriespeichern für Photovoltaikanlagen auf Einfamilienhäusern entsprechen. Für Batterien zur Unterstützung gebäudeflexibler Raumheizung wären diese Betriebsbedingungen aber hochgradig unpassend und würden zu einer deutlichen Unterschätzung der Umweltfolgen aus der Produktion führen, wie sich in weitere Folge zeigen wird.

Es konnten nur wenige Studien gefunden werden, welche die Abbildung der Betriebsbedingungen der gebäudeflexiblen Raumheizung im Sinne der vorliegenden Fragestellung erlauben. Speziell für die Bewertung der Vanadium Redox-Flow Batteriespeichertechnologie liegen in diesem Kontext nur wenige Studien vor, welche im Vergleich zu den Quellen betreffend die Lithium-Ionen Batteriespeichertechnologie auch weniger Charakterisierungsfaktoren ausweisen.<sup>233,234</sup>

---

<sup>231</sup> Quelldaten sauberer Strom und Photovoltaikstrom: Geissler S., Fechner J., Pölz W., Knotzer A.; Smart Energy Efficient Active Buildings and Building Cluster, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 00, 2014

<sup>232</sup> Quelldaten Verdrängungsstrom: Österreichisches Institut für Bautechnik, Richtlinie 6, Erläuternde Bemerkungen, OIB-330.6-010/15, 2015

<sup>233</sup> Rydh C.; Environmental Assessment of Battery Systems: Critical Issues for Established and Emerging Technologies; Thesis for the degree of Doctor of Philosophy; Environmental Systems Analysis; Chalmers University of Technology; Göteborg, Sweden 2003

<sup>234</sup> Dassisti M., Mastrorilli P., Rizzuti A., L'Abbate P., Cozzolino G., Chimienti M.; LCA of in-house produced small-sized vanadium redox-flow battery ;Proceedings of SEEP2014, Dubai , 23-25 November 2014

Für eine tiefergehende Betrachtung der Basisindikatoren Primärenergiebedarf und Treibhausgaspotential beziehungsweise die Quantifizierung weitere Charakterisierungsfaktoren aus der klassischen Lebenszyklusanalytik für die Batteriespeichertechnologien der Lithium-Ionen Batterien und der Vanadium Redox-Flow Batterien wurden folgende Studien betrachtet:

- Dassisti, 2014:<sup>235</sup>  
LCA of in-house produced small-sized vanadium redox-flow battery
- Denholm, 2004:<sup>236</sup>  
Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems
- Rydh, 1999:<sup>237</sup>  
Environmental Assessment of Vanadium Redox and Lead-acid Batteries for Stationary Energy Storage
- Rydh, 2003:<sup>238</sup>  
Environmental Assessment of Battery Systems: Critical Issues for Established and Emerging Technologies
- Minke, 2018:<sup>239</sup>  
Environmental assessment of vanadium redox flow batteries
- Moshövel, 2015:<sup>240</sup>  
PV-Nutzen; Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern
- Perdu, 2018:<sup>241</sup>  
Overview of existing and innovative batteries, Impact of the storage on the renewable electricity life cycle
- Vandepaer, 2017:<sup>242</sup>  
Environmental impacts of Lithium Metal Polymer and Lithium-ion stationary batteries

---

<sup>235</sup> Dassisti M., Mastrorilli P., Rizzuti A., L'Abbate P., Cozzolino G., Chimienti M.; LCA of in-house produced small-sized vanadium redox-flow battery; Proceedings of SEEP2014, Dubai, 23-25 November 2014

<sup>236</sup> Denholm P., Kulcinski G.; Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems; Energy Conversion and Management 45(13), 08- 2004, page: 2153-2172.

<sup>237</sup> Rydh C.; Environmental Assessment of Vanadium Redox and Lead-acid Batteries for Stationary Energy Storage, Journal of Power Sources, Vol. 80, No. 1-2, 1999; page. 21-29.

<sup>238</sup> Rydh C.; Environmental Assessment of Battery Systems: Critical Issues for Established and Emerging Technologies; Thesis for the degree of Doctor of Philosophy; Environmental Systems Analysis; Chalmers University of Technology; Göteborg, Sweden 2003

<sup>239</sup> Minke C., Peters J., Baumann M., Weil M.; Environmental assessment of vanadium redox flow batteries, Poster presentation, SETAC Conference Europe 28th Annual Meeting Rome, 2018

<sup>240</sup> Moshövel J., Magnor D., Sauer D., Gähns S., Bost M., Hirschl B., Cramer M., Özalay B., Matrose C., Müller C., Schnettler A.; PV-Nutzen; Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen und Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin; Dezember 2015

<sup>241</sup> Perdu F.; Overview of existing and innovative batteries, Impact of the storage on the renewable electricity life cycle; Presentation at: Science & energy; Ecole de Physique des Houches, March 4th-9th; 2018  
[http://science-and-energy.org/wp-content/uploads/2016/03/FPerdu\\_Houches\\_final-1.pdf](http://science-and-energy.org/wp-content/uploads/2016/03/FPerdu_Houches_final-1.pdf) (Letzter Zugriff: 15.06.2018)

<sup>242</sup> Vandepaer L., Cloutier J., Amor B.; Environmental impacts of Lithium Metal Polymer and Lithium-ion stationary batteries; Renewable and Sustainable Energy Reviews 78; 2017; page: 46–60.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus betrachtet, jeweils ausgestattet mit einem Batteriespeicher. Dieser Batteriespeicher war so zu dimensionieren, dass die Aufrechterhaltung definierter innenräumlicher thermischer Konditionen über einen beziehungsweise drei Autonomietagen hinweg während einer speziell ungünstigen klimatischen Phase am Standort gewährleistet werden kann. Das bedeutet, dass die Kapazität des Batteriespeichers ausreichen muss, um den thermischen Energiebedarf über die Autonomiephase ohne zwischenzeitliche Beladung decken zu können. Aus dieser Vorgabe resultieren relativ große Batteriespeicher mit einer Kapazität von 11 kWh bei einem Autonomietag und 27 kWh bei drei Autonomietagen für das Einfamilienhaus sowie von 86 kWh bei einem Autonomietag beziehungsweise 222 kWh bei drei Autonomietagen für das Mehrfamilienhaus.

Um die Batteriespeichertechnologien der Lithium-Ionen Batterien und der Vanadium Redox-Flow Batterien unter entsprechenden Betriebsbedingungen und bei ausreichenden Speicherdimensionierung vergleichen zu können wurde als funktionelle Einheit jeweils der auf die Speicherkapazität bezogene Charakterisierungsfaktor gewählt. Nur aus wenigen Studien kann diese funktionelle Einheit direkt ausgelesen werden, bei etlichen liegen aber ausreichend Angaben vor, um eine rechnerische Ermittlung zu ermöglichen. Im Folgenden werden einige Studien hinsichtlich der jeweils angeführten Daten skizziert.

Beispielweise wird bei Vandepaer, 2017, einem stationären Batteriespeicher mit einer nutzbaren Kapazität von 75 kWh, wie er im Gebäudebereich zum Einsatz gebracht werden könnte, einem Großspeicher mit einer Kapazität von 6MWh vergleichend gegenübergestellt. Als funktionelle Einheit wird hierfür eine  $MWh_d$  Batteriestrom, also die vom Speicher bereitgestellte Energieeinheit festgelegt. Angegeben werden die Charakterisierungsfaktoren für die beiden Speicher mit ihren jeweilig unterschiedlich großen Kapazitäten. Es wird der gesamte Lebenszyklus (Cradel to Grave) jedoch auf die Systemgrenze des Batteriespeichers selbst beschränkt bewertet, wodurch der Einfluss der Ladestromeigenschaften während der Betriebsphase nicht zum Tragen kommt. Es wird von einer Lebensdauer von 15 Jahren und einer Zyklenzahl von 5.000 ausgegangen. Die Ökobilanzierung erfolgt nach der Methode von IMPACT 2002+.<sup>243,244</sup>

Interpoliert man zwischen den für die beiden unterschiedlichen Speicher ermittelten Werten von Vandepaer, etwa für das Treibhausgaspotential nun entsprechend die vier im Rahmen der vorliegenden Studie untersuchten Speicher, kann gezeigt werden, dass die kapazitätsbezogene Abweichungen der Indikatorwerte für dieses so gering sind, dass sie als innerhalb des normalen Unsicherheitsbereichs von Ökobilanzen anzusehen sind. Eine analoge lineare Interpolation für alle weiterführenden Charakterisierungsfaktoren der Ökobilanzen ergab als größte relative Abweichung 2% zwischen dem Speicher mit 75 kWh Kapazität bei Vanderpaer und dem Speicher für das Mehrfamilienhaus bei drei Autonomietagen für den Indikator Kanzerogene. Daraus abgeleitet erscheint es legitim, für die im Rahmen der vorliegenden Studie angenommenen vier Anwendungsfälle näherungsweise von der Stabilität

---

<sup>243</sup> Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R., IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. In: International Journal of Life Cycle Assessment 8 (6) 324 – 330, Landsberg, 2003

<sup>244</sup> Anmerkung: Impact 2002+ wurde ursprünglich von der École polytechnique fédérale de Lausanne basierend auf Critical Surface-Time 95 entwickelt. Die Midpoint Kategorien korrespondieren teilweise mit jenen aus Eco-Indicator 99 und CML 2002.

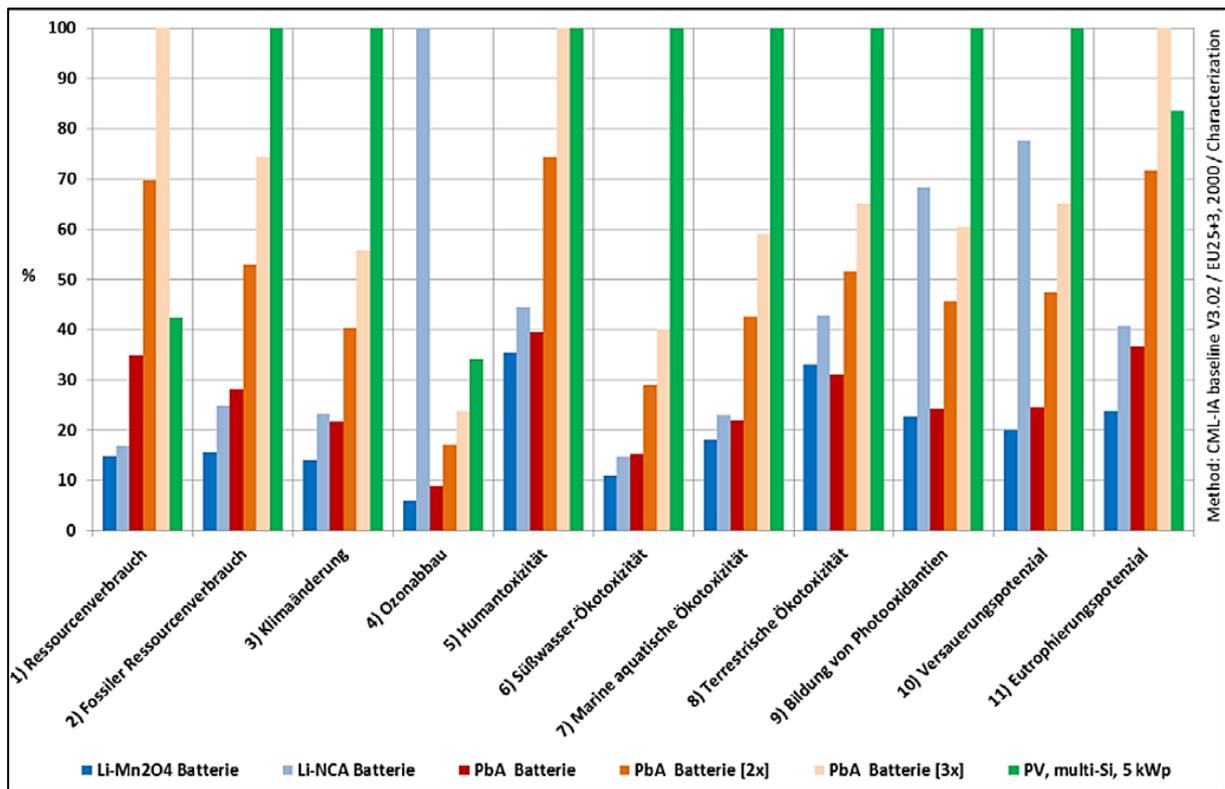
der gewählten funktionellen Einheit des auf die Speicherkapazität bezogenen Wirkungsindikatorwerts unabhängig von der Größe des Batteriespeichers auszugehen.

Bei Moshövel, 2015, wird ein Batteriespeichersystem mit einer nutzbaren Kapazität von 6,2 kWh zum 20-jährigen Betrieb an einer für einen 4-Personen-Haushalt typisch ausgelegten Photovoltaikanlage herangezogen, wobei die Photovoltaikanlage dabei nicht in die Bewertung einbezogen ist sondern lediglich der Batteriespeicher betrachtet wird. Die Umweltbelastungen durch die Herstellung einer solchen Photovoltaikanlage sowie die Umweltbelastungen durch deren Betrieb sind als Referenz den betrachteten Batteriespeichertechnologien gegenübergestellt. Bei einer üblichen Dimensionierung wie sie hier für das Einfamilienhaus mit 6,2 kWh angenommen wird, kann kein Autonomietag während einer ungünstigen Witterungsphase garantiert werden. Der so kleiner dimensionierte Batteriespeicher entleert sich und es muss anderwärtig Strom bezogen werden. Abbildung 6-40 zeigt einen relativen Vergleich der potenziellen Umweltwirkungen der Produktion von Batteriespeichern unterschiedlicher Technologien mit der Herstellung der für den 4-Personen-Haushalt typisch ausgelegten Photovoltaikanlage in ausgewählten Charakterisierungsfaktoren nach Moshövel.<sup>245</sup> Es wird deutlich, dass die Umweltwirkungen durch die Herstellung der Batteriespeicher in den meisten Charakterisierungsfaktoren deutlich unter denen einer passend dimensionierten Photovoltaikanlage liegen. Dies gilt jedoch nicht für den abiotischen Ressourcenverbrauch, vergleichbar mit der Entnahme mineralischer Rohstoffe (1) für Blei-Säure-Batteriespeicher und den stratosphärischen Ozonschichtabbau (4) für Lithium-Ionen-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid Batteriespeicher. Auch beim Versauerungspotenzial (10) sowie bei der Bildung von Photooxidantien (9) schneidet der Lithium-Ionen-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid Batteriespeicher vergleichsweise schlecht ab, liegt aber noch unterhalb der potenziellen Umweltwirkungen die durch die Produktion der Photovoltaikanlage selbst hervorgerufen wird.<sup>246</sup>

---

<sup>245</sup> Moshövel J., Magnor D., Sauer D., Gährs S., Bost M., Hirschl B., Cramer M., Özalay B., Matrose C., Müller C., Schnettler A.; PV-Nutzen; Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern; , Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen und Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin; Dezember 2015 Seite 148

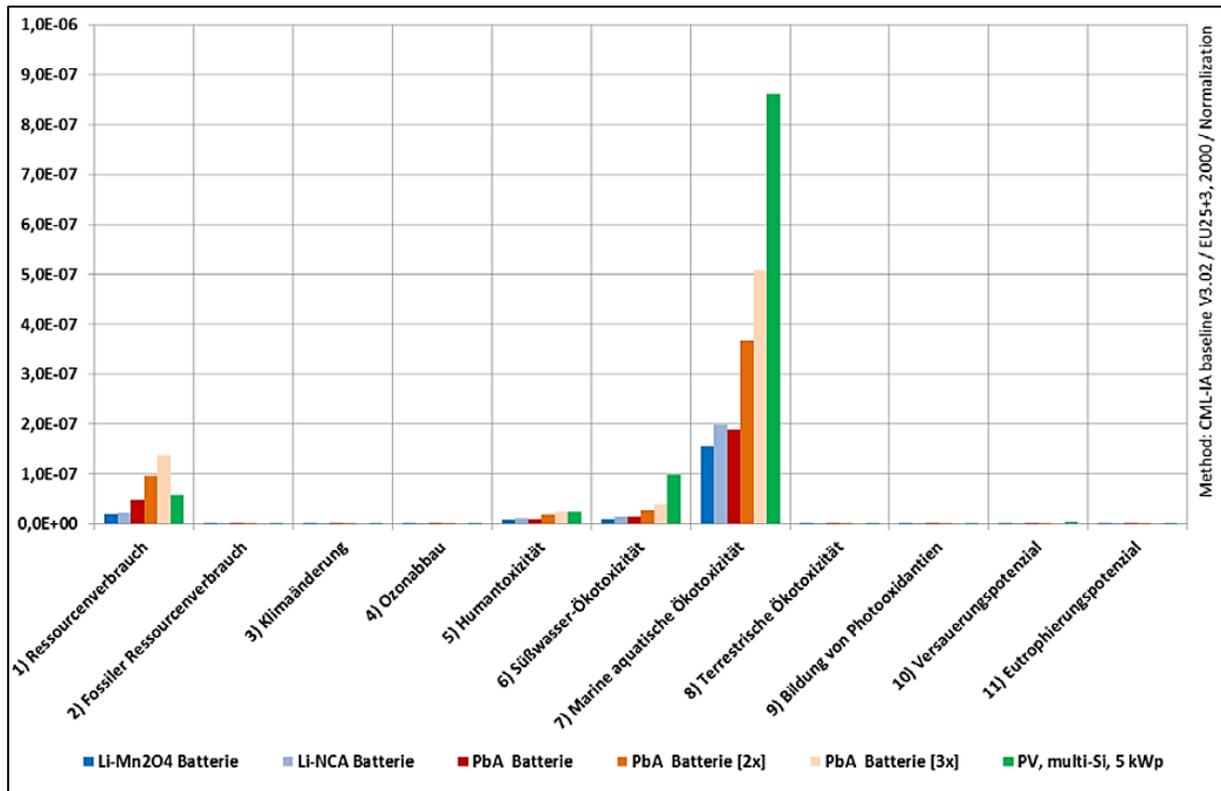
<sup>246</sup> Moshövel J., Magnor D., Sauer D., Gährs S., Bost M., Hirschl B., Cramer M., Özalay B., Matrose C., Müller C., Schnettler A.; PV-Nutzen; Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern; , Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen und Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin; Dezember 2015 Seite 148



**Abbildung 6-40:** Relativer Vergleich von Umweltwirkung der Produktion von unterschiedlichen Batteriespeichern mit einer Photovoltaikanlage

Und schließlich zeigt Abbildung 6-41 eine auf die europäische Gesamtumweltbelastung normierte und somit dimensionslose Darstellung der Umweltwirkungen. Dabei wird deutlich, dass die Umweltwirkungen im Charakterisierungsfaktor Marine aquatische Ökotoxizität im Verhältnis zur europäischen Grundbelastung mit Abstand am relevantesten für alle betrachteten Batteriespeichertechnologien und die Photovoltaikanlage ist. Darüber hinaus heben sich auch die Charakterisierungsfaktoren Ressourcenverbrauch, Süßwasser-Ökotoxizität und Humantoxizität bei allen betrachteten Produktsystemen von den übrigen Charakterisierungsfaktoren ab.<sup>247</sup>

<sup>247</sup> Moshövel J., Magnor D., Sauer D., Gährs S., Bost M., Hirschl B., Cramer M., Özalay B., Matrose C., Müller C., Schnettler A.; PV-Nutzen; Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen und Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin; Dezember 2015 Seite 148.

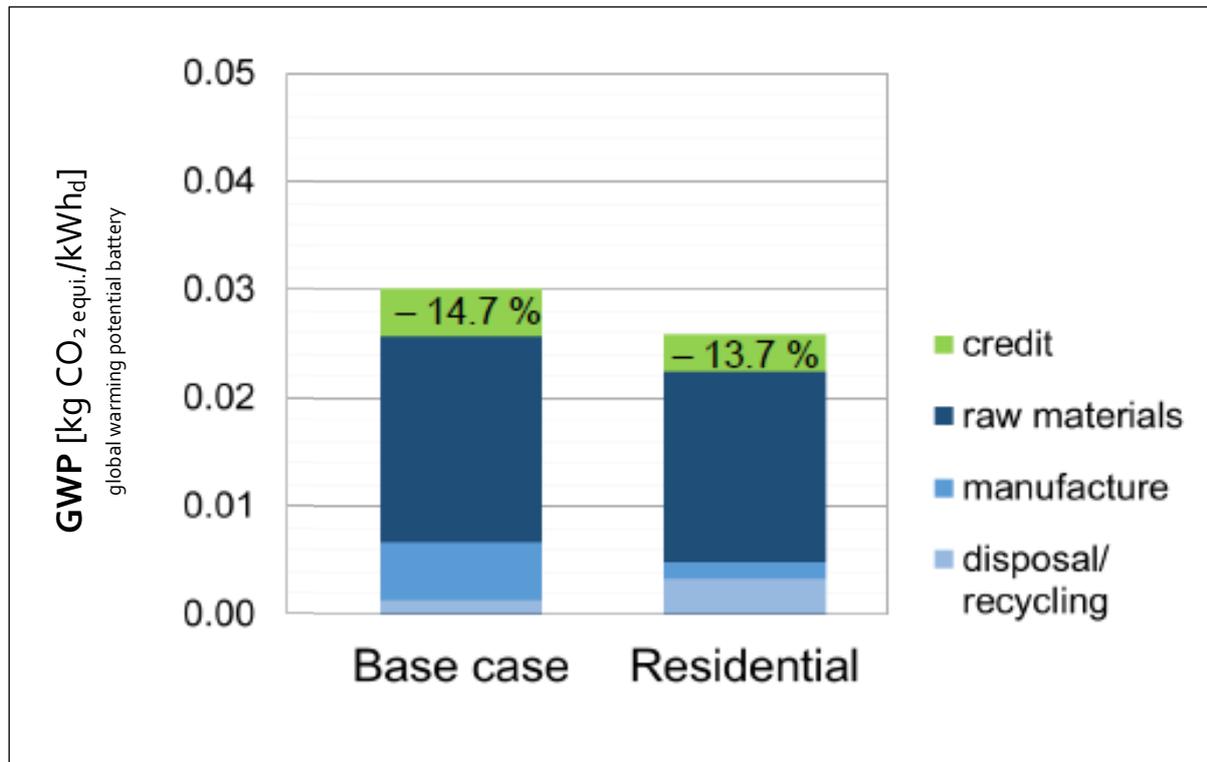


**Abbildung 6-41:** Relativer Vergleich von Umweltwirkung der Produktion von unterschiedlichen Batteriespeichern mit einer Photovoltaikanlage normiert auf die europäische Gesamtumweltbelastung

Minke, 2018, bewertet zur Ermittlung des Treibhausgaspotentials vergleichend drei stationärer Vanadium-Redox-Flow Batteriespeicher. Darunter ist einer für den Einsatz in einem Einfamilienhaus ausgelegt, mit einer maximalen Entladeleistung von 3 kW und einer nutzbaren Kapazität von 6 kWh die im Zuge eines Ladezyklus durchschnittlichen einmal pro Tag unter Annahme eines 80% Batterie-wirkungsgrads abgegeben wird. Es wird eine 10 jährige kalendarische Lebensdauer angenommen, gleichzeitig jedoch betont, dass die zumindest zu erwartende kalendarische Lebensdauer 20 Jahre beträgt. Die Ökobilanzierung des Treibhausgaspotentials erfolgt nach der ReCiPe Methode als Mid-Point-Kategorie, bezogen auf eine funktionelle Einheit von  $\text{kg CO}_2_{\text{equi.}}/\text{kWh}_u$ . Dabei steht der Index u für used, also für die vom Speicher bezogene Energie was eine direkte Vergleichbarkeit etwa mit den Ergebnissen der bei Vandepaer analysierten stationärer Lithium-Ionen Batteriespeicher verunmöglicht, da hier auf vom Speicher abgegebenen Energie normiert wird.<sup>248</sup> Minke differenziert in die Beiträge zum Treibhausgaspotential aus der Rohmaterialienbeschaffung, der Batteriespeicher Produktion, der Entsorgung und dem Recycling, wobei ein Bonus für Kreislaufbewirtschaftung ausgewiesen wird, der optional abgezogen werden kann. Im Kontext der Kompilation von Indikatorwerten für die vorliegende Studie wird dieser Bonus nicht eingelöst. Die Betriebsphase wird nicht explizit ausgewiesen, jedoch angegeben, dass der Wiege zu Bahre Ansatz zur Anwendung kommt. Es wird daher angenommen, dass die Beiträge des Batteriespeichers zum Treibhausgaspotential während der Betriebsphase berücksichtigt sind, der Beitrag des Betriebsstroms jedoch nicht einbezogen wird.

<sup>248</sup> Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver An, Struijs J., van Zelm R., ReCiPe 2008: A life cycle assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation; 2013

Schließlich sind auch die Charakterisierungsfaktoren für eine als Basisvariante bezeichneten stationärer Vanadium-Redox-Flow Batteriespeicher gleicher Zellchemie und Bauart jedoch mit 10fach höherer Speicherkapazität angegeben wie Abbildung 6-42 zeigt.<sup>249</sup>



**Abbildung 6-42:** Vergleich Treibhausgaspotenzial je bereitgestellter Energieeinheit während des Lebenszyklus nach Kapazität des Vanadium-Redox-Flow Batteriespeichers

Bei Rydh, 1999, wird als funktionelle Einheit ein stationärer Vanadium-Redox-Flow Batteriespeicher mit einer maximalen Entladeleistung von 50kW, einer nutzbaren Kapazität von 450kWh und einer durchschnittlichen täglichen Batteriestromabgabe von 150kWh<sub>d</sub> über 20 Jahre kalendarische Lebensdauer angenommen. Daraus ergibt sich eine Gesamtmenge von bereitgestelltem Batteriestrom von 1.095 MWh<sub>d</sub>. Was eine Gegenüberstellung mit der bei Vandepaer angewendeten funktionellen Einheit einer MWh<sub>d</sub> Batteriestrom aus einem stationärer Lithium-Ionen Batteriespeicher ermöglichen würde. Allerdings erfolgt die Ökobilanzierung bei Rydh nach dem Environmental Priority System hochaggregierend auf eine Zahl, die den monetären Wert darstellt, den jemand zahlen würde, um beeinträchtigende Veränderungen der Umwelt zu vermeiden. Inhaltliche Grundlage sind theoretisch

<sup>249</sup> Abbildung bearbeitet auf Grundlage von: Minke C., Peters J., Baumann M., Weil M.; Environmental assessment of vanadium redox flow batteries, Poster presentation, SETAC Conference Europe 28th Annual Meeting Rome 2018

abgeleitete Schätzungen, Charakterisierungsfaktoren im engen Sinn werden nicht zur Verfügung gestellt.<sup>250,251</sup> Ein direkter Vergleich mit Ergebnissen anderer Ökobilanzierungsmodelle wie etwa IMPACT 2002+, ist daher nicht möglich.<sup>252,253</sup>

Dassisti, 2014, führt als funktionelle Einheit eine stationärer Vanadium-Redox-Flow Batteriespeicher mit einer nutzbaren Kapazität von 0,15 kWh bei acht täglich möglichen Ladezyklen und einer sich daraus ergebenden durchschnittlichen täglichen Batteriestromabgabe von 1,2 kWh<sub>d</sub> über 20 Jahre kalendarische Lebensdauer ein. Daraus ergibt sich eine Gesamtmenge von bereitgestelltem Batteriestrom von 8.760 MWh<sub>d</sub>.<sup>254</sup> Die Zellchemie entspricht einer gängigen Zusammensetzung mit einer anodenseitige Vanadylsulfat VOSO<sub>4</sub> Elektrolytlösung und einer katodenseitige Vanadium(III)-chlorid VCl<sub>3</sub> Elektrolytlösung. Die Ökobilanzierung erfolgt mit IMPACT 2002+ und ReCiPe, was zumindest eine gewisse Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der bei Vandepaer angewendeten funktionellen Einheit einer MWh<sub>d</sub> Batteriestrom aus einem stationärer Lithium-Ionen Batteriespeicher ermöglicht.<sup>255,256</sup> Dassisti differenziert dabei in Produktion, Betrieb und Entsorgung mit Recycling, wobei jedoch der Ladestrom inkludiert betrachtet wird. Ausgehend von den Ergebnissen nach Hiremat<sup>257</sup> und Vandepaer werden daher die bei Dassisti angeführten Beiträge zu den ökologischen Wirkungen aus der Betriebsphase nur zu einem geringen Anteil in grober Näherung orientiert an Abbildung 6-43 angerechnet.<sup>258</sup> Es ergibt sich dabei eine hinreichende Deckung mit den bei Denholm vorgelegten Werten.<sup>259</sup>

---

<sup>250</sup> Bengt S., A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS) Version 2000 – General system characteristics. Schweden, 1999

<sup>251</sup> Nissen N.; Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme. Berlin 2001, S. 53

<sup>252</sup> Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R., IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. In: International Journal of Life Cycle Assessment 8 (6) 324 – 330, Landsberg, 2003

<sup>253</sup> Anmerkung: Impact 2002+ wurde ursprünglich von der École polytechnique fédérale de Lausanne basierend auf Critical Surface-Time 95 entwickelt. Die Midpoint Kategorien korrespondieren teilweise mit jenen aus Eco-Indicator 99 und CML 2002.

<sup>254</sup> Dassisti M., Mastroilli P., Rizzuti A., L'Abbate P., Cozzolino G., Chimienti M.; LCA of in-house produced small-sized vanadium redox-flow battery; Proceedings of SEEP2014, Dubai, 23-25 November 2014

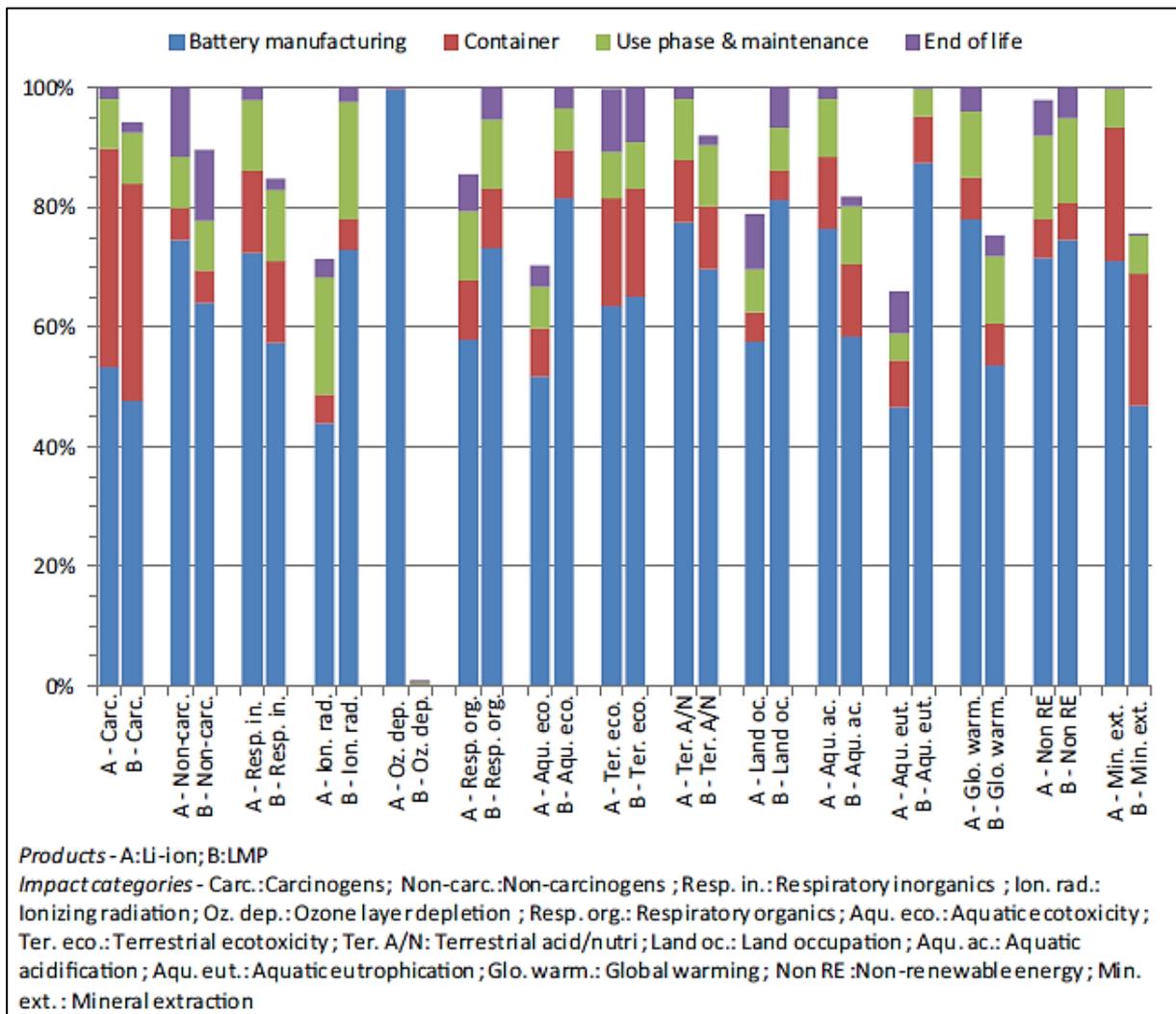
<sup>255</sup> Anmerkung: Impact 2002+ wurde ursprünglich von der École polytechnique fédérale de Lausanne basierend auf Critical Surface-Time 95 entwickelt. Die Midpoint Kategorien korrespondieren teilweise mit jenen aus Eco-Indicator 99 und CML 2002.

<sup>256</sup> Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver An, Struijs J., van Zelm R., ReCiPe 2008: A life cycle assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation; 2013

<sup>257</sup> Hiremath M.; Comparative Life Cycle Assessment of Stationary Battery Storage Technologies for Balancing Fluctuations of Renewable Energy Sources; Postgraduate Programme Renewable Energy 14; 2012

<sup>258</sup> Vandepaer L., Cloutier J., Amor B.; Environmental impacts of Lithium Metal Polymer and Lithium-ion stationary batteries; Renewable and Sustainable Energy Reviews 78; 2017; page: 46–60.

<sup>259</sup> Denholm P., Kulcinski G.; Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems; Energy Conversion and Management 45(13), 08- 2004, page: 2153-2172.



**Abbildung 6-43:** Prozentual aufgegliederte Anteile von Umweltwirkung aus Lithium-Ionen Batteriespeichern in einzelnen Lebenszyklusphasen

Für die vier bei Dassisti nach IMPACT 2002+ ermittelten Charakterisierungsfaktoren ergeben sich daraus in Annäherung die in Tabelle 6-16 angegebenen Indikatorwerte.

**Tabelle 6-16:** Übersicht vier weiterführender Ökobilanzindikatoren für Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher mit einer Kapazität von 0,15kWh

Wirkungskategorie	Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher Lebenszyklus gesamt	Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher Betrieb % - Anteil	Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher Kapazität 0,15 kWh
<b>Kanzerogene Schadstoffe</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>equi</sub> /MWh <sub>d</sub> ]	0,00000301	0,0000007 10%	2,38E-06 $0,00000301 - (0,0000007 \cdot 0,9) = 0,00000238$
<b>Nicht-kanzerogene Schadstoffe</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>equi</sub> /MWh <sub>d</sub> ]	0,0000266	0,0000232 10%	5,72E-06 $0,0000266 - (0,0000232 \cdot 0,9) = 0,00000572$
<b>Feinstaub</b> [kg PM <sub>2,5equi</sub> /MWh <sub>d</sub> ]	0,0759	0,06987 15%	1,65E-02 $0,0759 - (0,06987 \cdot 0,85) = 0,0165105$
<b>Ionisierende Strahlung</b> [Bq C-14 <sub>equi</sub> /MWh <sub>d</sub> ]	0,000674	0,000631 20%	1,692E-04 $0,000674 - (0,000631 \cdot 0,80) = 0,0001692$

Denholm, 2004, schließlich führt einen übergeordneten Vergleich der energetischen Speichersysteme Pumpwasserkraftspeicherung, Druckluftspeicherung und elektrochemische Speicherung in einem Vanadium-Redox-Flow Batteriespeicher.<sup>260</sup> Ausgewiesen werden die Charakterisierungsfaktoren des Primärenergiebedarfs und des Treibhausgaspotenzials differenziert in die Produktion und den Betrieb jeweils bezogen auf die im Rahmen dieser Studie angewendete funktionelle Bezugseinheit der Speicherkapazität.

Abschließend werden in Abbildung 6-44 und Abbildung 6-45 zwei exemplarische Kalkulationsblätter gezeigt, wie sie aus der Kompilation der Daten aus den vorangegangenen skizzierten Studien erstellt werden konnten, um die entsprechenden Werte für die vier in der vorliegenden Studie angenommenen Speicherfälle zu errechnen.

Vandepaar		Lithium-Ionen Größe 1	Lithium-Ionen Größe 2	Lithium-Ionen Anwendung 1: EFH-Konvektor - 22°C - Lilo 11kWh	Lithium-Ionen Anwendung 1: EFH-Konvektor - 22°C - Lilo 27kWh	Lithium-Ionen Anwendung 1: MFH-Konvektor - 22°C - Lilo 86kWh	Lithium-Ionen Anwendung 1: MFH-Konvektor - 22°C - Lilo 223kWh
	<b>Bezugsgröße</b>						
Umweltfolgen LCA	delivered energy	0,034 kg CO <sub>2</sub> / kWh <sub>d</sub>	0,029 kg CO <sub>2</sub> / kWh <sub>d</sub>	0,264 kg CO <sub>2</sub> / kWh <sub>d</sub>	0,497 kg CO <sub>2</sub> / kWh <sub>d</sub>	0,254 kg CO <sub>2</sub> / kWh <sub>d</sub>	0,470 kg CO <sub>2</sub> / kWh <sub>d</sub>
Umweltfolgen LCA	delivered energy	34 kg CO <sub>2</sub> / MWh <sub>d</sub>	28,9 kg CO <sub>2</sub> / MWh <sub>d</sub>	264 kg CO <sub>2</sub> / MWh <sub>d</sub>	497 kg CO <sub>2</sub> / MWh <sub>d</sub>	254 kg CO <sub>2</sub> / MWh <sub>d</sub>	470 kg CO <sub>2</sub> / MWh <sub>d</sub>
Nutzbare Kapazität	battery unit	70 kWh	600 kWh	11 kWh	22 kWh	96 kWh	22 kWh
delivered energy	battery unit	375.000 kWh	30.000 kWh	7.100 kWh	9.240 kWh	57.540 kWh	80.000 kWh
Kalkulatorische Lebensdauer		15 a	15 a	20 a	20 a	20 a	20 a
Kalkulatorische Zyklen	pro Jahr	5000 #	5000 #	645 #	342 #	669 #	360 #
used energy	pro Jahr			355 kWh/a	462 kWh/a	2577 kWh/a	400 kWh/a
				444 kWh/a	590 kWh/a	3487 kWh/a	498 kWh/a
Umweltfolgen LCA	battery unit capacity	12.750 kg CO <sub>2</sub>	867.000 kg CO <sub>2</sub>				
		170 kg CO <sub>2</sub> / kWh capacity	145 kg CO <sub>2</sub> / kWh capacity	170 kg CO <sub>2</sub> / kWh capacity	170 kg CO <sub>2</sub> / kWh capacity	170 kg CO <sub>2</sub> / kWh capacity	169 kg CO <sub>2</sub> / kWh capacity

**Abbildung 6-44:** Kalkulationsblatt Treibhausgaspotenzial Lithium-Ionen Batteriespeicher

<sup>260</sup> Denholm P., Kulcinski G.; Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems; Energy Conversion and Management 45(13), 08- 2004, page: 2153-2172.

Dassisti	Redox Flow	Redox Flow Anwendung 1: EFH - Konvektor 22°C - Ref 11 kWh	Redox Flow Anwendung 1: EFH - Konvektor 22°C - Ref 27 kWh	Redox Flow Anwendung 1: MFH - Konvektor - 22°C - Ref 86 kWh	Redox Flow Anwendung 1: MFH - Konvektor - 22°C - Ref 222 kWh
Umweltfolgen LCA	Bezugsgröße delivered energy	1,65E-05 Bq C-14 / kWh_d	2,86E-04 Bq C-14 / kWh_d	5,40E-04 Bq C-14 / kWh_d	2,74E-04 Bq C-14 / kWh_d
Umweltfolgen LCA	delivered energy	1,65E-02 Bq C-14 / MWh_d	2,86E-01 Bq C-14 / MWh_d	5,40E-01 Bq C-14 / MWh_d	2,74E-01 Bq C-14 / MWh_d
Konversionsfaktor Netzstrom	delivered energy				
Mittlerer Beladungszustand	percent of capacity				
Max. Entladeleistung					
Nutzbare Kapazität	0,15 kWh	11 kWh	27 kWh	86 kWh	222 kWh
Beladewirkungsgrad	80%	79%	79%	79%	79%
Entladewirkungsgrad	100%	100%	100%	100%	100%
delivered energy	1.314 kWh	6.960 kWh	9.040 kWh	56.800 kWh	78.380 kWh
used energy	1.643 kWh	9.600 kWh	12.740 kWh	75.960 kWh	105.160 kWh
Kalkulatorische Lebensdauer	20 a	20 a	20 a	20 a	20 a
Kalkulatorische Zyklen (8 per day)	8760 #	633	335	660	353
delivered energy pro Jahr		348 kWh/a	452 kWh/a	2840 kWh/a	3919 kWh/a
used energy pro Jahr		480 kWh/a	637 kWh/a	3798 kWh/a	5258 kWh/a
Umweltfolgen LCA	Stück Batterie capacity	3,E-02 Bq C-14	2,E-01 Bq C-14/kWhcapacity	2,E-01 Bq C-14/kWhcapacity	2,E-01 Bq C-14/kWhcapacity
		1,81E-01 Bq C-14/kWhcapacity			

Abbildung 6-45: Kalkulationsblatt Ionisierende Strahlung Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher

Aus diesen Kalkulationen ergeben sich die in Tabelle 6-17 angeführten Charakterisierungsfaktoren der Ökobilanzierung nach Batteriespeichersystem und Batteriespeicherkapazität beziehungsweise bezogen auf die funktionelle Einheit.

Tabelle 6-17: Übersicht der Basis- und weiterführenden Ökobilanzindikatoren nach Batteriespeichersystem und Batteriespeicherkapazität

Wirkungskategorie	Funktionelle Einheit [ÖBI/kWh Speicherkapazität]	EFH 11 kWh	EFH 27 kWh	MFH 86 kWh	MFH 222 kWh
<b>Kanzerogene Schadstoffe</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>equi</sub> /MWh]	6,50E+00 Li-Ion	1,07E+01 Li-Ion	2,37E+01 Li-Ion	9,84E+00 Li-Ion	2,26E+01 Li-Ion
	2,61E-05 VRFB	4,33E-05 VRFB	9,56E-05 VRFB	4,00E-05 VRFB	9,21E-05 VRFB
<b>Nicht-kanzerogene Schadstoffe</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>equi</sub> /MWh]	7,15E+00 Li-Ion	1,17E+01 Li-Ion	2,61E+01 Li-Ion	1,08E+01 Li-Ion	2,50E+01 Li-Ion
	6,26E-05 VRFB	1,04E-04 VRFB	2,30E-04 VRFB	9,62E-05 VRFB	9,62E-05 VRFB
<b>Feinstaub</b> [kg PM <sub>2,5equi</sub> /MWh]	2,55E-01 Li-Ion	4,18E-01 Li-Ion	9,28E-01 Li-Ion	3,85E-01 Li-Ion	8,87E-01 Li-Ion
	1,81E-01 VRFB	3,00E-01 VRFB	6,63E-01 VRFB	2,78E-01 VRFB	6,39E-01 VRFB
<b>Ionisierende Strahlung</b> [Bq C-14 <sub>equi</sub> /MWh]	1,43E+03 Li-Ion	2,35E+03 Li-Ion	5,22E+03 Li-Ion	2,16E+03 Li-Ion	4,97E+03 Li-Ion
	1,81E-01 VRFB	3,00E-01 VRFB	6,63E-01 VRFB	2,78E-01 VRFB	6,39E-01 VRFB
<b>Abbau stratosphärische Ozonschicht</b> [kg CFC-11 <sub>equi</sub> /MWh]	2,03E-03 Li-Ion	3,32E-03 Li-Ion	7,39E-03 Li-Ion	3,07E-03 Li-Ion	7,11E-03 Li-Ion
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Atmungsorgan wirksame organische Stoffe</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>4equi</sub> /MWh]	4,83E-02 Li-Ion	7,98E-02 Li-Ion	1,77E-01 Li-Ion	7,30E-02 Li-Ion	1,65E-01 Li-Ion
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Aquatische</b>	3,37E+04 Li-Ion	5,52E+04 Li-Ion	1,23E+05 Li-Ion	5,09E+04 Li-Ion	1,17E+05 Li-Ion

<b>Ökotoxizität</b> [kg TEG <sub>water</sub> /MWh]	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Terrestrische Ökotoxizität</b> [kg TEG <sub>soil</sub> /MWh]	7,90E+03 Li-Ion	1,30E+04 Li-Ion	2,88E+04 Li-Ion	1,20E+04 Li-Ion	2,75E+04 Li-Ion
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Terrestrische Versauerung/Überdüngung</b> [kg SO <sub>2</sub> equi./MWh]	3,80E+00 Li-Ion	6,22E+00 Li-Ion	1,38E+01 Li-Ion	5,75E+00 Li-Ion	1,32E+01 Li-Ion
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Landnutzung</b> [m <sup>2</sup> org.arable/MWh]	3,46E+00 Li-Ion	5,66E+00 Li-Ion	1,26E+01 Li-Ion	5,23E+00 Li-Ion	1,21E+01 Li-Ion
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Aquatische Versauerung</b> [kg SO <sub>2</sub> equi./MWh]	1,39E+00 Li-Ion	2,28E+00 Li-Ion	5,07E+00 Li-Ion	2,10E+00 Li-Ion	4,85E+00 Li-Ion
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Aquatische Überdüngung</b> [kg PO <sub>4</sub> P-lim/MWh]	4,27E-01 Li-Ion	6,99E-01 Li-Ion	1,55E+00 Li-Ion	6,46E-01 Li-Ion	1,49E+00 Li-Ion
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<b>Treibhausgas-potenzial</b> [kg CO <sub>2</sub> equi./kWh]	170 Li-Ion	279 Li-Ion	619 Li-Ion	257 Li-Ion	593 Li-Ion
	119 VRFB	197 VRFB	435 VRFB	182 VRFB	421 VRFB
<b>Primärenergiebedarf nicht erneuerbar</b> [kWh/kWh]	515 Li-Ion	845 Li-Ion	1877 Li-Ion	780 Li-Ion	1796 Li-Ion
	625 VRFB <sup>i</sup>	1039 VRFB	2293 VRFB	959 VRFB	2208 VRFB
<b>Entnahme mineralischer Rohstoffe</b> [kWh/MWh]	2,18E+01 Li-Ion	3,58E+01 Li-Ion	7,95E+01 Li-Ion	3,30E+01 Li-Ion	7,59E+01 Li-Ion
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

<sup>i</sup> ... Wert direkt übernommen von Denholm, 2004, (entspricht hinreichend Dassisti gewichtet nach Hiremath)

## 6.6 Aspekte sozialer Wirkungen

Die umfassende Analyse von Energiespeichermedien schließt auch eine Betrachtung sozialer Aspekte der Produktion mit ein. Der direkte Vergleich und eine Bewertung auf Basis dieser Aspekte können nur für die jeweiligen spezifischen Ausgangsstoffe Lithium beziehungsweise Vanadium erfolgen. Die nachfolgende Analyse beschränkt sich dabei auf drei wesentliche Indikatoren die eine Abschätzung des sozialen Impacts verschiedenerer Batteriespeicher in grober Näherung ermöglichen. Folgende Indikatoren werden herangezogen:

- Human Development Index (HDI)
- Gini-Koeffizient der Einkommensverteilung der Hauptproduktionsländer
- Nationale Gesundheitsausgaben in % des Bruttoinlandprodukts

Die Indikatoren entsprechen denen, welche bereits in Kapitel 5.5 erläutert und zur Bewertung der sozialen Wirkungen der Herstellung des thermischen Speichers Beton herangezogen wurden. Damit ist die Grundlage für einen abschließenden Vergleich der Speichermedien in Kapitel 7.3 erstellt.

## Lithium-Ionen Batteriespeicher

Lithium hat einen Anteil an 60 ppm an der kontinentalen Erdkruste. Die Gewinnung von Lithiumcarbonat erfolgt aus lithiumhaltigen Salzlösungen, durch Verdunsten des Wassers und unter Beigabe von Natriumcarbonat. Für die metallische Gewinnung wird dieses mit Salzsäure umgesetzt wodurch Kohlenstoffdioxid entsteht und entweicht. In weiteren Aufbereitungsprozessen kann schließlich reines Lithium gewonnen werden. Die weltweit vorhandenen Reserven in Minen wurden 2017 auf 14,5 Mio. t geschätzt. Die Hauptproduktionsländer von Lithium sind Chile, Australien und Argentinien.<sup>261</sup>

## Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher

Vanadium ist etwa doppelt so häufig wie Lithium und macht etwa einen Anteil von 120 ppm der kontinentalen Erdkruste aus. Es kommt meist gebunden in verschiedenen Mineralien vor. Mögliche Ausgangsstoffe für die Produktion von Vanadium sind Vanadiumerze, vanadiumhaltige Titan-Magnetit-Erze und Erdöl. Die wichtigste Quelle für die Gewinnung des Metalls fällt bei der Stahlerzeugung an. Vanadiumhaltige Eisenerze werden im Hochofen zu Eisen reduziert. Vanadium reichert sich prozessbedingt in der Schlacke an und kann durch weitere Aufbereitungsprozesse gewonnen werden. Die bekannten Reserven wurden 2015 auf 15 Mio. t geschätzt, was in absehbarer Zeit keine Engpässe erwarten lässt. Die Hauptproduktionsländer von Vanadium sind Südafrika, China und Russland.<sup>262</sup>

Die Werte der einzelnen Produktionsländer sind nachfolgend aufgelistet und in der abschließenden Tabelle 6-18 nach Jahresproduktionsmengen gewichtet und gemittelt angeführt.

**Human Development Index:** China 0,73; Russland 0,8; Südafrika 0,67; Australien 0,94; Chile 0,83; Argentinien 0,84<sup>263</sup>

**Gini Index bezogen auf die Einkommensverteilung:** China 47,4%, Russland 41%, Südafrika 57,8%, Australien 35,2%, Chile 45,4%, Argentinien 52,2%<sup>264</sup>

**Gesundheitsausgaben in % des BIP:** China 5,5%, Russland 7,1%, Südafrika 8,8%, Australien 9,4%, Chile 7,8%, Argentinien 4,8%<sup>265</sup>

**Produktionsmengen Vanadium (2016):** China 43.000 t, Russland 16.000 t, Südafrika 13.000 t<sup>264</sup>

**Produktionsmengen Lithium (2016):** Australien 14.300 t, Chile 12.000 t, Argentinien 5.700 t<sup>266</sup>

---

<sup>261</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium> [Letzter Zugriff 29.5.2018]

<sup>262</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, <https://de.wikipedia.org/wiki/Vanadium> [Letzter Zugriff 29.5.2018]

<sup>263</sup> United Nations Development Programme, Human Development Data, <http://hdr.undp.org/en/data> [Letzter Zugriff 29.5.2018]

<sup>264</sup> <https://investingnews.com/daily/resource-investing/industrial-metals-investing/vanadium-investing/vanadium-producing-countries/> [Letzter Zugriff 30.5.2018]

<sup>265</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_L%C3%A4nder\\_nach\\_Gesundheitsausgaben](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Gesundheitsausgaben) [Letzter Zugriff 29.5.2018]

<sup>266</sup> Wikipedia die freie Enzyklopädie, <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium> [Letzter Zugriff 29.5.2018]

**Tabelle 6-18:** Indikatorwerte zur Abschätzung des sozialen Impacts der Lithium- und der Vanadiumproduktion

	Lithiumproduktion	Vanadiumproduktion
<b>Human Development Index der drei Hauptproduktionsländer nach Produktionsmenge gewichtet</b>	0,88	0,73
<b>Mittlerer Gini-Index der drei Hauptproduktionsländer, nach Produktionsmenge gewichtet</b>	42,05%	47,05%
<b>Mittelwerte der Gesundheitsausgaben in % des BIP der drei Hauptproduktionsländer nach Produktionsmenge gewichtet</b>	7,98%	6,45%

## 7 Vergleich des ökologischen Rucksacks aus thermischer und elektrischer Energiespeicherung

Auf Basis der in den Kapiteln 5 und 6 entwickelten Ergebnisse kann ein Vergleich der ökologischen Wirkungen von Beton als thermischem und Batterien als elektrochemischen Energiespeichern erstellt werden.

### 7.1 Vergleich der ökologischen Wirkungen – Basisindikatoren

Vergleichend ausgewertet werden die Summenwerte des Primärenergiebedarfs und der CO<sub>2</sub>-Emissionen für jeweils zehn verschiedene Varianten und für jeweils das EFH und das MFH.

Ausgewiesen werden dabei die ökologischen Belastungen aus dem Strombezug, welche mit der tatsächlich bezogenen Energiemenge aber auch mit dem Maß der Nutzung erneuerbaren Überschussstroms variieren, ausgedrückt im PEB bzw. den CO<sub>2</sub>-Emissionen pro m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> und Jahr.

Und ausgewiesen werden die ökologischen Belastungen aus der Errichtung der thermischen oder elektrischen Speicher, ebenfalls ausgedrückt im PEB bzw. den CO<sub>2</sub>-Emissionen pro m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> und Jahr.

Es ergeben sich die folgenden Gesamtemissionen aus Strombezug und Speicherproduktion, für das EFH dargestellt in Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 und für das MFH dargestellt in Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4.

In den Diagrammen in dunkelblau dargestellt sind die ökologischen Belastungen aus dem Strombezug. In hellblau dargestellt sind die ökologischen Belastungen aus der Batteriespeicher-Produktion. In hellblau mit Muster dargestellt sind die ökologischen Belastungen aus der Produktion der Betondecken, da bei diesen die Frage zu stellen ist, ob diese der thermischen Speicherung angelastet werden oder nicht.

Aus den Diagrammen ist ablesbar:

- Die Anwendung der thermischen Speicherung mit BTA und energieflexibler Betriebsweise senkt die Belastungen aus dem Strombezug nennenswert, im Fall der CO<sub>2</sub>-Emissionen um Größenordnungen von 60% und darüber hinaus. Analoge Effekte werden auch von den Batteriespeichern erzielt, in deren Variante der „großen“ Dimensionierung, also ausgelegt auf eine dreitägige Überbrückungsperiode.
- Die ökologischen Folgen (PEB und CO<sub>2</sub>-Emissionen) der Produktion der Batteriespeicher wiegt in der lebenszyklischen Betrachtung die Belastungs-Reduktionen aus dem Strombezug überwiegend wieder auf. Das trifft, abgeschwächt, auch für den thermischen Speicher Beton zu, wobei allerdings in Frage gestellt werden muss, ob tatsächlich die ökologischen Produktionsaufwendungen einer bloßen Betondecke von 20 cm Stärke ihrer Zusatzfunktion als thermischer Speicher zuzuordnen sind. Umso mehr, als in den gegenständlichen Berechnungen keinerlei ökologische Produktionsaufwendungen der Holzbalkendecken gegengerechnet werden.

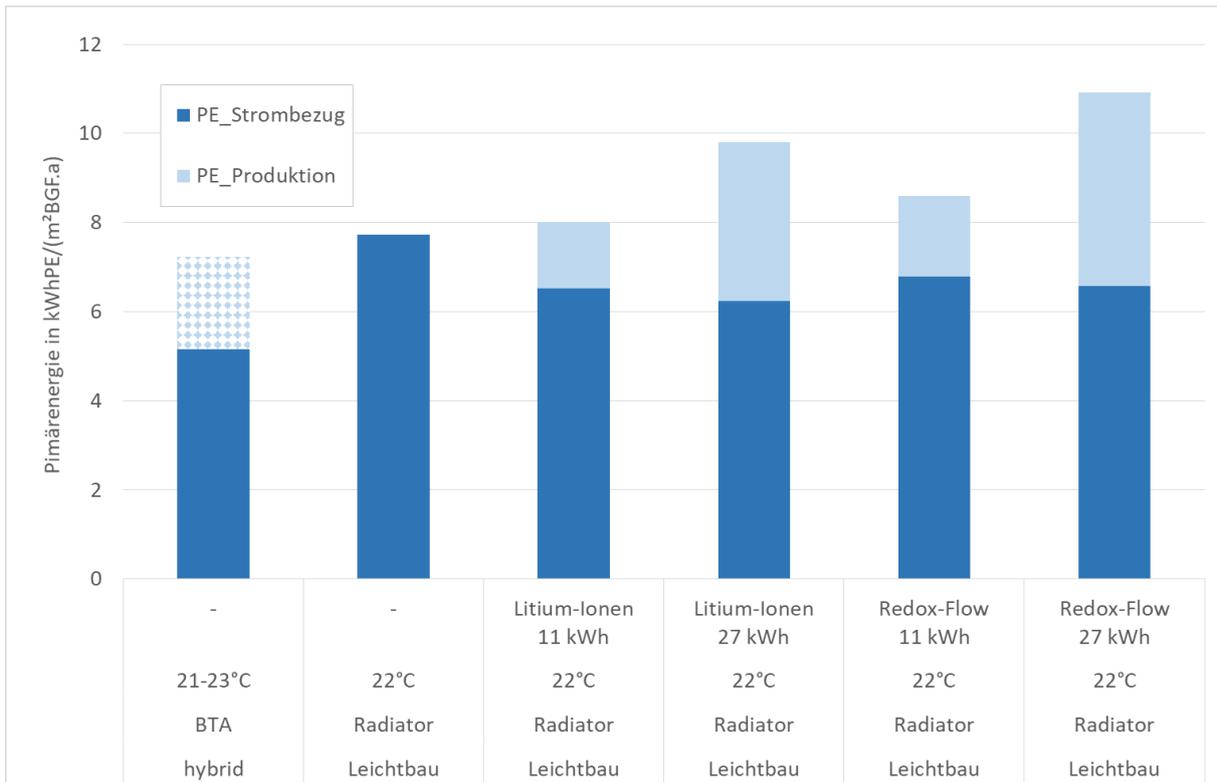


Abbildung 7-1 Primärenergiebilanz der Wärmeerzeugung EFH

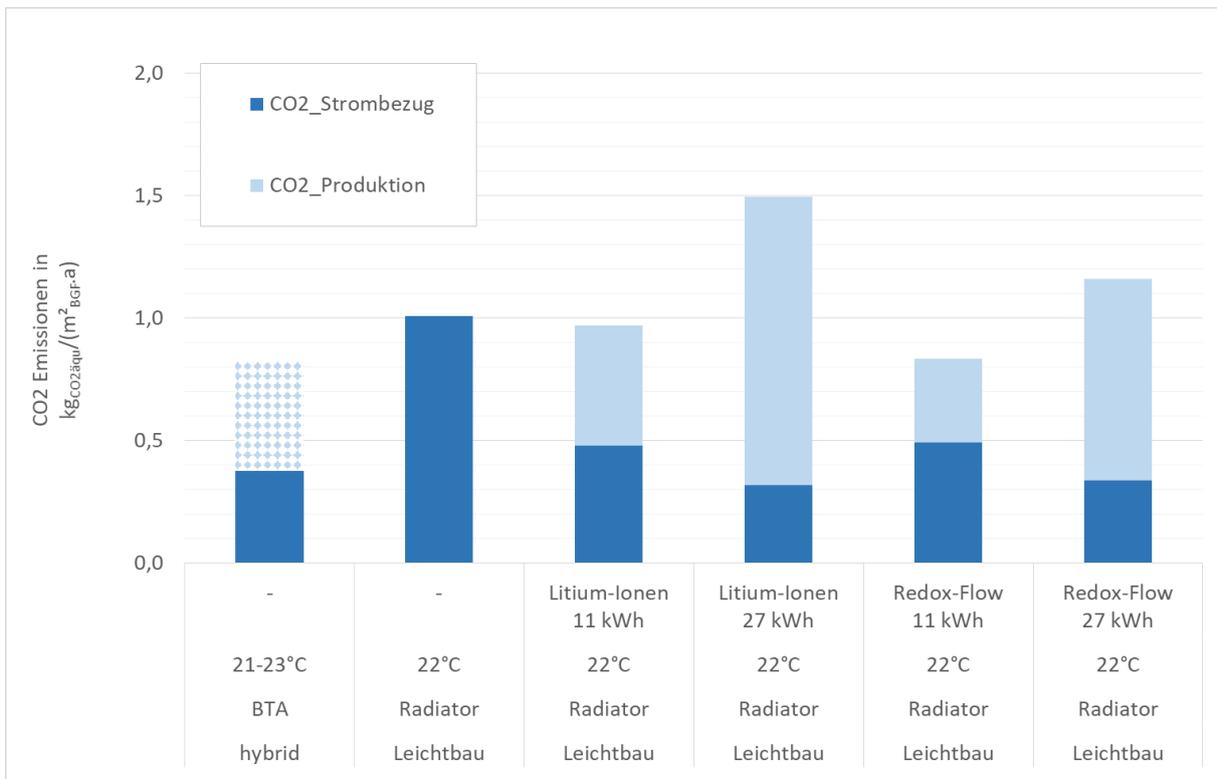
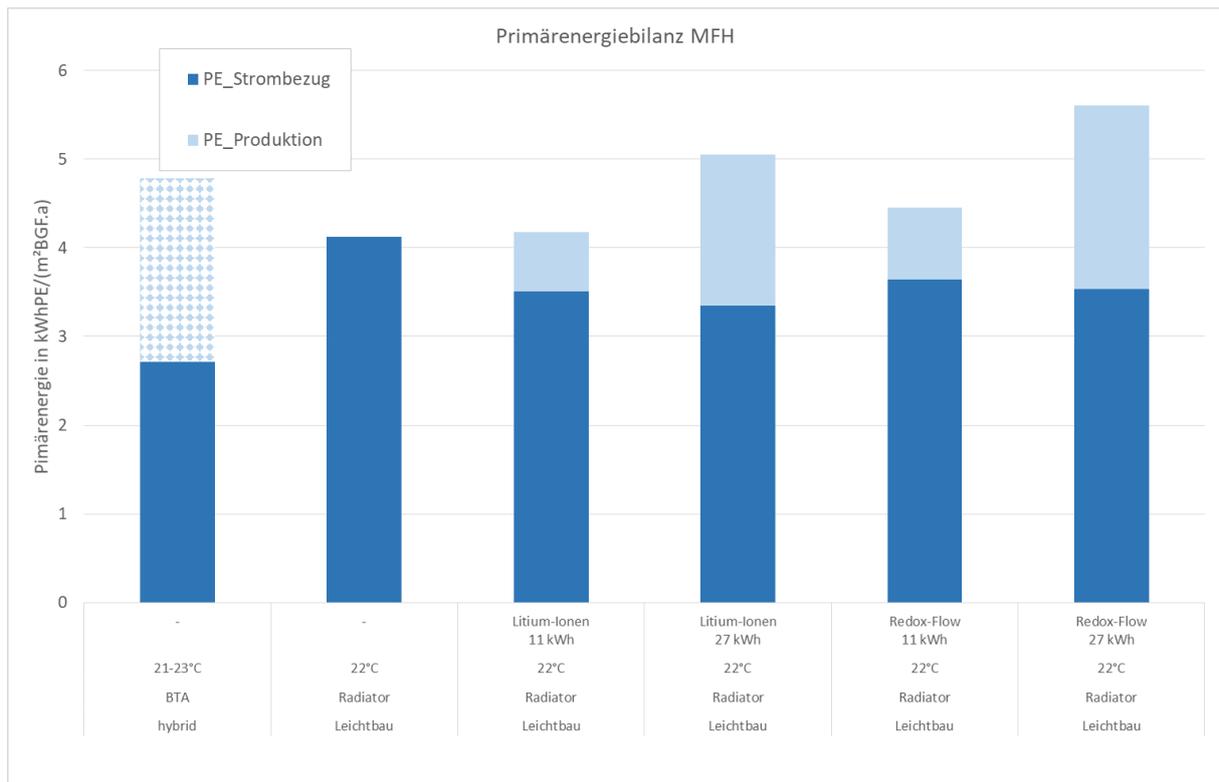
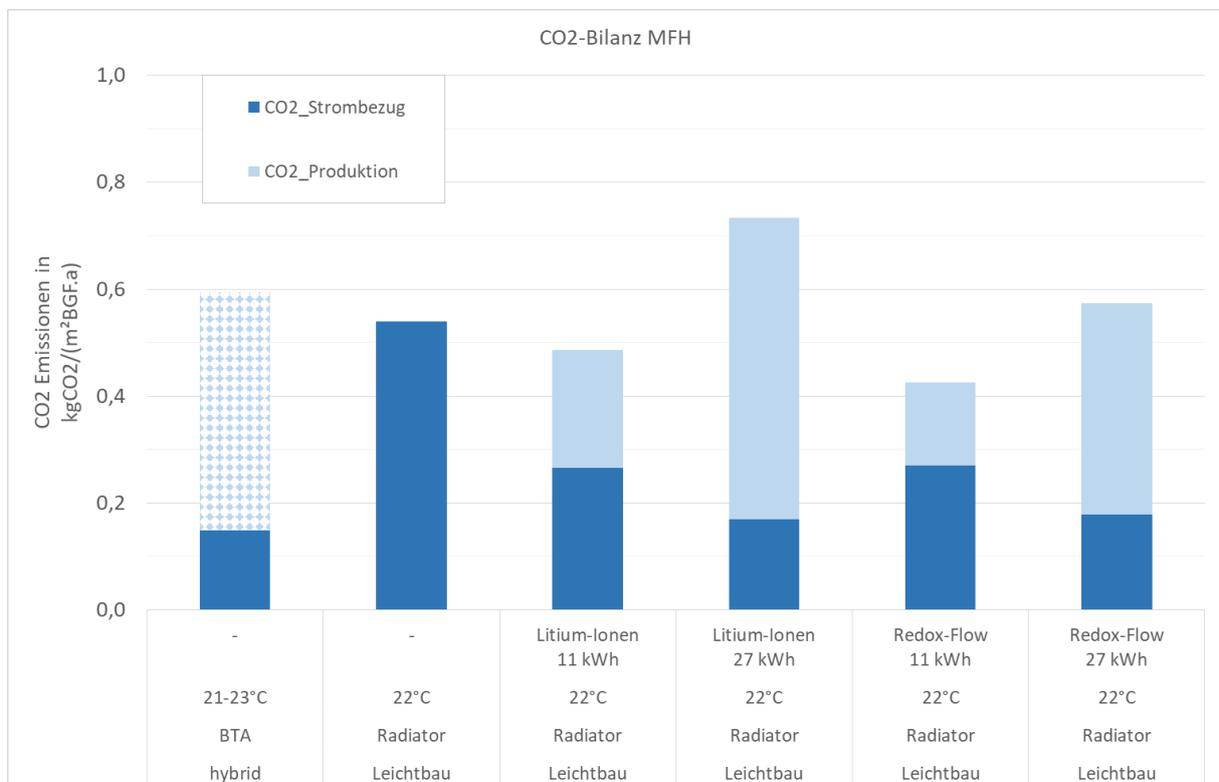


Abbildung 7-2 CO2-Bilanz der Wärmeerzeugung EFH



**Abbildung 7-3 Primärenergiebilanz der Wärmeerzeugung MFH**



**Abbildung 7-4 CO2-Bilanz der Wärmeerzeugung MFH**

## 7.2 Vergleich der ökologischen Wirkungen – Weiterführende Indikatoren

Als weiterführende Indikatoren ökologischer Wirkungen werden die Charakterisierungsfaktoren der Bilanzierungsmethode IMPACT 2002+ herangezogen.<sup>267,268</sup> Bezogen auf IMPACT 2002+ liegen sowohl für die Lithium-Ionen Batterien als auch für die Vanadium-Redox-Flow-Batterien Auswertungen vor. Darüber hinaus können auch entsprechende Charakterisierungsfaktoren für den Beton in der Literatur gefunden werden. Es ist aber anzumerken, dass keineswegs für alle untersuchten Speicher beziehungsweise für sämtliche weiterführenden Charakterisierungsfaktoren entsprechende Wirkungskategorieindikatorwerte in der Literatur gefunden werden können. Darüber hinaus ist aber ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die Datenlage unzureichend ist und die angeführten Werte teils nur auf den Angaben einer einzelnen Studie beruhen, und nicht im Sinne einer entsprechend fundierten wissenschaftlichen Datenkompilation durch Vergleiche abgesichert werden können. Folglich ist die nachfolgende Tabelle 7-1 nicht vollständig ausgefüllt. Die Datenfelder sind mit einer Ampelsignatur hinterlegt. Diese ermöglicht eine sehr einfache Orientierung betreffend den Vergleich der unterschiedlichen Speicher abseits der schwach abgesicherten Zahlenwertangaben.

**Tabelle 7-1:** Vergleich weiterführender Indikatorwerte zu den ökologischen Wirkungen der unterschiedlichen Speicher

Wirkungskategorie	[ÖBI/kWh Speicherkapazität]	[ÖBI/kWh Speicherkapazität]	[ÖBI/kWh Speicherkapazität]
	Beton	Li-Ion B	VRFB
<b>Primärenergiebedarf nicht erneuerbar</b> [kWh/kWh]	144	515	625
<b>Treibhausgaspotenzial</b> [kg CO <sub>2</sub> equi./kWh]	112	170	119
<b>Kanzerogene Schadstoffe</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>equi</sub> /MWh]	k.A.	6,50E+00	2,61E-05
<b>Nicht-kanzerogene Schadstoffe</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>equi</sub> /MWh]	k.A.	7,15E+00	6,26E-05
<b>Feinstaub</b> [kg PM <sub>2,5</sub> equi./MWh]	k.A.	2,55E-01	1,81E-01
<b>Ionisierende Strahlung</b> [Bq C-14 equi./MWh]	k.A.	1,43E+03	1,81E-01
<b>Abbau stratosphärische Ozonschicht</b> [kg CFC-11 <sub>equi</sub> /MWh]	3,14E-10 Anmerkung 1	2,03E-03	k.A.

<sup>267</sup> Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R., IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. In: International Journal of Life Cycle Assessment 8 (6) 324 – 330, Landsberg, 2003

<sup>268</sup> Anmerkung: Impact 2002+ wurde ursprünglich von der École polytechnique fédérale de Lausanne basierend auf Critical Surface-Time 95 entwickelt. Die Midpoint Kategorien korrespondieren teilweise mit jenen aus Eco-Indicator 99 und CML 2002.

<b>Atmungsorgan wirksame organische Stoffe</b> [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> equi./MWh]	k.A.	4,83E-02	k.A.
<b>Aquatische Ökotoxizität</b> [kg TEG <sub>water</sub> /MWh]	k.A.	3,37E+04	k.A.
<b>Terrestrische Ökotoxizität</b> [kg TEG <sub>soil</sub> /MWh]	k.A.	7,90E+03	k.A.
<b>Terrestrische und aquatische Versauerung/Überdüngung</b> [kg SO <sub>2</sub> equi./MWh]	1,65E-04 Anmerkung 2	5,19E+00	k.A.
<b>Landnutzung</b> [m <sup>2</sup> <sub>org.arable</sub> /MWh]	k.A.	3,46E+00	k.A.
<b>Aquatische Überdüngung</b> [kg PO <sub>4</sub> P-lim/MWh]	2,96E-05 Anmerkung 3	4,27E-01	k.A.
<b>Entnahme mineralischer Rohstoffe</b> [kWh/MWh]	k.A.	2,18E+01	k.A.

Anmerkung 1: [(7,2E-7 + 2,1 E-10 + 3,1 E-9 + 1,0E-10 -9,6E-8) : 2.300] : 0,868

Anmerkung 2: [(0,3 + 0,01 + 0,009 + 0,05 - 0,04) : 2.300] : 0,868

Anmerkung 3: [(0,3 + 0,01 + 0,009 + 0,05 - 0,04) : 2.300] : 0,868

### 7.3 Vergleich der Aspekte von sozialen Wirkungen

Der nachfolgende Vergleich wesentlicher Aspekte sozialer Wirkungen basiert auf einer Gegenüberstellung von den drei Indikatoren Human Development Index (HDI), Gini-Koeffizient der Einkommensverteilung und Anteil der nationalen Gesundheitsausgaben am Bruttoinlandprodukt, jeweils bezogen auf die Hauptproduktionsländer der Ausgangsstoffe Zement beziehungsweise Lithium sowie Vanadium.

Der direkte Vergleich der gemittelten Werte für wesentliche soziale Aspekte der Zementproduktion sowie der für die Batteriespeicherproduktion jeweils spezifischen Ausgangsstoffe Lithium beziehungsweise Vanadium zeigt deutliche Vorteile der stärker regional strukturierten Zementherstellung. Die Hauptproduktionsländer von Lithium sind Chile, Australien und Argentinien, jene von Vanadium Südafrika, China und Russland. Dass etwa 86% des in Österreich verwendeten Zements im Inland produziert werden, bildet sich in dessen besseren Indikatorwerten ab. Einzig der gemittelte Human Development Index für die Lithiumproduktion ist gleich hoch wie jener für die Zementproduktion. Einen großen Unterschied zeigt hingegen der Vergleich des Gini-Indexes bezogen auf die Einkommensverteilung. Die drei für Österreich relevanten Zementproduzenten liegen hier im Mittel um 40% unter dem Wert der Produzenten von Lithium oder Vanadium. Zur leichteren Orientierung sind die Datenfelder der vergleichenden Tabelle 7-2 mit einer Ampelsignatur hinterlegt.

**Tabelle 7-2:** Vergleich von Aspekten sozialer Wirkungen der Produktion der wesentlichsten Ausgangsstoffe der unterschiedlichen Speicher

	Betonproduktion	Lithiumproduktion	Vanadiumproduktion
<b>Human Development Index</b> der drei Hauptproduktionsländer nach Produktionsmenge gewichtet <sup>269</sup>	0,88	0,88	0,73
<b>Mittlerer Gini-Index</b> der drei Hauptproduktionsländer nach Produktionsmenge gewichtet	26,25%	42,05%	47,05%
<b>Gemittelter Wert der Gesundheitsausgaben in % des BIP</b> der drei Hauptproduktionsländer nach Produktionsmenge gewichtet	10,68%	7,98%	6,45%

<sup>269</sup>Für die Zementproduktion wurden die Indizes bezogen auf eine Importrate von 14% gewichtet.

## 8 Ergebniszusammenfassung und Schlussfolgerungen

### *Heizen mit 80% erneuerbarem Überschussstrom*

Es bestätigt sich, dass unter den angesetzten Randbedingungen der energieflexible Gebäudebetrieb in Form der vorsorglichen thermischen Beladung von Decken aus Beton die Nutzung erneuerbaren Überschussstroms aus Windkraftanlagen auf Werte in der Größenordnung von 70 bis 80% des gesamten Heizstrombedarfs steigern kann. (Siehe im Detail Kapitel 4.2.)

Als thermischer Speicher reichen dazu bereits die Betondecken in ihrer statisch ohnehin notwendigen Dimension von 20 cm Stärke aus. (Siehe im Detail Kapitel 3.9.)

### *Bis zu 10% HWB-Erhöhung durch Energieflexibilität*

Durch den energieflexiblen Betrieb, also die vorsorgliche thermische Beladung der aktivierten Decken sinkt deren verbleibende verfügbare Wärmespeicherfähigkeit, was für die untersuchten Gebäudekonstellationen zu einer Erhöhung des Bedarfs an Heizwärme in Größenordnungen von bis zu 10% gegenüber den in dieser Hinsicht am besten bilanzierenden Gebäudetypen (massive Decken mit Radiatorheizung) führt. Dieser letztgenannte Gebäudetyp weist aber andererseits nur niedrige Nutzbarkeit erneuerbaren Überschussstroms auf, in Größenordnungen von nur weniger als 30% des gesamten Heizstroms. (Siehe im Detail Kapitel 4.1.) Ob dieser Mehrbedarf auch tatsächlich auftritt, hängt von zahlreichen Randbedingungen ab, insbesondere vom thermischen Verhalten des Gebäudes (Wärmeschutz, solare Gewinne), der Regelung der BTA (Temperatur in den Schwachlastzeiten) und der Verfügbarkeit von erneuerbarem Überschussstrom.

### *Ökologischer Rucksack thermischer Speicherung in aktivierten Betondecken*

Der ökologische Rucksack der thermischen Speicherung in den Betondecken ist differenziert zu betrachten: Die Betondecken sind statisch ohnehin erforderliche Bauteile. Sie müssen für die hier herausgearbeiteten Ergebnisse eines wirkungsvollen energieflexiblen Betriebs nicht verstärkt ausgeführt werden. Insofern ist es jedenfalls zulässig, die ökologischen Belastungen ihrer Herstellung nicht der Zusatzfunktion der Speicherung zuzurechnen. Ein Zugang könnte es auch sein, nur die Differenz gegenüber den ökologischen Belastungen der Decke in Leichtbauweise der Speicherfunktion anzurechnen.

Wenn dennoch die gesamte ökologische Belastung der Herstellung der Betondecken der Speicherwirkung angelastet wird, dann wiegt dieser Effekt die Einsparungen an ökologischen Belastungen im Heizstrombedarf weitgehend auf, mit starken Abhängigkeiten von den Randbedingungen, wie insbesondere dem Gebäudetyp. Unter den gegebenen Randbedingungen ergibt sich ein ökologischer Rucksack jeder Wärmeeinheit aus dem Betonspeicher von 0,32 bis 0,46 kWh<sub>PE</sub>/kWh<sub>Nutzwärme</sub> und von 68 bis 99 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh<sub>Nutzwärme</sub>, wobei die kleineren Werte stets für das EFH gelten, bei dem der thermische Speicher der Decken stärker ausgenutzt wird. Siehe im Detail Kapitel 5.1 und 7.1.

### *Ökologischer Rucksack elektrochemischer Speicherung in Batteriespeichern*

Der ökologische Rucksack der elektrochemischen Speicherung in Batterien, in Dimensionierungen, die zu denselben hohen Anteilen erneuerbarer Überschussstrom-Nutzung führen, ist nennenswert höher als jener der Speicherung im Beton, selbst wenn dessen ökologische Belastungen vollständig der Speicherfunktion zugerechnet werden. Unter den gegebenen Randbedingungen ergibt sich ein ökologischer Rucksack jeder elektrischen Energieeinheit aus dem Batteriespeicher von 1,3 bis 1,8 kWh<sub>PE</sub>/kWh bzw. von 290 bis 489 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kWh, abhängig vom Gebäudetyp (MFH oder EFH) und vom Batterietyp (Lithium-Ionen oder Redox-Flow).

Eine Verkleinerung der Batteriespeicher kann diesen ökologischen Rucksack erheblich verkleinern, würde sich aber auch in einer Verringerung des nutzbaren Anteils erneuerbaren Überschussstroms auswirken. Dahingehende Varianten, mit einer Speicherkapazität für nur eine Eintagesperiode, wurden berechnet. Siehe im Detail Kapitel Kapitel 6.1 und 7.1.

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Quellenverzeichnis

#### 9.1.1 Analoge Quellen

- (1) Austria Presseagentur; OTS Presseaussendung, Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, [https://www.ots.at/presseaussendung/OTS\\_19990526\\_OTSo104/oesterreichs-zement-industrie-haelt-internationalem-wettbewerbsdruck-stand](https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_19990526_OTSo104/oesterreichs-zement-industrie-haelt-internationalem-wettbewerbsdruck-stand)
- (2) Bauer C.; Ökobilanz von Lithium-Ionen Batterien, Analyse der Herstellung von Energiespeichern für den Einsatz in Batteriefahrzeugen; September 2010
- (3) Becke A., Reiners J., Sülün C., Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton, InformationsZentrum Beton GmbH, Verlag Bau+Technik GmbH, 40601 Düsseldorf, 2014
- (4) BELECTRIC GmbH; Data-sheet: Battery Storage Belectric EBU; Jänner 2016
- (5) Bengt S., A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS) Version 2000 – General system characteristics. Schweden, 1999
- (6) Braam F., Projekt HEIPHOSS - Hocheffizienter und intelligenter Photovoltaik-Strom-Speicher : Teilprojekt Energiemanagement, Abschlussbericht, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, September 2015
- (7) Branchenbericht Bauzulieferer 2016, UniCredit Bank Austria AG Economics & Market Analysis Austria, 2016
- (8) Braun W., Birke P., Schiemann M.; Batterien für Elektromobilität, Leibnitz Universität Hannover, Vortrag Folie: 22., Jänner 2010
- (9) Bundesamt für Energie BFE; Die Alternative zu Teslas 'Powerwall', Fachbeitrag zu den Erkenntnissen eines Entwicklerteams im Bereich Akkumulatoren und Superkondensatoren, August 2015
- (10) Dassisti M., Mastrorilli P., Rizzuti A., L'Abbate P., Cozzolino G., Chimienti M.; LCA of in-house produced small-sized vanadium redox-flow battery ;Proceedings of SEEP2014, Dubai, 23-25 November 2014
- (11) Denholm P., Kulcinski G.; Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems; Energy Conversion and Management 45: 2153–2172.; 2004
- (12) Deutsche Energieagentur – dena (Hrsg.); Ausbau- und Innovationsbedarf in den Stromverteilnetzen in Deutschland bis 2030, Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse der Studie, S. 10., Dezember 2012
- (13) Deutsches Clean Tech Institute (Hrsg.); Speichertechnologien 2014, Technologien, Anwendungsbereiche, Anbieter; Mai 2014
- (14) DIN EN 60896-11:2003-07; Titel (Deutsch): Ortsfeste Blei-Akkumulatoren - Teil 11: Geschlossene Batterien; Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren; 2003
- (15) Dinger A.; Ripley M.; Mosquet X.; Rabl M.; Rizoulis D.; Russo, M.; Sticher, G.(2010): Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. The Boston Consulting Group, 2010
- (16) Dreyer D., Wechselstrombatterie, Elektronische Energiespeicherung auf dem Chip; Elektronik, Fachmedium für industrielle Anwender und Entwickler, 18.11.2014
- (17) EASE, 2016 und Lichtenberger, 2016
- (18) Ecoinvent; Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich, Switzerland
- (19) Elcap; Familienstammbaum der Superkondensatoren, Dezember 2010

- (20) EN 61140: 2016-11; Schutz gegen elektrischen Schlag, Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel
- (21) Energieversorgung Niederösterreich AG; 24-Stunden-Sonnenstrom: Batteriespeicher im Vergleich; April 2016
- (22) Europäisches Parlament und Rat; Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt
- (23) European Association for Storage of Energy - EASE (Ed.), Energy Storage Technology Descriptions: Sodium-Nickel-Chloride Battery, 2016
- (24) Fachverband Batterien; Definition verschiedener Lebensdauerbegriffe für Batterien; ZVEI Merkblatt Nr. 23, August 2013
- (25) FIN - Future is Now; Kuster Energielösungen GmbH, Anif, <http://www.kuster.co.at>
- (26) Forschungszentrum Jülich GmbH; EnArgus: Zentrales Informationssystem Energieforschungsförderung, Version 2.0, ab 2017
- (27) Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung, Grundlagen der Elektrochemie IEK-9: Energie sticht, Batteriequartett; April 2014
- (28) Fraunhofer ISE, 2017, Electricity production and spot prices in Germany in January 2017.
- (29) Friembichler et al., Energiespeicher Beton. Planungsleitfaden Thermische Bauteilaktivierung, bmvit, Berichte aus der Umweltforschung 9/2016
- (30) Friembichler et al., Thermische Bauteilaktivierung - Entwicklung eines Rechenkerns (TBA-CALC), bmvit, Berichte aus der Umweltforschung 11/2014
- (31) Fuchs G., Lunz B., Leuthold M., Sauer D.; Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität, Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien, Im Auftrag der Smart Energy for Europe Platform GmbH, September 2012
- (32) Geissler S., Fechner J., Pölz W., Knotzer A.; Smart Energy Efficient Active Buildings and Building Cluster, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 00, 2014
- (33) Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver An, Struijs J., van Zelm R., ReCiPe 2008: A life cycle assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: Characterisation; 2013
- (34) Hammer R., Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Einführung der Wirkungskategorien Biodiversitätsverlust in die Ökobilanzierung, Institute of Building Research & Innovation, 2018
- (35) Hannig M. (Hrsg.); Forschung, Magazin Universität des Saarlandes, 1/2014 S. 4-11., Mai 2014
- (36) Harbusch G., Lithium Titanat Akkumulator, web-Bericht des Vereins ZukunftsWerkstatt Verkehr, 2018
- (37) Hempelmann R., Baumgarten J., Britz A., Vijayaratnam V., Schley B.; Batterien als Speicher für regenerative Energien; in: Hannig M. (Hrsg.); Forschung, Magazin Universität des Saarlandes, 1/2014 S. 4-11., Mai 2014
- (38) Hiremath M.; Comparative Life Cycle Assessment of Stationary Battery Storage Technologies for Balancing Fluctuations of Renewable Energy Sources; Postgraduate Programme Renewable Energy 14; 2012
- (39) Hopp H.; Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug, Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle, Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik, Universität Stuttgart, 2016
- (40) Industrial Power; Handbuch für stationäre Bleibatterien, Teil 1 - Grundlagen, Konstruktion, Betriebsarten; Ausgabe 6, Februar 2012

- (41) International Union of Pure and Applied Chemistry; Compiled by McNaught A., Wilkinson A.; Compendium of Chemical Terminology; Blackwell Scientific Publications, Oxford 2nd ed.; 1997
- (42) Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R., IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. In: International Journal of Life Cycle Assessment 8 (6) 324 – 330, Landsberg, 2003
- (43) Khammas A., Das Buch der Synergie, 2017
- (44) Kommission der europäischen Union, Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012 der Kommission vom 16. Januar 2012 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden durch die Schaffung eines Rahmens für eine Vergleichsmethode zur Berechnung kostenoptimaler Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Gebäudekomponenten; 2012
- (45) Krausa M.; Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.; elektronisches Kompendium; © 2018
- (46) Kwade A., Bärwaldt G.; LithoRec - Recycling von Lithium-Ionen-Batterien; Abschlussbericht zum Verbundvorhaben; April 2012
- (47) Lichtenberger W., Elektrochemische Speicher, Hochtemperatur-Batterien, 2016
- (48) Longo S., Antonucci V., Cellura M., Ferraro M.; Life cycle assessment of storage systems: The case study of a sodium/nickel chloride battery; J. Clean. Prod.; 2013
- (49) Lu L. et al.; A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles; Journal of Power Sources 226, S. 272-288, 2013
- (50) Mauschitz G.; Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie, Berichtsjahr 2016, Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften Technische Universität Wien, 2017
- (51) METEONORM, Internationale Klimadatenbank, [www.meteotest.ch](http://www.meteotest.ch)
- (52) Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg; Photovoltaik und Batteriespeicher. Technologie, Integration, Wirtschaftlichkeit, Januar 2017,
- (53) Minke C., Peters J., Baumann M., Weil M.; Environmental assessment of vanadium redox flow batteries, Poster presentation, SETAC Conference Europe 28th Annual Meeting Rome, 2018
- (54) Möller K., Winter M.; Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien, Script zum Praktikum Anorganisch-Chemische Technologie; Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe, TU Graz; 2005
- (55) Moshövel J., Magnor D., Sauer D., Gähns S., Bost M., Hirschl B., Cramer M., Özalay B., Matrose C., Müller C., Schnettler A.; PV-Nutzen; Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern; , Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen und Institut für ökologische Wirtschaftsforschung Berlin; Dezember 2015
- (56) Niederhäuser A.; Newsplattform für erneuerbare Energien und Energieeffizienz in der Schweiz, eecomm GmbH (Hrsg.); Luft-Batterien, Hightech-Lösung für die Energiewende oder Luftnummer?, Dezember 2013
- (57) Nissen N.; Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme. Berlin 2001
- (58) Oetken M., Ducci M.; Eine unmögliche Batterie – die Wechselstrombatterie, Praxis der Naturwissenschaften Chemie 1/49. Jahrg. 2000, S. 16.
- (59) ÖNORM B 8110-6: 2011 Bbl 1: Einfamilienhaus – Validierungsbeispiele für den Heizwärmebedarf
- (60) ÖNORM B 8110-6: 2011 Bbl 2: Mehrfamilienhaus – Validierungsbeispiele für den Heizwärmebedarf

- (61) ÖNORM B 8110-6: 2011 Bbl 4: Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus – Validierungsbeispiel für die Berechnung des Heizwärmebedarfs eines luftbeheizbaren Niedrigstenergiegebäudes (Passivhaus)
- (62) Österreichische Massivbaustoffherstellung Impulsgeber für Regionen, Analyse sozial- und regionalwirtschaftlicher Effekte österreichischer Werksstandorte, Wolfgang E. Baaske, Forschungsverein Steine-Keramik des Fachverbands der Stein- und keramischen Industrie, 2016
- (63) Österreichischen Klimadatenkatalog, aus ÖNORM B 8110-5, 2011
- (64) Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB), SVBBTRL des OIB Untergruppe Energieeinsparung und Wärmeschutz, Länderexpertengruppe in der Verbindungsstelle der Bundesländer: OIB-Dokument zum Nachweis der Kostenoptimalität der Anforderungen der OIB-RL6 bzw. des Nationalen Plans gemäß Artikel 4 (2) zu 2010/31/EU, Wien März 2013
- (65) Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-Dokument zur Definition des Niedrigstenergiegebäudes und zur Festlegung von Zwischenzielen in einem „Nationalen Plan“ gemäß Artikel 9 (3) zu 2010/31/EU. Österreichisches Institut für Bautechnik, 2014
- (66) Österreichisches Institut für Bautechnik, Richtlinie 6, Erläuternde Bemerkungen, OIB-330.6-010/15, 2015
- (67) Österreichisches Montan-Handbuch, Bergbau Rohstoffe Grundstoffe Energie, Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (Hrsg) 2016
- (68) ÖVE/ÖNORM; E 8001-1 Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis  $\sim$  1000 V und  $\approx$  1500 V; Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen); 2000 - 03 - 01
- (69) Perdu F.; Overview of existing and innovative batteries, Impact of the storage on the renewable electricity life cycle; Presentation at: Science & energy; Ecole de Physique des Houches, March 4th-9th; 2018
- (70) Rantik M.; Life Cycle Assessment of Five Batteries for Electric Vehicles under Different Charging Regimes, KFB- Kommunikationforskningsberedningen-Meddelande 28; 1999
- (71) Rydh C., Sandén B.; Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements. Energy Conversion and Management 46: 1957–1979. Part II: Energy return factors and overall battery efficiencies. Energy conversion and management 46: 1980–2000.;2005
- (72) Rydh C.; Environmental Assessment of Battery Systems: Critical Issues for Established and Emerging Technologies; Thesis for the degree of Doctor of Philosophy; Environmental Systems Analysis; Chalmers University of Technology; Göteborg, Sweden 2003
- (73) Rydh C.; Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage, Journal of power sources 80: 21–29; 1999
- (74) Schnabel P.; Elektronik-Kompendium.de, Stand nach: Die Netzwerktechnik-Fibel, 4. Auflage, 2016
- (75) Schulz C.; Optimierung der Leistungsaufnahme eines solarbetriebenen Ad-Hoc-Netzwerk-Knotens, Hamburg, Diplomica Verlag GmbH., 2008
- (76) Shiokawa Y., Yamana H., Moriyama H.; An Application of Actinide Elements for a Redox Flow Battery; in: Journal of Nuclear Science and Technology. Band 37, Nr. 3, 2000, S. 253–256; 2000
- (77) Siemens, Fact sheet: Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), Juli 2012
- (78) Spanos C., Turney D., Fthenakis V.; Life-cycle analysis of flow-assisted nickel zinc-, manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction. Renewable Sustainable Energy Rev. 43: 478–494.; 2015
- (79) STATISTIK AUSTRIA, Verkehrsstatistik 2016, S. 20

- (80) Stockhammer U., URANUS Verlag (Hrsg.); Speicherspecial; Sonnenzeitung 3 und 4, 2012
- (81) Stromproduktion in Deutschland, Fraunhofer ISE, 2018 [https://www.energy-charts.de/energy\\_de.htm](https://www.energy-charts.de/energy_de.htm)
- (82) Sullivan J., and Gaines L.; Status of life cycle inventories for batteries, *Energy Conversion and Management* 58: 134–148.;2012
- (83) The Gillette Company; DURACELL® zinc-air cells; Technical Bulletin, 2004
- (84) Tübke J., Fischer P., Noack J.; Redox-Flow-Batterien als stationäre Energiespeicher, Stand und Perspektiven, Vortragsunterlagen Fraunhofer Institut für Chemische Technologie – ICT, März 2014
- (85) Umweltbundesamt, SCHWEBESTAUB IN ÖSTERREICH, Kurzfassung; 2005
- (86) Vandepaer L, Cloutier J., Amor B.; Environmental impacts of Lithium Metal Polymer and Lithium-ion stationary batteries; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 78; page: 46–60.; 2017
- (87) Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. – VDE (Hrsg.); Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene, Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Studie der Energietechnischen Gesellschaft- ETG im VDE; Mai 2015
- (88) Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (Hrsg.); Nachhaltigkeitsbericht 2016 der österreichischen Zementindustrie, 2017
- (89) Verkehrs Club Österreich; Kfz-Verkehr ist in Österreich seit 1990 massiv gestiegen; <https://www.vcoe.at/news/details/vcoe-kfz-verkehr-ist-in-oesterreich-seit-1990-massiv-gestiegen>
- (90) Weinrich H., Come J., Tempel H., Kungl H., Eichel R., Balke N.; Understanding the nanoscale redox-behavior of iron-anodes for rechargeable iron-air batteries; *Nano Energy* 41; 2017
- (91) Weinrich H.; Kathoden für ressourcen-effiziente Metall-Luft-Batterien, Dissertation am Lehrstuhl für Materialien und Prozesse für elektrochemische Energiespeicher und -wandler, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, (bei Zugriff Angabe noch laufend) 2018
- (92) Wilhelm J., Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems; Forschungszentrum Jülich, Schriftenreihe Energie & Umwelt, 2010
- (93) Xu J., Thomas H., Francis R., Lum K., Wang J., Liang B.; A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries; *Journal of Power Sources*, 177/2, page 512-527., March 2008
- (94) ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. (Hrsg.); Spannungsklassen in der Elektromobilität; Dezember 2013

## 9.1.2 Elektronische Quellen

<http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2008/woche35/woche35.html> (letzter Zugriff: 13.03.2018)

<http://docplayer.org/64807311-10-teil-redoxreaktionen.html> (letzter Zugriff: 10.04.2018)

<http://hdr.undp.org/en/data> (letzter Zugriff 29.5.2018)

<http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/leistungsdichte/> (letzter Zugriff: 21.03.2018)

<http://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/wirkungsgrad/> (letzter Zugriff: 21.03.2018)

<http://www.batteryspace.com/Custom-NiMH-Battery-Pack-18V-13-Ah-15xF-234-wh-Hump.aspx> (letzter Zugriff: 29.03.2017)

<http://www.energieleben.at/redflow-zcell/> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<http://www.energystorageexchange.org/projects> (letzter Zugriff: 08.01.2015)

[http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-9/DE/Batteriequartett.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-9/DE/Batteriequartett.pdf?__blob=publicationFile) (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1404/21/news018.html> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<http://www.lakritz-film.de/bosch2.html> (letzter Zugriff: 27.03.2017)

<http://www.lenze-schmidhauser.com/de-ch/> (letzter Zugriff: 15.03.2017)

<http://www.solarbatterie.com/SIGA-Batterien:...4.html> (letzter Zugriff: 29.03.2017)

<http://zukunftswerkstatt-verkehr.at/akku-lithium-titanat.html> (letzter Zugriff 05.04.2018)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Index\\_der\\_menschlichen\\_Entwicklung](https://de.wikipedia.org/wiki/Index_der_menschlichen_Entwicklung) (letzter Zugriff 30.5.2018)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_L%C3%A4nder\\_nach\\_Einkommensverteilung](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Einkommensverteilung) (letzter Zugriff 30.5.2018)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_L%C3%A4nder\\_nach\\_Gesundheitsausgaben](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Gesundheitsausgaben) (letzter Zugriff 30.5.2018)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium> (letzter Zugriff 29.5.2018)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Vanadium> (letzter Zugriff 29.5.2018)

<https://investingnews.com/daily/resource-investing/industrial-metals-investing/vanadium-investing/vanadium-producing-countries/> (letzter Zugriff 30.5.2018)

[https://www.akkuline.de/12v-akkupack-4-5ah-nimh-bf15947/15947\\_item.aspx](https://www.akkuline.de/12v-akkupack-4-5ah-nimh-bf15947/15947_item.aspx) (letzter Zugriff: 10.04.2018)

<https://www.batteriespezialist.de/Solarbatterien/Langzeit-Solar-280Ah-Versorgungsbatterie::451.html> (letzter Zugriff: 29.03.2017)

<https://www.batteriespezialist.de/Solarbatterien/Solar-280Ah-Versorgungsbatterie::104.html> (letzter Zugriff: 29.03.2017)

<https://www.ee-news.ch/de/solar/article/27703/luft-batterien-hightech-loesung-fuer-die-energie-wende-oder-luftnummer> (letzter Zugriff: 09.04.2018)

<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/1101251.htm> (letzter Zugriff: 10.04.2018)

<https://www.energiebewegung.at> (letzter Zugriff: 18.05.2018)

<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/reihenschaltung.html> (letzter Zugriff: 22.03.2018)

<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/hochvolt-batterie.html> (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/blei-akku.html> (letzter Zugriff: 22.03.2018)

<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/natrium-schwefel-batterie.html> (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/natrium-schwefel-batterie.html> (letzter Zugriff: 27.03.2018)

<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/batterieforschung/batterieforschung-seite2.html> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/batterieforschung/batterieforschung-seite2.html> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

[https://www.ibesalliance.org/fileadmin/content/download/presentation/DCTI\\_Speichertechnologiestudie.pdf](https://www.ibesalliance.org/fileadmin/content/download/presentation/DCTI_Speichertechnologiestudie.pdf) (letzter Zugriff: 09.04.2018)

[https://www.ngk.co.jp/nas/case\\_studies/rokkasho/](https://www.ngk.co.jp/nas/case_studies/rokkasho/) (letzter Zugriff: 04.04.2018)

<https://www.smarterworld.de/smart-power/batterien/artikel/128186/> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

[https://www.smarterworld.de/smart-power/sonstige/?\\_aid=111973&gid=4809](https://www.smarterworld.de/smart-power/sonstige/?_aid=111973&gid=4809) (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.2000.9714891> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<https://www.verbund.com/de-at/blog/blog-artikel/2011/11/07/erfindung-batterie-volt> (letzter Zugriff: 13.03.2018)

<https://www.victronenergy.de/upload/documents/Datasheet-AGM-Super-Cycle-battery-DE.pdf> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<https://www.volterion.com/wp-content/uploads/2018/03/komplettsystem.jpg> (letzter Zugriff: 06.04.2018)

<https://www.zamg.ac.at> (letzter Zugriff: 20.06.2018)

## 9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Bandbreiten der HWB-Veränderungen und der Raumtemperaturen für das EFH.....	5
Abbildung 1-2 Bandbreiten der HWB-Veränderungen und der Raumtemperaturen für das MFH .....	6
Abbildung 1-3 Strombedarf (HEB) der Varianten des EFH gegliedert nach Wind- und Netzstrom .....	7
Abbildung 1-4 Strombedarf (HEB) der Varianten des MFH gegliedert nach Wind- und Netzstrom.....	7
Abbildung 3-1: Außentemperaturen, Klimadatensatz Wien Innere Stadt.....	15
Abbildung 3-2 Außentemperatur u. Globalstrahlung, Jänner, Klimadatensatz Wien Innere Stadt .....	16
Abbildung 3-3: Zeitlicher Verlauf erneuerbarer Stromproduktion, NÖ, Jänner 2018 .....	17
Abbildung 3-4: Zeitlicher Verlauf der Stromproduktion aus Wind und PV, D, Jänner 2018 .....	18
Abbildung 3-5 Referenzgebäude Grundriss EG.....	21
Abbildung 3-6 Referenzgebäude Grundriss OG .....	21
Abbildung 3-7 Referenzgebäude Schnitt.....	22
Abbildung 3-8 Leistungskurven von Windenergieanlagen der 3 MW-Leistungsklasse .....	29
Abbildung 3-9 Windenergieanlagen, nach Leistungsklassen eingefärbt, im Wiener-Umland .....	30
Abbildung 3-10 Windgeschwindigkeit in Obersiebenbrunn, in 10 und 100 m über Grund, Jänner .....	31
Abbildung 3-3-11 Windgeschwindigkeit in Obersiebenbrunn, in 10 und 100 m über Grund, Jahr .....	32
Abbildung 3-12 Zeitverlauf des Auskühlens für das EFH.....	34
Abbildung 3-13 Zeitverlauf des Auskühlens für das MFH .....	34
Abbildung 4-1 Wärmebilanzen über die Heizperiode für das EFH .....	41
Abbildung 4-2 Wärmebilanzen über die Heizperiode für das MFH .....	41
Abbildung 4-3 Strombedarf (HEB) der Varianten des EFH gegliedert nach Wind- und Netzstrom .....	42
Abbildung 4-4 Strombedarf (HEB) der Varianten des MFH gegliedert nach Wind- und Netzstrom.....	43
Abbildung 4-5 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C.....	44
Abbildung 4-6 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 86 kWh Li-Ionen Batterie .....	44
Abbildung 4-7 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C.....	45
Abbildung 4-8 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C.....	45
Abbildung 4-9 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C.....	45
Abbildung 4-10 Energieflussbild EFH in Hybrid-Bauweise mit Radiatoren und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C.....	46
Abbildung 4-11 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C .....	46
Abbildung 4-12 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C .....	46
Abbildung 4-13 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 11 kWh Li-Ionen-Batterie .....	47
Abbildung 4-14 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 27 kWh Li-Ionen-Batterie .....	47
Abbildung 4-15 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 11 kWh Redox-Flow-Batterie .....	47
Abbildung 4-16 Energieflussbild EFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 27 kWh Redox-Flow-Batterie .....	48
Abbildung 4-17 Energieflussbild MFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C .....	49
Abbildung 4-18 Energieflussbild MFH in Hybrid-Bauweise mit BTA und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C .....	49
Abbildung 4-19 Energieflussbild MFH in Hybrid-Bauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C .....	50
Abbildung 4-20 Energieflussbild MFH in Hybrid-Bauweise mit Radiatoren und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C .....	50
Abbildung 4-21 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C .....	50
Abbildung 4-22 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und variablem Raumtemperatur-Sollwert von 21 °C bis 23 °C.....	51
Abbildung 4-23 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 86 kWh Li-Ionen-Batterie .....	51
Abbildung 4-24 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 222 kWh Li-Ionen-Batterie .....	51
Abbildung 4-25 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 86 kWh Redox-Flow-Batterie.....	52
Abbildung 4-26 Energieflussbild MFH in Leichtbauweise mit Radiatoren und konstantem Raumtemperatur-Sollwert von 22°C und einer 222 kWh Redox-Flow-Batterie.....	52
Abbildung 6-1: Exemplarischer Aufbau einer galvanischen Zelle.....	71
Abbildung 6-2: Gemeinsames Grundprinzip der Energieumwandlungsprozesse .....	72
Abbildung 6-3: Gruppierung von Superkondensatoren nach Art der Energiespeicherung.....	73

Abbildung 6-4: Anteil der Nutzkapazität an der Gesamtkapazität einer Batterie.....	76
Abbildung 6-5: Anordnung von Wechselrichtern bei der Einkopplung von PV-Modulen .....	80
Abbildung 6-6: Multilayer-Anordnung einer Chip-Wechselstrombatterie .....	82
Abbildung 6-7: Verhältnis Spannung zu Stromstärke für Batterien bei verschiedene Leistungsniveaus .....	83
Abbildung 6-8: Zwei Batterien in Reihenschaltung .....	84
Abbildung 6-9: Zwei Batterien in Serienschaltung .....	84
Abbildung 6-10: Aufbauprinzip einer Blei-Säure-Batterie .....	86
Abbildung 6-11: Modulare Blei-Säure-Batterieeinheit, Alt Daber, Deutschland .....	87
Abbildung 6-12: Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-Nass-Batterie.....	88
Abbildung 6-13: Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-EFB-Batterie .....	88
Abbildung 6-14: Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-Gel-Batterie .....	89
Abbildung 6-15: Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-AGM-Batterie .....	89
Abbildung 6-16: Spezifischer Aufbau einer Blei-Säure-Spiral-Batterie .....	90
Abbildung 6-17: Produktbeispiele von Blei-Säure-Batterien für den stationären haustechn. Einsatz .....	92
Abbildung 6-18: Aufbauprinzip einer Lithium-Ionen-Batterie.....	92
Abbildung 6-19: Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid Energiespeichersysteme zur Netzmoderation, Non-Gong, Südkorea .....	94
<b>Abbildung 6-20:</b> Auswahl an Lithium-Ionen-Batteriespeichern für haustechnische Analgen .....	97
Abbildung 6-21: Aufbauprinzip einer Metall-Luft-Batterie.....	98
Abbildung 6-22: Aufbauprinzip einer Natrium-Schwefel-Batterie .....	101
Abbildung 6-23: Aufbauprinzip einer Natrium-Nickelchlorid-Batterie .....	101
<b>Abbildung 6-24:</b> Modulare Natrium-Schwefel-Batterieeinheiten, Windkraftanlage, Futamata, Japan .....	102
<b>Abbildung 6-25:</b> Aufbau des Natrium-Nickelchlorid-Batteriespeichers für haustechnische Analgen .....	105
<b>Abbildung 6-26:</b> Aufbauprinzip einer Nickel-Metallhydrid-Batterie.....	106
<b>Abbildung 6-27:</b> Exemplarische Nickel-Metallhydrid -Batteriespeichern für haustechnische Analgen.....	108
Abbildung 6-28: Aufbau- und Einbindungsprinzip einer Redox-Flow-Batterie .....	109
Abbildung 6-29: Modulare Redox-Flow-Vanadium-Batterieeinheiten, Solarkraftwerk, Abira, Japan .....	110
Abbildung 6-30: Redox-Flow-Zink-Bromid-Batterie für haustechnische Analgen .....	113
Abbildung 6-31: Redox-Flow-Vanadium-Batterie für haustechnische Analgen .....	114
Abbildung 6-32: Änderungspotential durch Anwendung verschiedener Technologien in den Stromverteilnetzen bis 2030 .....	115
Abbildung 6-33: Entwicklung der kumulierten installierten Leistung nach Batterietechnologie weltweit.....	118
Abbildung 6-34: Vergleich Primärenergiebedarf der Produktionsphase je bereitgestellter Energieeinheit .....	120
Abbildung 6-35: Vergleich Treibhausgaspotenzial der Produktionsphase je bereitgestellter Energieeinheit.....	121
Abbildung 6-36: Vergleich Primärenergiebedarf je bereitgestellte Energieeinheit während des Lebenszyklus .....	122
Abbildung 6-37: Vergleich Treibhausgaspotenzial je bereitgestellte Energieeinheit während des Lebenszyklus .....	123
Abbildung 6-38: Lebenszyklisch beizumessendes Treibhausgaspotenzial der Batteriespeichertechnologien bei unterschiedlichen Betriebszenarien.....	124
Abbildung 6-39: Zusammenhang zwischen dem lebenszyklisch beizumessenden Treibhausgaspotenzial der Batteriespeichertechnologien und dem Treibhauspotential des herangezogenen Ladestroms .....	125
Abbildung 6-40: Relativer Vergleich von Umweltwirkung der Produktion von unterschiedlichen Batteriespeichern mit einer Photovoltaikanlage.....	130
Abbildung 6-41: Relativer Vergleich von Umweltwirkung der Produktion von unterschiedlichen Batteriespeichern mit einer Photovoltaikanlage normiert auf die europäische Gesamtumweltbelastung .....	131
Abbildung 6-42: Vergleich Treibhausgaspotenzial je bereitgestellter Energieeinheit während des Lebenszyklus nach Kapazität des Vanadium-Redox-Flow Batteriespeichers.....	132
Abbildung 6-43: Prozentual aufgegliederte Anteile von Umweltwirkung aus Lithium-Ionen Batteriespeichern in einzelnen Lebenszyklusphasen .....	134
Abbildung 6-44: Kalkulationsblatt Treibhausgaspotenzial Lithium-Ionen Batteriespeicher .....	135
Abbildung 6-45: Kalkulationsblatt Ionisierende Strahlung Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher .....	136
Abbildung 7-1 Primärenergiebilanz der Wärmeerzeugung EFH .....	141
Abbildung 7-2 CO <sub>2</sub> -Bilanz der Wärmeerzeugung EFH .....	141
Abbildung 7-3 Primärenergiebilanz der Wärmeerzeugung MFH .....	142
Abbildung 7-4 CO <sub>2</sub> -Bilanz der Wärmeerzeugung MFH .....	142

## 9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Referenzgebäude geometrische Kennwerte .....	21
Tabelle 3-2 Außenwand Leichtbau und Hybridbau .....	24
Tabelle 3-3 Oberste Geschoßdecke Leichtbau .....	25
Tabelle 3-4 Oberste Geschoßdecke Hybridbau .....	25
Tabelle 3-5 Geschoßdecke EG/OG Leichtbau .....	26
Tabelle 3-6 Geschoßdecke EG/OG Hybridbau .....	26
Tabelle 3-7 Geschoßdecke gegen Erdreich .....	27
Tabelle 3-8: Thermische und elektrische Speichergrößen .....	35
Tabelle 3-9: Wärmekapazitäten im EFH bezogen auf eine Lufttemperaturamplitude von 1 K .....	38
Tabelle 4-1 Energiebilanzen und Temperaturstatistik über die Heizperiode für das EFH .....	40
Tabelle 4-2 Energiebilanzen und Temperaturstatistik über die Heizperiode für das MFH .....	40
Tabelle 5-1 Umwelteinwirkungen Basisindikatoren für 1 m <sup>3</sup> Beton C20 .....	57
Tabelle 5-2: Umwelteinwirkungen weiterführende Indikatoren für 1 m <sup>3</sup> „Durchschnittsbeton“ .....	60
Tabelle 5-3: Durchschnittliche Zusammensetzung von Beton (gewichtetes Mittel aus Transportbeton und Betonfertigteilen für Deutschland) [Angaben in kg/m <sup>3</sup> Beton] .....	61
Tabelle 5-4 Einflussbereich der Betonerzeugung auf Kategorien der IUCN CMP Klassifikation .....	64
Tabelle 5-5: Summierung zur Endpoint Schadenskategorie Biodiversitätsverlust durch Betonerzeugung in Österreich normiert nach IUCN CMP Klassifikation .....	67
<b>Tabelle 6-1:</b> Kenngrößen und Charakteristika von Blei-Säure-Batterien .....	90
<b>Tabelle 6-2:</b> Stärken-Schwächen Übersicht zu Blei-Säure-Batterien .....	91
<b>Tabelle 6-3:</b> Kenngrößen und Charakteristika von Lithium-Ionen-Batterien .....	95
<b>Tabelle 6-4:</b> Stärken-Schwächen Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien .....	96
<b>Tabelle 6-5:</b> Kenngrößen und Charakteristika von Metall-Luft-Batterien .....	99
<b>Tabelle 6-6:</b> Kenngrößen und Charakteristika von Natrium-Schwefel-Batterien und Natrium-Nickelchlorid-Batterien .....	103
<b>Tabelle 6-7:</b> Stärken-Schwächen Übersicht zu Natrium-Schwefel-Batterien und Natrium-Nickelchlorid-Batterien .....	104
<b>Tabelle 6-8:</b> Kenngrößen und Charakteristika von Nickel-Metallhydrid-Batterien .....	107
<b>Tabelle 6-9:</b> Stärken-Schwächen Übersicht zu Nickel-Metallhydrid-Batterien .....	108
<b>Tabelle 6-10:</b> Kenngrößen und Charakteristika von Redox-Flow-Batterien .....	112
<b>Tabelle 6-11:</b> Stärken-Schwächen Übersicht zu Redox-Flow-Batterien .....	113
<b>Tabelle 6-12:</b> Primärenergiebedarf der Batterietechnologien Systemgrenze Batterie im Vergleich .....	121
Tabelle 6-13: Treibhausgaspotential der Batterietechnologien Systemgrenze Batterie im Vergleich .....	121
<b>Tabelle 6-14:</b> Primärenergiebedarf der Batterietechnologien im Vergleich .....	123
Tabelle 6-15: Treibhausgaspotential der Batterietechnologien im Vergleich .....	124
Tabelle 6-16: Übersicht vier weiterführender Ökobilanzindikatoren für Vanadium Redox-Flow Batteriespeicher mit einer Kapazität von 0,15kWh .....	135
Tabelle 6-17: Übersicht der Basis- und weiterführenden Ökobilanzindikatoren nach Batteriespeichersystem und Batteriespeicherkapazität .....	136
<b>Tabelle 6-18:</b> Indikatorwerte zur Abschätzung des sozialen Impacts der Lithium- und der Vanadiumproduktion .....	139
<b>Tabelle 7-1:</b> Vergleich weiterführender Indikatorwerte zu den ökologischen Wirkungen der unterschiedlichen Speicher .....	143
<b>Tabelle 7-2:</b> Vergleich von Aspekten sozialer Wirkungen der Produktion der wesentlichsten Ausgangsstoffe der unterschiedlichen Speicher .....	145