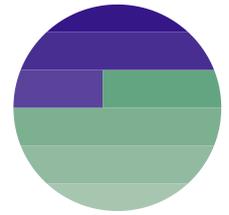


ECOFYS

sustainable energy for everyone



thinkstep

Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte

Abschlussbericht

Im Auftrag des Bayerischen
Staatsministeriums für Wirtschaft und
Medien, Energie und Technologie

Kunde: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien,
Energie und Technologie

Titel: Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für
private Haushalte

Berichtsversion: V2.0

Berichtsdatum: 31. Januar 2017

© thinkstep AG

**In Namen der thinkstep AG und ihrer
Tochterunternehmen**

Dokument erstellt von

Alexander Stoffregen



alexander.stoffregen@thinkstep.com

31. Januar 2017

Tel.: +49-711-341817-0

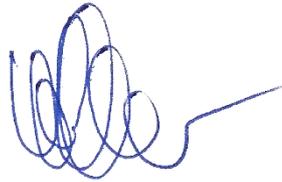
Jasmin Hengstler

Dr. Benjamin Reuter

Dr. Oliver Schuller

**Qualitätssicherung
durch**

Dr. Christoph Koffler



Technical Director
Americas

31. Januar 2017

Unter Aufsicht von

Dr. Oliver Schuller

Teamleiter Energie und Öl & Gas

Im Namen der Ecofys Germany GmbH:

Dokument erstellt von

Markus Offermann



m.offermann@ecofys.com

Tel.: +49-221-27070156

31 Januar 2017

Bernhard von Manteuffel

Die thinkstep AG und die Ecofys GmbH bearbeiten das Projekt „Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte“ unter der Leitung von thinkstep als Bietergemeinschaft.

Die Bietergemeinschaft ist in besonderer Weise geeignet, da beide Partner führend im Fachgebiet entsprechend ihrer im Projekt zugewiesenen Hauptrolle sind:

- die thinkstep AG (vormals PE INTERNATIONAL AG), eines der weltweit erfahrensten Unternehmen für sektorübergreifende Dienstleistungen, strategische Beratung und Softwarelösungen im Kontext Nachhaltigkeit, kann im Themenbereich nachhaltiges Bauen eine Vielzahl von erfolgreichen nationalen, europäischen sowie internationalen Projekten vorweisen. Zudem ist thinkstep bei Initiativen der wissenschaftlichen und anwenderorientierten Methodenentwicklung, sowie der Berechnung der Nachhaltigkeitsleistungen von Bauprodukten, Gebäuden, technischen Gebäudeausrüstungen und Stadtquartieren aktiv.
- Ecofys verfügt über langjährige wissenschaftliche und praktische Erfahrung im Gebäudebereich, mit energetischen Berechnungen, ökonomische Analysen, relevanten Vorarbeiten sowie der wissenschaftlichen Unterstützung politischer Prozesse. Aktuell erarbeitet Ecofys für die Europäische Kommission wissenschaftliche Analysen zur Überarbeitung der europäischen Gebäuderichtlinie (EPBD) und ist beteiligt an der derzeitigen Aktualisierung der EnEV (Spezifizierung der Definition der von der EPBD geforderten Niedrigstenergiegebäudestandards).

Neben der Projektleitung ist thinkstep für die Kapitel 1, sowie 4 bis 7 hauptverantwortlich; Ecofys für Kapitel 2 und 3.

Dieser Bericht wurde von thinkstep mit der angemessenen Sachkompetenz und Sorgfalt unter den im Vertrag zwischen thinkstep und dem Kunden vereinbarten Bedingungen angefertigt. thinkstep ist weder dem Kunden noch anderen Parteien gegenüber verantwortlich in Bezug auf Angelegenheiten, welche den für das Projekt vereinbarten Rahmen überschreiten.

Ungeachtet jedweder Vertraulichkeit des Berichts übernimmt thinkstep keinerlei Verantwortung gegenüber Dritten, denen dieser Report (oder Teile davon) zugänglich gemacht wird. Solche Parteien stützen sich auf eigenes Risiko auf den Bericht. Interpretationen, Analysen oder Aussagen jedweder Art durch Dritte liegen außerhalb von thinksteps Verantwortungsbereich.

Sollten Sie Anregungen, Beschwerden, oder sonstiges Feedback diesen Bericht betreffen haben, wenden Sie sich bitte an servicequality@thinkstep.com.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungen.....	6
Tabellen.....	10
Abkürzungen	11
1. Hintergrund und Ziele der Studie	13
1.1. Hintergrund der Studie.....	13
1.2. Ziele der Studie.....	14
2. Untersuchungsrahmen	16
2.1. Modellgebäude und Energiebedarfe.....	16
2.2. Systemgrenzen	19
2.2.1. Zeitlicher Erfassungsbereich.....	19
2.2.2. Geografischer Erfassungsbereich.....	19
2.3. Zu untersuchende Produktsysteme	19
2.3.1. Heizsysteme.....	19
2.3.2. Speichersysteme.....	24
2.4. Produktfunktion(en) und funktionelle Einheit	28
3. Ökonomische Analyse.....	31
3.1. Methodik der ökonomischen Analyse	31
3.2. Grundlagen der ökonomischen Analyse.....	35
3.2.1. Verbrauchsgebundene Kosten	35
3.2.2. Betriebsgebundene Kosten.....	37
3.2.3. Kapitalgebundene Kosten	38
3.2.4. Fördermittel	40
3.3. Ergebnisse der ökonomischen Analyse.....	45
3.3.1. Szenario 1: moderate Energiepreissteigerung / gängige Wärmepumpeneffizienz / kürzere Lebensdauern	47
3.3.2. Szenario 2: starke Energiepreissteigerung / optimierte Wärmepumpeneffizienz / längere Lebensdauern	50
3.3.3. Diskussion und Szenarienvergleich	54
4. Ökologische Analyse.....	57
4.1. Methodik der ökologischen Analyse	57
4.1.1. Untersuchungsrahmen.....	58

4.1.2.	Sachbilanz.....	58
4.1.3.	Abschneidekriterien.....	58
4.1.4.	Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethodik und der Wirkungskategorien	59
4.1.5.	Normierung und Gewichtung	63
4.1.6.	Art und Format des Berichts	66
4.1.7.	Software und Datenbanken.....	66
4.2.	Datengrundlage der Sachbilanz	67
4.2.1.	Herstellung der Heiz- und Speichersysteme.....	67
4.2.2.	Nutzung der Heiz- und Speichersysteme	67
4.3.	Ergebnisse der ökologischen Analyse	75
4.3.2.	Szenario 1: moderate Energiepreissteigerung / gängige Wärmepumpeneffizienz / kürzere Lebensdauern	76
4.3.3.	Szenario 2: starke Energiepreissteigerung / optimierte Wärmepumpeneffizienz / längere Lebensdauern	96
5.	Ökoeffizienzanalyse	103
5.1.	Methodik und Grundlagen der Ökoeffizienzanalyse	103
5.2.	Ergebnisse der Ökoeffizienzanalyse	103
5.2.2.	Szenario 1: moderate Energiepreissteigerung / gängige Wärmepumpeneffizienz / kürzere Lebensdauern	104
5.2.3.	Szenario 2: starke Energiepreissteigerung / optimierte Wärmepumpeneffizienz / längere Lebensdauern	110
6.	Monetarisierung von Umweltwirkungen	116
6.1.	Methodik und Grundlagen der Monetarisierung von Umweltwirkungen	116
6.2.	Ergebnisse der Monetarisierung von Umweltwirkungen	118
6.2.2.	Szenario 1: moderate Energiepreissteigerung / gängige Wärmepumpeneffizienz / kürzere Lebensdauern	118
6.2.3.	Szenario 2: starke Energiepreissteigerung / optimierte Wärmepumpeneffizienz / längere Lebensdauern	124
7.	Zusammenfassung und Fazit	125
	Quellenverzeichnis	129
	Anhang A – Zusätzliche Abbildungen Ökonomische Analyse	136
	Anhang B – Abbildungen der Monetarisierung von Umweltwirkungen	145
	Anhang C – Praxisbeispiel für die Berücksichtigung abweichender Energiekosten	149

Abbildungen

Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau der berücksichtigten Speichersysteme inklusive Photovoltaikanlage, und Luftwärmepumpe oben: Mit zusätzlichem Wärmepufferspeicher unten: Mit Batteriespeicher.....	25
Abbildung 3-1: Methodik der ökonomischen Analyse.....	33
Abbildung 3-2: Neubau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 1	47
Abbildung 3-3: Altbau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 1	47
Abbildung 3-4: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 1	48
Abbildung 3-5: Neubau, Speichersystemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 1	48
Abbildung 3-6: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei geringem Warmwasserbedarf, Szenario 1	49
Abbildung 3-7: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei mittlerem Warmwasserbedarf, Szenario 1	49
Abbildung 3-8: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei hohem Warmwasserbedarf, Szenario 1	50
Abbildung 3-9: Neubau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 2	50
Abbildung 3-10: Altbau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 2.....	51
Abbildung 3-11: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 2	51
Abbildung 3-12: Neubau, Speichersystemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 2	52
Abbildung 3-13: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei geringem Warmwasserbedarf , Szenario 2	52
Abbildung 3-14: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei mittlerem Warmwasserbedarf , Szenario 2	53
Abbildung 3-15: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei hohem Warmwasserbedarf , Szenario 2	53
Abbildung 4-1: Phasen einer Ökobilanz [ISO 2006a, ISO 2006b].....	58
Abbildung 4-2: Wärmenetze nach Energieträgern [AGFW 2015].....	68
Abbildung 4-3: Projektion Strommix Durchschnitt aus 2020/2030 [Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI 2015].....	73
Abbildung 4-4: PV gewichteter Strommix Durchschnitt aus 2020/2030 zur Berechnung Gutschrift bei Einspeisung ohne Batterie	74
Abbildung 4-5: Neubau, Systemvergleich, Treibhausgase, Szenario 1	77
Abbildung 4-6: Neubau, Systemvergleich, Treibhausgase ohne Haushaltsstrom Szenario 1	77
Abbildung 4-7: Altbau, Systemvergleich, Treibhausgase, Szenario 1	79
Abbildung 4-8: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Versauerung, Szenario 1	80
Abbildung 4-9: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich terrestrisches Eutrophierung, Szenario 1	81
Abbildung 4-10: Altbau, Systemvergleich Fotochemisches Ozonbildungspot., Szenario 1	81
Abbildung 4-11: Altbau, Systemvergleich Feinstaub/anorganische Emissionen, Szenario 1	82

Abbildung 4-12: Altbau, Systemvergleich Ressourcenverbrauch (fossil & mineralisch), Szenario 1	82
Abbildung 4-13: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich Treibhausgase, Szenario 1	83
Abbildung 4-14: Neubau, Systemvergleich, gleichgewichtet, Szenario 1	85
Abbildung 4-15: Altbau, Systemvergleich, gleichgewichtet, Szenario 1	86
Abbildung 4-16: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich, gleichgewichtet, Szenario 1	86
Abbildung 4-17: Neubau, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1	87
Abbildung 4-18: Altbau, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1	88
Abbildung 4-19: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1	89
Abbildung 4-20: Neubau, Speichersystemvergleich Treibhausgase, Szenario 1	90
Abbildung 4-21: Neubau, Speichersystemvergleich Versauerung, Szenario 1	91
Abbildung 4-22: Neubau, Speichersystemvergleich Feinstaub, Szenario 1	91
Abbildung 4-23: Neubau, Speichersystemvergleich Ressourcenverbrauch, Szenario 1	92
Abbildung 4-24: Neubau, Speichersystemvergleich nach Gewichtung (ohne Ressourcenverbrauch), Szenario 1	93
Abbildung 4-25: Neubau, Speichersystemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1	93
Abbildung 4-26: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich – Vergleich Warmwasserbedarf, gleichgewichtet, Szenario 1	95
Abbildung 4-27: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich – Vergleich Warmwasserbedarf, nach Gewichtung, Szenario 1	96
Abbildung 4-28: Neubau, Systemvergleich Treibhausgase, Szenariovergleich	97
Abbildung 4-29: Altbau, Systemvergleich Treibhausgase, Szenariovergleich	97
Abbildung 4-30: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Treibhausgase, Szenariovergleich	98
Abbildung 4-31: Neubau, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenariovergleich	99
Abbildung 4-32: Altbau, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenariovergleich	99
Abbildung 4-33: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenariovergleich	100
Abbildung 4-34: Neubau, Speichersystemvergleich Treibhausgase, Szenario 1&2	101
Abbildung 4-35: Neubau, Speichersystemvergleich nach Gewichtung (ohne Ressourcenverbrauch), Szenario 2	101
Abbildung 4-36: Neubau, Speichersystemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1&2	102
Abbildung 5-1: Neubau, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 1	105
Abbildung 5-2: Altbau, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 1	106
Abbildung 5-3: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 1	107
Abbildung 5-4: Neubau, Speichersystemvergleich Ökoeffizienz ohne Ressourcenverbrauch, Szenario 1	108
Abbildung 5-5: Neubau, Speichersystemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 1	108
Abbildung 5-6: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich, Ökoeffizienz bei geringem Warmwasserbedarf, Szenario 1	109

Abbildung 5-7: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich, Ökoeffizienz bei hohem Warmwasserbedarf, Szenario 1	110
Abbildung 5-8: Neubau, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 2	111
Abbildung 5-9: Altbau, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 2	111
Abbildung 5-10: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 2	112
Abbildung 5-11: Neubau, Speichersystemvergleich Ökoeffizienz ohne Ressourcenverbrauch, Szenario 2	113
Abbildung 5-12: Neubau, Speichersystemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 2	113
Abbildung 5-13: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich, Ökoeffizienz bei geringem Warmwasserbedarf, Szenario 2	114
Abbildung 5-14: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich, Ökoeffizienz bei hohem Warmwasserbedarf, Szenario 2	115
Abbildung 6-1: Vergleich von unterschiedlichen Faktoren zur Monetarisierung von Treibhausgasemissionen (verwendeter Umrechnungsfaktor: 1US\$ = 0,90€)	117
Abbildung 6-2: Neubau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)	119
Abbildung 6-3: Neubau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)	119
Abbildung 6-4: Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)	120
Abbildung 6-5: Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)	121
Abbildung 6-6: (teil-) San. Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)	122
Abbildung 6-7: (teil-) San. Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)	122
Abbildung 6-8: Neubau, Speichersystemvergleich, Szenario 1 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)	123
Abbildung 6-9: Neubau, Speichersystemvergleich, Szenario 1 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)	124
Abbildung 0-1: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Versauerung</i> , Szenario 1	136
Abbildung 0-2: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Frishwasser Eutrophierung</i> , Szenario 1	136
Abbildung 0-3: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Eutrophierung mariner Ökosysteme</i> , Szenario 1	137
Abbildung 0-4: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>terrestrische Eutrophierung</i> , Szenario 1	137
Abbildung 0-5: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>fotochemisches Ozonbildungspotential</i> , Szenario 1	138
Abbildung 0-6: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Ökotoxizität Süßwasser</i> , Szenario 1	138
Abbildung 0-7: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Humantoxizität kanzerogen</i> , Szenario 1	139
Abbildung 0-8: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Humantoxizität nicht-kanzerogen</i> , Szenario 1	139

Abbildung 0-9: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Feinstaub/anorganische Emissionen</i> , Szenario 1	140
Abbildung 0-10: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Ressourcenverbrauch</i> , Szenario 1	140
Abbildung 0-11: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Ionisierende Strahlung</i> , Szenario 1	141
Abbildung 0-12: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Frischwasser Eutrophierung</i> , Szenario 1	141
Abbildung 0-13: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Eutrophierung mariner Ökosysteme</i> , Szenario 1	142
Abbildung 0-14: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Ökotoxizität Süßwasser</i> , Szenario 1	142
Abbildung 0-15: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Humantoxizität kanzerogen</i> , Szenario 1	143
Abbildung 0-16: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Humantoxizität nicht-kanzerogen</i> , Szenario 1	143
Abbildung 0-17: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich <i>Ionisierende Strahlung</i> , Szenario 1	144
Abbildung 0-1: Neubau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)	145
Abbildung 0-2: Neubau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Detailanalyse der externer Kosten (in US\$)	145
Abbildung 0-3: Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)	146
Abbildung 0-4: Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Detailanalyse der externer Kosten (in US\$)	146
Abbildung 0-5: (Teil-) San. Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)	147
Abbildung 0-6: (Teil-) San. Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Detailanalyse der externer Kosten (in US\$)	147
Abbildung 0-7: Neubau, Speichersystemvergleich, Szenario 2 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)	148
Abbildung 0-8: Neubau, Speichersystemvergleich, Szenario 2 – Detailanalyse der externer Kosten (in US\$)	148

Tabellen

Tabelle 2-1:	Modellgebäude-Charakteristika.....	17
Tabelle 2-2:	Heizwärmebedarfsklassen.....	18
Tabelle 2-3:	Warmwasserbedarfsklassen.....	18
Tabelle 2-4:	Heizsysteme und berücksichtigte Komponenten	20
Tabelle 2-5:	Jahresnutzungsgrade der Heizsysteme (ohne Wärmepumpen)	22
Tabelle 2-6:	Jahresnutzungsgrade der Wärmepumpen-Heizsysteme, Szenario 1: gängige (nicht optimierte) Wärmepumpen	23
Tabelle 2-7:	Jahresnutzungsgrade der Wärmepumpen-Heizsysteme, Szenario 2: optimierte Wärmepumpen	24
Tabelle 2-8:	Speichersysteme und berücksichtigte Komponenten	26
Tabelle 2-9:	Wesentliche Grundlagen der Speichersysteme [C.A.R.M.E.N. e.V. 2015]	26
Tabelle 2-10:	Ergebnisse der stündlichen Berechnungen, Neubau (50 % der installierten PV-Leistung als Einspeisebegrenzung).....	28
Tabelle 2-11:	Lebensdauern der anlagentechn. Komponente (in Anlehnung an [VDI 2012]).....	29
Tabelle 3-1:	Energiepreise für Einfamilienhäuser.....	35
Tabelle 3-2:	Energiepreisentwicklung 2016-2036, Szenario 1 und 2	36
Tabelle 3-3:	Kosten für Instandsetzung, Wartung, Inspektion.....	37
Tabelle 3-4:	Schornsteinfegergebühren	37
Tabelle 3-5:	Investitionskosten Heizsysteme nach Modellgebäuden	38
Tabelle 3-6:	Investitionskosten Speichersysteme	40
Tabelle 3-7:	Gesamtinvestitionszuschüsse Heizsysteme („10.000-Häuser-Programm“ und BAFA), Neubau, (teil-)sanierter Altbau und Altbau.....	41
Tabelle 3-8:	Investitionszuschüsse Heizsysteme nach Fördermittelgeber, Neubau	42
Tabelle 3-9:	Investitionszuschüsse Heizsysteme nach Fördermittelgeber, (teil-)sanierter Altbau.....	43
Tabelle 3-10:	Investitionszuschüsse Heizsysteme nach Fördermittelgeber, Altbau	44
Tabelle 3-11:	Investitionszuschüsse Speichersysteme nach Fördermittelgeber (gerundete Werte), Neubau	45
Tabelle 4-1:	Bewertung der Qualität der Methoden nach EC-JRC [JRC 2011b]	59
Tabelle 4-2:	Beschreibung der Wirkungskategorien [JRC 2011b]	60
Tabelle 4-3:	Normierungsfaktoren für die Wirkungskategorien für das Jahr 2010 [JRC 2014]...64	
Tabelle 4-4:	Vergleich Normierungsfaktoren EU-27 und Global [JRC 2016 b]	64
Tabelle 4-5:	Gewichtungsfaktoren für die normierten Wirkungskategorien [JRC 2014]	66
Tabelle 4-6:	Eigenschaften des betrachteten Hochtemperaturelektrospeichers.....	67
Tabelle 4-7:	Annahmen zu Netzverlusten und Effizienzen der Wärmenetze	68
Tabelle 4-8:	Direkte Emissionsfaktoren der Heizgeräte in kg/TJ Brennstoffeinsatz	70
Tabelle 4-9:	Schwermetallemissionen für Heizgeräte mit Biomasseverwendung in kg/TJ Brennstoffeinsatz	72
Tabelle 4-10:	Ableitung des PV gewichteten Strommixes für 2025	73

Abkürzungen

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BW	Brennwertkessel
C.A.R.M.E.N.	Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.
CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CTUh	Toxische Vergleichseinheit für Menschen (engl.: Comparative Toxic Unit for Human)
CTUe	Toxische Vergleichseinheit für Ökosysteme (engl.: Comparative Toxic Unit for Ecosystems)
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
H ⁺	Proton (positiv geladenes Ion des Wasserstoffatoms)
HCl	Chlorwasserstoff
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
ILCD	International Life Cycle Data System
ISO	Internationale Organisation für Standardisierung
kWp	Kilowatt <i>peak</i> (engl.: Spitze); Bezeichnung für die elektrische Leistung von Solarzellen unter Standard-Testbedingungen
LCA	Ökobilanz (engl.: Life Cycle Assessment)
LCI	Sachbilanz (engl.: Life Cycle Inventory)
LCIA	Wirkungsabschätzung (engl.: Life Cycle Impact Assessment)
Li-Ion	Lithium-Ionen
mPuffer	mit Pufferspeicher
mSt	Trinkwarmwassererwärmung mittels Solarthermiekollektoren

N	Elementsymbol für Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NCA	(engl. Natural Capital Accounting), im Zusammenhang mit Monetarisierung von Umweltwirkungen
NMVOG	Nicht-methanhaltige flüchtige organische Verbindung (engl.: Non-Methane Volatile Organic Compound)
NO _x	Stickstoffoxide
NT	Niedertemperaturkessel
oBatterie	Stromerzeugung ohne Batteriespeicher
oPuffer	ohne Pufferspeicher
oSt	Trinkwarmwassererwärmung ohne Solarthermiekollektoren
P	Elementsymbol für Phosphor
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb-Gel	Blei-Gel Batterie
Pb-Säure	Blei-Säure Batterie
PV	Photovoltaik
PCDD/PCDF	Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane
PHPP	Passivhaus Projektierungspaket
PM _x	Feinstaubemissionen (engl. Particulate Matter) mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als x µm
REF	Referenz
Sb	Elementsymbol für Antimon
SO ₂	Schwefeldioxid
STR	Strom
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VOC	Flüchtige organische Verbindung (engl.: Volatile Organic Compound)
WN	Wärmenetz
WP	Wärmepumpe

1. Hintergrund und Ziele der Studie

1.1. Hintergrund der Studie

Das Bayerische Energieprogramm des Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie [StMWi 2016] vom 20. Oktober 2015, das das Bayerische Energiekonzept „Energie innovativ“ von 2011 fortschreibt, formuliert als oberstes Ziel der bayerischen Energiepolitik „eine sichere, bezahlbare und umweltverträgliche Energieversorgung für Bayerns Bürger und Betriebe“.

Das Energieprogramm enthält für das Jahr 2025 konkrete Ziele für Bayern [StMWi 2016]:

- **Klimaziel:** Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen auf 5,5 t pro Kopf
- **Effizienzziel:** Erhöhung der Primärenergieproduktivität um mindestens 25 % gegenüber 2010
- **Verbrauchsziele:** Senkung des Primärenergieverbrauchs um 10 % gegenüber 2010
- **Ausbauziele der erneuerbaren Energien:** Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf 70 %
- **Anteil regenerativer Energien am Endenergieverbrauch:** Deckung von 20 % des Endenergieverbrauchs aus regenerativen Energien

Diese Ziele werden durch einen ausgewogenen Mix unterschiedlicher Maßnahmen verfolgt. Dabei betten sich die Maßnahmen in die stabile und belastbare Strukturen der Drei-Säulen-Strategie: „Effiziente Verwendung von Energie“, „Nachhaltige Stromerzeugung“ und „Notwendiger Stromtransport“ ein.

Nachdem im 2015 veröffentlichten Energieprogramm [StMWi 2016] für den Gebäudebereich erhebliche Einsparpotentiale zur Senkung des bayerischen Energieverbrauchs identifiziert wurden („Energiewende ist ohne Wärmewende nicht denkbar“), ist es konsequent, konkrete Verbesserungsmaßnahmen in diesem Bereich seitens der Landesregierung durch geeignete Förderprogramme zu unterstützen. Schließlich werden aktuell rund 40 % des Energieverbrauchs in Deutschland durch den Bau und das Betreiben von Gebäuden verursacht.

In diesem Kontext wurde das „10.000-Häuser-Programm“ in Bayern konzipiert, um durch geeignete Förderprogramme konkret Anreize für die Umsetzung von energetischen Modernisierungsmaßnahmen zu schaffen. Durch das bayerische „10.000-Häuser-Programm“ werden Hauseigentümer von Ein- und Zweifamilienhäusern unterstützt, die mit innovativen Lösungen sowohl für die Erzeugung und die Speicherung als auch für das intelligente Management von Energie Vorreiter in Sachen Energieeffizienz sind bzw. werden wollen. Im Programmteil „Heizungsaustausch“ wird die vorzeitige Umstellung auf neue, hocheffiziente Heizungsanlagen unabhängig von einer Bundesförderung bezuschusst.

Es kann konstatiert werden, dass es für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende entscheidend sein wird, die vorhandenen Potentiale im Gebäudesektor hinsichtlich Energieeffizienz und Energieeinsparung zu nutzen. Hierdurch kann eine Reduktion des Energieverbrauchs und ein Beitrag zur Erreichung des europäischen Ziels, bis 2020 einen Anteil von 20 % erneuerbarer Energien am Gesamtenergieverbrauch vorzuweisen, geleistet werden.

Für die Nutzung der identifizierten Potentiale ist es wichtig, die Einsparmöglichkeiten und Kosten einzelner Technologien im Häuserbereich mit Hinblick auf Energieverbrauch und

Treibhausgasemissionen zu kennen, gleichzeitig aber auch andere Umweltthemen nicht aus dem Blick zu verlieren, um eine Verlagerung von Problemen zu vermeiden. Es ist daher wichtig neben der Problematik des Klimawandels auch andere Umweltthemen wie Ressourcenverbrauch, Versauerung, Eutrophierung oder Toxizität in Bewertungen von Technologien im Gebäudebereich zu berücksichtigen.

1.2. Ziele der Studie

Vor dem Hintergrund des „10.000-Häuser-Programms“ hat das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie den Dienstleistungsauftrag „Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte“ vergeben. Das Projekt wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) koordiniert und vom Centralen Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N) fachlich begleitet. Das primäre Ziel dieser Studie ist es, für verschiedene Heiz- und Speichersysteme, die in diesem Programm gefördert werden, die ökologische und ökonomische Leistungsfähigkeit anhand einer Ökoeffizienzanalyse zu vergleichen. Der Fokus liegt dabei auf einer umfassenden Betrachtung der verschiedenen Systeme über ihren gesamten Lebenszyklus (d. h., Betrachtung von Herstellung, Nutzung, Verwertung/Entsorgung) inklusive aller zugehörigen Energieträger und Materialbereitstellungsketten – nur so ergibt sich eine ganzheitliche und vollständige Vergleichsbasis.

Die Bewertung der Technologien erfolgt innerhalb ihres Einsatzkontextes. Dabei wird der Einfluss folgender Parameter auf die Ergebnisse untersucht:

- Energiestandard des Gebäudes
- Unterschiedlicher Warmwasserverbrauch
- Lebensdauer der Technologien
- Energiepreissteigerungen
- Wärmepumpeneffizienzen

Des Weiteren werden in der Studie neben den im „10.000-Häuser-Programm“ geförderten Technologien weitere, zukünftige Technologien mitbetrachtet.

Mit Hilfe der Ergebnisse dieses Projektes sollen die bayerischen Privathaushalte bei der Planung und Entscheidungsfindung im Rahmen des „10.000-Häuser-Programms“, insbesondere im Programmteil „Heizungsaustausch“, unterstützt werden.

Ein Schwerpunkt bei der Projektumsetzung liegt deshalb auf einer leichten Anwendbarkeit und Verständlichkeit der Projektergebnisse für den Hauseigentümer. Das Konzept für die Umsetzung der Analyse beinhaltet darum eine Systemgruppierung über einfache und zumeist bekannte Parameter (z. B. jährlicher Wärmebedarf, Anzahl der Bewohner, Nennleistung der Heizungsanlage, Gebäudetypen). Über diese einfache Systemzuordnung wird die problemlose und adäquate Verwendung der Projektergebnisse gewährleistet.

In der Ökoeffizienzanalyse werden die Gesamtkosten einer Technologie über den gesamten Lebenszyklus erhoben und den Umweltlasten gegenübergestellt, um Technologien mit hoher Ökoeffizienz zu identifizieren bzw. die zusätzlichen Kosten für die Reduktion von Umweltlasten zu bestimmen. Um eine möglichst breite Abdeckung von Umweltthemen zu erreichen, werden neben der Emittierung von Treibhausgasen weitere Umweltkategorien wie Versauerung, Eutrophierung, Feinstaub, Toxizität und Ressourcenverbrauch mitbetrachtet und über einen Gewichtungsschlüssel aggregiert (Single-Score Indikator), um eine direkte Vergleichbarkeit der Technologien über alle Umweltkategorien zu ermöglichen.

Dem Auftraggeber und dem Ersteller der Studie ist bewusst, dass es für eine Gewichtung von Umweltkategorien zu einem aggregierten Ergebnis keine naturwissenschaftliche, objektive Methode gibt. Die Gewichtung ist daher vor allem als Versuch zu verstehen, Verlagerungen von Umweltproblemen in andere Umweltkategorien vor allem zum Zwecke des Klimaschutzes zu erkennen und, sofern möglich, Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der Umweltlasten in anderen Umweltkategorien zu geben.

Die vereinfachte und ganzheitliche Bewertung verschiedener Heiz- und Speichersysteme durch die Ökoeffizienzanalyse eröffnet den Haus- und Wohnungsbesitzern in Bayern eine faktenbasierte und anwendungsbezogene Auswahl von Heiz- und Speichersystemen unter Berücksichtigung der vorhandenen Fördermaßnahmen und -programmen. Zusätzlich zu den aggregierten Ergebnissen der Ökoeffizienzanalyse stellt die Studie zunächst detailliert die ökonomischen Ergebnisse der Heiz- und Speichersysteme dar, zeigt exemplarisch Ergebnisse für ausgewählte Umweltkategorien sowie für alle Untersuchungen, die sich aus den oben genannten Parametern ergeben, die Ergebnisse für die Treibhausgase und die gewichteten Ergebnisse der ökologischen Analyse.

Die vorliegende Studie ist folgendermaßen gegliedert:

Zunächst wird der Untersuchungsrahmen der Studie genauer definiert (Kapitel 2). Im Anschluss daran werden eine ökonomische sowie eine ökologische Analyse der Heiz- und Speichersystemen durchgeführt (Kapitel 3 respektive 4). Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgt die Ökoeffizienzanalyse (Kapitel 5). Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse findet in den jeweiligen Kapiteln statt.

In einem Exkurs werden in Kapitel 6 die monetarisierten Umwelteffekte mit der Trucost Methode [Trucost 2015] ausgewertet und die ökonomischen Ergebnisse aus Kapitel 3 inklusive der monetarisierten Umwelteffekte dargestellt und diskutiert.

Kapitel 7 rundet die Studie mit einer Zusammenfassung und einem Fazit ab. Des Weiteren existiert eine Zusammenfassung der Studie als separates Dokument.

2. Untersuchungsrahmen

Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse der ökonomischen und der ökologischen Analyse ist entscheidend für die Durchführung der Ökoeffizienzanalyse. Um diese zu gewährleisten, werden für beide Analysen die gleichen Randbedingungen und Annahmen verwendet.

Im Rahmen der Studie werden unterschiedliche Heiz- und Speichersysteme für drei ausgewählte Gebäudetypen über einen festen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren untersucht. Mit Bezug auf das bayerische „10.000-Häuser-Programm“ konzentriert sich die Studie auf den Freistaat Bayern als Standort.

Neben dem Bedarf an Heizwärme und Warmwasser wird auch der Strombedarf (Haushaltsstrom, Betriebsstrom der Heiz- und Speichersysteme sowie Wärmepumpenstrom) der jeweiligen Gebäudetypen berücksichtigt. Als Grundlage wurden Leistungs- bzw. Gesamtwärmebedarfsklassen der bayerischen Privathaushalte gebildet, die jeweils den Heizwärme- und Warmwasserbedarf berücksichtigen.

Für einen Gebäudetyp wird der Einfluss des Warmwasserbedarfs auf die Verwendung der Heizsysteme betrachtet. Zusätzlich werden für alle Gebäudetypen zwei Szenarien betrachtet, in denen Variationen zu den Parametern Energiepreissteigerung, Wärmepumpeneffizienz und Lebensdauer der anlagentechnischen Komponenten untersucht werden.

Die folgenden Abschnitte dokumentieren grundlegende Randbedingungen, die den Untersuchungen und Berechnungen im Rahmen der Projektbearbeitung zugrunde liegen.

2.1. Modellgebäude und Energiebedarfe

Der Einsatz von Heizsystemen ist im Wesentlichen vom Nutzwärmebedarf des Gebäudes beeinflusst, der wiederum von Größe, Form und vor allem dem Energiestandard des Gebäudes sowie dem Nutzerverhalten bestimmt wird. Da der Fokus der Studie auf der Sanierung liegt, also dem Austausch eines bestehenden Heizungssystems durch eine Neuinstallation, wurde für die Festlegung der Gebäudetypen folgende Vorauswahl getroffen:

- Altbau (unsaniert): Es findet nur ein Austausch des Heizungssystems statt.
- (teil-)sanierter Altbau: Gleiches Gebäude wie Altbau, beim dem aber im Vorfeld oder im Zuge des Austausches des Heizungssystems eine energetische Sanierung der Gebäudehülle stattgefunden hat bzw. stattfindet.
- Neubau: Neues Gebäude mit Passivhausstandard zur Untersuchung, ob sich die Ergebnisse der Systeme im Vergleich zueinander bei sehr geringem Heizwärmedarf verändern.

Der Berechnung des Nutzwärmebedarfs der drei Modellgebäude wurden, für Bayern typische Wohngebäudetypen zugrunde gelegt. Hierzu wurde unter Berücksichtigung der bayerischen Gebäudetypologie und des Zensus von 2011 eine Auswahl von Modellgebäuden vorgenommen [IWU 2006, LSN 2014].

Der Zensus von 2011 ergab für bestehende Gebäude, dass der bayerische Gebäudebestand von Ein- bzw. Zweifamilienhäusern dominiert wird (>85 % der Gebäude). Mehr als zwei Drittel aller Wohngebäude sind freistehend. Die Baualtersklassen 1970-1989 (ca. ein Drittel) und 1950-1969 (ca. ein Viertel) sind am häufigsten vertreten. Bezogen auf die Wohnfläche pro Wohneinheit deckt der

relevanteste Bereich 100-129 m² ein Drittel aller Wohngebäude ab. Im Neubau ist die Größenklasse 100-129 m² mit einem Viertel aller Neubauten ebenfalls stark vertreten.

Auf der Grundlage der Ergebnisse des Zensus und in Verbindung mit der bayerischen Gebäudetypologie wurden die folgenden als repräsentativ zu erachtenden Modellgebäude für die vorliegende Studie ausgewählt.

Tabelle 2-1: Modellgebäude-Charakteristika

Modellgebäude	Ansicht	Bauteil	Bauteilfläche [m ²]	U-Wert (g-Wert) [W/(m ² ·K)]
Neubau¹ 110 m ² Wohnfläche, 6 kW Heizlast²		Fassade	124,4	0,12
		Fenster	27,6	0,60 (0,55) ³
		Dachschräge	77,0	0,12
		Oberste Geschossdecke	41,0	0,10
		Unterer Abschluss	98,7	0,15
		Fassade	173,0	0,90
Altbau⁴ 118 m ² Wohnfläche, 15 kW Heizlast		Fenster	23,6	1,40 (0,65)
		Dachschräge	37,3	0,24
		Oberste Geschossdecke	33,3	0,45
		Unterer Abschluss	66,1	1,00
		Fassade	173,0	0,24
		Fenster	23,6	1,30 (0,65)
(teil-) sanierter Altbau⁵ 118 m ² Wohnfläche, 9 kW Heizlast		Dachschräge	37,3	0,24
		Oberste Geschossdecke	33,3	0,24
		Unterer Abschluss	66,1	0,30
		Fassade	173,0	0,24
		Fenster	23,6	1,30 (0,65)
		Dachschräge	37,3	0,24

¹ Quelle: [ZUB 2010]

² Norm-Heizlast gem. DIN EN 12831 (inkl. ca. 3,5 kW Zusatz-Heizlast für den Aufheizbetrieb). Anmerkung: Die Standard Auslegung entspricht nicht der Auslegung gem. PHPP, die keine Zusatzlast für den Aufheizbetrieb vorsieht und weniger Sicherheiten bzgl. Extremwitterungsereignissen beinhaltet. Bei einer möglichen (nicht normkonformen) Auslegung gem. PHPP ist die erf. Auslegungsleistung deutlich geringer, was sich bei einigen Systemen -insb. der Sole Wärmepumpe- sehr vorteilhaft auf die Wirtschaftlichkeit auswirken würde.

³ Bei der gewählten Standard Geometrie musste eine extrem hochwertige Fensterqualität gewählt werden, um eine hohe energetische Qualität -in der Nähe des Passivhausstandards (spez. Heizwärmebedarf <15 kWh/m²a)- zu erreichen. Dieser Standard kann wirtschaftlicher durch ein energetisches Gesamtkonzept erreicht werden, bei dem auch die Geometrien einbezogen werden.

⁴ Quelle: [IWU 2006], Geometrie: Baualtersklasse 1949-1968, energetische Qualität: Baualtersklasse 1969-1978 (Fenster und Dachschräge renoviert, zuzgl. Wärmebrückenzuschlag von 0,05 W/m²K)

⁵ Geometrie: wie Altbau, energetische Qualität: EnEV-Mindestanforderung zu Höchstwerten der Wärmedurchgangskoeffizienten bei erstmaligem Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen (zuzgl. Wärmebrückenzuschlag von 0,02 W/m²K) [BGBl 2014]. Da hinsichtlich der Belange des Klimaschutzes eine ambitioniertere energetische Sanierung anzustreben ist, wurde hier die Bezeichnung „(teil-) saniert“ gewählt. Eigentlich handelt es sich um eine Vollsanierung, jedoch in der minimal zulässigen energetischen Qualität.

Aus der energetischen Analyse der drei obigen Modellgebäude ergeben sich die in Tabelle 2-2 dargestellten Heizwärmebedarfsklassen.

Tabelle 2-2: Heizwärmebedarfsklassen

Heizwärmebedarfsklassen	Modellgebäude	Heizwärmebedarf [kWh/a]	Spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/(m ² a)]
gering	Neubau	1.718	16
mittel	(teil-)sanierter Altbau	8.063	68
hoch	Altbau	20.430	173

Neben dem Raumwärmedarf ist der Energiebedarf zur Warmwasserbereitung ein wesentlicher Parameter zur Bestimmung der Ökoeffizienz eines Heizsystems. Zum einen wird für die Warmwasserversorgung in der Regel ein höheres Temperaturniveau benötigt. Zum anderen ist der Warmwasserbedarf nahezu gleichmäßig über den Jahresverlauf verteilt, sodass ein relevanter Anteil durch die Nutzung einer solarthermischen Anlage gedeckt werden kann. Der Wärmebedarf zur Warmwasserbereitung ist weitestgehend unabhängig vom Heizwärmebedarf und im Wesentlichen abhängig von der Anzahl der Bewohner und deren individuellen Verbrauchverhalten sowie dem Anlagentyp (mit oder ohne Zirkulationssystem). Bei den Berechnungen wurde bzgl. des Verbrauchsverhaltens der in der folgenden Tabelle beschriebene Nutzenergiebedarf für Warmwasser zugrunde gelegt.

Tabelle 2-3: Warmwasserbedarfsklassen

Warmwasserbedarfsklasse	Personenanzahl	Warmwasser-Nutzwärmebedarf [kWh/a]
gering	1-2	660
mittel	3-4	1.320 ⁶
hoch	>5	2.640

In den energetischen Berechnungen⁷ wurde davon ausgegangen, dass alle Warmwassersysteme im Bestand mit Zirkulationssystem ausgestattet sind (Ausnahme: (teil-)sanierter Altbau mit geringem Warmwasserbedarf). Der Neubau wurde ohne Zirkulationssystem angenommen. Der Gesamtwärmebedarf für die Warmwasserbereitung ergibt sich aus der Summe von Nutzenergiebedarf und systemabhängigem Zusatzwärmebedarf⁸.

In der Studie werden die drei Warmwasserbedarfsklassen als Sensitivität exemplarisch für das Modellgebäude „(teil-)sanierter Altbau“ untersucht (s. „Sensitivität Warmwasser“ in Kapitel 3.3.1 und 3.3.2). Für den Neu- und Altbau wird die Warmwasserbedarfsklasse „mittel“ angesetzt, da davon ausgegangen werden kann, dass diese Gebäude überwiegend für die entsprechende Personenanzahl geplant wurden.

⁶ Entsprechend dem neuen Kennwert der aktuellen DIN V 18599 (10/2016)

⁷ Passivhaus-Projektierungs-Paket [PHPP 2015]

⁸ Der Zusatzwärmebedarf, der durch die Warmwasserverteilung erzeugt wird, beläuft sich für Systeme ohne Zirkulation auf 510 kWh/a (Neubau) und auf 600 kWh/a ((teil-) sanierter Altbau, bei nachträglicher -Rohrleitungsdämmung gem. aktueller EnEV Anforderung) bzw. 880 kWh/a (Altbau, Rohrleitungsdämmung nur halb so stark wie die aktuelle EnEV Anforderung) mit Zirkulation.

2.2. Systemgrenzen

Der Fokus der Studie liegt auf der Sanierung, sprich dem Austausch eines bestehenden Wärmesystems. Daher werden lediglich die Kosten und Umweltwirkungen für den Ersatz oder die Neuinstallation inklusive der Verwertung/Entsorgung der Wärmeerzeuger bzw. die Neuinstallation von Photovoltaik (PV)- oder solarthermischen Anlagen und Speichern, nicht jedoch die Kosten und Umweltwirkungen für Wärmeverteiler- und Wärmeübergabesysteme oder Abgassysteme, betrachtet.

Für die drei unterschiedlichen Gebäudetypen ergeben sich daher folgende Festlegungen:

- Im Neubau werden zusätzlich auch die dauerhaften Komponenten, wie Gasanschluss oder Schornstein bei den Heizkesseln (sowie Mikro-Erdgas Blockheizkraftwerke (BHKW) und erdgasbetriebene Wärmepumpe) berücksichtigt, da sonst die Vergleichbarkeit mit strombetriebenen Wärmepumpen oder der Versorgung durch Wärmenetze nicht gegeben ist.
- Der Haushaltsstrombedarf der drei obigen Modellgebäude wird ebenfalls berücksichtigt. Dabei wird der durchschnittliche Stromverbrauch in Ein- oder Zweifamilienhäusern bzw. Reihen- und Doppelhäusern in Bayern von 3.300 kWh/a⁹ berücksichtigt.

2.2.1. Zeitlicher Erfassungsbereich

Die Studie befasst sich überwiegend mit aktuell am Markt erhältlichen Heiz- und Speichersystemen. Für die Studie wird davon ausgegangen, dass die Systeme im Jahr 2017 installiert werden und für einen Zeitraum von 20 Jahren verwendet werden. Daraus ergibt sich für die Nutzung der Systeme der Betrachtungszeitraum 2017-2037.

Näheres bezüglich der zeitlichen Referenz der verwendeten Daten für die ökonomische Betrachtung (Erwerb, Förderungen, Betrieb sowie Annahmen zu Preissteigerungen im Betrachtungszeitraum) sind in Abschnitt 3.2 dargelegt. Für die ökologische Betrachtung ist der zeitliche Bezug in Abschnitt 4.2 dokumentiert.

2.2.2. Geografischer Erfassungsbereich

Der Fokus der Studie liegt in der Verwendung der betrachteten Heiz- und Speichersysteme in Bayern. Sofern möglich bzw. sinnvoll werden für die ökologische und ökonomische Betrachtung Daten mit Bezug auf Bayern verwendet (z. B. Sonneneinstrahlung für Solarthermie und Photovoltaik).

2.3. Zu untersuchende Produktsysteme

2.3.1. Heizsysteme

Im Zuge der Untersuchung werden im Neubau 17 und im Bestand (Altbau und (teil-)sanierter Altbau) 19 Heizsystemvarianten betrachtet. Diese werden in Tabelle 2-4 genauer erläutert. Die dabei eingeführten Abkürzungen werden im Bericht weiterverwendet. Es wird davon ausgegangen, dass bei den Gebäuden im Bestand üblicherweise Erdgas- oder Ölniedertemperaturkessel ausgetauscht werden. Entsprechend der überwiegenden Praxis und aus Gründen der Übersichtlichkeit wird bei den Betrachtungen das jeweilige Heizsystem entweder durch ein neues Heizsystem ersetzt, das den

⁹ Berücksichtigte Quellen u.a.: [AGEB 2015, BDEW 2014, BMUB 2014, EnergieAgentur.NRW 2011]. Der angenommene mittlere Wert von 3.300 kWh/a beinhaltet den Hilfsenergiebedarf für die Heizungstechnik (z. B. den Pumpstrombedarf). Für den Neubau wurde - unter Berücksichtigung einer in der Regel überdurchschnittlich effizienten Technik - ein Abschlag von 180 kWh/a berücksichtigt.

gleichen fossilen Primärenergieträger verwendet (z. B. Austausch von Erdgasniedertemperaturkessel durch Erdgasbrennwertkessel, Erdgaswärmepumpe oder Mikro-Erdgas BHKW), oder aber durch ein alternatives Heizsystem (z. B. strombetriebene Wärmepumpe, Biomassekessel oder Wärmenetz), jedoch nicht durch einen Wärmeerzeuger, der einen anderen fossilen Energieträger verwendet (z. B. Austausch eines Erdgasniedertemperaturkessels durch Heizölbrennwertkessel¹⁰).

Tabelle 2-4: Heizsysteme und berücksichtigte Komponenten

Heizsystem Abkürzung ¹¹	Beschreibung des Heizsystems	Berücksichtigte Komponenten ¹²
NT_Heizöl	Niedertemperaturkessel Öl (Konventionelle Ölheizung) mit Restlebensdauer von 10 Jahren und danach Brennwerttechnik Öl für weitere 10 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Öltank ▪ (Zirkulationspumpe)
NT_Erdgas	Niedertemperaturkessel Erdgas (Konventionelle Erdgasheizung) mit Restlebensdauer von 10 Jahren und danach Brennwerttechnik Erdgas für weitere 10 Jahre	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Gasanschluss ▪ (Zirkulationspumpe)
BW_Heizöl_oST	Brennwertkessel Öl ohne Solarthermie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Öltank ▪ (Zirkulationspumpe)
BW_Erdgas_oST	Brennwertkessel Erdgas ohne Solarthermie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Gasanschluss ▪ (Zirkulationspumpe)
BW_Heizöl_mST	Brennwertkessel Öl mit Solarthermie (zur Trinkwarmwassererwärmung)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Öltank ▪ Solarthermie ▪ Warmwasser-Pufferspeicher ▪ (Zirkulationspumpe)
BW_Erdgas_mST	Brennwertkessel Erdgas mit Solarthermie (zur Trinkwarmwassererwärmung)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Gasanschluss ▪ Solarthermie ▪ Warmwasser-Pufferspeicher ▪ (Zirkulationspumpe)
BIO_Pellet_mST	Pelletheizung (Holz befeuert) mit Solarthermie (zur Trinkwarmwassererwärmung)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Pelletlager ▪ Solarthermie ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Einbau und Zubehör

¹⁰ Im Falle eines Energieträgerwechsels sind die ggf. dabei entstehenden Zusatzkosten und Vorteile (z.B. beim Wechsel von Heizöl auf Erdgas: Kostenseitig der Gasanschluss und die Entsorgung des Öltanks mit dem Vorteil des entsprechenden Raumgewinns) zusätzlich zu berücksichtigen.

¹¹ BW = Brennwertkessel, NT = Niedertemperaturkessel, oST/mST = ohne/mit solarer Trinkwarmwassererwärmung mittels Solarthermiekollektoren, mBHKW = Mikro-Blockheizkraftwerk, WP = Wärmepumpe, STR = Strom, WN = Wärmenetz

¹² Für die Gebäude im Bestand wird davon ausgegangen, dass die dauerhaften Komponenten, wie Gasanschluss, Schornstein etc., weiterverwendet werden können und sind entsprechend nicht berücksichtigt (siehe auch Abschnitt 2.2).

Heizsystem Abkürzung ¹¹	Beschreibung Heizsystems	des	Berücksichtigte Komponenten ¹²
			▪ (Zirkulationspumpe)
BIO_Scheitholz	Scheitholzheizung		▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Einbau und Zubehör ▪ (Zirkulationspumpe)
mBHKW_Erdgas_Schwarm	Schwarm von Erdgas-Mikro BHKW, die zentral gesteuert werden		▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Steuerung ▪ Einbau und Zubehör ▪ (Zirkulationspumpe)
mBHKW_Erdgas	Mikro-Erdgas-BHKW		▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Einbau und Zubehör ▪ (Zirkulationspumpe)
WP_Sonde	Wärmepumpensystem mit Erdwärmesonde		▪ Wärmeerzeuger ▪ Sonden ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Einbau, Zubehör und Genehmigung (Zirkulationspumpe)
WP_Grundwasser	Wärmepumpensystem mit Grundwasser		▪ Wärmeerzeuger ▪ Brunnen ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Einbau, Zubehör und Genehmigung (Zirkulationspumpe)
WP_Luft	Wärmepumpensystem mit Luft		▪ Wärmeerzeuger ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Einbau und Zubehör ▪ (Zirkulationspumpe)
WP_Kollektor	Wärmepumpensystem mit Erdkollektor/Erdkörpern		▪ Wärmeerzeuger ▪ Kollektoren ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Einbau und Zubehör ▪ (Zirkulationspumpe)
WP_Eisspeicher	Wärmepumpensystem mit Eisspeicher und Solar-Luftabsorber		▪ Wärmeerzeuger ▪ Eisspeicher ▪ Solar-Luftabsorber ▪ Kombi-Pufferspeicher ▪ Einbau, Zubehör und Genehmigung ▪ Einbau und Zubehör (Zirkulationspumpe)
WP_Hybrid_Erdgas	Luftwärmepumpen-Hybridsystem mit Erdgas-Brennwert Spitzenlastkessel		▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Gasanschluss ▪ Einbau und Zubehör ▪ (Zirkulationspumpe)
WP_Erdgas	Erdgas-Wärmepumpe		▪ Wärmeerzeuger ▪ Schornstein ▪ Gasanschluss ▪ Kombi-Pufferspeicher

Heizsystem Abkürzung ¹¹	Beschreibung des Heizsystems	Berücksichtigte Komponenten ¹²
WN_städtisch/ländlich	Wärmenetz (Unterscheidung in städtisch und ländlich)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einbau und Zubehör (Zirkulationspumpe) ▪ Wärmeerzeuger ▪ Einbau und Zubehör (Zirkulationspumpe)
STR_Hochtemperatur-elektrospeicher	Hochtemperaturspeicher (zur mittelfristigen Speicherung von Strom aus dem Netz bzw. Strom aus Windkraft, Stichwort „Power-to-Heat“)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einbau und Zubehör (Zirkulationspumpe) ▪ Wärmeerzeuger ▪ Einbau und Zubehör (Zirkulationspumpe)

Das System NT_Erdgas oder NT_Heizöl verwendet zunächst einen alten Niedertemperaturkessel für zehn Jahre weiter. Danach wird dieser Niedertemperaturkessel durch ein Brennwertgerät ersetzt. Bei diesen beiden Systemen soll untersucht werden, unter welchen Umständen ein Weiterbetrieb eines Niedertemperaturgerätes noch sinnvoll sein kann.

Die betriebsbedingten Kosten und Umweltlasten sind im Wesentlichen durch die Effizienzen der Heizsysteme bestimmt. Nachfolgend zeigt Tabelle 2-5 die verwendeten Jahresnutzungsgrade für die Heizsysteme ohne Wärmepumpen.

Tabelle 2-5: Jahresnutzungsgrade der Heizsysteme (ohne Wärmepumpen)

Heizsystem Abkürzung	Jahresnutzungsgrad Heizen ¹³			Jahresnutzungsgrad Warmwasser ¹³
	Neubau	(teil-) san. Altbau	Altbau	ALLE
<i>Modellgebäude</i>				
NT_Heizöl ¹⁴	-	0,91	0,88	0,81
NT_Erdgas ¹⁴	-	0,91	0,88	0,81
BW_Heizöl_oST	0,97	0,96	0,95	0,85
BW_Erdgas_oST	1,01	1,01	1,00	0,85
BW_Heizöl_mST ¹⁵	0,97	0,96	0,95	0,69
BW_Erdgas_mST ¹⁵	1,01	1,01	1,00	0,69
BIO_Pellet_mST ¹⁵	0,89	0,88	0,88	0,64
BIO_Scheitholz	0,84	0,83	0,83	0,74
mBHKW_Erdgas_Sch warm ¹⁶	0,95	0,95	0,95	0,95

¹³ Die angegebenen Jahresnutzungsgrade ergeben sich aus dem Verhältnis Heizwärmebedarf (inkl. Verluste für Speicherung, Verteilung und Übergabe)/Endenergiebedarf Heizen (Strom für Wärmepumpe Steuerung und Pumpen- bzw. Lüfterenergie zur Erschließung der Wärmequelle) bzw. Warmwasserbedarf (inkl. Verluste für Speicherung und Verteilung)/Endenergiebedarf Warmwasser (Strom für Wärmepumpe Steuerung und Pumpen- bzw. Lüfterenergie zur Erschließung der Wärmequelle); Die Jahresnutzungsgrade variieren je nach Modellgebäude, da die Vorlauftemperaturen unterschiedlich sind (Auslegungswerte: Neubau: 35/28°C; Altbau: 65/50°C; (teil-) sanierter Altbau: 50/40°C).

¹⁴ Nur für Bestandsgebäude (Modellgebäude Altbau und (teil-)sanierter Altbau) relevant.

¹⁵ Solarthermieertrag der Vakuumröhrenkollektoren (4 m²): Neubau: 1.280 kWh/a; (teil-) san. Altbau: 1.340 kWh/a; Altbau: 1.410 kWh/a (für mittleren Warmwasserbedarf, Anmerkung: Die unterschiedlichen Solarthermieerträge resultieren aus einem unterschiedlich hohen Warmwasser-Wärmebedarf der Gebäudetypen aufgrund unterschiedlicher Rohrleitungsdämmungen und einem Zirkulationssystem in den Altbauten).

Heizsystem Abkürzung	Jahresnutzungsgrad Heizen ¹³			Jahresnutzungsgrad Warmwasser ¹³
	[-]			[-]
mBHKW_Erdgas ¹⁶	0,95	0,95	0,95	0,95
WN_städtisch/ländlich	0,99	0,99	0,99	0,99
STR_Hochtemperatur- elektrospeicher	1,00	1,00	1,00	1,00

Die Effizienz von Wärmepumpen ist, neben der Qualität der Anlage, sehr sensibel hinsichtlich der gewählten Einstellung der Regelparameter (insbesondere Systemtemperaturen und Bivalenzpunkt¹⁷). Häufig wird keine Optimierung dieser Einstellungen vorgenommen, sodass die tatsächliche Effizienz deutlich hinter den Möglichkeiten und Erwartungen zurückbleibt. Daher wird in zwei Szenarien eine Sensitivitätsuntersuchung hinsichtlich der diesbezüglich typischer Weise zu erwartenden Bandbreite der Effizienz von Wärmepumpen durchgeführt.

Tabelle 2-6 zeigt die jeweiligen Jahresnutzungsgrade der Wärmepumpen für Heizen und Warmwasser für Szenario 1 (gängige Wärmepumpen). Tabelle 2-7 zeigt die Jahresnutzungsgrade der Wärmepumpen für Heizen und Warmwasser für optimierte Wärmepumpen (Szenario 2).

Tabelle 2-6: Jahresnutzungsgrade der Wärmepumpen-Heizsysteme, Szenario 1: gängige (nicht optimierte) Wärmepumpen¹⁸

Heizsystem Abkürzung	Jahresnutzungsgrad Heizen ^{19,20}			Jahresnutzungsgrad Warmwasser ^{19,20}
	[-]			[-]
<i>Modellgebäude</i>	Neubau	(teil-) san. Altbau	Altbau	ALLE
WP_Sonde	4,2	3,8	3,1	2,4
WP_Grundwasser	4,8	4,4	3,5	2,6
WP_Luft	3,0	2,7	2,2	2,3
WP_Kollektor	4,0	3,6	2,9	2,3
WP_Eisspeicher	3,6	3,3	2,7	2,4
WP_Hybrid_Erdgas	3,5	3,2	2,6	2,9
WP_Erdgas	1,4	1,4	1,3	1,0

¹⁶ BHKW Kenndaten: BHKW (Neubau, (teil-)sanierter Altbau): 12 kWth; 4 kWel (Vollaststunden: 300 bzw. 840; Stromerzeugung: 1.200 bzw. 3.350 kWh; Stromeigennutzung: 90 bzw. 250 kWh), bei dem hier angegebenen Jahresnutzungsgrad handelt es sich um den Gesamtnutzungsgrad für Strom und Wärme [ASUE 2014].

BHKW (Altbau) : 15 kWth; 6 kWel (Vollaststunden: 1.520; Stromerzeugung: 9.100 kWh; Stromeigennutzung: 460 kWh).

¹⁷ Der Bivalenzpunkt beschreibt die Außentemperatur, bei der die Heizleistung der Wärmepumpe gerade noch den Wärmebedarf des Gebäudes decken kann. Sinkt die Außentemperatur weiter ab, so muss ein zweiter Wärmeerzeuger hinzu geschaltet werden.

¹⁸ In Jahresarbeitszahlen; Anlehnung an die Ergebnisse (Mittelwerte) von [Fraunhofer ISE 2011].

¹⁹ Die angegebenen Jahresnutzungsgrade ergeben sich aus dem Verhältnis Heizwärmebedarf (inkl. Verluste für Speicherung, Verteilung und Übergabe)/Endenergiebedarf Heizen (Strom für Wärmepumpe Steuerung und Pumpen- bzw. Lüfterenergie zur Erschließung der Wärmequelle) bzw. Warmwasserbedarf (inkl. Verluste für Speicherung und Verteilung)/Endenergiebedarf Warmwasser (Strom für Wärmepumpe Steuerung und Pumpen- bzw. Lüfterenergie zur Erschließung der Wärmequelle); Die Jahresnutzungsgrade variieren je nach Modellgebäude, da die Vorlauftemperaturen unterschiedlich sind (Auslegungswerte: Neubau: 35/28°C; Altbau: 65/50°C; (teil-) sanierter Altbau: 50/40°C).

²⁰ Bei den angegebenen Werten handelt es sich um nicht statistisch verifizierte **Anhaltswerte für nicht optimierte Standard Wärmepumpen**. Im Einzelfall können die tatsächlich erreichten Jahresnutzungsgrade deutlich davon abweichen. Insbesondere bei Luftwärmepumpen ist außerdem eine starke Abhängigkeit vom lokalen Klima gegeben.

Tabelle 2-7: Jahresnutzungsgrade der Wärmepumpen-Heizsysteme, Szenario 2: optimierte Wärmepumpen

Heizsystem Abkürzung	Jahresnutzungsgrad Heizen ^{19,21}			Jahresnutzungsgrad Warmwasser ^{19,21}
	[-]			[-]
Modellgebäude	Neubau	(teil-) san. Altbau	Altbau	ALLE
WP_Sonde	5,0	4,6	3,7	2,6
WP_Grundwasser	5,7	5,2	4,2	2,8
WP_Luft	3,5	3,2	2,6	2,4
WP_Kollektor	4,8	4,3	3,5	2,5
WP_Eisspeicher	5,0	4,6	3,7	2,6
WP_Hybrid_Erdgas	4,1	3,8	3,1	3,0
WP_Erdgas	1,5	1,5	1,4	1,1

Für die Energiepreisentwicklungen wird aufgrund der vielfältigen Abhängigkeit der Energiepreise von nicht absehbaren Faktoren (u. a. weltweiter Energieverbrauch, Endlichkeit der Ressourcen, politische Unsicherheiten) ebenfalls eine Sensitivität zweier Energiepreissteigerungsszenarien untersucht.

Zusätzlich wird eine Sensitivität der Lebensdauer der Komponenten hinzugefügt, da in der Realität deutliche Unterschiede bei den Austauschzeitpunkten der Wärmeerzeuger vorherrschen. Daraus ergeben sich die folgenden beiden Szenarien:

- Szenario 1 (=> *ungünstig für Wärmepumpen und weitere investitionskostenintensive Technologien*):
 - moderate Energiepreissteigerung (siehe Kapitel 3.2.1)
 - gängige Wärmepumpeneffizienz
 - kürzere Lebensdauern (siehe Tabelle 2-11)
- Szenario 2 (=> *günstig für Wärmepumpen und weitere investitionskostenintensive Technologien*):
 - starke Energiepreissteigerung (im Vergleich zu Strom) (siehe Kapitel 3.2.1)
 - optimierte Wärmepumpeneffizienz
 - längere Lebensdauern (siehe Tabelle 2-11)

In der ökonomischen Analyse wirken sich alle variierten Parameter in den Szenarien aus, in der ökologischen Betrachtung nur die unterschiedlichen Wärmepumpeneffizienzen sowie die unterschiedlichen Lebensdauern der anlagentechnischen Komponenten. Die beiden Szenarien werden auch für die Speichersysteme verwendet.

2.3.2. Speichersysteme

In Bezug auf Speichersysteme werden am Beispiel des Neubaus vier Varianten (ein thermischer- und 3 Batteriespeicher) untersucht. Ergänzend wird ein System ohne Speicher b, um den Einfluss auf den Photovoltaik-Eigenverbrauch zu evaluieren. Der schematische Aufbau der Speichersysteme ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

²¹ Bei den angegebenen Werten handelt es sich um nicht statistisch verifizierte **Anhaltswerte für betrieboptimierte effiziente Wärmepumpen**. Die Werte für Eisspeicher-, Hybrid- und Erdgas-Wärmepumpen basieren, aufgrund fehlender Daten gänzlich auf Abschätzungen. Im Einzelfall können die tatsächlich erreichten Jahresnutzungsgrade daher deutlich von den genannten Werten abweichen. Insbesondere bei Luftwärmepumpen ist außerdem eine starke Abhängigkeit vom lokalen Klima gegeben.

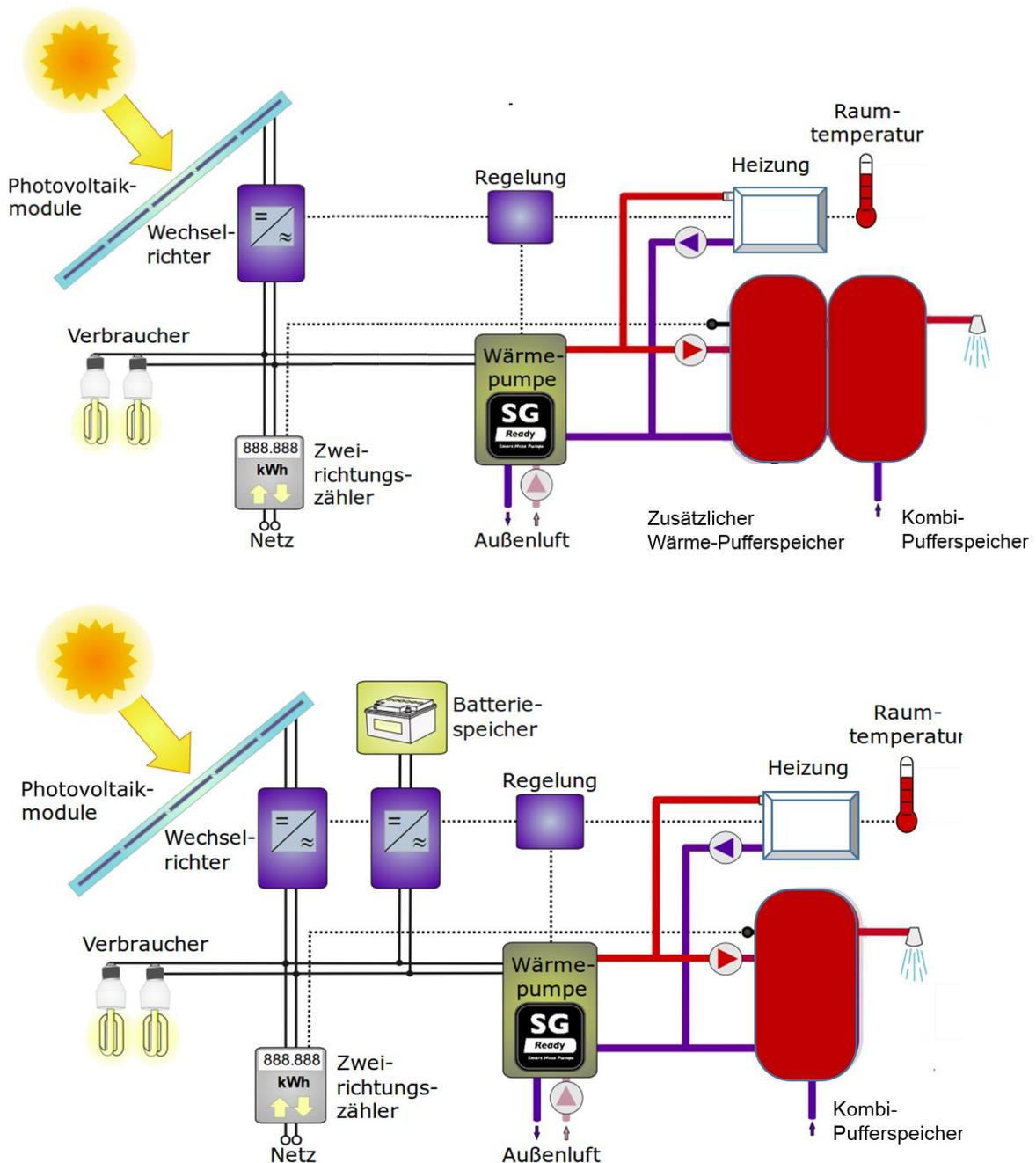


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau der berücksichtigten Speichersysteme inklusive Photovoltaikanlage, und Luftwärmepumpe oben: Mit zusätzlichem Wärme-Pufferspeicher unten: Mit Batteriespeicher²²

Für den berücksichtigten Neubau mit Luftwärmepumpe gelten die gleichen Annahmen wie für die entsprechende Variante im Heizsystemvergleich und den in Abschnitt 2.1 dargelegten Spezifikationen zum Gebäudetyp „Neubau“. Nachfolgend sind in Tabelle 2-8 die fünf Systeme und ihre wesentlichen anlagentechnischen Komponenten aufgelistet.

²² Quelle: In Anlehnung an Darstellungen in [HTW Berlin 2015]

Tabelle 2-8: Speichersysteme und berücksichtigte Komponenten

Speichersystem Abkürzung ²³	Beschreibung des Speichersystems	Berücksichtigte Komponenten
oBatterie_oPuffer_Ref	Photovoltaikanlage mit Luftwärmepumpe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Photovoltaikanlage ▪ Luftwärmepumpe
oBatterie_mPuffer	Photovoltaikanlage mit Luftwärmepumpe und zusätzlichem- Wärme-Pufferspeicher	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Photovoltaikanlage ▪ Luftwärmepumpe ▪ Zus. Wärme-Pufferspeicher
Li-Ion_oPuffer	Photovoltaikanlage mit Luftwärmepumpe und Lithium- Ionen ²⁴ -Batteriespeicher	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Photovoltaikanlage ▪ Luftwärmepumpe ▪ Lithium-Ionen-Batterie ▪ Speichermanagementsystem
Pb-Säure_oPuffer	Photovoltaikanlage mit Luftwärmepumpe und Blei-Säure- Batteriespeicher	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Photovoltaikanlage ▪ Luftwärmepumpe ▪ Blei-Säure-Batterie ▪ Speichermanagementsystem
Pb-Gel_oPuffer	Photovoltaikanlage mit Luftwärmepumpe und Blei-Gel- Batteriespeicher	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Photovoltaikanlage ▪ Luftwärmepumpe ▪ Blei-Gel-Batterie ▪ Speichermanagementsystem

Tabelle 2-9 zeigt die wesentlichen Grundlagen der Speichersysteme in einer Matrix aus Nutzkapazität, Zyklenanzahl und Effizienz der Batteriespeicher und der Wärmekapazität des Pufferspeichers.

Tabelle 2-9: Wesentliche Grundlagen der Speichersysteme [C.A.R.M.E.N. e.V. 2015]

Speichersystem Abkürzung ²³	Batterie- speicher Nutz- kapazität ²⁵ [kWh]	Batterie- speicher Zyklus- anzahl ²⁶ [-]	Batterie- speicher Effizienz [%] ²⁷	Wärme-Puffer- speicher ²⁸ Wärmekapazität [kWh]
oBatterie_oPuffer_Ref	-	-	-	-
oBatterie_mPuffer ²⁹	-	-	-	17,4
Li-Ion_oPuffer	12,0	6.200	91,8	-
Pb-Säure_oPuffer	12,0	2.400	91,5	-
Pb-Gel_oPuffer	12,0	2.700	87,5	-

²³ oBatterie_oPuffer = ohne Batterie und ohne zusätzlichen Wärme-Pufferspeicher, oBatterie_mPuffer = ohne Batterie, mit zusätzlichem Wärme-Pufferspeicher, Li-Ion_oPuffer = Lithiumionenbatterie zusätzlichen Wärme-Pufferspeicher, Pb-Säure_oPuffer = Bleisäurebatterie zusätzlichen Wärme-Pufferspeicher, Pb-Gel_oPuffer = Bleigelbatterie zusätzlichen Wärme-Pufferspeicher

²⁴ Als Zellentyp wurde auf Basis einer Marktstudie [C.A.R.M.E.N. e.V. 2015] Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO₄) als häufigste Technologie identifiziert und ausgewählt.

²⁵ Anmerkung: Die Kapazität ist in Übereinstimmung mit den Förderbedingungen (KfW-Förderprogramm „Speicher“ und „10.000-Häuser-Programm“) gewählt. Übliche wirtschaftliche Dimensionierungen ohne Förderung (als Tagespufferspeicher) liegen eher im Bereich von 5-7 kWh (anstelle von 12 kWh, bei denen größere Potentiale der Netzdienlichkeit gegeben sind).

²⁶ Für die tatsächlich in der Praxis erreichbaren Zyklenzahlen der Batteriesysteme gibt es derzeit noch keine statistisch belastbaren Daten. Die Angaben wurden aus Mittelwerten aus [C.A.R.M.E.N. e.V. 2015] abgeleitet.

²⁷ Als Mittelwert der Angaben zum maximalen Systemwirkungsgrad. Die Wirkungsgrade einzelner Systeme können deutlich voneinander abweichen. Ein Systemwirkungsgrad von 85 % ist dabei nicht unüblich. Da der Wirkungsgrad einen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtwirtschaftlichkeit hat, sollte dieser bei der Kaufentscheidung berücksichtigt werden.

²⁸ Volumen: 1.000 Liter, maximale Speichertemperatur = 60°C (ΔT = 15 K) als zusätzlicher Wärme-Pufferspeicher neben dem vorhandenen Kombi-Speicher

²⁹ Verluste des zusätzlichen Wärme-Pufferspeichers wurden vernachlässigt (Pufferspeicher in thermischer Hülle)

Die stündlichen Berechnungen werden mit der DIN EN ISO 13790-Arbeitshilfe durchgeführt. Die Berechnungen quantifizieren die unterschiedlichen Eigenverbrauchs- und Einspeisegrößenordnungen des Photovoltaikstroms für das jeweilige Speichersystem.

Grundlage der Betrachtung bildet eine 5 kWp-Photovoltaikanlage³⁰ mit einem jährlichen Ertrag für den Standort München von 4.720 kWh_{el}³¹ und ein gemäß VDI 4655 erstelltes Lastprofil für den Haushaltsstrom eines typischen Einfamilienhauses [VDI 2008]. Der mittlere Haushaltsstrombedarf, auf den das Lastprofil angepasst ist, wird auf der Grundlage der Auswertung mehrerer Quellen mit 3.300 kWh/a angenommen³².

Es wird die folgende Priorisierung/Reihenfolge bzgl. der Photovoltaiknutzung festgelegt³³:

1. Haushalts- und Hilfsstrom-Direktnutzung
2. Wärmepumpe-Direktnutzung für Heizung und Warmwasserbereitung
3. Aufladung Batteriespeicher bzw. Aufheizung des zus. Wärme-Pufferspeichers mittels Luft-Wärmepumpe³⁴

Außerdem wird die Einspeisebegrenzung des „10.000-Häuser-Programms“ auf 50 % der installierten Photovoltaik-Nennleistung berücksichtigt.

Tabelle 2-10 zeigt die Ergebnisse der stündlichen Berechnungen mit der DIN EN ISO 13790-Arbeitshilfe für den Neubau und 50 % Einspeisebegrenzung.

³⁰ 5 kWp waren zum Zeitpunkt der Untersuchung die Minimalgrenze zur Erlangung der Fördermittel im „10.000-Häuser-Programm“ und somit mutmaßlich das wirtschaftliche Optimum

³¹ Standort: München, Ausrichtung: Südwest, Neigung: 45°, Ertrag: 944 kWh_{el}/kWp [JRC 2012]; Um Effekte durch die spezielle Ausrichtung zu vermeiden wurde bei der Berechnung der stündlichen Erträge eine Südausrichtung berücksichtigt. Der Gesamtertrag wurde dabei auf die oben genannten 944 kWh_{el}/kWp reduziert, um real vorkommende Einschränkungen zu berücksichtigen.

³² Berücksichtigte Quellen u.a.: [AGEB 2015, BDEW 2014, BMUB 2014, EnergieAgentur.NRW 2011]. Der angenommene mittlere Wert von 3.300 kWh/a beinhaltet den Hilfsenergiebedarf für die Heizungstechnik (z.B. den Pumpstrombedarf). Für den Neubau wurde -unter Berücksichtigung einer in der Regel überdurchschnittlichen effizienten Technik- ein Abschlag von 180 kWh/a berücksichtigt.

³³ In den Wintermonaten (November bis Februar) sind die Erträge der PV Anlage in der Regel so gering, dass diese häufig nicht einmal ausreichen, um den Haushaltsstrombedarf zu decken. Darüber hinaus leistet sie nur einen geringen Beitrag zur Deckung des Heizwärmebedarfs. Die gewählte Betriebsweise ist unter den gegebenen Randbedingungen die mutmaßlich Wirtschaftlichste.

³⁴ Die Beladung des zus. Wärmepufferspeichers erfolgt nur in einem Zeitraum zwischen 12 und 16 Uhr, da hier davon auszugehen ist, dass die Umgebungstemperaturen maximal sind und damit auch die Effizienz der Wärmepumpe das Tagesoptimum erreicht.

Tabelle 2-10: Ergebnisse der stündlichen Berechnungen, Neubau (50 % der installierten PV-Leistung als Einspeisebegrenzung)

Speichersystem Abkürzung	PV-Deckung Haus- halts- und Hilfs- strom <i>Direkt</i> [kWh/a]	PV-Ladung Wärme- puffer- speicher mittels WP <i>Indirekt</i> [kWh/a]	PV-Nutzung Wärme- pumpe <i>Direkt</i> [kWh/a]	PV-Ladung Batterie <i>Indirekt</i> [kWh/a]	PV-Ladung Kombi- speicher mittels Heiz- stab ³⁵ <i>Direkt</i> [kWh/a]	PV-Eigen- ver- brauch [kWh/a]	PV-Eigen- ver- brauch korri- giert ³⁶ [kWh/a]	PV-Eigen- ver- brauch korri- giert ³⁶ [%]
oBatterie_oPuffer_Ref	1.120	0	300	0	150	1.580	1.450	31%
oBatterie_mPuffer	1.120	510	300	0	110	2.040	1.880	40%
Li-Ion_oPuffer	1.120	0	300	1.200	120	2.750	2.750	58%
Pb-Säure_oPuffer	1.120	0	300	1.200	120	2.750	2.750	58%
Pb-Gel_oPuffer	1.120	0	300	1.200	120	2.750	2.750	58%

2.4. Produktfunktion(en) und funktionelle Einheit

Die Produktfunktion der untersuchten Heizsysteme umfasst die Bereitstellung von Nutzwärme in den jeweiligen Gebäudetypen über einen Zeitraum von 20 Jahren. Da sowohl das Mikro-Erdgas-Blockheizkraftwerk als auch die Photovoltaikanlage bei den Speichersystemen zusätzlich zur Nutzwärme auch Strom bereitstellen, wird diese Bereitstellung des Haushaltsstroms in die Betrachtung miteinbezogen. Die Bereitstellung des Betriebs- und Wärmepumpenstroms, der sich aus dem Betrieb der Heiz- und Speichersysteme ergibt, ist ebenfalls in der Betrachtung enthalten. So ergibt sich als funktionelle Einheit die Deckung des Heizwärmebedarfs, des Warmwasserwärmebedarfs und des Strombedarfs der untersuchten drei Gebäudetypen über einen Zeitraum von 20 Jahren. Wie in Abschnitt 2.2 bezüglich der Systemgrenzen bereits dargelegt, sind die Wärmeverteilungs- und Wärmeübergabesysteme nicht Teil der Betrachtung.

Lebensdauer der Heiz- und Speichersysteme

Für die Analyse ist es erforderlich, die Lebensdauern von einzelnen energetisch relevanten Komponenten festzulegen, um hieraus, bezogen auf den Betrachtungszeitraum, den Zeitpunkt ggf. anfallender Ersatzbeschaffungen zu bestimmen und in die Kalkulation einfließen lassen zu können. Abhängig von der Lebensdauer von Einzelkomponenten werden hieraus für die ökonomische Analyse die Höhe der erforderlichen Kapitaleinsätze für Ersatzbeschaffungen bzw.

³⁵ Der Photovoltaikstrom, der aufgrund der Einspeisebegrenzung des „10.000-Häuser-Förderprogramms“ (50 % der installierten PV-Leistung) nicht eingespeist werden kann, wird genutzt, um den Kombispeicher per Heizstab zu erhitzen

³⁶ Der aus stündlicher Basis berechnete Eigenverbrauch wurde bei den Varianten ohne Batteriepuffer um 8 % reduziert, um das Auftreten von kurzfristigen Leistungsspitzen zu berücksichtigen [HTW Berlin 2016].

Ressourcenverbräuche sowie Restwertansätze zum Ende eines bestimmten Betrachtungszeitraums ermittelt.

Tabelle 2-11: Lebensdauern der anlagentechn. Komponente (in Anlehnung an [VDI 2012])

Komponente ³⁷	Lebensdauern	Lebensdauern
	Szenario 1 VDI 2067 [Jahre]	Szenario 2 ³⁸ VDI 2067 + 33 % [Jahre]
Heizöl-Brennwertkessel, Gerät	18	24
Heizöl-Brennwertkessel, Tank	50	50
Erdgas-Brennwertkessel, Gerät	18	24
Erdgas-Brennwertkessel, Anschluss	50	50
Solarthermische Anlage	15	20
Pelletkessel, Gerät	15	20
Pelletkessel, Lager	50	50
Scheitholzessel, Gerät	15	20
Scheitholzessel, Lager	50	50
Blockheizkraftwerk	15	20
Sonden-Wärmepumpe, Gerät	20	27
Sonden-Wärmepumpe, Sonden	50	50
Grundwasser-Wärmepumpe, Gerät	20	27
Grundwasser -Wärmepumpe, Brunnen	50	50
Luft-Wärmepumpe, Gerät	18	24
Kollektor-Wärmepumpe, Gerät	20	27
Kollektor -Wärmepumpe, Erdkollektor	50	50
Solar-Luftabsorber	15	20
Eisspeicher	50	50
Hybrid-Wärmepumpe	18	24
Erdgas-Wärmepumpe	18	24
Hochtemperaturrelektrospeicher	20	27
Wärmenetz-Übergabestation	30	40
Photovoltaik-Anlage	20	27
Lithium-Ionen-Batterie ³⁹	15	20
Blei-Säure-Batterie ³⁹	10	13
Blei-Gel-Batterie ³⁹	11	15
Kombi-Pufferspeicher	25	33
Speichermanagementsystem	25	33

Für die ökologische Analyse werden die zu berücksichtigenden anlagentechnischen Komponenten mithilfe der Lebensdauern linear skaliert. Die Produktion und Verwertung/Entsorgung von Komponenten mit einer Lebensdauer von 10 Jahren muss entsprechend zweimal für den gesamten

³⁷ Bei den für Gebäude im Bestand betrachteten Niedertemperaturgeräten handelt es sich um Altgeräte, die nach ca. 20 Jahren Betrieb weitere 10 Jahre verwendet werden und dann durch ein Brennwertgerät ausgetauscht werden (siehe auch Abschnitt 2.3.1).

³⁸ Die maximale Lebensdauer ist begrenzt auf 50 Jahre.

³⁹ Aufgrund fehlender Daten und Langzeiterfahrungen mussten für die Batteriesysteme Annahmen getroffen werden.

Betrachtungszeitrahmen von 20 Jahren berücksichtigt werden, für einen Heizöltank mit einer Lebensdauer von 50 Jahren werden entsprechend zwei Fünftel berücksichtigt.

Da Wärmeerzeuger und andere Komponenten in der Realität teilweise deutlich länger eingesetzt werden als die in der VDI 2067 angegebene ökonomische Lebensdauer, wird eine Sensitivität der Lebensdauer der Komponenten berücksichtigt [VDI 2012]:

- Szenario 1: kürzere Lebensdauern (in Anlehnung an VDI 2067),
- Szenario 2: längere Lebensdauern (in Anlehnung an VDI 2067+33 %)

Die Zusammenstellung der Lebensdauern der beiden Szenarien zeigt Tabelle 2-11.

3. Ökonomische Analyse

Im Rahmen der ökonomischen Analyse werden die Vollkosten der Heiz- und Speichersysteme in privaten Haushalten bestimmt. Berechnet werden die verbrauchs-, kapital- und betriebsgebundenen Kosten der Systeme über den festgelegten Betrachtungszeitraum. Bei Systemen und Anlagenkomponenten, die eine kürzere oder längere Lebensdauer haben (z. B. Erdsonden), werden entsprechende Ersatzinvestitionen bzw. Restwerte berücksichtigt. Somit sind die Ergebnisse weitestgehend unabhängig vom gewählten Betrachtungszeitraum.

Die Berechnungen erfolgen unter Berücksichtigung der Perspektive von Privathaushalten als Investoren.

Die folgenden Abschnitte erläutern die Methodik der ökonomischen Analyse (Kapitel 3.1), die relevantesten ökonomischen Grundlagen (Kapitel 3.2) und abschließend die ökonomischen Ergebnisse der beiden untersuchten Szenarien (Kapitel 3.3).

3.1. Methodik der ökonomischen Analyse

Die ökonomischen Berechnungen der Heiz- und Speichersysteme (s. 2.3.1 und 2.3.2) werden mit einem validierten Kalkulationstool durchgeführt, welches von Ecofys bereits im Rahmen von anderen Forschungsprojekten zur Bestimmung der Kostenoptimalität⁴⁰ von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudebereich eingesetzt wurde.

Zu den zentralen Eingabeparametern für die ökonomische Analyse zählen:

- Verbrauchsgebundene Kosten (s. 3.2.1)
 - Energiekosten (inkl. Berücksichtigung von Energiepreiserhöhungen)
- Betriebsgebundene Kosten (s. 3.2.2)
 - Instandsetzung, Wartung, Inspektion
 - Schornsteinfegergebühren
- Kapitalgebundene Kosten (s.3.2.3)⁴¹
 - Investitionen
 - Ersatzinvestitionen (unter Berücksichtigung der jeweiligen Lebensdauern)
- Fördermittel (s. 3.2.4)
 - „10.000-Häuser-Programm“
 - Förderung durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)
 - Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
 - Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG-Gesetz)
 - KfW Förderprogramm 275 für Batteriespeicher

⁴⁰ In der europäischen Richtlinie 2010/31/EU wird die Methodik zur Bestimmung der kostenoptimalen Niveaus beschrieben.

⁴¹ Mögliche Kosten für Demontage und Entsorgung der Altanlagen sind nicht berücksichtigt, da diese zum einen bei jedem Wärmerzeugertausch gleich hoch sind, zum anderen sind diese i. d. R. vergleichsweise gering-

Zur Ermittlung der Energiekosten (s. verbrauchsgebundene Kosten) der betrachteten Heiz- und Speichersysteme werden zwei Berechnungs-Arbeitshilfen verwendet:

- Heizsysteme: Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP)⁴²
- Speichersysteme: Stündlicher Heizwärmebedarf gem. DIN EN ISO 13790⁴³

Anhand der PHPP-Berechnungen werden für drei Wärmebedarfsklassen – dargestellt durch drei Modellgebäude (Neubau, Altbau, (teil-)sanierter Altbau), siehe Tabelle 2-1) – für jedes Heizsystem der Endenergiebedarf ermittelt, der die Grundlage für die ökonomische Analyse bildet. Auf der Grundlage der stundenfeinen Berechnungen nach DIN EN ISO 13790-Arbeitshilfe wurden die unterschiedlichen Eigenverbrauchs- und Einspeisegrößenordnungen des Photovoltaikstroms für die Speichersysteme quantifiziert⁴⁴. Der Eigenverbrauch reduziert in den ökonomischen Berechnungen den notwendigen Strombezug und der sich ergebende überschüssige Photovoltaikstrom wird eingespeist und gemäß [EEG 2017] vergütet⁴⁵.

Die folgende Abbildung veranschaulicht die Methodik der ökonomischen Analyse.

⁴² Excelbasiertes vom Passivhausinstitut erstelltes Tool. Der Heizwärmebedarf wird über ein Monatsbilanzverfahren bestimmt.

⁴³ Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008); Deutsche Fassung EN ISO 13790:2008: Bestimmung des Heizwärmebedarfs auf stündlicher Basis

⁴⁴ Fehler, die durch die gewählte stündliche Auflösung entstehen, werden durch geeignete Abschläge berücksichtigt

⁴⁵ Da derzeit am Markt noch keine zeitabhängig variablen Stromtarife für Privatverbraucher verfügbar sind, werden bei den Speichersystemregelungen nur hausoptimierte Lösungen (maximale Wirtschaftlichkeit für den Privatnutzer) berücksichtigt.

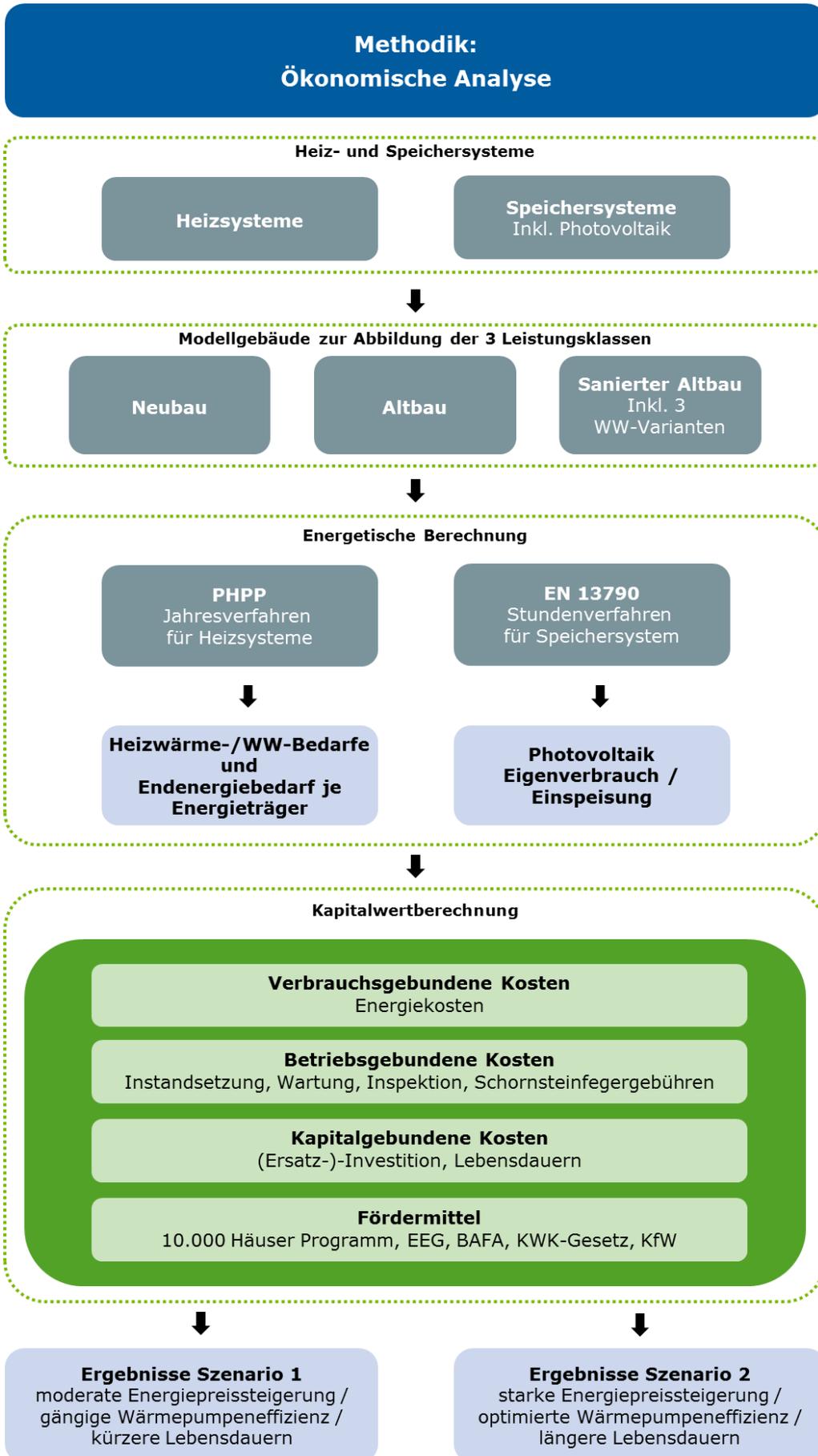


Abbildung 3-1: Methodik der ökonomischen Analyse

Berechnet werden jeweils die Gesamtkosten der unterschiedlichen Heiz- und Speichersysteme für die drei ausgewählten Gebäudetypen über einen festen Betrachtungszeitraum. Bei der Berechnung der Gesamtkosten werden neben den Investitionskosten (getrennt nach Anlagentechnik und Gebäudehülle) auch die Energie-, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie die Kosten für Ersatzmaßnahmen berücksichtigt. Die Kosten der Anlagentechnik, die bei einer Wärmeerzeugererneuerung anfallen, setzen sich aus einem Teil dauerhafter Investitionen (z. B. Gasanschluss, Abgassystem, Sonden von Solewärmepumpen, Brunnen von Wasserwärmepumpen) und einem Teil mit kürzeren Lebensdauern zusammen (z. B. Kessel oder Wärmepumpe inkl. Installation). Entsprechend ihrer Lebensdauer werden nach Ablauf der selbigen bei den Berechnungen die betreffenden Kosten der Ersatzinvestitionen berücksichtigt. Falls die jeweilige Lebensdauer den Betrachtungszeitraum übersteigt, wird ein Restwert berücksichtigt. Die Restwertberechnung erfolgt im Einklang mit der VDI 2067 und der Delegierten Verordnung Nr. 244/2012⁴⁶ über einen linearen Ansatz unter Berücksichtigung der Diskontierung am Ende des Betrachtungszeitraums. Für die Kosten und Qualitäten der Ersatzmaßnahmen werden, soweit nicht ausdrücklich anders beschrieben, die aktuellen Preise sowie die aktuellen Qualitäten (Effizienz) angenommen.

Die Berechnung der Gesamtkosten wird anhand der Kapitalwertmethode durchgeführt, welche alle zukünftigen Zahlungsströme mittels eines festgelegten Zinssatzes über den Betrachtungszeitraum abzinst und dadurch vergleichbar macht. Als **Betrachtungszeitraum** wurde ein Zeitraum von **20 Jahren** gewählt. Dieser entspricht in etwa der zu erwartenden mittleren Lebensdauer der relevanten Komponenten von Heizungssystemen. Als **Kalkulationszinssatz** wird bei der Berechnung ein mittlerer **Real-Zinssatz von 1 %** zugrunde gelegt. Dieser Zinssatz beschreibt dabei die aktuelle Niedrigzinssituation. Die Inflationsrate ist von 1,5 % im Jahr 2013 auf nahe 0,5 % im Jahre 2015 gesunken.

Die Berechnung des Kapitalwertes erfolgte nach folgender Gleichung:

$$C_g(\tau) = C_i + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right]$$

Erklärung:

τ	Berechnungszeitraum
$C_g(\tau)$	Kapitalwert (Gesamtkosten) (bezogen auf das Anfangsjahr τ_0) über den Berechnungszeitraum
C_i	Anfangsinvestitionen für die Maßnahme oder Maßnahmenreihe j
$C_{a,i}(j)$	jährliche Kosten im Jahr i für die Maßnahme oder Maßnahmenreihe j – inkl. Energiekosten
V_f	Restwert der Maßnahme oder Maßnahmenreihe j am Ende des Berechnungszeitraums (abgezinst auf das Anfangsjahr τ_0)
$R_d(i)$	Abzinsungsfaktor für das Jahr i auf der Grundlage des Abzinsungssatzes r nach folgender Berechnung:
	$R_d(p) = \left(\frac{1}{1 + r/100} \right)^p$
	Mit:
p	Anzahl der Jahre ab dem Anfangszeitraum
r	(realer) Abzinsungssatz

⁴⁶ Leitlinien zur delegierten Verordnung (EU) Nr. 244/2012 der Kommission vom 16. Januar 2012, Europäische Kommission, 2012.

Die Berechnung findet zu **realen Kosten und Preisen des Bezugsjahres 2016** statt. Die Berechnungen der Kapitalwerte werden aus der privatwirtschaftlichen Perspektive (d. h. der Perspektive eines Hauseigentümers, der auch gleichzeitig Nutzer der Immobilie ist) dargestellt. Als Förderungen werden sowohl das bayerische "10.000-Häuser-Programm", als auch die für die Heiz-, PV- und Speichersysteme relevanten Bundesförderungen (BAFA⁴⁷, EEG⁴⁸, KWK-Gesetz⁴⁹ und KfW⁵⁰) berücksichtigt.

Bei den Kostenberechnungen werden hinsichtlich der zukünftigen Energiepreisentwicklung, der Wärmepumpeneffizienz und den Lebensdauern der wesentlichen Heizungssystemkomponenten zwei Szenarien berücksichtigt (siehe Kapitel 2.3.1). Durch die Berücksichtigung dieser Szenarien wird ein Ergebnisraum aufgespannt, der sowohl die Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung der Energiepreise, als auch die relevanten realen Unsicherheiten bzgl. der Effizienz der Wärmepumpen sowie der Lebensdauer der Wärmeerzeuger berücksichtigen soll (siehe Ergebniskapitel 3.3).

3.2. Grundlagen der ökonomischen Analyse

Die folgenden Teilabschnitte dokumentieren die grundlegenden ökonomischen Randbedingungen, die den Untersuchungen und Berechnungen im Rahmen der Projektbearbeitung zugrunde liegen.

3.2.1. Verbrauchsgebundene Kosten

Die verbrauchsgebundenen Kosten ergeben sich aus den aktuellen Energiepreisen für Einfamilienhausbesitzer und den Energiepreisentwicklungen im Betrachtungszeitraum.

Energiepreise

Den Berechnungen werden Jahres-Mittelwerte für Deutschland aus [EID 2017], [AGFW 2016], [C.A.R.M.E.N. e.V. 2016b], [TFZ 2015], [LfU 2016] und [DESTATIS 2016] zugrunde gelegt. Alle Energiepreise sind inklusive Steuern zu verstehen.

Tabelle 3-1: Energiepreise für Einfamilienhäuser

Energieträger	Arbeitspreis ⁵¹ [€/kWh]	Grundpreis [€/Jahr]
Erdgas ⁵²	0,063	-
Heizöl ⁵³	0,063	-
Nah-/Fernwärme ⁵⁴	0,072	350
Holzpellets ⁵⁵	0,054	-

⁴⁷ BAFA: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle

⁴⁸ EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz

⁴⁹ KWK-Gesetz: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

⁵⁰ KfW-Förderprogramm „Speicher“

⁵¹ Heizwertbezug

⁵² Aufgrund der aktuellen Entwicklungen der Energiepreise und des Angleichens der Verbraucherpreise für Heizöl und Erdgas wird der gleiche Ausgangspreis für beide Energieträger angenommen. Grundsätzlich unterlagen die Preisentwicklungen der beiden Energieträger in der Vergangenheit sehr starken Schwankungen, diese sind auch zukünftig zu erwarten. Im langfristigen Mittel haben sich die Preise allerdings angeglichen.

Der Erdgaspreis versteht sich inklusive des Grundpreises und mit Heizwertbezug.

⁵³ [EID 2017], Heizöllieferung von 3.000 l

⁵⁴ [AGFW 2016], Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (Anpassung der angegebenen Energiepreise an die Abnahmemenge)

⁵⁵ [C.A.R.M.E.N. 2016] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (Anpassung der angegebenen Energiepreise an die Abnahmemenge)

Energieträger	Arbeitspreis ⁵¹ [€/kWh]	Grundpreis [€/Jahr]
Scheitholz ⁵⁶	0,058	-
Strom Wärmepumpentarif ⁵⁷	0,200	91
Stromtarif Mittelfristspeicher ⁵⁸	0,107	91
Strom Haushaltstarif ⁵⁹	0,297	-

Die Preise für die unterschiedlichen Energieträger unterliegen derzeit starken Schwankungen und sind abhängig vom individuellen Angebot des Anbieters. Mögliche Abweichungen - insbesondere auch im Verhältnis der Energieträger untereinander - sind daher bei der Entscheidungsfindung eines neuen Wärmeerzeugers zu berücksichtigen.

Energiepreisentwicklungen

Die Energiepreisentwicklung ist von vielen nicht absehbaren Faktoren (u. a. weltweiter Energieverbrauch, Endlichkeit der Ressourcen, politische Unwägbarkeiten) abhängig. Um diese Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von der Energiepreissteigerung zu adressieren, wurde eine Sensitivität anhand von zwei Energiepreissteigerungsszenarien untersucht. Abgesehen von der Höhe der Preissteigerung ist auch das Verhältnis der Preissteigerung der unterschiedlichen Energieträger von Bedeutung⁶⁰.

Tabelle 3-2: Energiepreisentwicklung 2016-2036, Szenario 1 und 2

Energieträger	Energiepreisentwicklung [%/Jahr] ⁶¹	
	Szenario 1	Szenario 2
Erdgas ⁶²	1,35	2,03
Heizöl	1,35	2,03
Nah-/Fernwärme	0,88	1,32
Holzpellets	1,35	2,03
Scheitholz	1,35	2,03
Strom	0,82	1,22

Anmerkung: Da die jährlichen Steigerungen der genannten Quelle sehr variabel sind, wurden diese zur besseren Übersicht für die o. g. Zeiträume linearisiert.

⁵⁶ [TFZ 2015] Technologie- und Förderzentrum im Förderzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

⁵⁷ Wärmepumpentarif wird nur berücksichtigt, wenn keine Photovoltaikanlage vorhanden war (nicht bei Speichersystemvergleich).

⁵⁸ [LfU 2016], gem. Projekt Windheizung 2.0. Achtung: Dieser Tarif ist fiktiv und auch in absehbarer Zeit nicht am Markt verfügbar!

⁵⁹ [Destatis 2016] Statistisches Bundesamt

⁶⁰ Bei den beiden berücksichtigten Szenarien wird davon ausgegangen, dass die Strompreise im Verhältnis zu den Preisen der übrigen Energieträger künftig weniger stark ansteigen. Dies wirkt sich positiv für strombasierte Systeme aus.

⁶¹ [PwC 2016] PricewaterhouseCoopers, Realsteigerung nach Abzug der allgemeinen Preissteigerungsrate

⁶² In Anlehnung an die Studie [PwC 2016] wird eine einheitliche Preisentwicklung der Verbraucherpreise für Erdgas und Heizöl (auf Basis der Heizölpreise) angenommen.

Das erste Szenario bildet eine moderate Energiepreissteigerung gemäß [PwC 2016] ab, während das zweite Szenario eine starke Energiepreissteigerung vorsieht, die um 50% über den Angaben von [PwC 2016] liegt.

3.2.2. Betriebsgebundene Kosten

Zur Berücksichtigung der laufenden jährlichen betriebsgebundenen Kosten ist der Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Inspektion, sowie Schornsteinfegergebühren in die Berechnungen einzubeziehen.

Instandsetzung, Wartung, Inspektion

Die für Wohngebäude verwendeten Ansätze für Instandsetzung, Wartung und Inspektion sind in Tabelle 3-3 dokumentiert. Hierbei handelt es sich um die den jeweiligen anlagentechnischen Komponenten zugeordnete Kosten für ein Einfamilienhaus. Die herangezogenen pauschalen Ansätze basieren auf Auswertungen von [VDI 2012] und [BTGA 2015].

Tabelle 3-3: Kosten für Instandsetzung, Wartung, Inspektion

Einheit	[€/Jahr]
Erdgas-/Heizöl-Kessel	102
BHKW ⁶³	1.031
Solare Trinkwassererwärmung	41
Wärmepumpe	122
Pelletkessel, Scheitholzessel	254
Photovoltaik ⁶⁴	170
Fernwärme und Mittelfristspeicher	0,5 %/a bezogen auf Investitionskosten

Schornsteinfegergebühren

Zusätzlich zu den vorgenannten Aufwendungen für Instandsetzung, Wartung und Inspektion fallen bei Systemvarianten mit Gas-, Ölkessel, BHKW, Pellet- und Scheitholzessel Schornsteinfegergebühren an. Diese werden auf Grundlage der Kehr- und Überprüfungsgebührenordnung⁶⁵ abgeschätzt, sie stellen mittlere Werte für Bayern dar und sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 3-4: Schornsteinfegergebühren

Einheit	[€/Jahr]
Gas- und Ölbrennwertkessel / mBHKW	25
Pelletkessel, Scheitholzessel	102

⁶³ Instandhaltungskosten und Verwaltungsaufwand

⁶⁴ Aufwand für Abrechnung und Wartung

⁶⁵ Verordnung über die Kehrung und Überprüfung von Anlagen (Kehr- und Überprüfungsordnung – KÜO) vom 16.06.2009.

3.2.3. Kapitalgebundene Kosten

Investitionskosten

Die in den Berechnungen angesetzten Investitionskosten sind das Ergebnis umfangreicher Recherchen. Sie basieren i. d. R. auf Listenpreisen führender Hersteller und umfassen neben den Materialkosten auch die Lieferung, Montage und Inbetriebnahme sowie typische Rabatte und Preiszuschläge durch den Installateur. Obwohl bei der Ermittlung typischer Werte große Sorgfalt walten gelassen wurde, werden sich im konkreten Einzelfall Abweichungen in Abhängigkeit vom Hersteller, Anbieter, von der Region und der Jahreszeit oder auch von der Auftragslage ergeben.⁶⁶

Die Gesamtinvestitionskosten beinhalten in dieser Studie Kosten, die direkt dem Wärmeerzeuger zugeordnet werden können (Kessel/Wärmepumpe, Gasanschluss, Heizöltank, Sondenbohrung, Schornstein etc.). Investitionskosten, die aus dem Lüftungssystem oder der Wärmeverteilung und -übergabe resultieren, sind nicht Teil der Gesamtinvestitionskosten. Für den Gebäudebestand (Altbau und (teil-)sanierter Altbau) werden die Kosten außerdem exklusive der dauerhaften Komponenten angesetzt (bspw. Gasanschluss). Tabelle 3-5 zeigt die Gesamtinvestitionskosten und die Aufteilung auf die wesentlichen Komponenten der Heizsysteme differenziert nach den Modellgebäuden.

Tabelle 3-5: Investitionskosten Heizsysteme nach Modellgebäuden

Heizsystem Abkürzung ⁶⁷	Einfamilienhaus Neubau [Euro]	Einfamilienhaus (teil-)sanierter Altbau ⁶⁸ [Euro]	Einfamilienhaus Altbau ⁶⁹ [Euro]
<i>Wohnfläche</i>	110 m²	118 m²	118 m²
<i>Installierte Leistung</i>	6 kW	9 kW	15 kW
NT_Heizöl⁷⁰	-	-	-
NT_Erdgas⁷⁰	-	-	-
BW_Heizöl_oST	11.600	7.000	7.400
▪ Wärmeerzeuger	6.600	7.000	7.400
▪ Schornstein	3.300	-	-
▪ Öltank	1.700	-	-
BW_Erdgas_oST	9.000	5.300	5.500
▪ Wärmeerzeuger	3.700	3.800	4.000
▪ Schornstein	3.300	1.500	1.500
▪ Gasanschluss	2.000	-	-
BW_Heizöl_mST	18.300	13.700	14.100
▪ siehe BW_Heizöl_oST	11.600	7.000	7.400
▪ Solarthermie	5.700	5.700	5.700
▪ Warmwasser- Pufferspeicher	1.000	1.000	1.000

⁶⁶ Aufgrund der beschriebenen unvermeidbaren Unsicherheiten wird kein Kostenunterschied zwischen nicht optimierten Standard-Wärmepumpen (=>Szenario 1) und optimierten effizienten Wärmepumpen (Szenario 2) berücksichtigt. Insbesondere bei den Systemen „WP_Eisspeicher“, „WP_Hybrid_Erdgas“ und „WP_Erdgas“ ist die Systemauswahl am Markt und die Anzahl der installierten Anlagen sehr gering, so dass die genannten Kosten als „besonders unsicher“ einzustufen sind.

⁶⁷ BW = Brennwertkessel, NT = Niedertemperaturkessel, oST/mST = ohne/mit solarer Trinkwarmwassererwärmung mittels Solarthermiekollektoren, mBHKW = Mikro-Blockheizkraftwerk, WP = Wärmepumpe, STR = Windstrom, WN = Wärmenetz

⁶⁸ Exkl. Schornstein, Gasanschluss und Öltank, da davon ausgegangen wird, dass kein Energieträgerwechsel bei Öl und Gas vorgenommen wird. Bei einem Wechsel von auf ein Brennwertsystem ist nicht selten auch eine Schornsteinertüchtigung notwendig. Diese wurde hier nicht berücksichtigt.

⁶⁹ Siehe vorherige Fußnote

⁷⁰ Nur für Bestandsgebäude (Modellgebäude Altbau und (teil-) sanierter Altbau) relevant. Die Kosten entsprechen den Kosten der Varianten BW_Heizöl_oST bzw. BW_Erdgas_oST, da angenommen wird, dass der Niedertemperaturkessel nach 10 Jahren im Betrachtungszeitraum durch ein Brennwertgerät ersetzt wird.

Heizsystem Abkürzung ⁶⁷	Einfamilienhaus Neubau [Euro]	Einfamilienhaus (teil-)sanierter Altbau ⁶⁸ [Euro]	Einfamilienhaus Altbau ⁶⁹ [Euro]
BW_Erdgas_mST	15.700	12.000	12.200
▪ siehe BW_Erdgas_oST	9.000	5.300	5.500
▪ Solarthermie	5.700	5.700	5.700
▪ Warmwasser- Pufferspeicher	1.000	1.000	1.000
BIO_Pellet_mST	24.850	23.550	26.650
▪ Wärmeerzeuger ⁷¹	13.550	14.950	16.850
▪ Schornstein	3.300	-	-
▪ Pelletlager	1.100	1.700	2.900
▪ Solarthermie	5.700	5.700	5.700
▪ Kombi-Pufferspeicher	1.200	1.200	1.200
BIO_Scheitholz	15.350	12.050	12.050
▪ Wärmeerzeuger ⁷¹	10.850	10.850	10.850
▪ Schornstein	3.300	-	-
▪ Kombi-Pufferspeicher	1.200	1.200	1.200
mBHKW_Erdgas_Schwa rm ⁷²	31.900	28.600	33.900
▪ Wärmeerzeuger	26.400	26.400	30.900
▪ Schornstein	3.300	-	-
▪ Kombi-Pufferspeicher Steuerung	1.200 1.000	1.200 1.000	1.200 1.000
mBHKW_Erdgas ⁷²	30.700	27.400	31.900
▪ Wärmeerzeuger	26.400	26.400	30.900
▪ Schornstein	3.300	-	-
▪ Wärmespeicher	1.000	1.000	1.000
WP_Sonde	22.500	28.500	39.500
▪ Wärmeerzeuger	14.000	16.300	20.500
▪ Sonden	7.300	11.000	17.800
▪ Kombi-Pufferspeicher	1.200	1.200	1.200
WP_Grundwasser	23.200	25.500	29.700
▪ Wärmeerzeuger	14.000	16.300	20.500
▪ Brunnen	5.000	5.000	5.000
▪ Sonstige	3.000	3.000	3.000
▪ Kombi-Pufferspeicher	1.200	1.200	1.200
WP_Luft	11.600	17.000	23.700
▪ Wärmeerzeuger	11.600	15.800	22.500
▪ Kombi-Pufferspeicher	-	1.200	1.200
WP_Kollektor	18.800	23.000	30.600
▪ Wärmeerzeuger	14.000	16.300	20.500
▪ Kollektoren	3.600	5.500	8.900
▪ Kombi-Pufferspeicher	1.200	1.200	1.200
WP_Eisspeicher	24.500	31.000	38.700
▪ Wärmeerzeuger	11.700	15.900	22.500
▪ Eisspeicher	4.800	5.200	5.600
▪ Solar-Luftabsorber	2.400	3.100	3.800
▪ Sonstiges	5.600	5.600	5.600
▪ Kombi-Pufferspeicher	-	1.200	1.200
WP_Hybrid_Erdgas	10.800	7.000	8.500
▪ Wärmeerzeuger	5.500	7.000	8.500

⁷¹ Inkl. Staubabscheider

⁷² [ASUE 2014]

Heizsystem Abkürzung ⁶⁷	Einfamilienhaus Neubau [Euro]	Einfamilienhaus (teil-)sanierter Altbau ⁶⁸ [Euro]	Einfamilienhaus Altbau ⁶⁹ [Euro]
▪ Schornstein	3.300	-	-
▪ Gasanschluss	2.000	-	-
WP_Erdgas⁷³	19.800	14.500	14.500
▪ Wärmeerzeuger	13.300	13.300	13.300
▪ Schornstein	3.300	-	-
▪ Gasanschluss	2.000	-	-
▪ Kombi-Pufferspeicher	1.200	1.200	1.200
STR_Hochtemperatur- elektrospeicher⁷⁴	10.000	23.000	-
▪ Wärmeerzeuger	10.000	23.000	-
WN_städtisch/ländlich	8.700	8.900	8.900
▪ Wärmeerzeuger	8.700	8.900	8.900

Tabelle 3-6 stellt die Investitionskosten der Speichersysteme dar und differenziert dabei nach Batteriespeicher, Pufferspeicher, Photovoltaikanlage und Speichermanagementsystem.

Tabelle 3-6: Investitionskosten Speichersysteme

Speichersystem Abkürzung	Batterie- speicher ⁷⁵ [Euro]	Puffer- speicher [Euro]	Photo- voltaik- anlage [Euro]	Speicher- manage- ment system [Euro]	Summe Speicher- system [Euro]
oBatterie_oPuffer_Ref	-	-	9.100	-	9.100
oBatterie_mPuffer	-	1.200	9.100	1.000	11.300
Li-Ion_oPuffer	19.300	-	9.100	1.000	29.400
Pb-Säure_oPuffer	9.400	-	9.100	1.000	19.500
Pb-Gel_oPuffer	20.100	-	9.100	1.000	30.200

3.2.4. Fördermittel

Die berücksichtigten Fördermittel können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- Investitionszuschüsse
 - [10.000-Häuser-Programm 2016] („Technikbonus“ und „Heizungstausch“)
 - [BAFA 2016b]
 - [KfW 2017]
- Einspeisevergütungen
 - [EEG 2017]
 - [KWKG-Gesetz 2015]

⁷³ [BDEW 2016] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., (inkl. Schornstein und Gasanschluss)

⁷⁴ Annahme (in Abstimmung mit dem LfU): *Dieses System ist noch im Entwicklungsstadium und in absehbarer Zeit nicht am Markt verfügbar.*

⁷⁵ [C.A.R.M.E.N. e.V. 2015] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. Anmerkung: Die Kosten für Batteriesysteme unterliegen derzeit einem starken Preisverfall. Seit Oktober 2016 bietet ein Hersteller einen 14 kWh Stromspeicher für knapp über 7.000 € inkl. Installation an, was sich deutlich positiv auf die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme auswirkt.

Tabelle 3-7 zeigt zunächst die Gesamtinvestitionszuschüsse der Heizsysteme für die drei Modellgebäude.

Tabelle 3-7: Gesamtinvestitionszuschüsse Heizsysteme („10.000-Häuser-Programm“ und BAFA), Neubau, (teil-)sanierter Altbau und Altbau

Heizsystem Abkürzung ⁷⁶	Einfamilienhaus Neubau ⁷⁷ [Euro]	Einfamilienhaus (teil-)sanierter Altbau [Euro]	Einfamilienhaus Altbau [Euro]
NT_Heizöl	0	0	0
NT_Erdgas	0	0	0
BW_Heizöl_oST	0	1.000	1.000
BW_Erdgas_oST	0	1.000	1.000
BW_Heizöl_mST	500	2.000	2.500
BW_Erdgas_mST	500	2.000	2.500
BIO_Pellet_mST ⁷⁸	5.500	5.500	6.000
BIO_Scheitholz	2.000	3.000	3.000
mBHKW_Erdgas_Schwarm	5.800	5.800	4.000
mBHKW_Erdgas	5.800	5.800	4.000
WP_Sonde	2.000	6.500	5.500
WP_Grundwasser	2.000	6.000	5.000
WP_Luft ⁷⁹	0	1.500	1.500
WP_Kollektor	2.000	6.000	5.000
WP_Eisspeicher	0	0	0
WP_Hybrid_Erdgas	2.500	3.800	2.300
WP_Erdgas	2.500	7.000	5.500
STR_Hochtemperaturelektro- speicher	0	0	0
WN_städtisch/ländlich	0	0	0

Tabelle 3-8 zeigt die Investitionszuschüsse der Heizsysteme nach Fördermittelgeber für den Neubau.

⁷⁶ BW = Brennwertkessel, NT = Niedertemperaturkessel, oST/mST = ohne/mit solarer Trinkwarmwassererwärmung mittels Solarthermiekollektoren, mBHKW = Mikro-Blockheizkraftwerk, WP = Wärmepumpe, STR = Strom, WN = Wärmenetz.

⁷⁷ Anmerkung im 10.000-Häuser-Programmteil EnergieSystemHaus wird ein Passivhaus mit zusätzlich 9.000 € Energieeffizienzbonus gefördert wenn ein Technikbonus gewährt wird. Diese Förderung wurde hierbei nicht berücksichtigt.

⁷⁸ Zur Erlangung des spezifizierten Technikbonus im Rahmen des "10.000-Häuser-Programms" ist entweder ein Kessel mit Brennwerttechnologie oder ein Partikelfilter vorzusehen. Darüber hinaus gibt es weitere Nebenanforderungen, die im Merkblatt T5 des Programms (https://www.energieatlas.bayern.de/file/pdf/1789/10000-Haeuser-Programm_-_Merkblatt_T5.pdf) beschrieben sind.

⁷⁹ Zur Erlangung des spezifizierten Technikbonus für Luftwärmepumpen im Rahmen des "10.000-Häuser-Programms" besteht die Notwendigkeit der Vorsehung einer mind. 5 kWp großen, auf den Winterbetrieb optimierten PV Anlage sowie eines Bauteilspeichers und eines spezifischen Heizwärmebedarfs des Hauses von ≤15 kWh/m²a.

Tabelle 3-8: Investitionszuschüsse Heizsysteme nach Fördermittelgeber, Neubau

Heizsystem Abkürzung ⁸⁰	“10.000-Häuser- Programm” Technikbonus ⁸¹ [Euro]	BAFA ⁸² [Euro]	Neubau Gesamt [Euro]
BW_Heizöl_oST	0	0	0
BW_Erdgas_oST	0	0	0
BW_Heizöl_mST	0	500	500
BW_Erdgas_mST	0	500	500
BIO_Pellet_mST ⁸³	1.500	4.000	5.500
BIO_Scheitholz	0	2.000	2.000
mBHKW_Erdgas_Schwarm	3.000	2.800	5.800
mBHKW_Erdgas	3.000	2.800	5.800
WP_Sonde	2.000	0	2.000
WP_Grundwasser	2.000	0	2.000
WP_Luft ⁸⁴	0	0	0
WP_Kollektor	2.000	0	2.000
WP_Eisspeicher	0	0	0
WP_Hybrid_Erdgas	2.500	0	2.500
WP_Erdgas	2.500	0	2.500
STR_Hochtemperaturelektro- speicher	0	0	0
WN_städtisch/ländlich	0	0	0

Tabelle 3-9 zeigt die Investitionszuschüsse der Heizsysteme nach Fördermittelgeber für den (teil-)sanierten Altbau.

⁸⁰ BW = Brennkessel oST/mST = ohne/mit solarer Trinkwassererwärmung mittels Solarthermiekollektoren, mBHKW = Mikro-Blockheizkraftwerk, WP = Wärmepumpe, STR = Strom, WN = Wärmenetz

⁸¹ Der Technikbonus des “10.000-Häuser-Programms” fördert Wärmepumpensysteme, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), netzdienliche Photovoltaik, Solarwärmespeicherung und Holzheizungen. Beim Neubau muss mindestens ein KfW-Effizienzhaus 55 und bei der Modernisierung von bestehenden Wohngebäuden ein KfW-Effizienzhaus 115 erreicht werden.

⁸² BAFA fördert Wärmepumpensysteme (nur im Bestand), Solarthermiesysteme, Biomassekessel und Mikro BHKW-Anlagen.

⁸³ Zur Erlangung des spezifizierten Technikbonus im Rahmen des “10.000-Häuser-Programms” ist entweder ein Kessel mit Brenntechnologie oder ein Partikelfilter vorzusehen. Darüber hinaus gibt es weitere Nebenanforderungen, die im Merkblatt T5 des Programms (https://www.energieatlas.bayern.de/file/pdf/1789/10000-Haeuser-Programm_-_Merkblatt_T5.pdf) beschrieben sind.

⁸⁴ Zur Erlangung des spezifizierten Technikbonus für Luftwärmepumpen im Rahmen des “10.000-Häuser-Programms” besteht die Notwendigkeit der Vorsehung einer mind. 5 kWp großen, auf den Winterbetrieb optimierten PV Anlage sowie eines Bauteilspeichers und eines spezifischen Heizwärmebedarfs des Hauses von $\leq 15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Luft-Wärmepumpen werden im 10.000-Häuser-Programm mit bis zu 2.000 Euro gefördert. Um die Vergleichbarkeit zu den übrigen Heizsystemen zu gewährleisten, wurden für die Luftwärmepumpenvariante keine der zusätzliche notwendigen Spezifikationen angenommen, so dass hierfür kein Förderanspruch besteht.

Tabelle 3-9: Investitionszuschüsse Heizsysteme nach Fördermittelgeber, (teil-)sanierter Altbau

Heizsystem Abkürzung ⁸⁵	“10.000- Häuser- Programm” Technik- bonus ⁸⁶ [Euro]	“10.000- Häuser- Programm” Heizungs- tausch ^{87 88} [Euro]	BAFA ⁸⁹ [Euro]	(teil-) sanierter Altbau Gesamt [Euro]
NT_Heizöl	0	0	0	0
NT_Erdgas	0	0	0	0
BW_Heizöl_oST	0	1.000	0	1.000
BW_Erdgas_oST	0	1.000	0	1.000
BW_Heizöl_mST	0	1.500	500	2.000
BW_Erdgas_mST	0	1.500	500	2.000
BIO_Pellet_mST ⁹⁰	1.500	0	4.000	5.500
BIO_Scheitholz	0	1.000	2.000	3.000
mBHKW_Erdgas_Schwarm	3.000	0	2.800	5.800
mBHKW_Erdgas	3.000	0	2.800	5.800
WP_Sonde	2.000	0	4.500	6.500
WP_Grundwasser	2.000	0	4.000	6.000
WP_Luft	0	0	1.500	1.500
WP_Kollektor	2.000	0	4.000	6.000
WP_Eisspeicher	0	0	0	0
WP_Hybrid_Erdgas	2.500	0	1.300	3.800
WP_Erdgas	2.500	0	4.500	7.000
STR_Hochtemperaturelektro speicher	0	0	0	0
WN_städtisch/ländlich	0	0	0	0

Tabelle 3-10 zeigt die Investitionszuschüsse der Heizsysteme nach Fördermittelgeber für den Altbau.

⁸⁵ BW = Brennwertkessel, NT = Niedertemperaturkessel, oST/mST = ohne/mit solarer Trinkwarmwassererwärmung mittels Solarthermiekollektoren, mBHKW = Mikro-Blockheizkraftwerk, WP = Wärmepumpe, STR = Strom, WN = Wärmenetz

⁸⁶ Der Technikbonus des “10.000-Häuser-Programm”s fördert Wärmepumpensysteme, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), netzdienliche Photovoltaik, Solarwärmespeicherung und Holzheizungen. Beim Neubau muss mindestens ein KfW-Effizienzhaus 55 und bei der Modernisierung von bestehenden Wohngebäuden ein KfW-Effizienzhaus 115 erreicht werden.

⁸⁷ Der Heizungstausch des “10.000-Häuser-Programm”s fördert den Austausch bestehender Heizanlagen durch Öl- und Gaskessel mit Brennwertechnik, Biomasseheizungen und KWK-Anlagen. Grundsätzlich gilt, dass die beiden Förderkategorien “TechnikBonus” und “Heizungstausch” nicht miteinander kombinierbar sind.

⁸⁸ Die Förderungen für Heizungstausch und Technikbonus sind nicht kombinierbar. Obwohl bei vielen Varianten grundsätzlich auch eine Förderung für den Heizungstausch möglich wäre, wurde soweit dies möglich ist die Technikbonusförderung berücksichtigt, da diese höher ist.

⁸⁹ BAFA fördert Wärmepumpensysteme (nur im Bestand), Solarthermiesysteme, Biomassekessel und Mikro BHKW-Anlagen.

⁹⁰ Zur Erlangung des spezifizierten Technikbonus im Rahmen des “10.000-Häuser-Programms” ist entweder ein Kessel mit Brennwertechnologie oder ein Partikelfilter vorzusehen. Darüber hinaus gibt es weitere Nebenanforderungen, die im Merkblatt T5 des Programms (https://www.energieatlas.bayern.de/file/pdf/1789/10000-Haeuser-Programm_-_Merkblatt_T5.pdf) beschrieben sind.

Tabelle 3-10: Investitionszuschüsse Heizsysteme nach Fördermittelgeber, Altbau

Heizsystem Abkürzung ⁹¹	“10.000-Häuser- Programm” Heizungs- tausch ⁹² [Euro]	BAFA ⁹³ [Euro]	Altbau Gesamt [Euro]
NT_Heizöl	0	0	0
NT_Erdgas	0	0	0
BW_Heizöl_oST	1.000	0	1.000
BW_Erdgas_oST	1.000	0	1.000
BW_Heizöl_mST	2.000	500	2.500
BW_Erdgas_mS T	2.000	500	2.500
BIO_Pellet_mST	2.000	4.000	6.000
BIO_Scheitholz	1.000	2.000	3.000
mBHKW_Erdgas _Schwarm	1.000	3.000	4.000
mBHKW_Erdgas	1.000	3.000	4.000
WP_Sonde	1.000	4.500	5.500
WP_Grundwasse r	1.000	4.000	5.000
WP_Luft	0	1.500	1.500
WP_Kollektor	1.000	4.000	5.000
WP_Eisspeicher	0	0	0
WP_Hybrid_Erdg as	1.000	1.300	2.300
WP_Erdgas	1.000	4.500	5.500
STR_Hochtempe raturelektrospeic her	0	0	0
WN_städtisch/län dlich	0	0	0

Tabelle 3-11 zeigt die Investitionszuschüsse der Speichersysteme nach Fördermittelgeber für den Neubau.

⁹¹ BW = Brennwertkessel, NT = Niedertemperaturkessel, oST/mST = ohne/mit solarer Trinkwarmwassererwärmung mittels Solarthermiekollektoren, mBHKW = Mikro-Blockheizkraftwerk, WP = Wärmepumpe, STR = Strom, WN = Wärmenetz

⁹² Der Heizungstausch des “10.000-Häuser-Programm”s fördert den Austausch bestehender Heizanlagen durch Öl- und Gaskessel mit Brennwertechnik, Biomasseheizungen und KWK-Anlagen.

⁹³ BAFA fördert Wärmepumpensysteme (nur im Bestand), Solarthermiesysteme, Biomassekessel und Mikro BHKW-KWK-Anlagen.

Tabelle 3-11: Investitionszuschüsse Speichersysteme nach Fördermittelgeber (gerundete Werte), Neubau

Speichersystem Abkürzung	„10.000-Häuser- Programm“ Technikbonus ⁹⁴ [Euro]	KfW ⁹⁵ [Euro]	Neubau Gesamt [Euro]
oBatterie_oPuffer_Ref	0	0	0
oBatterie_mPuffer	2.000	1.700	3.700
Li-Ion_oPuffer	1.900	5.400	7.300
Pb-Säure_oPuffer	1.900	3.500	5.400
Pb-Gel_oPuffer	1.900	5.600	7.500

Die KfW-Förderung setzt sich zusammen aus einem Tilgungszuschuss und einem zinsvergünstigtem Kredit⁹⁶. Der Tilgungszuschuss ist degressiv und sinkt von 25 % ab 1.3.2016 auf 10 % ab 1.7.2018. Im Rahmen des Projektes wurde ein Tilgungszuschuss von 19 %, der für den Zeitraum 1.1.2017 bis 30.6.2017 gilt, berücksichtigt. Die KfW-Förderung kann in Kombination mit dem „10.000-Häuser-Programm“ bis zu einer Höhe des maximalen doppelten des Tilgungszuschusses – hier also 38 % – berücksichtigt werden.

Die berücksichtigten Einspeisevergütungen belaufen sich für den Photovoltaikstrom gem. [EEG 2017]⁹⁷ auf 12 ct/kWh und für den Strom aus Kraft-Wärme-Kopplung⁹⁸ auf 3,3 ct/kWh.

3.3. Ergebnisse der ökonomischen Analyse

Die folgenden Teilabschnitte dokumentieren die Ergebnisse der Kapitalwertberechnungen auf Basis der in Kapitel 3.1 beschriebenen Methodik und der Grundlagen aus Kapitel 3.2.

Es werden die folgenden beiden, bereits in Kapitel 2.3.1 beschriebenen, Szenarien untersucht:

- Szenario 1 (=> *Ungünstig für Wärmepumpen und investitionskostenintensive Technologien*):
 - moderate Energiepreissteigerung
 - gängige Wärmepumpeneffizienz
 - kürzere Lebensdauern
- Szenario 2 (=> *Günstig für Wärmepumpen und investitionskostenintensive Technologien*):
 - starke Energiepreissteigerung
 - optimierte Wärmepumpeneffizienz
 - längere Lebensdauern

⁹⁴ Der Technikbonus des „10.000-Häuser-Programm“s fördert Wärmepumpensysteme, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Netzdienliche Photovoltaik, Solarwärmespeicherung und Holzheizungen. Beim Neubau muss mindestens ein KfW-Effizienzhaus 55 und bei der Modernisierung von bestehenden Wohngebäuden ein KfW-Effizienzhaus 115 erreicht werden.

⁹⁵ Die KfW fördert die Kombination von PV-Anlagen und Batteriespeicher. Ein wesentliches Kriterium dabei ist, dass, analog zur entsprechenden Förderung im Rahmen des „10.000-Häuser-Programm“s, die maximale Netzeinspeisung auf max. 50% der installierten Leistung der PV-Anlage zu beschränken ist.

⁹⁶ Der Vorteil der Zinsvergünstigung wird nicht gesondert betrachtet, da zum einen ein gewisser Aufwand für die Antragstellung berücksichtigt werden sollte und zum anderen durch den degressiven Tilgungszuschuss die Förderung nicht fix ist und sich ab dem 1.1.2017 sogar ungünstiger als berücksichtigt darstellt.

⁹⁷ https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf, §51 (2); Absenkung gem. § 31, konservativ schon etwas niedriger angesetzt (s. Absenkung in §31)

⁹⁸ Außerdem berücksichtigt: Eingesparte Stromkosten, Energiesteuer-Erstattung, KWK-Bonus, Erstattung Netznutzungsentgelt

Bei den Ergebnissen werden die unterschiedlichen Anteile der folgenden wesentlichen Einflussfaktoren auf den Kapitalwert dargestellt:

- Verbrauchsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene Kosten (bei Systemen mit PV Anlagen unter Berücksichtigung (Abzug) des Eigenverbrauchsanteils und der PV-Einspeisevergütung)
- Kapitalgebundene Kosten (inklusive evtl. notwendiger Ersatzinvestitionen innerhalb des Betrachtungszeitraumes)

Die für die Wirtschaftlichkeitsbewertung relevanten Kosten (der sog. Kapitalwert) ergeben sich aus der Addition von verbrauchsgebundenen, betriebsgebundenen und kapitalgebundenen Kosten abzüglich der Restwerte (derjenigen Anlagenteile, deren Lebensdauer länger ist als der Betrachtungszeitraum, wie z. B. Erdsonden) und der Förderungen. Die für den Kapitalwert relevanten Kostenblöcke sind in den folgenden Grafiken durch kräftige Farben hervorgehoben.

Bei den Betrachtungen zu den Speichersystemen sind außerdem die Einflüsse des Photovoltaik-Eigenverbrauchs (Stromkosteneinsparung) und der Photovoltaik-Einspeisevergütung, die eine Reduktion der Betriebskosten bewirken, in den Grafiken durch negative Kostenblöcke dargestellt.

In den Tabellen unter den Grafiken sind die jeweils berücksichtigten Kostenblöcke aufgeführt. Dadurch soll es einem willigen Investor ermöglicht werden, die entsprechenden Kostenblöcke gemäß seiner individuellen Rahmenbedingungen anzupassen, um das für ihn am besten geeignete System zu finden.

Im Folgenden dargestellt werden die Ergebnisse für:

1. Unterschiedliche Heizsysteme beim Einsatz in den drei Gebäudetypen (Neubau, (teil-)sanierter Altbau und Altbau) unter Berücksichtigung eines mittleren Warmwasserbedarfs.
2. Unterschiedliche Speichersysteme unter Berücksichtigung eines über eine Luftwärmepumpe versorgten effizienten Neubaus mit einer 5 kWp PV-Anlage auf dem Dach.
3. Der Einfluss des Warmwasserbedarfs auf die diesbezüglichen Energiekosten bei unterschiedlichen Heizungssystemen am Beispiel des (teil-)saniereten Altbaus.

Anmerkung: Die Ergebnisse für den Hochtemperaturelektrospeicher basieren auf Forschungsergebnissen und theoretischen Annahmen und sind lediglich als mittel- bis langfristiges perspektivisches Potential zu sehen. Ein derartiges System inkl. entsprechenden Tarifs ist aktuell und in absehbarer Zeit nicht am Markt verfügbar.

3.3.1. Szenario 1: moderate Energiepreissteigerung / gängige Wärmepumpeneffizienz / kürzere Lebensdauern

Heizsysteme

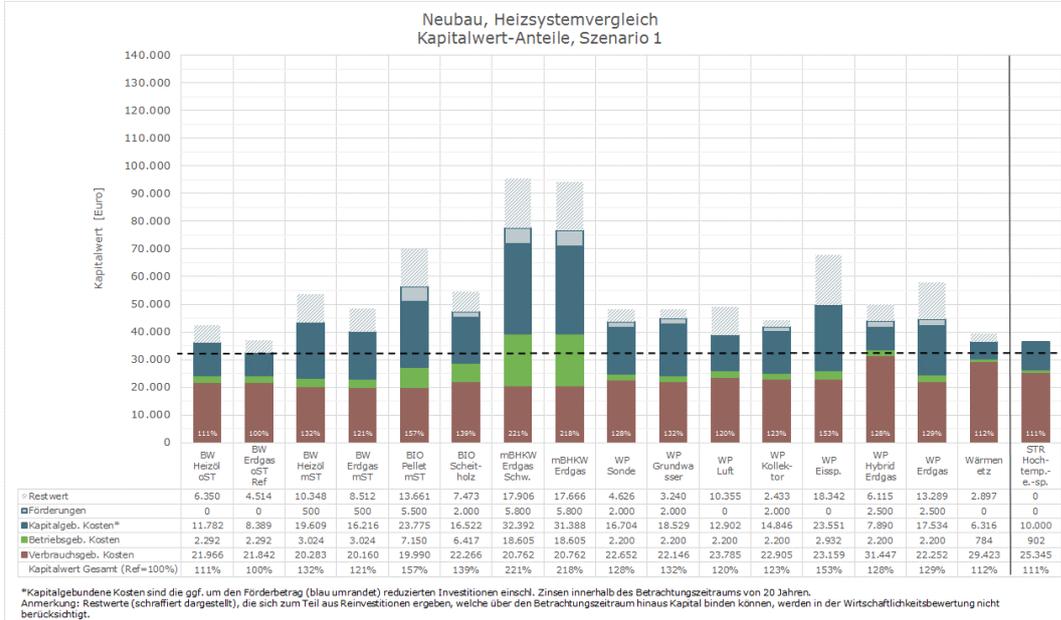


Abbildung 3-2: Neubau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 1

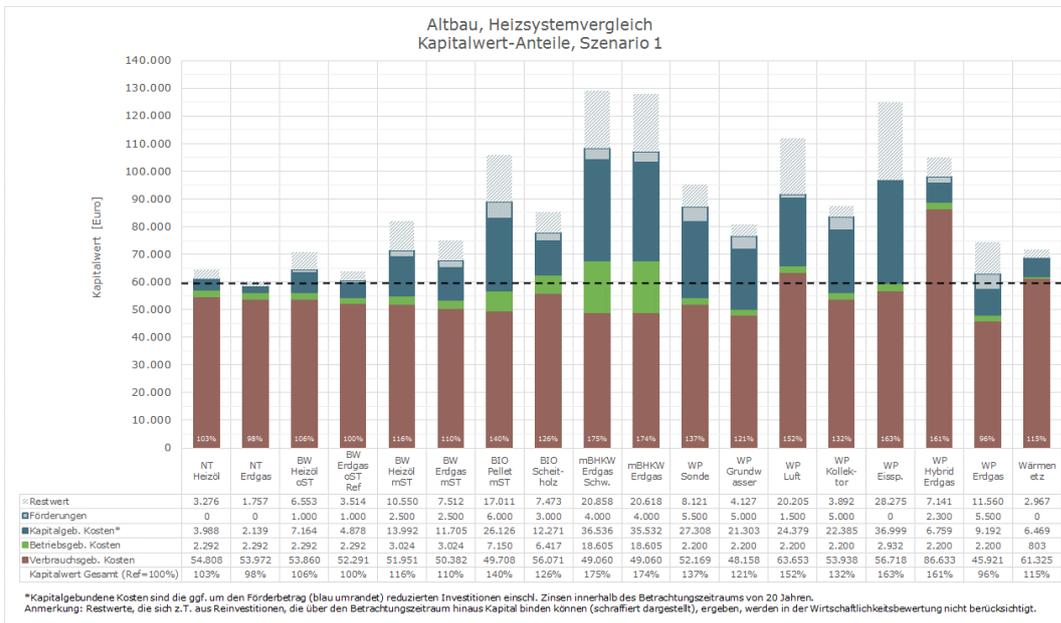


Abbildung 3-3: Altbau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 1

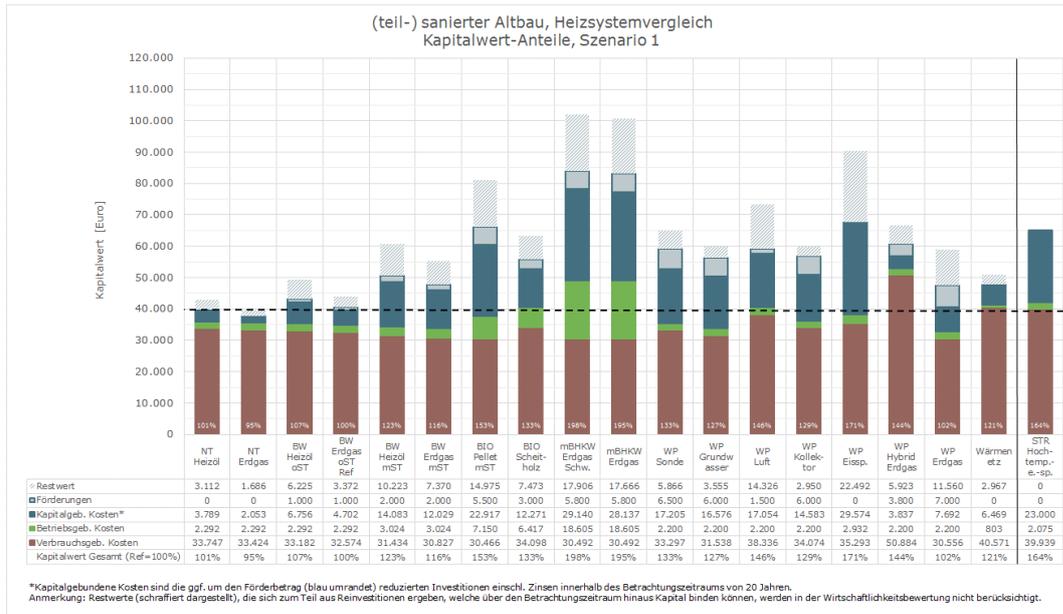


Abbildung 3-4: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 1

Speichersysteme

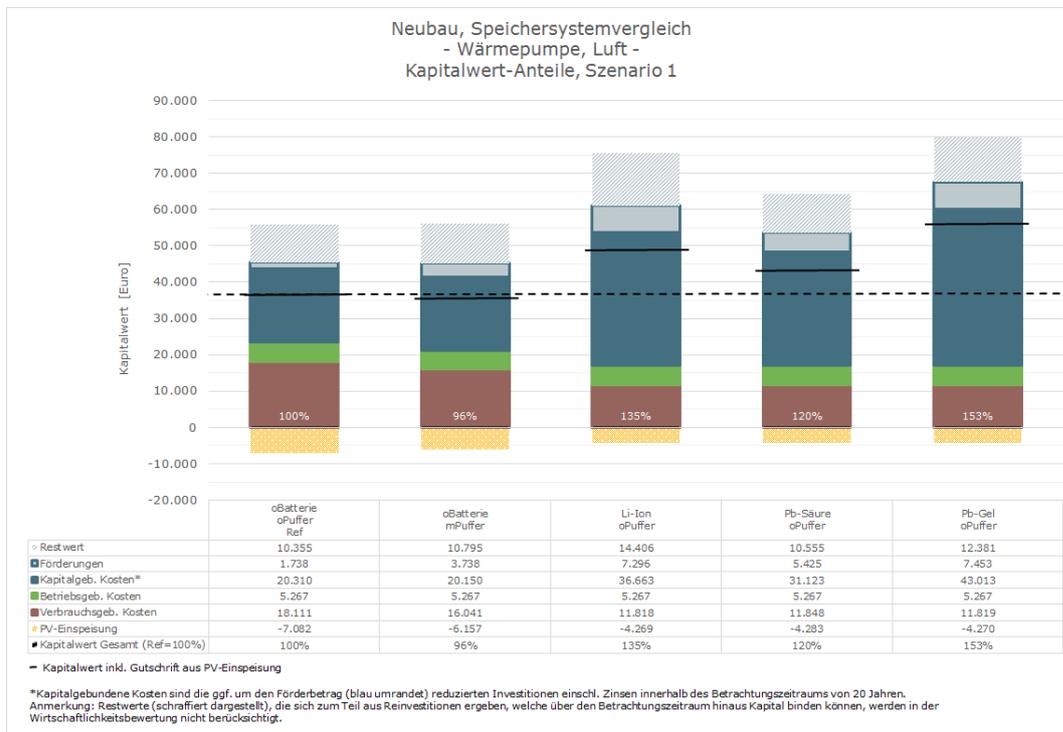


Abbildung 3-5: Neubau, Speichersystemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 1

Sensitivität Warmwasserbedarf

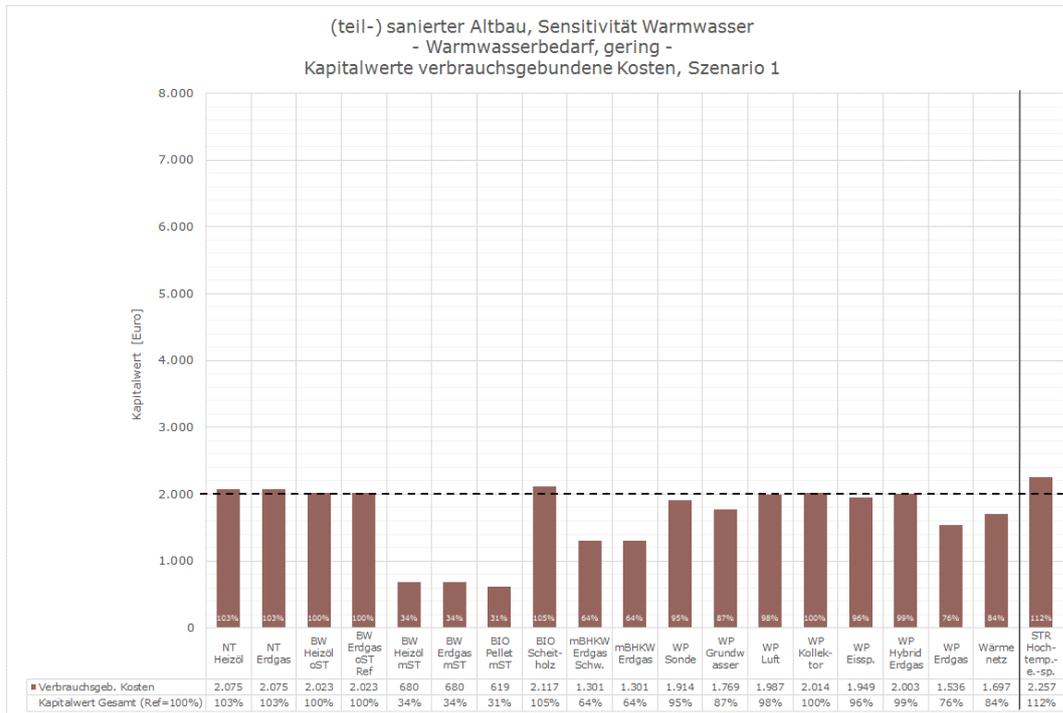


Abbildung 3-6: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei geringem Warmwasserbedarf, Szenario 1

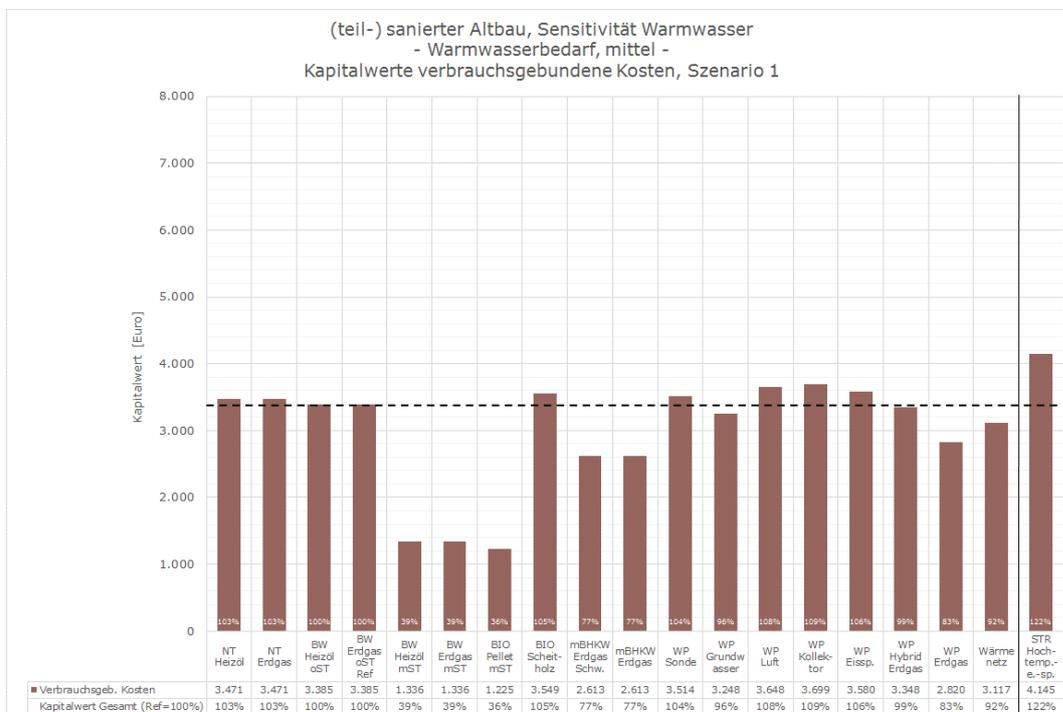


Abbildung 3-7: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei mittlerem Warmwasserbedarf, Szenario 1

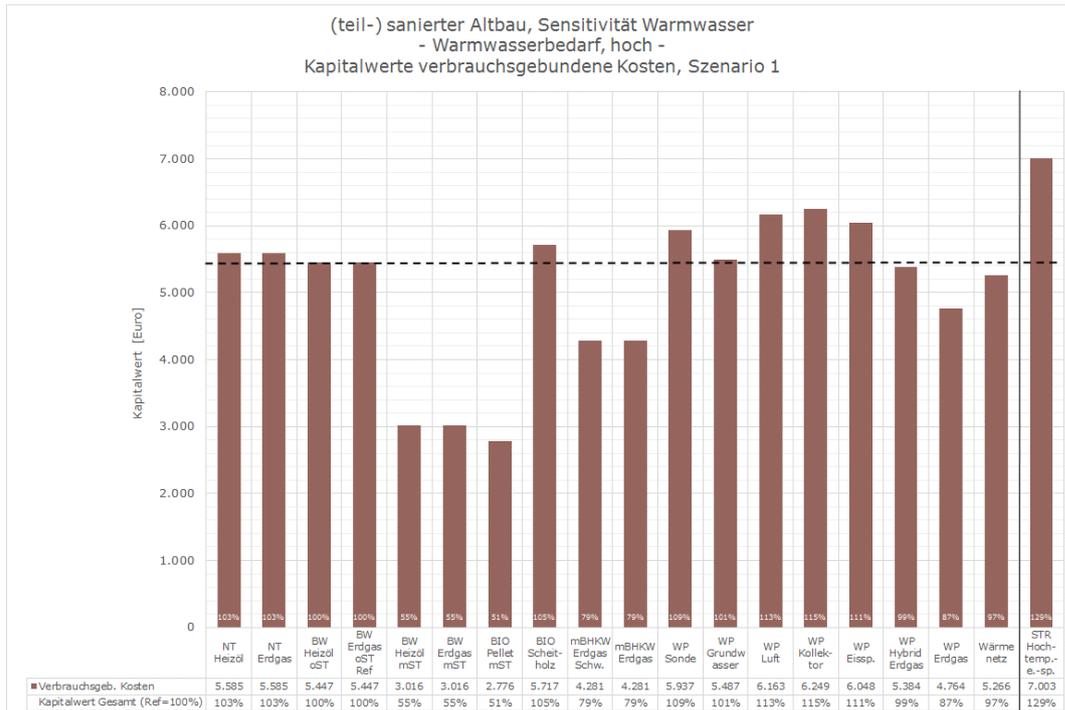


Abbildung 3-8: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei hohem Warmwasserbedarf, Szenario 1

3.3.2. Szenario 2: starke Energiepreissteigerung / optimierte Wärmepumpeneffizienz / längere Lebensdauern

Heizsysteme

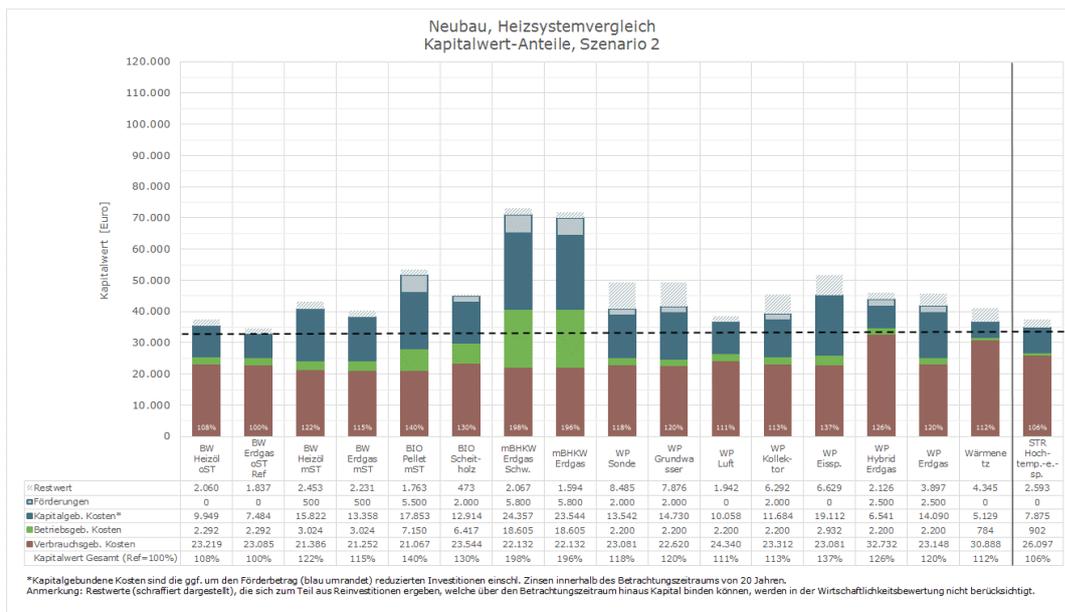


Abbildung 3-9: Neubau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 2

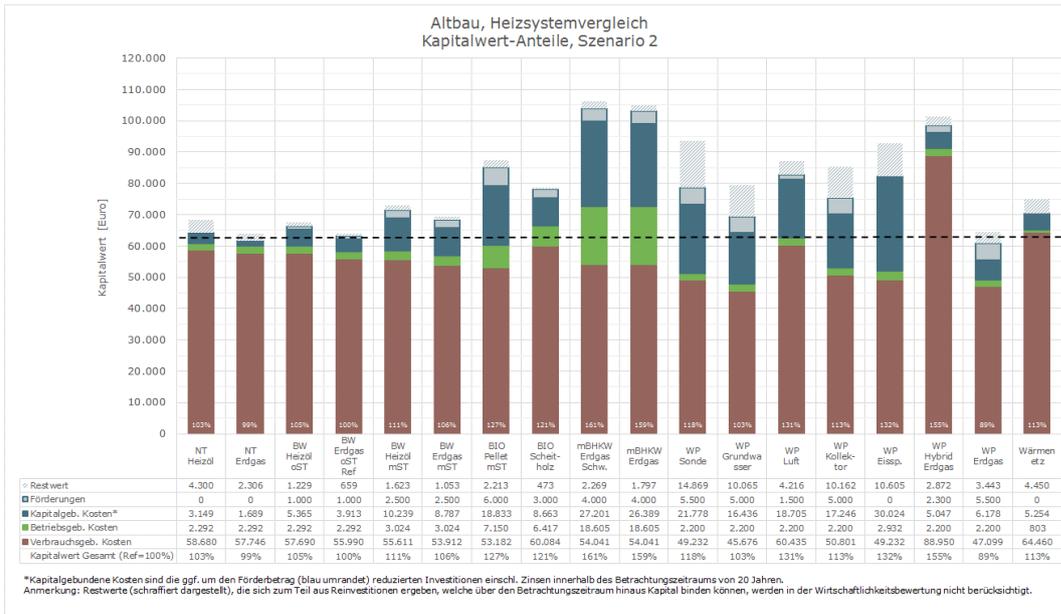


Abbildung 3-10: Altbau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 2

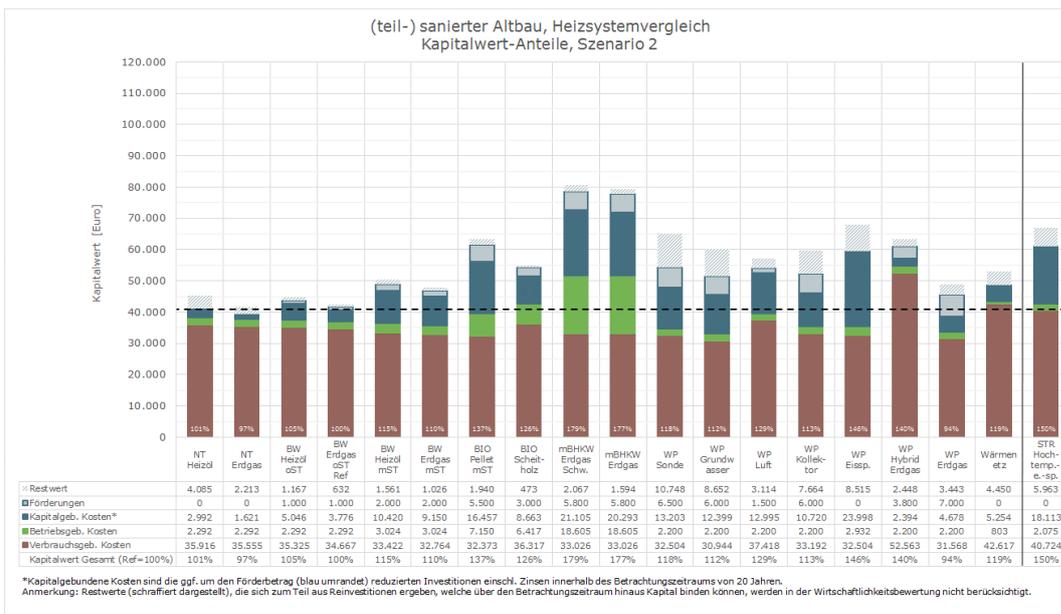


Abbildung 3-11: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 2

Speichersysteme

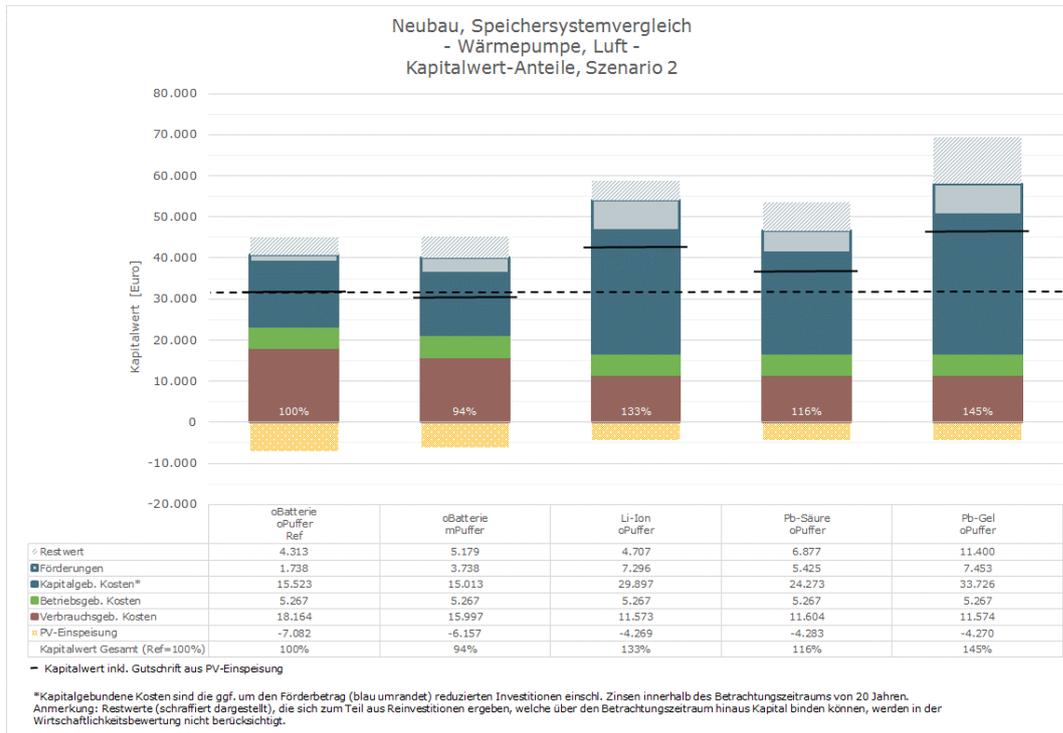


Abbildung 3-12: Neubau, Speichersystemvergleich Kapitalwert-Anteile, Szenario 2

Sensitivität Warmwasser

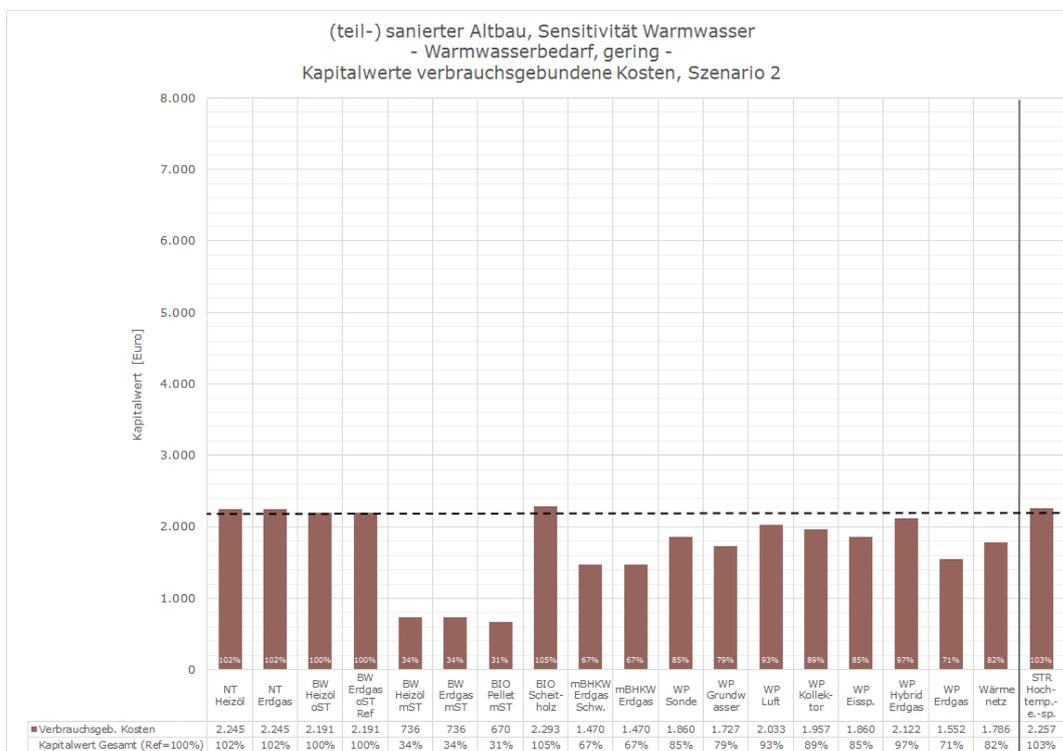


Abbildung 3-13: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei geringem Warmwasserbedarf , Szenario 2

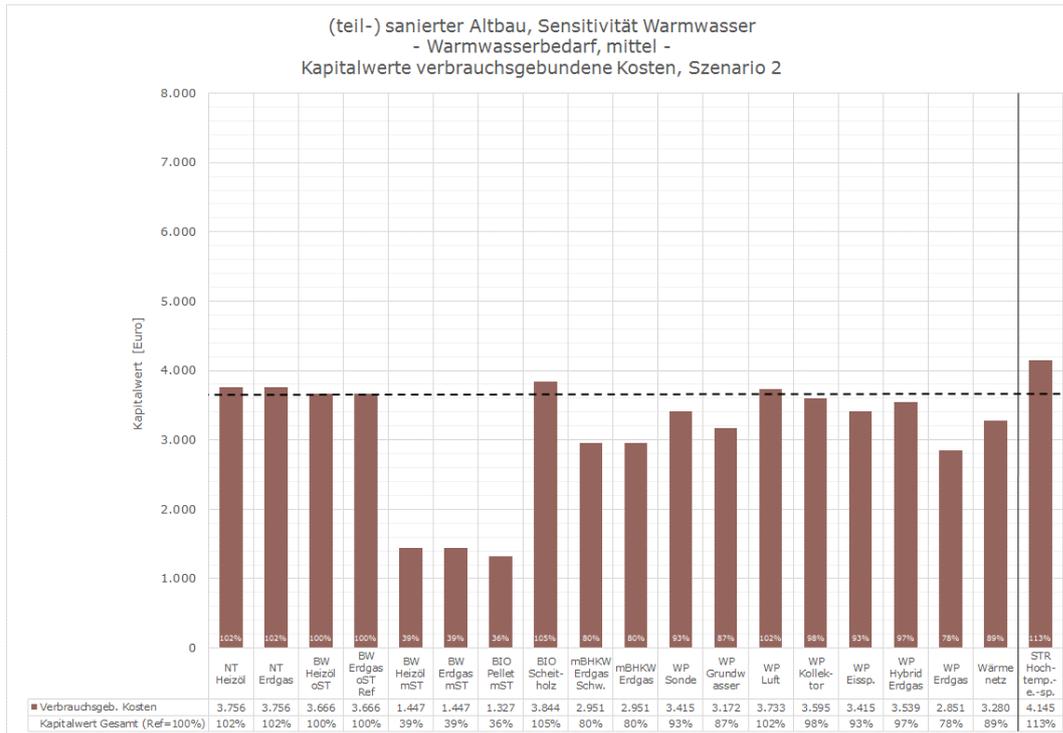


Abbildung 3-14: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei mittlerem Warmwasserbedarf , Szenario 2

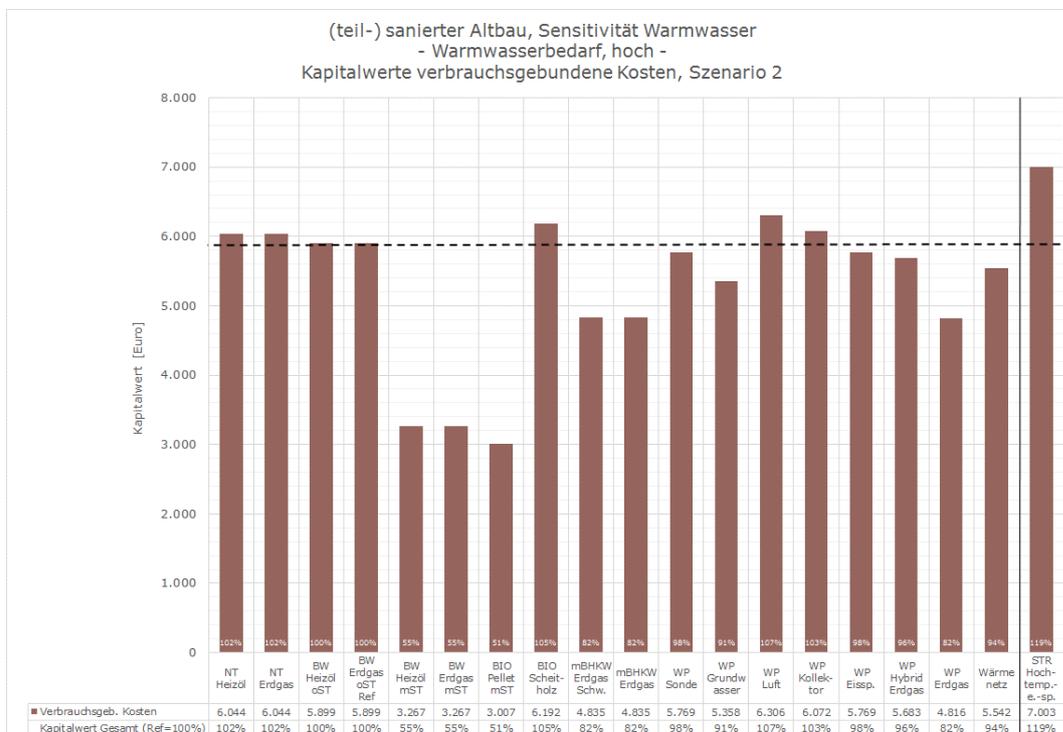


Abbildung 3-15: Systemvergleich, Anteile verbrauchsgebundener Kosten bei hohem Warmwasserbedarf , Szenario 2

3.3.3. Diskussion und Szenarienvergleich

Anhand der Ergebnisse werden die Unterschiede der einzelnen Systeme für unterschiedliche Gebäudequalitäten deutlich. Durch die Wahl der zwei Szenarien und die Sensitivitätsuntersuchung für den Warmwasserbedarf wurde versucht beispielhaft die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich der Rahmenbedingungen aufzuzeigen. Der Wirtschaftlichkeitsvergleich der Systeme wird durch den Vergleich der dargestellten Kapitalwerte möglich: Je geringer der Kapitalwert ist, desto günstiger ist die Wirtschaftlichkeit. Obwohl darauf geachtet wurde die Rahmenbedingungen so repräsentativ wie möglich zu wählen, ist davon auszugehen, dass es in der Praxis - abhängig von den individuellen Rahmenbedingungen (insbesondere den Energiepreisen und den Investitionskosten) - zu Abweichungen kommen wird, die einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis (d.h. den Kapitalwert und damit die Wirtschaftlichkeit) haben und bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden müssen.

Während beim Altbau die verbrauchsgebundenen Kosten bei fast allen Systemen den mit Abstand größten Kostenblock darstellen, gewinnen die kapitalgebundenen Kosten beim sanierten Altbau an Bedeutung. Beim Neubau liegen die kapitalgebundenen Kosten schließlich bei vielen Systemen in Szenario 1 in der gleichen Größenordnung wie die verbrauchsgebundenen Kosten⁹⁹ oder sogar teilweise darüber. Im Vergleich zu Szenario 1 sinken die kapitalgebundenen Kosten durch die längeren Lebensdauern in Szenario 2. Dies wirkt sich insbesondere positiv bei Wärmeerzeugersystemen aus, die hohe Investitionskosten bedingen, wie z. B. Blockheizkraftwerke oder Sole-Wärmepumpen. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit bei Wärmepumpensystemen ist die erreichte Systemeffizienz. Dies wird sehr gut aus den Ergebnissen ersichtlich. Während z. B. beim Altbau die Grundwasserwärmepumpe in Szenario 2 in etwa den gleichen Kapitalwert wie das Referenzsystem (Erdgasbrennwertkessel ohne Solarthermie) aufweist, liegt dieser in Szenario 1 um über 20 % über dem des Kapitalwerts des Referenzsystems. Im Neubau in Szenario 1 ist unter den berücksichtigten Rahmenbedingungen der Erdgasbrennwertkessel ohne Solarthermie das wirtschaftlichste System, gefolgt von dem Heizölbrennwertkessel ohne Solarthermie und der Fernwärmeversorgung. Bei Szenario 2 verringert sich der Abstand zu den Wärmepumpen und dem Pelletkessel deutlich, der Erdgasbrennwertkessel ohne Solarthermie bleibt jedoch das wirtschaftlichste System.

Bei den Altbauten zeigt sich ein verändertes Bild: Hier ist in vielen Fällen die Erdgas-Wärmepumpe die wirtschaftlichste Lösung mit dem geringsten Kapitalwert. Die Ergebnisse für dieses System basieren jedoch aufgrund der geringen Marktverfügbarkeit auf vergleichsweise weniger fundierten Werten, die somit allenfalls eine Indikation darstellen, jedoch keine Verallgemeinerbarkeit zulassen. Der vorzeitige Austausch eines bestehenden Niedertemperatur-Erdgas- oder -Heizölkessels, wenn dieser, wie bei den Berechnungen zu Grunde gelegt, über einen ausreichend guten Jahresnutzungsgrad verfügt, ist, wie den Ergebnissen zu entnehmen ist, nicht zwangsläufig wirtschaftlich. Bei einem niedrigeren Jahresnutzungsgrad des Altkessels als bei den vorliegenden Berechnungen angenommen, empfiehlt sich jedoch ein vorzeitiger Austausch selbst wenn der Altkessel grundsätzlich noch funktionstüchtig wäre.

Beim Altbau weist in Szenario 2 die Grundwasserwärmepumpe eine hohe Wirtschaftlichkeit auf. In Szenario 1 sind die elektrischen Wärmepumpensysteme - aufgrund der eingeschränkten Effizienz - weniger wirtschaftlich als die konventionellen Wärmeerzeuger (Erdgas- und Heizölkessel). Die Biomassekessel weisen Kapitalwerte auf, die im Bereich von 27 % bis 57 % über den Kapitalwerten des jeweiligen Referenzsystems liegen. Der beste Wert wird im Altbau (hoher Energieverbrauch) in Szenario 2 (hohe Energiekostensteigerung) erreicht. Die Eisspeicher- und die Hybridwärmepumpen weisen relativ hohe Kapitalwerte auf. Ähnlich wie bei den Erdgas-Wärmepumpen basieren die

⁹⁹ Obwohl die verbrauchsgebundenen Kosten die Kosten für Allgemiestrom beinhalten.

Ergebnisse für diese Systeme jedoch auf vergleichsweise wenig fundierten Werten, die allenfalls eine Indikation darstellen, jedoch keine Verallgemeinbarkeit zulassen. Die untersuchten BHKWs sind unter keinen Umständen wirtschaftlich. Dies ist auf die marktbedingt notwendige erhebliche Überdimensionierung bei Einfamilienhäusern und die damit verbundenen hohen Investitionskosten zurückzuführen. Die ebenfalls dargestellte fiktive Möglichkeit eines windstrombedarfsgesteuerten *Hochtemperaturelektrospeichers* führt - unter Berücksichtigung der angenommen stark vergünstigten Stromtarife - im Neubau (bei sehr geringem Heizwärmebedarf) zu vergleichsweise attraktiven Kapitalwerten.

Der Warmwasserbedarf hat einen erheblichen Einfluss auf die Energiekosten und sollte bei der Systemauswahl beachtet werden. Bei einem hohen Warmwasserbedarf können im Untersuchungszeitraum von 20 Jahren diesbezügliche verbrauchsgebundene Kapitalkosten von über 6.000 Euro entstehen. Das sind teilweise mehr als 15 % der gesamten Kapitalkosten bei den Heizungssystemen im Neubau. Bei sinkender Energieeffizienz des Gebäudes sinkt auch der relative Einfluss des Warmwasserbedarfs. Bei hohem Warmwasserbedarf sind Systeme mit geringen verbrauchsbedingten Kosten (z. B. Systeme mit Solarthermie-Anlagen) günstiger. Bei hohem Warmwasserbedarf können durch eine Solarthermie-Anlage im Untersuchungszeitraum von 20 Jahren Betriebskosten von ca. 2.500 € eingespart werden, was allerdings unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht ausreicht, um die Wirtschaftlichkeitsschwelle zu überschreiten. Bei geringem Warmwasserbedarf liegen die Schwankungsbreiten der verbrauchsgebundenen Kosten der unterschiedlichen Systeme selbst ohne Solarthermie nur im Bereich 2.000 € und sind daher von untergeordneter Bedeutung bei der Systemauswahl.

Der Vergleich der Speichersysteme mit Photovoltaikanlage (am Beispiel des Neubaus mit Luftwärmepumpe) zeigt, dass die hinsichtlich einer maximierten Netzdienlichkeit 12 kWh großen Batteriespeichersysteme - unter den berücksichtigten Randbedingungen - trotz Förderung noch höhere Kapitalkosten aufweisen als die Anlagen ohne Batteriespeicher. Unter diesen Rahmenbedingungen ist das System mit Blei-Säure-Batterie das wirtschaftlich günstigste der betrachteten Batteriespeichersysteme.

Das wirtschaftlichste Speichersystem ist, unabhängig vom Szenario, die Implementierung eines geförderten zusätzlichen Wärme-Pufferspeichers. Dieser ermöglicht es, durch ein geeignetes Speichermanagement den Speicher während der wärmsten Tagesstunden (zwischen 12 und 16 Uhr) mit hoher Effizienz aufzuladen und dadurch die verbrauchsgebundenen Kosten zu reduzieren. In Kombination mit der 5 kWp Photovoltaik-Anlage ist dieses System in Szenario 2 das wirtschaftlichste aller untersuchten Systeme für den Neubau.

Zu beachten ist, dass sich die oben genannten Aussagen auf die zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie vorliegenden Studien zum durchschnittlichen Preisniveau für Batteriespeichersysteme beziehen (Stand 2015). Inzwischen (Stand Januar 2017) sind die Preise für Batteriespeichersysteme stark gefallen. In Einzelfällen können die Investitionskosten für Batteriespeichersysteme (z.B. für Li-Ionen Batterien) weniger als die Hälfte der dargestellten Investitionskosten betragen. Damit würden die Batteriespeichersysteme die Grenze zur Wirtschaftlichkeit erreichen. Das kann überschlägig aus den entsprechenden Abbildungen entnommen werden, indem dort von den kapitalgebundenen Kosten die Investitionskostendifferenz abgezogen wird (z.B. ca. -10.000 € im Falle einer Halbierung der Kosten für Li-Ionen Batterien).

An diesem Beispiel wird außerdem deutlich, wie die Ergebnisse zur Systemauswahl interpretiert werden müssen:

Eine Entscheidung für oder gegen ein neues Heiz- oder Speichersystem sollte immer aufgrund des Vergleichs vorliegender Angebote und der individuellen Rahmenbedingungen - insbesondere der Energiepreise - erfolgen. Bei den Energiepreisen sind nicht nur die Arbeitspreise (Umrechnungsfaktoren: Heizöl: 10 kWh/l, Erdgas: Unterer Heizwert in kWh (für Vergleichbarkeit) = 1,11 * oberen Heizwert in kWh (Brennwert)¹⁰⁰, Pellets 5 kWh/kg), sondern auch die Grundkosten, d.h. die Anlieferung bei Pellets und Heizöl bzw. der Grundpreis bei Erdgas, zu berücksichtigen. Die Vergleichbarkeit zu den in den Grundlagen genannten individuellen tatsächlichen Energiepreisen erhält man, indem man die Grundkosten und die verbrauchsbedingten Kosten addiert und durch den (erwarteten) Verbrauch teilt¹⁰¹. Neben der absoluten Höhe ist insbesondere auch das Verhältnis der Energieträgerkosten untereinander (z.B. Erdgas ⇔ Wärmepumpenstrom) von entscheidender Bedeutung.

¹⁰⁰ Achtung: Erdgasabrechnungen weisen den Verbrauch/Arbeitspreis in kWh in der Regel bezogen auf den oberen Heizwert (Brennwert) aus. Bei den in dieser Studie genannten Energieträgerpreisen handelt es sich aus Vergleichbarkeitsgünden um die Preise für den unteren Heizwert. Bezogen auf den unteren Heizwert liegt der Umrechnungsfaktor bezogen auf den m³ i.d.R. im Bereich von 10 kWh/m³, ist jedoch lokal etwas unterschiedlich.

¹⁰¹ Ein Praxisbeispiel zur Berücksichtigung abweichender Energiekosten ist dem Anhang C zu entnehmen.

4. Ökologische Analyse

Im Rahmen der ökologischen Analyse werden die Umweltwirkungen der Heiz- und Speichersysteme in privaten Haushalten bestimmt. Hierfür werden Ökobilanzen (engl. Life Cycle Assessment, LCA) der verschiedenen Heiz- und Speichersysteme durchgeführt.

Die folgenden Abschnitte erläutern die Methodik der ökologischen Analyse (Kapitel 4.1), die relevanten Grundlagen (Kapitel 4.2) und abschließend die Ergebnisse der beiden untersuchten Szenarien (Kapitel 4.3).

4.1. Methodik der ökologischen Analyse

Die ökologische Analyse der verschiedenen Heiz- und Speichersysteme wird mit Hilfe der Methodik der Ökobilanz durchgeführt.

Eine Ökobilanz umfasst die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges.“ [ISO 2006b]. In diesem Kontext werden als Inputflüsse Ressourcen und als Outputflüsse Emissionen, die bei der Herstellung, dem Betrieb oder der Verwertung/Entsorgung entstehen, verstanden. Potenzielle Umweltwirkungen umfassen z. B. den Treibhauseffekt, die Versauerung, die Eutrophierung (Überdüngung) und weitere Umweltkategorien.

Grundgedanke jeder Ökobilanz ist der Lebenszyklusansatz, d. h. das Einbeziehen der Herstellung, des Betriebs und der Verwertung/Entsorgung der zu untersuchenden Produkte bzw. Produktsysteme in die Analyse. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass beispielsweise die Auswahl eines geeigneten Heiz- und Speichersystems immer aus gesamtökologischer Sicht erfolgt.

Die Durchführung der Ökobilanz erfolgt in Anlehnung an die DIN-Normen ISO 14040 und ISO 14044 [ISO 2006a, ISO 2006b]¹⁰². Die Phasen einer Ökobilanz sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

¹⁰² In Absprache mit dem Auftraggeber der Studie wurde auf eine Kritische Prüfung durch einen Sachverständigen gemäß ISO 14044, Kapitel 6 [ISO 2006b] verzichtet. Die Ökobilanz-Studie kann daher keine Konformität mit den Anforderungen der ISO 14044 in Anspruch nehmen.

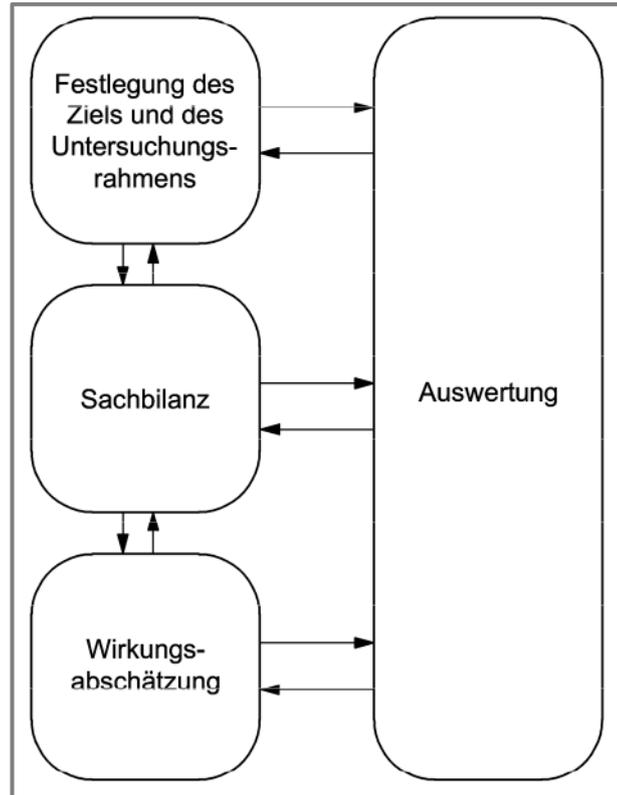


Abbildung 4-1: Phasen einer Ökobilanz [ISO 2006a, ISO 2006b]

4.1.1. Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen ist in Kapitel 2 für ökonomische und ökologische Analyse zusammen betrachtet.

4.1.2. Sachbilanz

Aufbauend auf der Festlegung des Untersuchungsrahmens der Studie (siehe Kapitel 2) werden in der Sachbilanz (engl.: Life Cycle Inventory, LCI) alle relevanten Stoffströme (Energie- und Materialinputflüsse, Produkte, Nebenprodukte, Abfall, Emissionen in Luft, Wasser und Boden) der betrachteten Komponenten der Heiz- und Speichersysteme über den gesamten Lebenszyklus (Herstellung, Nutzung und Verwertung/Entsorgung) berücksichtigt.

Neben der geeigneten Definition des Untersuchungsrahmens ist die Datenqualität entscheidend für die Aussagekraft der berechneten Ergebnisse. Daher sind die Daten der Sachbilanz unter den gegebenen Zeit- und Budgetbeschränkungen so präzise, vollständig, konsistent, reproduzierbar und repräsentativ wie möglich in Bezug auf das Ziel und den Untersuchungsrahmen der Studie zu ermitteln. Eine detailliertere Erläuterung der Datenbasis erfolgt in Kapitel 4.2.

Basierend auf den Daten werden mit Hilfe der GaBi Software [thinkstep 2016a] LCA Modelle der Heiz- und Speichersysteme erstellt. Die Modelle umfassen dabei sowohl die Herstellung, den Betrieb und die Verwertung/Entsorgung der Heiz- und Speichersysteme über den betrachteten Zeitraum.

4.1.3. Abschneidekriterien

Für diese Studie sind keine Abschneidekriterien definiert. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, wird die Systemgrenze in Hinblick auf die allgemeine Relevanz in Bezug auf das Ziel der Studie definiert. Für Prozesse innerhalb der Systemgrenze werden alle verfügbaren Energie- und Stoffstromdaten in das

Modell aufgenommen. In Fällen, in denen keine passenden Inventare verfügbar sind, um einen Input oder Output zu repräsentieren, werden Abschätzungen, auf Basis konservativer Annahmen hinsichtlich der Umweltauswirkungen, verwendet. Diese Abschätzungen können beispielsweise Inventare für das gleiche Material bzw. den gleichen Energieträger mit einer anderen geografischen Repräsentativität, Materialien mit ähnlichen Eigenschaften (z.B. unterschiedliche Stahllegierungen) oder alternative Materialien, die im gleichen Kontext eingesetzt werden, sein.

4.1.4. Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethodik und der Wirkungskategorien

Im Zuge der Wirkungsabschätzung (engl.: Life Cycle Impact Assessment, LCIA) werden die relevanten Stoffströme und Emissionen der Sachbilanz sogenannten Wirkungskategorien zugeordnet (Klassifizierung) und hinsichtlich ihres jeweiligen Wirkungspotentials charakterisiert. Zweck der Klassifizierung und Charakterisierung ist der Erhalt eines Indikatorwertes pro Wirkungskategorie.

Für die Wirkungsabschätzung werden die von dem Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission empfohlenen Methoden aus dem International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook verwendet [JRC 2011b]. Sie sind in Tabelle 4-2 aufgeführt. Außerdem wird die Bewertung der Qualität der Methoden durch das JRC in der Tabelle angegeben. Eine Beschreibung der einzelnen Kategorien der Bewertung ist in Tabelle 4-1 dargestellt:

Tabelle 4-1: Bewertung der Qualität der Methoden nach EC-JRC [JRC 2011b]

Kategorie	Beschreibung
I	empfohlen und zufriedenstellend
II	empfohlen, jedoch in manchen Fällen verbesserungswürdig
III	empfohlen, jedoch mit Vorsicht zu verwenden

Weitere Informationen sind in den „GaBi Modeling Principles“ verfügbar [thinkstep 2016b].

Tabelle 4-2: Beschreibung der Wirkungskategorien [JRC 2011b]

Wirkungskategorie		Beschreibung	Einheit	Bewertung der Qualität
Treibhauspotential ¹⁰³	Climate change midpoint	Ein Maß für Treibhausgasemissionen wie CO ₂ und Methan. Diese Emissionen verursachen einen Anstieg in der Absorption von Infrarotstrahlung, die von der Erde emittiert wird, durch die Atmosphäre, wodurch der natürliche Treibhauseffekt verstärkt wird. Dies kann wiederum nachteilige Auswirkungen auf die Ökosystemqualität, die menschliche Gesundheit und materiellen Wohlstand haben.	kg CO ₂ -Äquivalente	I
Ressourcen-verbrauchspotential	Resource depletion, mineral, fossils and renewables, midpoint	Der Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen führt zu einer verringerten Verfügbarkeit in der Zukunft. Der Verbrauch mineralischer und fossiler Ressourcen wird separat berichtet. Der Verbrauch von Ressourcen beruht bei der verwendeten Methode auf deren Reservenbasis (engl. reserve basis).	kg Sb-Äquivalente	II
Versauerungspotential	Acidification midpoint	Ein Maß für die Emissionen, die eine versauernde Auswirkung auf die Umwelt haben. Versauerungspotential ist ein Maß für die Fähigkeit eines Moleküls, in Gegenwart von Wasser die Wasserstoffionenkonzentration (H ⁺) zu erhöhen, wodurch der pH-Wert verringert wird. Mögliche Auswirkungen sind Fischsterben, Waldsterben und die Zerstörung von Baumaterialien.	mol H ⁺ -Äquivalente	II
Eutrophierungspotential - Süßwasser	Eutrophication freshwater midpoint	Überdüngung deckt alle potentiellen Umweltwirkungen eines Überangebots an Makronährstoffen ab, deren wichtigste Vertreter von Stickstoff (N)- und Phosphor (P)-Verbindungen sind.	kg P-Äquivalente	II
Eutrophierungspotential - Salzwasser	Eutrophication marine midpoint	Nährstoffanreicherung kann einen unerwünschten Wandel der	kg N-Äquivalente	II

¹⁰³ Die verwendete Version 1.06 der ILCD Methode verwendet Charakterisierungsfaktoren aus dem 4. Assessment Report (AR) des Intergovernmental Panel in Climate Change (IPCC) für einen 100 jährigen Zeithorizont, https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html, biogene CO₂ Emissionen (z.B. Intake in die Biomasse beim Biomassewuchs und Verbrennungsemissionen bei der Nutzung) sind nicht berücksichtigt, bzw. kompensieren sich über den Lebenszyklus.

Wirkungskategorie		Beschreibung	Einheit	Bewertung der Qualität
Eutrophierungspotential - Boden	Eutrophication terrestrial midpoint	Artenzusammensetzung sowie eine gesteigerte Biomasseproduktion sowohl in aquatischen als auch in terrestrischen Ökosystemen verursachen. In aquatischen Ökosystemen kann dies durch den zusätzlichen Sauerstoffbedarf der Biomassezerersetzung zu einem unzureichendem Sauerstoffgehalt führen.	mol N-Äquivalente	II
Sommersmogpotential	Photochemical ozone formation midpoint, human health	Ein Maß für die Emissionen von Ausgangsstoffen, die in Bodennähe unter dem Einfluss von UV-Licht und in Gegenwart von Stickoxiden durch die Reaktion von VOC und Kohlenmonoxid zur Smogbildung (insbesondere Ozon O ₃) beitragen. Bodennahes Ozon kann schädlich für die menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Pflanzen sein.	kg NMVOC-Äquivalente	II
Ozonabbaupotential	Ozone depletion	Ein Maß für Luftemissionen, die zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beitragen. Daraus resultiert, dass ein höheres Maß ultravioletter Strahlen (UVB) die Erdoberfläche erreicht – mit nachteiligen Auswirkungen auf den Menschen und Pflanzen.	kg CFC 11 Äquivalente	I
Feinstaub/anorganische Emissionen	Particulate Matter/Respiratory inorganics	Ein Maß für Luftemissionen mit Auswirkungen auf die Atmungsorgane. Hierzu gehören Feinstaub aus der Verbrennung von fossilen und biogenen Brennstoffen aber auch aus Industrieprozessen, Erosion und natürlichem Ursprung, der aufgrund der Partikelgröße alveolengängig ist. Weitere berücksichtigte Emissionen: Stickoxide, Schwefeldioxid, Ammoniak und Kohlenmonoxid.	kg PM _{2,5} -Äquivalente	I
Ionisierende Strahlung	Ionizing radiation, human health	Ein Maß für elektromagnetische Strahlung und Partikelstrahlung, welche unmittelbar schädliche Auswirkungen für die menschliche Gesundheit, Ökosysteme sowie natürliche Ressourcen haben.	kBq U235 Äquivalente	II
Humantoxizität, kanzerogen	Human toxicity midpoint, cancer effects	Ein Maß für toxische Emissionen, welche unmittelbar schädlich für die Gesundheit von Menschen und anderer Spezies sind.	CTUh	II/III

Wirkungskategorie	Beschreibung	Einheit	Bewertung der Qualität
Humantoxizität, nicht-kanzerogen	Human toxicity midpoint, non-cancer effects		II/III
Ökotoxizität	Ecotoxicity freshwater midpoint	CTUe	II/III

Die Wirkungskategorie Landnutzung (Land use) konnte in der ökologischen Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Zum einen besteht bei der Wirkungskategorie land use weiterhin Forschungsbedarf für eine robuste Methode zur Wirkungsabschätzung, des Weiteren sind Landnutzungen, beispielsweise für Infrastrukturen, in der verwendeten Ökobilanzdatenbank noch nicht vollständig implementiert. Aktuell werden in einem Forschungsprojekt des JRC die Empfehlungen zu den drei Wirkungskategorien Landnutzung, Wasserverbrauch sowie Ressourcenverbrauch überarbeitet [JRC 2016]. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die oben genannten Wirkungskategorien Wirkpotentiale darstellen, d. h., sie sind Annäherungen an Umweltwirkungen, die auftreten könnten, falls die Emissionen (a) tatsächlich dem zugrundeliegenden Wirkmechanismus folgen und (b) in der Umwelt auf bestimmte Randbedingungen treffen. Wirkungsabschätzungsergebnisse sind daher relative Aussagen und machen keine Voraussagen über Auswirkungen auf Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken.

4.1.5. Normierung und Gewichtung

In der ISO 14044 zählen die Normierung und die Gewichtung zu den optionalen Bestandteilen der Wirkungsabschätzung [ISO 2006b]. Dies hat vor allem folgenden Grund: Während die Berechnung von Einzelemissionen und die Zuordnung der Einzelemissionen zu Umweltindikatoren auf chemisch- und toxikologischen Wirkmechanismen mathematisch nachvollziehbar und daher wissenschaftlich anerkannt wird, ist die Festlegung eines Gewichtungsschlüssels oftmals durch individuelle Präferenzen, politische Einflüsse oder persönliche Einschätzungen des Autors bestimmt. Zusätzlich bestehen bei den Normierungsfaktoren für eine Reihe von Wirkungskategorien Unsicherheiten.

Im Folgenden werden die Normierung und Gewichtung genauer erläutert.

Normierung

Bei der Normierung wird der Indikatorwert einer Wirkungskategorie durch Division auf einen Referenzwert bezogen. Dieser Referenzwert stellt in der Regel den Indikatorwert der gleichen Wirkungskategorie für eine bestimmte Region oder ein Land dar (z. B. alle Treibhausgasemissionen in der EU oder für einen EU Bürger in einem bestimmten Jahr). Ergebnis sind dimensionslose Werte für jede Wirkungskategorie, die aufgrund der relativen Größenordnung miteinander verglichen werden können.

Für die Studie werden die vom Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission empfohlenen Normierungsfaktoren der Wirkungskategorien für die Europäische Union (EU-27) für das Jahr 2010 verwendet [JRC 2014]. Sie sind in Tabelle 4-3 dargestellt. Normierungsfaktoren für Deutschland oder Bayern sind für die ausgewählten Wirkungskategorien nicht verfügbar. Die Bewertung und Einteilung der Robustheit der Faktoren (sehr hoch/mittel/niedrig) durch das JRC ist ebenfalls in Tabelle 4-3 angegeben [JRC 2014].

Tabelle 4-3: Normierungsfaktoren für die Wirkungskategorien für das Jahr 2010 [JRC 2014]

ILCD Wirkungskategorie	Einheit	Gesamte Umweltwirkung in der Region	Normierungsfaktor pro Person	Bewertung der Robustheit
Treibhausgase	kg CO ₂ -Äquivalente	4,60E+12	9,22E+03	sehr hoch
Ressourcenverbrauch fossil & mineralisch	kg Sb-Äquivalente	5,03E+07	1,01E-01	mittel
Versauerung	mol H ⁺ -Äquivalente	2,36E+10	4,73E+01	hoch
Frischwasser Eutrophierung	kg P-Äquivalente	7,41E+08	1,48E+00	mittel bis niedrig
Eutrophierung mariner Ökosysteme	kg N-Äquivalente	8,44E+09	1,69E+01	mittel bis niedrig
Terrestrische Eutrophierung	mol N-Äquivalente	8,76E+10	1,76E+02	mittel
Fotochemisches Ozonbildungspotential	kg NMVOC-Äquivalente	1,58E+10	3,17E+01	mittel
Ozonabbaupotential	kg CFC 11 Äquivalente	1,06E+07	2,16E-2	mittel
Feinstaub/anorganische Emissionen	kg PM _{2,5} -Äquivalente	1,90E+09	3,80E+00	sehr hoch
Ionisierende Strahlung	kBq U235 Äquivalente	5,64E+11	1,13E+03	mittel
Humantoxizität, kanzerogen	CTUh	1,84E+04	3,69E-05	niedrig
Humantoxizität, nicht-kanzerogen	CTUh	2,66E+05	5,33E-04	niedrig
Ökotoxizität Süßwasser	CTUe	4,36E+12	8,74E+03	niedrig

Die Robustheit wird vor allem für Toxizitätsindikatoren als niedrig angegeben. Ein Vergleich von globalen Normierungsfaktoren aus unterschiedlichen Studien [JRC 2016 b] zeigt, dass die Studien zu relevanten Unterschieden kommen.

Tabelle 4-4: Vergleich Normierungsfaktoren EU-27 und Global [JRC 2016 b]

ILCD Wirkungskategorie	Einheit	EC-JRC EU27 (2010) pro Person	EC-JRC Global (2010/2013) pro Person	PROSUITE Global (2010/2000) pro Person
Treibhausgase	kg CO ₂ -Äquivalente	9.220	7.071	8.100
Ressourcenverbrauch fossil & mineralisch	kg Sb-Äquivalente	0,101	0,193	0,313

ILCD Wirkungskategorie	Einheit	EC-JRC EU27 (2010) pro Person	EC-JRC Global (2010/2013) pro Person	PROSUITE Global (2010/2000) pro Person
Versauerung	mol H ⁺ -Äquivalente	47,3	56,1	49,6
Frischwasser Eutrophierung	kg P-Äquivalente	1,48	6,54	0,62
Eutrophierung mariner Ökosysteme	kg N-Äquivalente	16,9	30,4	9,4
Terrestrische Eutrophierung	mol N-Äquivalente	176	164	115
Fotochemisches Ozonbildungspotential	kg NMVOC-Äquivalente	31,7	45,3	56,7
Ozonabbaupotential	kg CFC 11 Äquivalente	0,0216	0,0122	0,0414
Feinstaub/anorganische Emissionen	kg PM _{2.5} -Äquivalente	3,80	5,07	2,76
Ionisierende Strahlung	kBq U235 Äquivalente	1.130	241	1.330
Humantoxizität, kanzerogen	CTUh	0,0000369	0,0000124	0,0000542
Humantoxizität, nicht-kanzerogen	CTUh	0,000533	0,000155	0,001100
Ökotoxizität Süßwasser	CTUe	8.740	3.738	665

Neben der Schwierigkeit, die Emissionen einer Wirkungskategorie für eine Region zu erheben, für die es keine umfangreichen Inventare gibt, wie es beispielsweise für Treibhausgase [UNFCCC 2016] oder die meisten relevanten Emissionen der Wirkungskategorien Versauerung oder fotochemisches Ozonbildungspotential [CEIP 2016] der Fall ist, besteht im europäischen Kontext zusätzlich die Problematik, dass viele Rohstoffe, Materialien und Produkte außerhalb der EU abgebaut respektive gefertigt und importiert werden, gleichzeitig aber auch Waren exportiert werden und somit nicht in der EU konsumiert werden. Insbesondere für die Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch fossil und mineralisch ergibt sich aufgrund der Importabhängigkeit der EU für Erze bzw. Metalle eine Verzerrung, da der Normierungswert nur die innerhalb der EU abgebauten Rohstoffe beinhaltet¹⁰⁴. Diesem Aspekt wurde versucht Rechnung zu tragen, in dem Importe und Exporte mit Hilfe von Ökobilanzdaten zum inländischen bzw. EU Inventar hinzugerechnet (Importe) oder abgezogen (Exporte) werden [JRC 2014]. Der Stand der Methodenentwicklung ist aber noch nicht soweit, dass belastbare Normierungsfaktoren, die Importe und Exporte berücksichtigen, verfügbar wären.

Gewichtung

Um einen einzelnen ökologischen Indikator (einen sogenannten *Single Score*) zu erhalten, wird eine kategorienübergreifende Gewichtung durchgeführt. Dabei werden die normierten und dimensionslosen Indikatorwerte der Wirkungskategorien mit Hilfe eines Gewichtungsschlüssels

¹⁰⁴ Der Indikator Ressourcenverbrauch fossil und mineralisch beinhaltet zwar neben Metallen und anderen mineralischen Rohstoffen auch fossile und biogene Energieträger wie Erdgas und Erdöl, diese haben aufgrund ihrer geringen Charakterisierungsfaktoren kaum Einfluss auf den Normierungsfaktor oder das Ergebnis der Ökobilanz, da diese hauptsächlich durch Metalle wie Silber oder Strontium bestimmt werden.

untereinander gewichtet und in einen einzelnen ökologischen Indikatorwert aufsummiert. Dadurch wird eine Relation zwischen den verschiedenen Wirkungskategorien hergestellt. Ergebnis ist ein dimensionsloser Einzelwert.

Tabelle 4-5: Gewichtungsfaktoren für die normierten Wirkungskategorien [JRC 2014]

Wirkungskategorie	Gewichtungsfaktor ¹⁰⁵ [%]
Treibhausgase	27,4
Ökotoxizität Süßwasser	13,1
Feinstaub/anorganische Emissionen	8,3
Ressourcenverbrauch fossil & mineralisch	8,3
Humantoxizität, kanzerogen	7,1
Ionisierende Strahlung	7,1
Fotochemisches Ozonbildungspotential	6,0
Humantoxizität, nicht-kanzerogen	4,8
Ozonabbaupotential	4,8
Versauerung	4,8
Eutrophierung mariner Ökosysteme	2,8
Fischwasser Eutrophierung	2,8
Terrestrische Eutrophierung	2,8
TOTAL	100,0

Durch den Gewichtungsschlüssel können einzelne Wirkungskategorien einen entsprechend stärkeren oder geringeren Einfluss auf das Gesamtergebnis der ökologischen Analyse haben. Außerdem können Umweltkategorien mit mehreren Wirkungskategorien, wie z. B. die Eutrophierung, zusammengefasst werden. Der verwendete Gewichtungsschlüssel ist in Tabelle 4-5 dargestellt. Er basiert auf den Midpoint-Gewichtungsfaktoren von Huppes und van Oers [JRC 2011a]. Diese stellen Durchschnittswerte aus drei Gewichtungsschlüsseln dar.

4.1.6. Art und Format des Berichts

Analog den Anforderungen des ISO-Standards (ISO, 2006) stellt dieser Bericht, die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Ökobilanz vollständig, korrekt, und unvoreingenommen in Bezug auf die angesprochene Zielgruppe dar. Die Ergebnisse, Daten, Methoden, Annahmen, und Einschränkungen werden auf transparente Weise und mit hinreichendem Detaillierungsgrad berichtet, um den Leser die inhärenten Komplexitäten, Einschränkungen, und Zielkonflikte der Ökobilanz zu vermitteln. Dies ermöglicht es, die Ergebnisse entsprechend des Ziels der Studie zu interpretieren und zu verwenden.

4.1.7. Software und Datenbanken

Das LCA-Modell wurde mittels der GaBi 6 Software der thinkstep AG erstellt. Die GaBi 2016 Datenbanken [thinkstep 2016a] liefern die Sachbilanzdaten für die Hintergrundsysteme.

¹⁰⁵ Im Original beinhaltet der verwendete Gewichtungsschlüssel noch die Umweltkategorien Landnutzung und Wasserverbrauch, aufgrund der in oben genannten Problematik wurden diese beiden Umweltkategorien nicht berücksichtigt und die verbleibenden Umweltkategorien entsprechend so skaliert, dass sich insgesamt 100 % ergeben.

4.2. Datengrundlage der Sachbilanz

4.2.1. Herstellung der Heiz- und Speichersysteme

Als Anbieter der Ökobilanzsoftware GaBi und der dazugehörigen GaBi Datenbanken 2016 sowie als Hauptlieferant von Ökobilanzdaten für die ÖKOBAUDAT des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) verfügt thinkstep über eine große Basis an Ökobilanzdaten zu Heiz- und Speichersystemen [ÖKOBAUDAT 2016, thinkstep 2016a]. Daher wurde im Rahmen dieser Studie auf Daten der ÖKOBAUDAT und der GaBi Datenbanken 2016 zurückgegriffen. Diese berücksichtigen die Herstellung, Nutzung und Verwertung/Entsorgung der relevanten Komponenten und basieren weitestgehend auf anonymisierten, durchschnittlichen, gesammelten Industriedaten, die seit 1995 erstellt und jährlich fortgeschrieben und aktualisiert werden. Bestehende Datenlücken wurden, in Absprache mit dem Auftraggeber und mit Unterstützung des C.A.R.M.E.N e.V., durch Daten aus öffentlich verfügbaren Literaturquellen sowie Experteninterviews und -abschätzungen geschlossen.

Es erfolgte eine bestmögliche Anpassung der bestehenden Daten an den in Kapitel 2 festgelegten Untersuchungsrahmen (Nennleistung & Gewicht, Lebensdauer, etc.).

Der *Hochtemperaturelektrospeicher* befindet sich noch im Entwicklungsstadium und ist in absehbarer Zeit nicht am Markt verfügbar. Auf Basis von Daten verschiedener Hersteller von Systemen mit ähnlicher Technologie, aber deutlich geringeren Speicherkapazitäten wurden gemeinsam mit dem Auftraggeber die in Tabelle 4-6 dargestellten Eigenschaften des Speichers festgelegt und als Grundlage für die Ökobilanz verwendet.

Tabelle 4-6: Eigenschaften des betrachteten Hochtemperaturelektrospeichers

Eigenschaften Hochtemperaturelektrospeicher	Neubau	(teil-)sanierter Altbau
Speicherkapazität [kWh]	500	1.700
Maße Speicherkern:		
Höhe [m]	0,8	1,2
Breite [m]	0,8	1,2
Tiefe [m]	1,20	1,81
Dämmung [cm]	15	15
Volumen Speicherkern [m ³]	0,766	2,60
Feolith [kg]	2.875	9.775
Dämmung [m ³]	1,35	2,57
Dichte Dämmung [kg/m ³]	145	145
Masse Dämmung [kg]	196	373
Bleche [m ²]	7,36	13,99
Blechdicke [mm]	1	1
Masse Blech [kg]	58	111
Masse Träger [kg]	100	250

4.2.2. Nutzung der Heiz- und Speichersysteme

Für die Modellierung der Nutzungsphase werden im Wesentlichen, die im Untersuchungsrahmen (Kapitel 2) gemachten und bereits für die ökonomische Analyse verwendeten Annahmen zur

Nutzungsphase (u. a. Jahresnutzungsgrad, Lebensdauer, Energiebedarf, Eigenstrombedarf) und zu den geografischen Gegebenheiten (Bayern bzw. Deutschland) wie Sonneneinstrahlung oder Energieträgermix für Wärmenetze verwendet.

Wärmenetze

Der Energieträgermix der Wärmebereitstellung durch das städtische und ländliche Wärmenetz wird in Abbildung 4-2 dargestellt. Die grundlegenden Daten für den städtischen Mix, die Kraftwerkeigenschaften und Netzverluste entstammen einer Publikation des Energieeffizienzverbands für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) [AGFW 2015] und sind in Tabelle 4-7 zusammengefasst. Die Daten für das ländliche Wärmenetz wurden von C.A.R.M.E.N. e.V. bereitgestellt [C.A.R.M.E.N. e.V. 2016a].

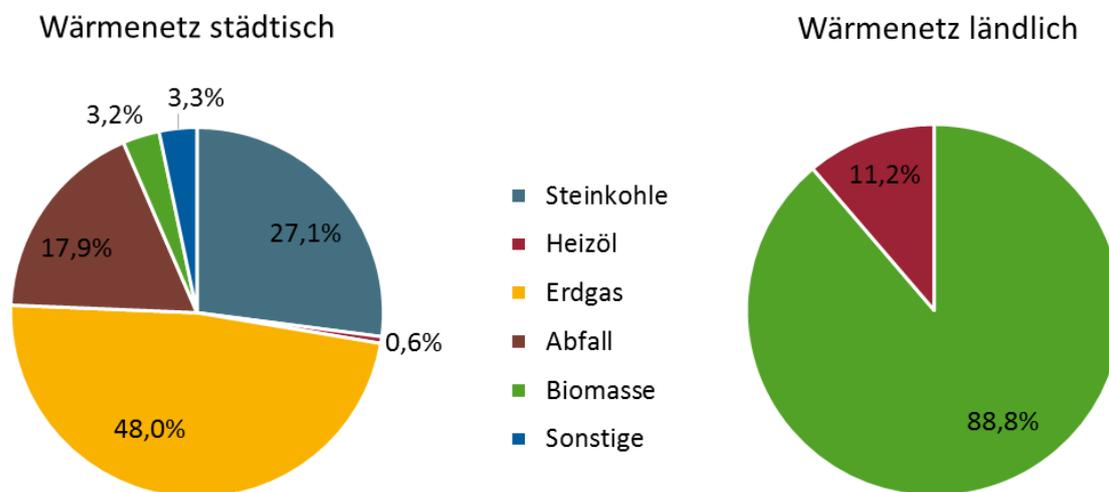


Abbildung 4-2: Wärmenetze nach Energieträgern [AGFW 2015]

Tabelle 4-7: Annahmen zu Netzverlusten und Effizienzen der Wärmenetze

	Wärmenetz [AGFW 2015]	Wärmenetz [C.A.R.M.E.N. e.V. 2016a]
Netzverluste	15,7% ¹⁰⁶	13,2% ¹⁰⁷
Anteil KWK	86%	0%
Wirkungsgrad Heizwerke/Heizkessel	81%	82%
Wirkungsgrad KWK	80% bei 33% Stromanteil	-

Verbrennungsemissionen

Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 geben einen Überblick über die für die Heizgeräte verwendeten, direkten Emissionsfaktoren der Nutzungsphase. Die Emissionsfaktoren sind die Grundlage für die

¹⁰⁶ Berechnet für Bayern aus Wärmenetzzeinspeisung und „Wärmeabgabe an Kunden“

¹⁰⁷ Über Anzahl der Heizwerke „mit kurzem Netz“ und „mit Wärmenetz“ gewichtet.

Berechnung der Emissionen, die direkt bei der Verbrennung des jeweiligen Energieträgers entstehen. Diese wurden in Abstimmung mit Informationen des Auftraggebers und mit Unterstützung des C.A.R.M.E.N. e.V. sowie des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachhaltige Rohstoffe anhand von wissenschaftlichen Abhandlungen und Ergebnissen, sowie Typprüfungen geförderter Kessel abgeleitet.

Für Pelletkessel und Scheitholzessel wurde aufgrund der Förderbedingungen angenommen, dass Staubabscheider zum Einsatz kommen. Aktuelle Emissionsdaten für Pellet- und Scheitholzessel lassen sich aus den Typenprüfungen, der von der BAFA geförderten Kessel [BAFA 2015], entnehmen. Allerdings beinhalten die Werte der Typprüfung noch nicht die Verwendung eines Staubabscheiders. Um den Einsatz der Staubabscheider zu berücksichtigen, wurde auf die durchschnittlichen Staubemissionen der geförderten Kessel im Zeitraum Januar 2014 bis Januar 2015 ein Abscheidegrad von 60% angenommen (siehe auch Fußnote in Tabelle 4-8).

Für die Wärmenetze wurde davon ausgegangen, dass es sich um ein bestehendes Wärmenetz handelt, an das das Gebäude angeschlossen werden kann. Für den Biomassekessel des ländlichen Wärmenetzes wurde für die Staubemissionen der zulässige Grenzwert von 20 mg/Nm³ der Stufe 2 [UBA 2010] der novellierten 1. BImSchV von 2010 verwendet. Prinzipiell können die Staubemissionen bei Holzheizkesseln für ländliche Wärmenetze, insbesondere bei Verwendung von Staubabscheidern, niedriger sein¹⁰⁸.

¹⁰⁸ Für bestehende Holzheizkessel in Wärmenetzen, die vor dem 31.12.2014 installiert wurden, liegt der Grenzwert, nach Ablauf der Übergangsfristen, bei 100 mg/Nm³. Entsprechend können in existierenden Wärmenetzen die Staubemissionen über den angenommenen 20 mg/Nm³ liegen.

Tabelle 4-8: Direkte Emissionsfaktoren der Heizgeräte in kg/TJ Brennstoffeinsatz

Emission [kg/TJ]	NT_ Heizöl ¹⁰⁹	NT_ Erdgas ^{109,110}	BW_ Heizöl ¹⁰⁹	BW_Erdgas, WP_Erdgas, WP_Hybrid_ Erdgas ^{109,110}	mBHKW _Erdgas ^{109,110,111}	Pellet ^{109,112}	Scheit- holz ^{109,112}	Wärmenetz ländlich - Heizöl- Spitzenlast ¹⁰⁹	Wärmenetz ländlich - Hackschnitzel (891 kW) ^{109,113}
CO ₂ fossil	73.344	55.797	73.344	55.797	55.797	96.105 ¹¹⁴	97.128 ¹¹⁴	73.344	97.128 ¹¹⁴
CO	7,00	6,90	7,00	6,40	31,7	33,4	72,4	12	84,7
NO _x	40,0	19,0	40,0	5,10	20,9	76,7	84,7	44,0	97,4
SO ₂	2,35 ¹¹⁵	0,50	2,35 ¹¹⁵	0,50	0,50	5,10	5,10	2,35 ¹¹⁵	3,38
Formaldehyd					14,3				
NM VOC (unspez.)	2,50	0,38	2,50	0,34	0	1,05	4,21	2,80	19,4
CH ₄	0,02	0,04	0,02	12,00	40,0 ¹¹⁶	0,93	3,73	0,02	8,03
Partikel ¹¹⁷	0,10	0,03	0,10	0,03	0,03	3,44 ¹¹⁸	3,10 ¹¹⁸	0,10	13,4 ¹¹⁹
PM _{>10}	0	0	0	0	0	0,1	0,09	0	0,40
PM _{2,5-10}	0	0	0	0	0	0,1	0,09	0	0,40
PM _{2,5}	0,1	0,03	0,1	0,03	0,03	3,24	2,9	0,1	12,6
PCDD/PCDF	1,0E-09	1,7E-09	1,0E-09	1,7E-09	1,7E-09	1,0E-09	3,9E-08	2,8E-09	5,6E-08
PAK	1,0E-05		1,0E-05			0,07	0,03	1,0E-05	0,39
Benzol	0,004	1,0E-04	0,004	2,0E-04	2,0E-04			0,02	

¹⁰⁹ Quelle: [UBA 2008]

¹¹⁰ Quelle: [UBA 2000]

¹¹¹ Quelle: Herstellerangaben [Viessmann 2015, Vaillant 2011]

¹¹² Quelle: [BAFA 2015, TFZ 2013, FNR 2013]

¹¹³ Quelle: [TFZ 2010]

¹¹⁴ biogenes CO₂

¹¹⁵ Annahme aus Mineralölabsatz Deutschland, dass 100% Heizöl extraleicht (HEL) schwefelarm mit 50 ppm Schwefel verwendet wird. Anteil HEL schwefelarm 2015 = 96,3 % (2009 = 27,2 %) [BAFA 2016a, IWO 2016]. Annahme 2017 = 100 %.

¹¹⁶ 0,2% Methanschlupf basierend auf [IFEU 2008]

¹¹⁷ Bei den angegebenen Partikelgrößen handelt es sich nicht um eine Größengrenze der einbezogenen Partikel, sondern 50% der Partikel mit dieser Größe werden in die Messung mit einbezogen, während der Anteil der einbezogenen Partikel mit geringerer Größe bis 100% ansteigt und mit steigender Größe entsprechend auf 0% sinkt. Bei PM₁₀ werden 100% der Partikel mit einer Größe < 1 µm eingebezogen, 50 % der Partikel mit 10 µm und bei 15 µm sinkt der Anteil der einbezogenen Partikel auf 0 % [Mattenklott 2009].

¹¹⁸ Für Pellet- und Scheitholzessel wurde aufgrund der Förderbedingungen festgelegt, dass diese mit Partikelabscheider ausgerüstet sind. Für die BAFA geförderten Kessel [BAFA 2015] liegen Werte aus der Typenprüfung ohne Abscheider vor: Pelletkessel 8,6 kg/TJ, Scheitholzessel 7,7 kg/TJ. Für diese wurde eine Abscheidungsrate von 60%, aufgrund der Verwendung eines elektrostatischen Partikelfilters angenommen (vom Hersteller werden Abscheidungsrate von 50-90% angegeben [Kutzner 2015]).

¹¹⁹ Resultiert aus Grenzwert der 1. BImSchV von 20 mg/Nm³ für Holzheizkessel (Stufe 2).

Emission [kg/TJ]	NT_ Heizöl ¹⁰⁹	NT_ Erdgas ^{109,110}	BW_ Heizöl ¹⁰⁹	BW_Erdgas, WP_Erdgas, WP_Hybrid_ Erdgas ^{109,110}	mBHKW _Erdgas ^{109,110,111}	Pellet ^{109,112}	Scheit- holz ^{109,112}	Wärmenetz ländlich - Heizöl- Spitzenlast ¹⁰⁹	Wärmenetz ländlich - Hackschnitzel (891 kW) ^{109,113}
N ₂ O	0,28	0,19	0,28	0,06	0,06	0,28	0,28	0,56	0,28
HCl						0,09	0,09		0,09
Quecksilber		6,00E-05		6,00E-05		5,22E-04	5,60E-04		4,53E-04

Tabelle 4-9: Schwermetallemissionen für Heizgeräte mit Biomasseverwendung in kg/TJ Brennstoffeinsatz^{120, ,}

Emission [kg/TJ]	Pellet	Scheit-holz	Wärmenetz ländlich - Hackschnitzel (891 kW)
Arsen	8,66E-03	8,66E-05	3,70E-04
Cadmium	6,61E-04	6,61E-04	1,00E-03
Chrom	8,60E-03	8,60E-03	4,00E-02
Kupfer	3,10E-02	3,10E-02	2,10E-02
Quecksilber	5,22E-04	5,60E-04	4,53E-04
Molybdän	3,32E-03	3,04E-03	3,04E-03
Nickel	7,78E-02	6,95E-02	3,77E-03
Blei	4,63E-03	4,63E-03	1,98E-02
Zink	3,64E-02	3,64E-02	1,55E-01

Strommix

Die vorliegende Studie ist auf Neuanlagen innerhalb des Gebäudes fokussiert, die ab dem Jahr 2017 installiert werden. Für alle Technologien wird ein Betrachtungszeitrahmen von 20 Jahren festgelegt. Unterschiede beim Stromverbrauch ergeben sich vor allem zwischen Heizkesseln und Wärmepumpen. Bei den Wärmepumpen addiert sich zusätzlich zum Haushaltsstrom inklusive Strom für die Zirkulationspumpe (3.300 kWh/Jahr) noch der Strom für die Wärmepumpe. Um die Umweltwirkungen von Wärmepumpen daher abschätzen zu können, ist eine Berücksichtigung des Ausbaus der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung notwendig. Auf Basis der von der Bundesregierung im Energiekonzept 2010 festgelegten Ziele bezüglich Treibhausgasminde rung und Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix, wurden in der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ des Öko-Instituts e.V. und des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) [Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI 2015], Prognosen zum Strommix mit zehnjährlicher Auflösung berechnet.

Abbildung 4-3 zeigt den für die Berechnungen der ökologischen Analyse verwendeten Strommix, aufgeteilt nach Energieträgern. Unter anderem werden in der genannten Studie Prognosen für die Zusammensetzung des Strommixes für die Jahre 2020 und 2030 angegeben. Um die Prognosen der zukünftigen Entwicklung des Strommixes in die vorliegende Studie einzubeziehen, wurde für die Berechnung des Strommixes der Mittelwert aus den beiden Prognosewerten 2020 und 2030 gebildet und somit vereinfachend eine kontinuierliche Entwicklung unterstellt. Die sonstigen wesentlichen Eigenschaften und Parameter des Strommixes, wie die Energieträgerbereitstellung, die Kraftwerkseigenschaften (u. a. Effizienz, Eigenbedarf und Emissionsfaktoren), Stromimporte sowie die Netz- und Verteilungsverluste, basieren auf dem Referenzjahr 2013. Diese Daten entstammen öffentlich verfügbaren Literaturquellen und Statistiken, wie z. B. der Internationalen Energieagentur (engl. International Energy Agency, IEA).

¹²⁰ Quelle: [TFZ 2013, UBA 2008, Universität Stuttgart 2007]

Strommix nach Energieträgern

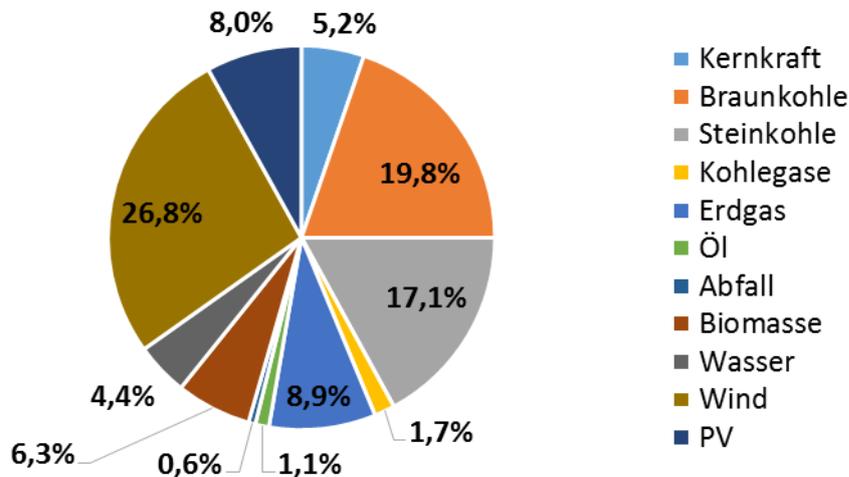


Abbildung 4-3: Projektion Strommix Durchschnitt aus 2020/2030 [Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI 2015]

Der produzierte Strom der Photovoltaikanlage wird nach der in Kapitel 2.3.2 festgelegten Priorisierung verwendet. Für den anfallenden Stromüberschuss wird eine Gutschrift berechnet¹²¹.

Bei den beiden Systemen ohne Batteriespeicher findet die Einspeisung von überschüssigem Strom, der nicht im Haushalt oder von der Wärmepumpe verbraucht wird, unmittelbar zum Zeitpunkt der Erzeugung statt, überwiegend in den Mittagsstunden. Bei den Systemen mit Batterie kann der überschüssige Strom, der während der Mittagsspitzen entsteht und der nicht im Haus verbraucht wird, zunächst überwiegend in die Batterie mit einer Speicherkapazität von 12 kWh eingespeichert werden.

Für die beiden Systeme ohne Batterie wurde daher ein alternativer Strommix (PV Gewichteter Strommix 2014) berechnet. Dieser „PV Gewichtete Strommix 2014“ basiert auf dem Strommix des Jahres 2014 zu Zeiten mit PV-Einspeisung in das Netz. Zeiten, zu denen kein PV-Strom erzeugt wird (z. B. nachts), wurden nicht im „PV Gewichteten Strommix 2014“ berücksichtigt. Der PV Anteil im „PV Gewichteten Strommix 2014“ wurde über eine Gewichtung stündlich aufgelöster Strommixe berechnet.

Tabelle 4-10: Ableitung des PV gewichteten Strommixes für 2025

	Strommix 2014 [Agora 2015]	PV Gewichteter Strommix 2014	Projektion Strommix 2025	PV gewichteter Strommix 2025
Wind	10,6%	7,6%	26,8%	22,0%
Photovoltaik	6,4%	19,8%	8,0%	24,7%
Biomasse	8,1%	7,6%	6,4%	5,2%
Wasserkraft	3,7%	4,1%	4,4%	3,6%
Residuallast (fossil und nuklear)	71,2%	60,9%	54,4%	44,5%

¹²¹ Die eingespeiste Strommenge wird mit der spezifischen Umweltlast des substituierten Stroms (z.B. kg CO₂eq./kWh Strom) multipliziert und das Produkt vom Gesamtergebnis abgezogen.

Die Gewichtung erfolgte über die in der jeweiligen Stunde erzeugte Strommenge aus PV im Verhältnis zur gesamten erzeugten Strommenge aus PV. Die Anpassung an das Jahr 2025 erfolgte durch eine lineare Skalierung des Anteils an Photovoltaikstrom im Jahre 2014 (6,4 %) und zukünftig in 2025 (8 %) sowie der restlichen Energieträger (Wind, Wasserkraft, Biomasse und fossile Residuallast inklusive Kernkraft).

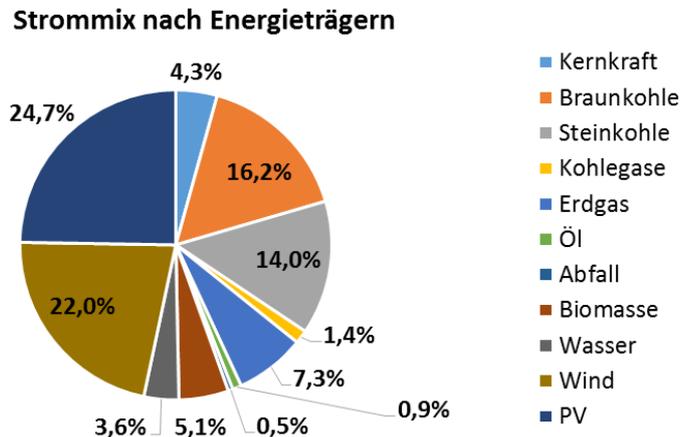


Abbildung 4-4: PV gewichteter Strommix Durchschnitt aus 2020/2030 zur Berechnung Gutschrift bei Einspeisung ohne Batterie

BHKW

Die beiden Erdgas-Mikro-BHKW der betrachteten Heizsysteme stellen neben Wärme auch Strom bereit. Dieser wird bevorzugt zur Deckung des Strombedarfs der Gebäude verwendet. Unter der Annahme, dass auftretende Stromüberschüsse ins Netz eingespeist werden, wird eine Gutschrift berechnet. Die beiden mBHKWs unterscheiden sich ausschließlich in der Berechnung der erteilten Gutschrift. Für das normale mBHKW erfolgt die Gutschrift nach dem oben beschriebenen durchschnittlichen Strommix für das Jahr 2025. Für das *mBHKW Schwarm* erfolgt die Berechnung der Gutschrift unter der Annahme, dass die BHKWs so gesteuert werden, dass der Pufferspeicher dann aufgeladen wird, wenn am jeweiligen Tag aktuell wenig Strom aus erneuerbaren Energien (PV und Wind) eingespeist wird und somit potentiell Spitzenlastkraftwerke zugeschaltet werden müssten.

Daher wird für das *mBHKW Schwarm* für die Berechnung der Gutschrift die Annahme getroffen, dass Strom aus erdgasbetriebenen Spitzenlastkraftwerken mit einer Effizienz von 40 % substituiert wird. Diese Annahme für das *mBHKW Schwarm* ist als Optimum für die ökologische Betrachtung des mBHKW zu verstehen. Der für die Gutschrift beim normalen BHKW verwendete durchschnittliche Strommix 2025 hat einen spezifischen Emissionsfaktor von 508 g CO₂-Äquivalente/kWh und der Strom für die Gutschrift beim *mBHKW Schwarm* 624 g CO₂-Äquivalente/kWh [thinkstep 2016a]. Bei der Wirkungskategorie Treibhausgaspotential erfolgt für das *mBHKW Schwarm* somit eine um 23 % höhere Gutschrift. Allerdings ergeben sich bei anderen Wirkungskategorien, wie zum Beispiel Versauerung, Feinstaub oder Toxizität geringere Gutschriften für das *mBHKW Schwarm*, da das substituierte Erdgaskraftwerk deutlich geringere Staubemissionen oder NO_x-Emissionen hat, als die im 2025 Strommix eingesetzten Kohlekraftwerke und der Strommix im Mittel höhere Emissionen hat als das Erdgaskraftwerk.

Daten der Hintergrundsysteme

Die Sachbilanzdaten für die Hintergrundsysteme (z. B. Bereitstellung von Infrastrukturmaterialien und Energieträgern) liefern die GaBi 2016 Datenbanken [thinkstep 2016a]. Die Aktualität der Datensätze wird durch eine jährliche Aktualisierung der Daten sichergestellt.

4.3. Ergebnisse der ökologischen Analyse

Die folgenden Teilabschnitte stellen die Ergebnisse der ökologischen Analyse auf Basis der in Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2 beschriebenen Methodik und Grundlagen dar.

Es werden die folgenden beiden, bereits in Kapitel 2.3.1 beschriebenen, Szenarien untersucht:

- Szenario 1 (=> *ungünstig für Wärmepumpen und weitere investitionskostenintensive Technologien*):
 - moderate Energiepreissteigerung
 - gängige Wärmepumpeneffizienz
 - kürzere Lebensdauern
- Szenario 2 (=> *günstig für Wärmepumpen und weitere investitionskostenintensive Technologien*):
 - starke Energiepreissteigerung
 - optimierte Wärmepumpeneffizienz
 - längere Lebensdauern

Bei den Ergebnissen einzelner Wirkungskategorien (z. B. Treibhausgase) werden die unterschiedlichen Anteile der folgenden wesentlichen Einflussfaktoren auf die Umweltwirkungen dargestellt:

- Infrastruktur (Herstellung und Verwertung/Entsorgung der jeweiligen Komponenten des Heizungs- bzw. des Speichersystems, z. B. Heizkessel, Wärmepumpe, Pufferspeicher etc.)
- Energieträgerbereitstellung (Erdgas, Heizöl, Pellets etc.),
- Strombereitstellung unterschieden in Strom für Haushalt, Betriebsstrom (Hilfsstrom für Heizungssystem) und Strom für die Wärmepumpen bzw. den Hochtemperaturspeicher und
- Nutzung (im Wesentlichen Verbrennungsemissionen bei der Nutzung von Erdgas, Heizöl und Biomasse sowie Verluste von Kühlmittel bei den Wärmepumpen).

Dargestellt werden folgende Ergebnisse:

1. Unterschiedliche Heizsysteme beim Einsatz in den drei Gebäudetypen (Neubau, (teil-)sanierter Altbau und Altbau) unter Berücksichtigung eines mittleren Warmwasserbedarfs.
2. Unterschiedliche Speichersysteme unter Berücksichtigung eines über eine Luftwärmepumpe versorgten effizienten Neubaus mit einer 5 kWp PV Anlage auf dem Dach.
3. Der Einfluss des Warmwasserbedarfs auf die diesbezüglichen Energiekosten bei unterschiedlichen Heizungssystemen am Beispiel des (teil-)saniereten Altbaus.

Aufgrund der Vielzahl an Ergebnisdiagrammen wird an dieser Stelle lediglich eine Auswahl an Ergebnissen der Wirkungsabschätzung gezeigt. Folgende Ergebnisse werden nachfolgend gezeigt:

- Wirkungskategorie Treibhausgase
- Weitere, ausgewählte Wirkungskategorien, wie z. B. Feinstaub oder Versauerung
- Gewichtete Ergebnisse

Weitere Ergebnisse für Neubau und Altbau (Szenario I) befinden sich im Anhang.

Anmerkung: Die Ergebnisse für den Hochtemperaturelektrospeicher basieren auf Forschungsergebnissen und theoretischen Annahmen und sind lediglich als mittel- bis langfristiges perspektivisches Potential zu sehen. Ein derartiges System inkl. entsprechenden Tarifs ist aktuell und in absehbarer Zeit nicht am Markt verfügbar.

Generelle Erklärungen zu den Abbildungen der Ergebnispräsentation:

- STR_Hochtemperaturolektrospeicher: Bei diesem im Wesentlichen mit Strom aus Windkraft betriebenen *Hochtemperaturolektrospeicher* handelt es sich, wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, um eine Technologie die aktuell nicht am Markt verfügbar ist und daher das mögliche Potential einer Technologie abschätzt, die potentiell überschüssigen Windstrom in den Wintermonaten zum Heizen verwenden könnte. Die Technologie wurde aus diesem Grund in den Diagrammen grafisch abgetrennt.
- Die gestrichelte, waagerechte Linie stellt das Gesamtergebnis des Referenzgerätes dar. In allen Gebäuden ist dies das Brennwertgerät Erdgas ohne Solarthermie (*BW_Erdgas_oST*).
- Bei den Niedertemperaturgeräten im Altbau und (teil-)sanierten Altbau wird der Austausch der selbigen Niedertemperaturgeräte zunächst um 10 Jahre aufgeschoben und dann durch ein neues Brennwertgerät ersetzt (Niedertemperatur Erdgas → Brennwert Erdgas, Niedertemperatur Heizöl → Brennwert Heizöl).
- Bei den mBHKW wird für den eingespeisten Strom eine Gutschrift berechnet, die in den Diagrammen als negative Umweltlast dargestellt ist. Zum besseren Verständnis wird für das mBHKW die Gesamtsumme aus Umweltlast (für Betrieb, Strombereitstellung, Erdgasbereitstellung sowie Produktion und Verwertung/Entsorgung) und Gutschrift ein schwarzer Balken auf Höhe der Gesamtsumme dargestellt, sofern dies grafisch umsetzbar ist.
- Beim Wärmenetz wird die Wärme aus verschiedenen primären Energieträgern (Erdgas, Heizöl, Steinkohle, Biomasse, Abfall) bereitgestellt. Deren ökologische Auswirkungen ergeben sich aus der Bereitstellung, den Verbrennungsemissionen und den Netzverlusten. Eine Aufgliederung der einzelnen Anteile an der Wärmebereitstellung in primäre Energieträger und Verbrennungsemission ist in der Auswertung aus technischen Gründen nicht möglich.

4.3.2. Szenario 1: moderate Energiepreissteigerung / gängige Wärmepumpeneffizienz / kürzere Lebensdauern

Heizsysteme

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Neubau

Die verschiedenen Heizsysteme wurden in einem Systemvergleich inklusive der Bereitstellung von Strom miteinander verglichen, um das Blockheizkraftwerk (BHKW), das Wärme- und Strom erzeugt, besser vergleichen zu können und um generell den gesamten Energieverbrauch des Gebäudes vergleichen zu können. Aufgrund des geringen spezifischen Wärmebedarfs von 16 kWh/(m²*a) für das Gebäude ergibt sich für die Treibhausgase in Abbildung 4-5 ein hoher Anteil für die Bereitstellung des Haushaltsstroms (3.300 kWh/Jahr), der für alle Systeme gleich ist. Für das Referenzgerät *BW_Erdgas_oST* (Brennwerterdgaskessel ohne Solarthermie) ergeben sich für die gesamte Laufzeit von 20 Jahren 53 t Treibhausgase. Davon fallen 63 % für die Bereitstellung des Haushaltsstroms an.

Da für die Strombereitstellung unter Berücksichtigung des weiteren Ausbaus der Verwendung von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung in Deutschland nur Abschätzungen getroffen werden können, können die Umweltwirkungen, die sich aus der Strombereitstellung ergeben, in Abhängigkeit des Ausbautempos höher oder niedriger sein. Dies gilt insbesondere auch für die Wärmepumpen, die zur Bereitstellung der Wärme Strom benötigen. Mit den getroffenen Annahmen zum Strommix (siehe Kapitel 4.1.1) für die gewählte Laufzeit von 2017-2037, ergeben sich für alle Wärmepumpen

die rein elektrisch betrieben werden, Vorteile gegenüber dem Referenzgerät. Die geringsten Treibhausgasemissionen bei den Wärmepumpen ergeben sich aufgrund der höchsten Effizienz für die Grundwasserwärmepumpe.

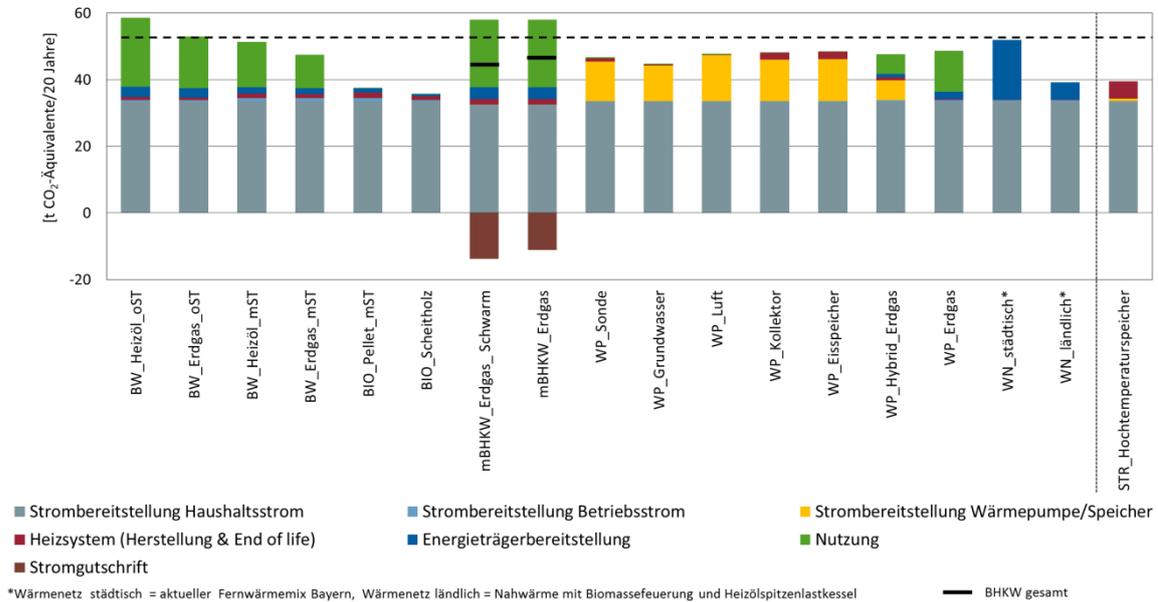


Abbildung 4-5: Neubau, Systemvergleich, Treibhausgase, Szenario 1

Zum Verständnis zeigt Abbildung 4-6 die Treibhausgasemissionen der Heizsysteme über die gesamte Laufzeit von 20 Jahren ohne Haushaltsstrom. Ohne den Haushaltstrom reduzieren sich die Treibhausgase für die Grundwasserwärmepumpe um 40 % gegenüber dem Referenzgerät und um ca. 20-25 % für die Wärmepumpen Luft, Kollektor und Eisspeicher.

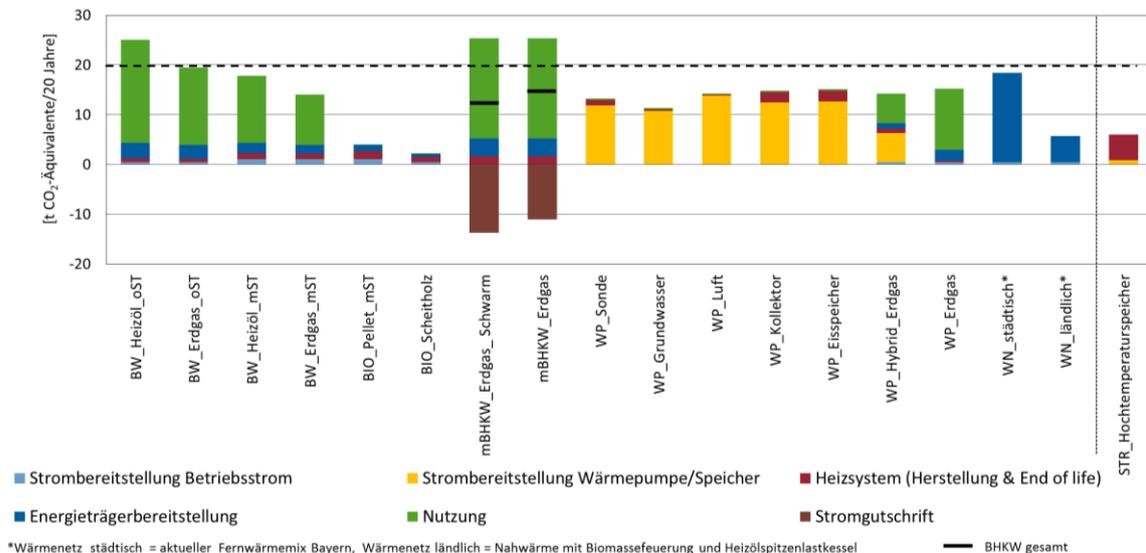


Abbildung 4-6: Neubau, Systemvergleich, Treibhausgase ohne Haushaltsstrom Szenario 1

Die Wärmepumpen verfügen über ein weiteres Reduktionspotential für den Fall, dass über eine intelligente Steuerung (smart grid) Strom aus dem Netz zu Zeiten bezogen wird, zu denen besonders viel Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wird bzw. keine zusätzliche Residuallast benötigt wird, und tragen somit dazu bei, die Fluktuationen, die es bei Wind- und Solarstrom gibt, über den Warmwasserpufferspeicher abzufedern. Allerdings ist hier auch zu berücksichtigen, dass die zeitliche

Verschiebung weg von der optimalen Betriebsweise der Wärmepumpe (zum Beispiel bei einer Luftwärmepumpe) zu einer geringeren Effizienz der Wärmepumpe führen kann.

Bei der Darstellung der Treibhausgase für die verschiedenen Heizungen zeigt sich der Vorteil für die biomassebasierten Heizkessel. Ohne Haushaltstrom liegen die Reduktionen der Treibhausgase gegenüber der Referenztechnologie bei 70-89 % (Pellet -79 %, Scheitholz -89 %, Wärmenetz ländlich -70 %). Die Einsparungen beim Wärmenetz fallen etwas geringer aus, da ca. 11 % der Wärme durch einen Heizölspitzenlastkessel bereitgestellt wird; zusätzlich fallen bei der Verteilung der Wärme ca. 14 % Netzverluste an. Die höheren Treibhausgasemissionen beim Pelletkessel (Bio_Pellet_mST) gegenüber dem Scheitholzkessel (Bio_Scheitholz) ergeben sich aufgrund der höheren Aufwendungen für die Produktion der Pellets gegenüber Scheitholz sowie für die Herstellung der eingesetzten Solarthermie-Anlage.

Für alle Biomassekessel ist zu beachten, dass die Verfügbarkeit von Holz begrenzt ist und die Abschätzung des Potentials nicht Gegenstand dieser Studie ist. Der Ausbau der Verwendung von Biomassekessel sollte immer auch an die Verfügbarkeit von lokal oder regional angebaute Biomasse gekoppelt sein.

Das mBHKW_Erdgas hat insgesamt die höchsten Treibhausgasemissionen, allerdings produziert das mBHKW neben Wärme auch Strom. Der überschüssige Strom wird ins Netz eingespeist und eine Gutschrift berechnet (siehe Abschnitt 4.1.1). Nach Abzug der Gutschrift von den Emissionen des BHKW (schwarze Linie) ergibt sich gegenüber dem Referenzsystem 12 % geringere Treibhausgasemissionen. Für das mBHKW_Erdgas_Schwarm wurde für die Berechnung der Gutschrift nicht der durchschnittliche Strommix verwendet, sondern angenommen, dass das mBHKW über eine intelligente Steuerung dann eingesetzt wird, wenn Spitzenlaststrom benötigt wird und die erzeugte Wärme entsprechend im Warmwasserpufferspeicher gespeichert wird (siehe Abschnitt 4.1.1). Aufgrund der etwas größeren Gutschrift für das Schwarm mBHKW fallen die Einsparungen gegenüber dem Referenzsystem mit 17 % etwas größer aus. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien im Strommix sich die Gutschrift für das mBHKW reduzieren wird, die Vorteile beim mBHKW bestehen langfristig also nur, wenn über eine intelligente Steuerung überwiegend Strom aus fossilen Reserve- bzw. Spitzenlastkraftwerken ersetzt wird, die eingesetzt werden um Fluktuationen bei der Erzeugung von Strom durch Windkraft und Photovoltaik auszugleichen.

Die Bereitstellung und Verwertung/Entsorgung des Heizsystems hat bei den meisten Heizgeräten nur einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen. Beim Referenzgerät sind es 1,3 % inklusive Haushaltstrom und 3,6 % ohne Haushaltstrom. Dieser Anteil steigt für Systeme mit Solarthermie entsprechend an (BW_Erdgas_mST = 2,3 % bzw. 7,0 %). Am höchsten ist dieser Anteil beim Hochtemperaturelektrospeicher, 13 % bezogen auf die Gesamtemissionen bzw. 85 % ohne Haushaltstrom. Dieser hohe Anteil ergibt sich vor allem für die Bereitstellung der Speichersteine. Für den Neubau beträgt die notwendige Kapazität des Hochtemperaturelektrospeichers 500 kWh, um im Winter Wärme für ca. 10 Tage einspeichern zu können. Daraus ergibt sich eine benötigte Speichersteinmenge aus Feolith von 2.875 kg.

Eine Diskussion von weiteren Ergebnissen bzw. Umweltwirkungskategorien wie Feinstaub und Versauerung findet exemplarisch für den Altbau im entsprechenden Abschnitt unter „Altbau“ statt.

Altbau

Im Gegensatz zum Neubau, ist der Betrieb der Heizgeräte im Altbau deutlich dominanter, da aufgrund des Heizwärmebedarfs von 173 kWh/(m²*a) deutlich mehr Nutzwärme bereitgestellt werden muss. Inkludiert man den Wärmebedarf für das Trinkwarmwasser inklusive des Zusatzwärmebedarfs, der

durch die Warmwasserverteilung erzeugt wird, ergibt sich ein um 630 % höherer Wärmebedarf für den Altbau.

Vergleicht man beispielsweise die Treibhausgasemissionen des Referenzgerätes Erdgasbrennwertkessel ohne Solarthermie (BW_Erdgas_oST) in Neubau und Altbau, die sich aus der Nutzung und der Erdgasbereitstellung ergeben, erkennt man den Einfluss der unterschiedlichen Energiestandards deutlich. Für den Altbau ergeben sich für den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren 92 t CO₂-Äquivalente aus der Verbrennung des Erdgases sowie 16,6 t für die Bereitstellung des Erdgases. Beim Neubau mit entsprechender Dämmung der Außenhülle entstehen 15,6 t CO₂-Äquivalente bei der Verbrennung des benötigten Erdgases und 2,8 t für die Erdgasbereitstellung. Dies spiegelt die unterschiedlichen Nutzwärmebedarfe der beiden Gebäude wieder.

Beim Referenzgerät Erdgasbrennwertkessel ohne Solarthermie (BW_Erdgas_oST) liegt der Anteil des Haushaltsstroms an den Gesamtemissionen bei 23 %. Aus der Nutzung bzw. der Verbrennung des Erdgases entstehen 63 % der gesamten Treibhausgasemissionen. Für die reinen Brennwertgeräte ergeben sich aufgrund der höheren Effizienzen für die ersten 10 Jahre gegenüber dem Niedertemperaturgerät¹²² leichte Vorteile, die insgesamt zu einer Einsparung von 5 t CO₂-Äquivalente bei BW_Erdgas_oST (Brennwerterdgaskessel ohne Solarthermie) gegenüber NT_Erdgas. Durch die Verwendung einer Solarthermie-Anlage zur Unterstützung der Trinkwarmwasserbereitstellung bei den Brennwertgeräten ergibt sich unter den gewählten Annahmen gegenüber den Systemen ohne Solarthermie eine Einsparung über die gesamte Laufzeit von ca. 6 t CO₂-Äquivalente für Erdgas und 7,8 t CO₂-Äquivalente für Heizöl. Dies entspricht jeweils einer Einsparung von ca. 4 %.

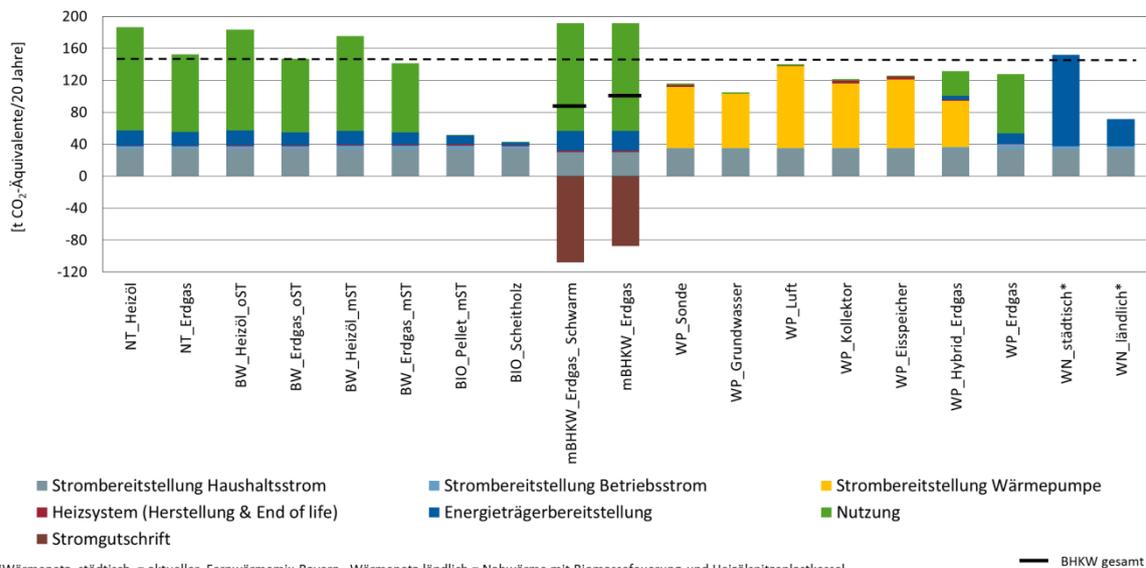


Abbildung 4-7: Altbau, Systemvergleich, Treibhausgase, Szenario 1

Analog zum Neubau ergeben sich für die biomassebasierten Technologien deutliche Vorteile gegenüber dem Referenzsystem. Die Verwendung des Pelletheizkessel zur Deckung des Nutzwärmebedarfs reduziert die Treibhausgase gegenüber dem Referenzsystem um 66 % inklusive Haushaltsstrom und um 85 % ohne Haushaltsstrom. Beim Scheitholzkessel liegt die Reduktion gegenüber dem Referenzsystem bei 72 % bzw. 92 % wenn der Haushaltsstrom nicht berücksichtigt ist.

¹²² Das System NT_Erdgas oder NT_Heizöl verwendet zunächst einen alten Niedertemperaturkessel für zehn Jahre weiter. Danach wird dieser Niedertemperaturkessel durch ein Brennwertgerät ersetzt.

Die mBHKW erzeugen im Altbau mit 1.520 Volllaststunden deutlich mehr Strom als im Neubau mit 300 Volllaststunden. So ergibt sich nicht nur absolut, sondern auch relativ eine deutlich höhere Gutschrift durch die Einspeisung des Stroms. Die Gesamtbilanz des Systems mit mBHKW, resultierend aus Herstellung und Verwertung/Entsorgung, Erdgasbereitstellung, Betrieb und zusätzlicher Strombezug aus dem Netz abzüglich Gutschrift, ist daher gegenüber dem Referenzsystem deutlich besser als beim Neubau (-32 % für mBHKW_Erdgas und -45 % für mBHKW_Erdgas_Schwarm).

Im Folgenden werden für den Altbau exemplarisch Ergebnisse weiterer Umweltkategorien gezeigt. Die Umweltkategorien Versauerung, terrestrische Eutrophierung, fotochemisches Ozonbildungspotential und Feinstaub/anorganische Emissionen zeigen tendenziell ähnliche Ergebnisse. Wesentlicher Unterschied zu den Treibhausgasen sind die teilweise höheren Umweltlasten der biomassebasierten Technologien aufgrund der Verbrennungsemissionen.

Bei den Umweltkategorien Versauerung, terrestrische Eutrophierung und fotochemisches Ozonbildungspotential führen vor allem die NO_x-Emissionen aus der Verbrennung der Biomasse (ca. 50-70 % der Gesamtemissionen und bis zu 90 % der Umweltlasten aus der Nutzung) zu den höheren Umweltlasten gegenüber dem Referenzsystem.

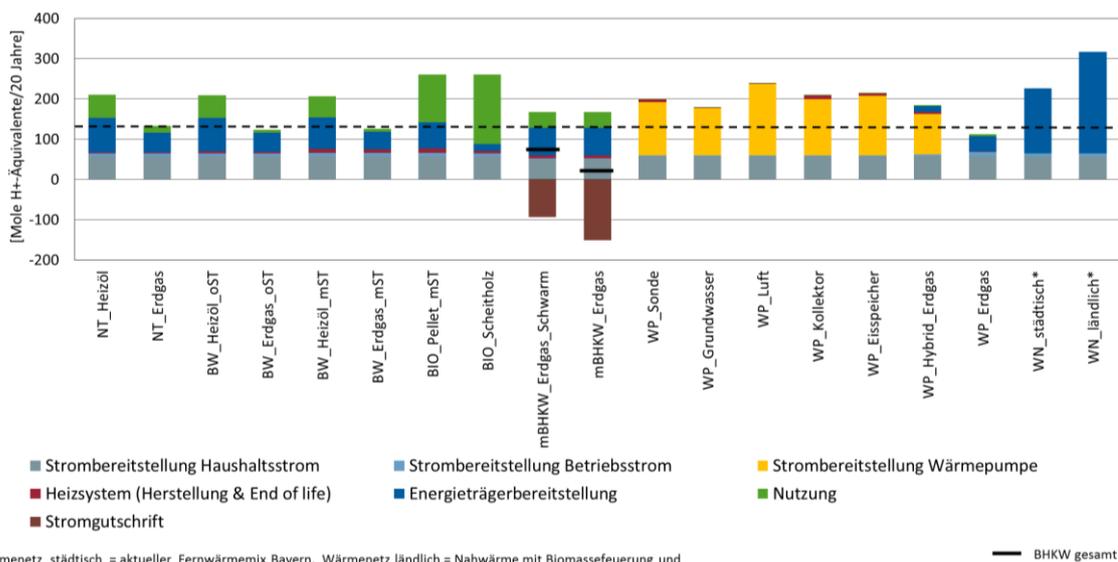


Abbildung 4-8: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Versauerung, Szenario 1

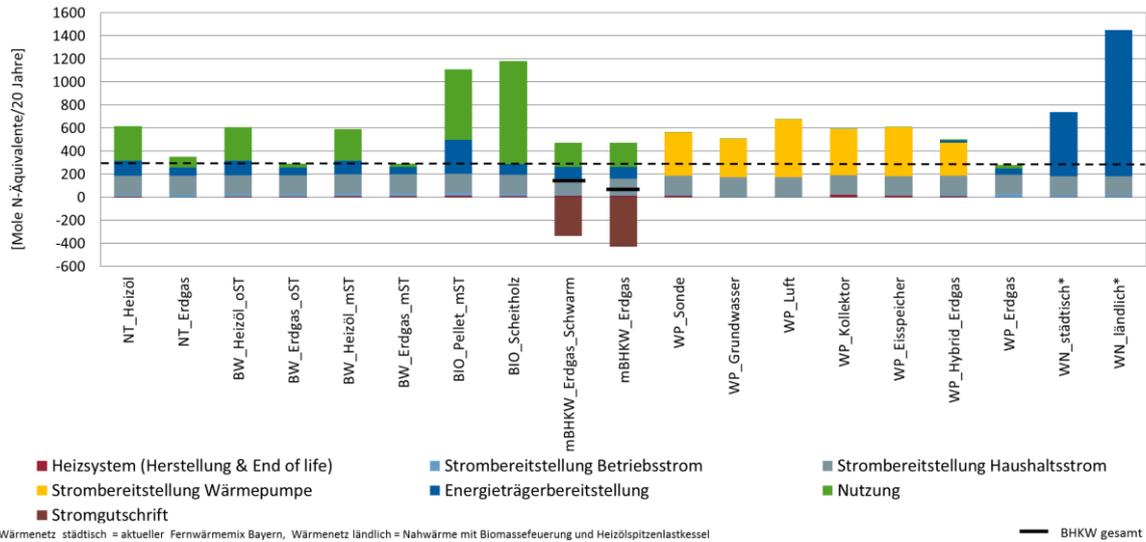


Abbildung 4-9: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich terrestrisches Eutrophierung, Szenario 1

Bei den Umweltkategorien Versauerung und terrestrische Eutrophierung fällt außerdem auf, dass die Gutschrift für das mBHKW Schwarm geringer ausfällt als für das mBHKW, das den durchschnittlichen für 2027 angenommenen Strommix für die Berechnung der Gutschrift verwendet. Der Grund hierfür liegt an der relativ sauberen Verbrennung des Erdgases in Erdgaskraftwerken im Vergleich zu Kohlekraftwerken im Strommix.

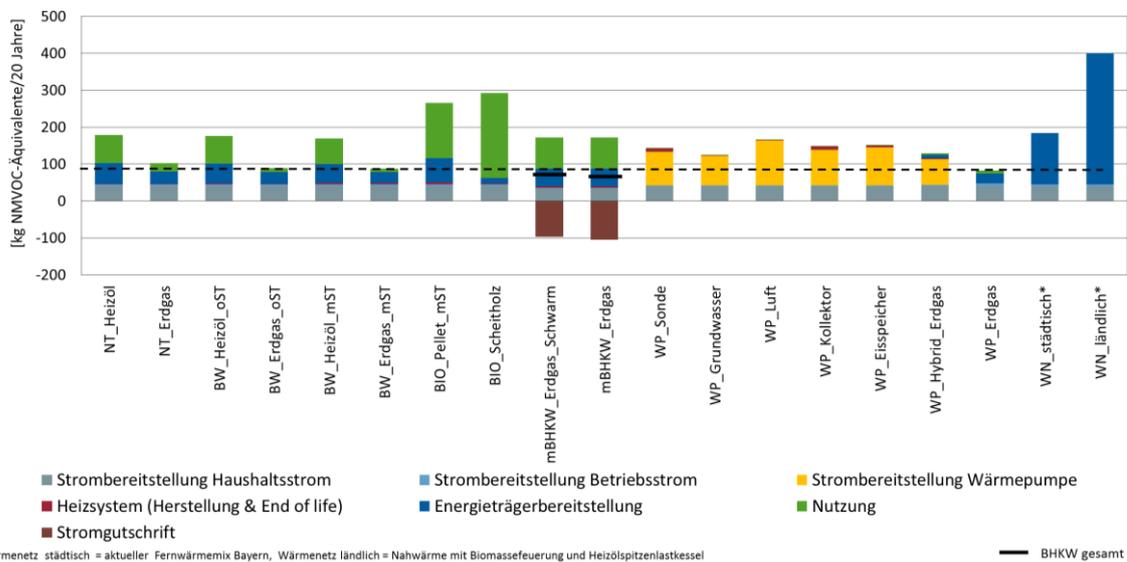


Abbildung 4-10: Altbau, Systemvergleich Fotochemisches Ozonbildungspot., Szenario 1

Bei der Umweltkategorie Feinstaub/anorganische Emissionen entfallen beim Pelletkessel ca. 50% auf die Nutzung und beim Scheitholzkessel 60%. Ca. 75% der Umweltlasten aus der Nutzung entfallen auf Staubemissionen aus der Größenklasse PM_{2.5}, weitere 20% auf Stickoxidemissionen. Ohne die Verwendung eines Staubabscheiders, der die Staubemissionen, wie oben angenommen, um 60% reduziert, wären die Gesamtemissionen des Pelletkessels über den gesamten Lebenszyklus um ca. 50% höher (26,5 kg PM_{2.5}-Äquivalente gegenüber 17,3 mit Abscheider) und beim Scheitholzkessel um ca. 60% höher (28,6 kg PM_{2.5}-Äquivalente gegenüber 17,5 mit Abscheider).

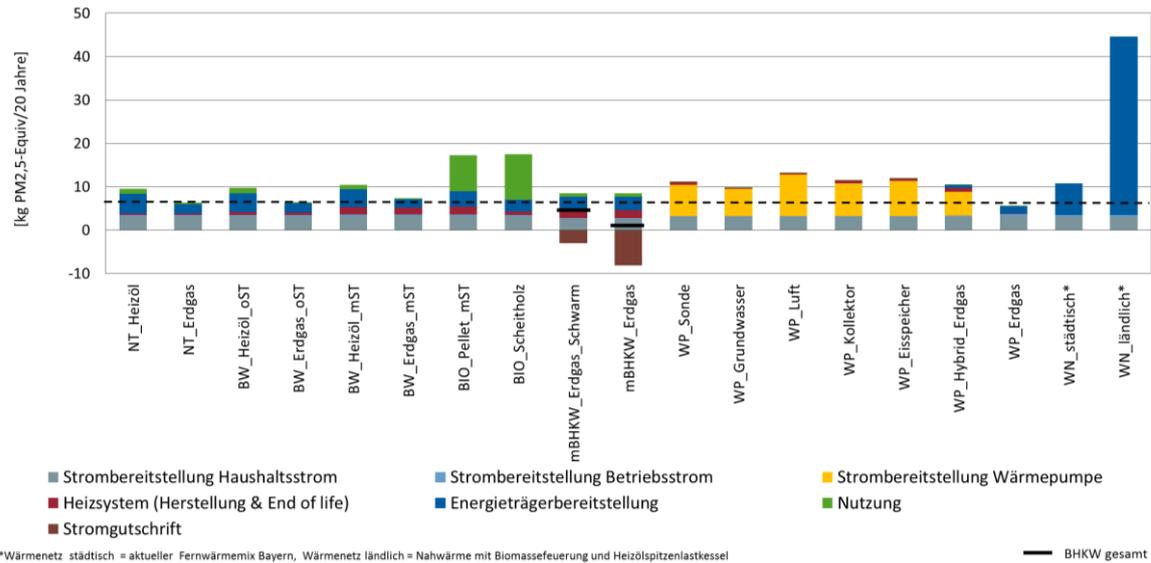


Abbildung 4-11: Altbau, Systemvergleich Feinstaub/anorganische Emissionen, Szenario 1

Für das Wärmenetz ländlich (WN_ländlich) sei an dieser Stelle noch mal erwähnt, dass mit dem Grenzwert für Staubemissionen von 20 mg/Nm³ gerechnet wurde. Bei Verwendung eines Staubabscheiders können sich die Umweltlasten aus der Verbrennung (im Diagramm in Energieträgerbereitstellung inkludiert) entsprechend deutlich reduzieren.

Der in Abbildung 4-12 gezeigte Ressourcenverbrauch spiegelt im Wesentlichen den Einsatz und die Art der eingesetzten Infrastruktur wieder. Aufgrund der in der Methode verwendeten Charakterisierung der Ressourcen ist der Einfluss der fossilen Ressourcen marginal, daher hat die Energieträgerbereitstellung bzw. Nutzung bei den Niedertemperatur- und Brennwertgeräten sowie bei den Biomassekessel kaum Einfluss auf den gesamten Ressourcenverbrauch.

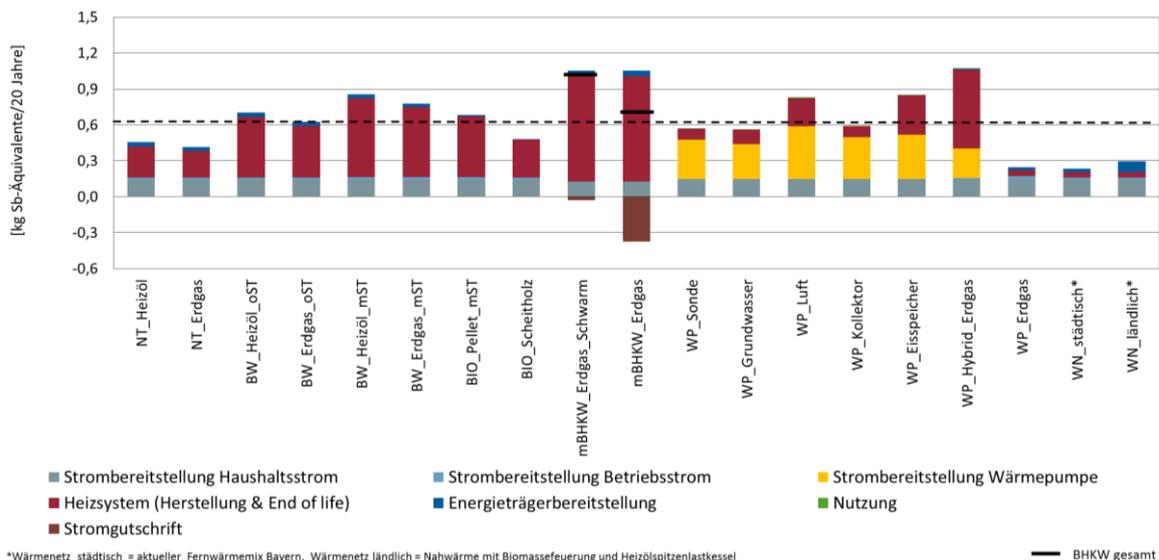


Abbildung 4-12: Altbau, Systemvergleich Ressourcenverbrauch (fossil & mineralisch), Szenario 1

Brennwertgeräte beinhalten zur Vermeidung von Korrosion aufgrund der Kondensatbildung einen größeren Anteil an höher legierten Stählen als dies beispielsweise bei Niedertemperaturgeräten der Fall ist. NT_Erdgas und NT_Heizöl enthalten jeweils einen halben Brennwertkessel, da dieser nur in

der zweiten Hälfte des Bilanzzeitraumes eingesetzt wird und noch weitere zehn Jahre betrieben werden kann. Der Niedertemperaturkessel, der in den ersten 10 Jahren verwendet wird, ist zuvor bereits 20 Jahre gelaufen, somit ökonomisch abgeschrieben und die Infrastruktur ebenfalls ökologisch abgeschrieben.

Bei den mBHKW zeigt sich für das mBHKW_Erdgas_Schwarm eine deutlich geringere Gutschrift als für das mBHKW_Erdgas, da der Ressourcenverbrauch des durchschnittlichen Strommixes, der zur Berechnung der Gutschrift verwendet wird, vor allem durch den Anteil an Strom aus Photovoltaik-Anlagen und Windkraft-Anlagen resultiert.

Bei den Wärmenetzen zeigt sich der Vorteil einer durch viele Nutzer geteilten Infrastruktur. Die Netzinfrastruktur wurde sowohl für das städtische als auch für das ländliche Wärmenetz, auf Basis der in den verwendeten Statistiken [AGFW 2015, C.A.R.M.E.N. e.V. 2016a] angegebenen Netzlängen, berücksichtigt. Die Materialzusammensetzungen sowie die Annahmen zur Lebensdauer wurden der Studie MaRes - Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen [Wuppertal 2011] entnommen.

(Teil-)sanierter Altbau, mittlerer Warmwasserverbrauch

Die Ergebnisse des (teil-)saniereten Altbaus sind, wie bereits zuvor bei Neubau und Altbau, durch den Nutzwärmebedarf des Gebäudes bestimmt. Der spezifische Heizwärmebedarf des (teil-) saniereten Altbaus beträgt 68 kWh/(m²*a). Für die Annahmen zur energetischen Sanierung des Gebäudes ergibt sich entsprechend eine Reduktion des Heizwärmebedarfs von ca. 60%. Entsprechend liegen die Emissionen aus Nutzung und Energieträgerbereitstellung bei den Heizkesseln bzw. Strombereitstellung für Wärmepumpen zwischen denen des Neubaus und Altbaus. Für das Referenzgerät Erdgasbrennwertkessel ohne Solarthermie (BW_Erdgas_oST) ergibt sich für Nutzung und Energieträgerbereitstellung gegenüber dem Altbau, aufgrund der Annahmen zur energetischen Sanierung, eine Reduktion der Treibhausgase von ca. 55% inklusive Trinkwarmwasserbereitstellung.

Der Anteil des Haushaltsstroms wird beim Referenzgerät, verglichen mit dem unsanierten Altbau, in dem lediglich die Heizgeräte ausgetauscht werden, wieder relevanter (38 % der gesamten über die Lebensdauer von 20 Jahren erzeugten Treibhausgasemissionen).

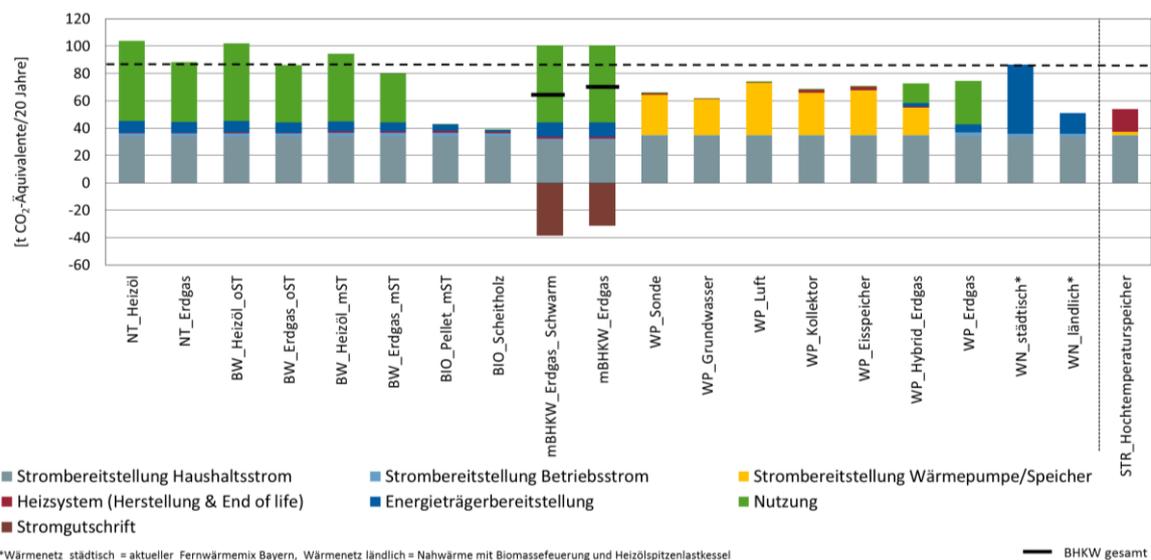


Abbildung 4-13: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich Treibhausgase, Szenario 1

Ergebnisse der Gewichtung

Nachfolgend werden die Ergebnisse nach Gewichtung für die drei Gebäudetypen im Szenario I dargestellt. Für die Normierung wurden die in Abschnitt 4.1.5 dargestellten Normierungsfaktoren verwendet. Durch das Dividieren der Umweltlasten einer Umweltwirkungskategorie durch den verwendeten Normierungsfaktor für diese Umweltwirkungskategorie (siehe Tabelle 4-3), der in der Theorie die Gesamtheit der Umweltlasten einer Umweltwirkungskategorie in der Europäischen Union pro Einwohner darstellt, wird das betrachtete Produktsystem in Beziehung zu den gesamten Umweltlasten einer Umweltwirkungskategorie in der Region Europäische Union gestellt. Die Division der Umweltlasten des Produktsystems durch die Umweltlast eines durchschnittlichen Einwohners der EU wird für alle Umweltwirkungskategorien durchgeführt, so dass die Verhältnisse der Umweltlasten des Produktsystems an den Gesamtumweltlasten einer Umweltwirkungskategorie miteinander verglichen werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Normierung zunächst keine Gewichtung der verschiedenen Wirkungskategorien darstellt sondern nur die Anteile der Umweltlasten an den Gesamtumweltlasten einer Region vergleichbar macht. Ein höheres Ergebnis einer Umweltwirkungskategorie nach Normierung drückt also den höheren Anteil des Produktsystems an den gesamten Umweltlasten dieser Wirkungskategorie in der Region aus.

Die Division der Umweltlasten einer Umweltwirkungskategorie durch den Normierungsfaktor dieser Umweltwirkungskategorie führt zu einer dimensionslosen Zahl, durch die anschließende Multiplikation mit dem Gewichtungsschlüssel ergeben sich die gewichteten Ergebnisse. Um den Einfluss der Normierung auf die Ergebnisse sichtbar zu machen, werden zunächst exemplarisch alle Wirkungskategorien gleichgewichtet dargestellt, dies entspricht einer Darstellung der normierten Ergebnisse, allerdings gestapelt, um alle Wirkungskategorien und Technologien in einem Diagramm darstellen zu können.

Die normierten und gleichgewichteten Ergebnisse für den Neubau zeigen, dass es zwischen den Systemen keine besonders großen Unterschiede gibt. Dieser Umstand resultiert wie oben bei den Treibhausgasen (siehe Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6) vor allem aus den absoluten Umweltlasten des Haushaltsstroms, der für alle Systeme gleich ist.

Die Darstellung der Ergebnisse zeigt, dass die Systeme bei einigen Umweltkategorien relativ zu den gesamten Umweltlasten einer Umweltkategorie in der betrachteten Region (EU-27) deutlich höhere Umweltlasten haben als bei anderen. Dies ist vor allem für die Kategorien Treibhausgase, Ressourcenverbrauch sowie für Heizkessel, die Heizöl und Biomasse verwenden, auch für einige Toxizitätsindikatoren der Fall.

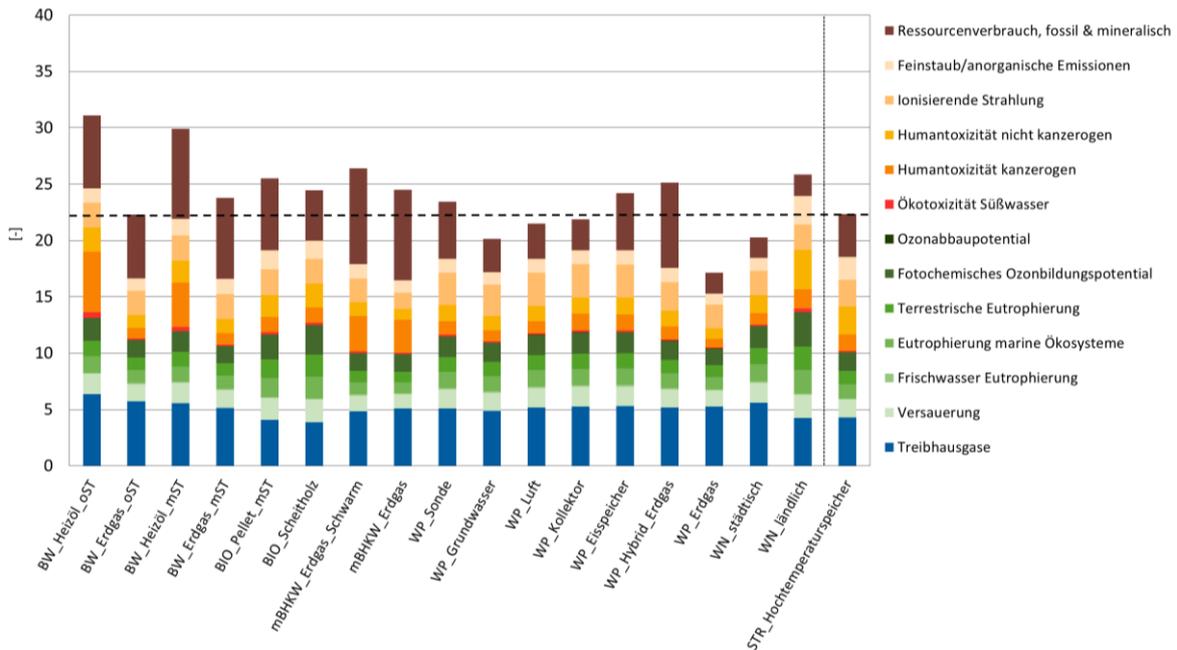


Abbildung 4-14: Neubau, Systemvergleich, gleichgewichtet, Szenario 1

Die normierten und gleichgewichteten Ergebnisse des Altbaus und des (teil-)sanierten Altbaus zeigen eine deutlichere Differenzierung zwischen den Systemen, da der Einfluss der Nutzwärmebereitstellung und damit die Unterschiede, die sich aus der Nutzung der Heizgeräte ergeben, deutlich relevanter als beim Neubau sind.

Die Biomassekessel haben bei den Umweltkategorien Feinstaub/anorganische Emissionen, Humantoxizität, terrestrische und marine Eutrophierung sowie fotochemisches Ozonbildungspotential, aufgrund höherer NO_x, CO, Staub und Schwermetallemissionen aus der Nutzungsphase, eine höhere Relevanz bei den gleichgewichteten Ergebnissen als beim Referenzgerät. Diese höheren Ergebnisse bei den genannten Wirkungskategorien werden teilweise durch geringere Treibhausgase bei den Biomassekesseln kompensiert.

Bei den mBHKW ergeben sich bei den gleichgewichteten Ergebnissen aufgrund des Beitrags der Formaldehydemissionen zur Humantoxizität kanzerogen keine Vorteile (Schwarm) bzw. geringe Vorteile beim mBHKW mit durchschnittlicher Stromgutschrift.

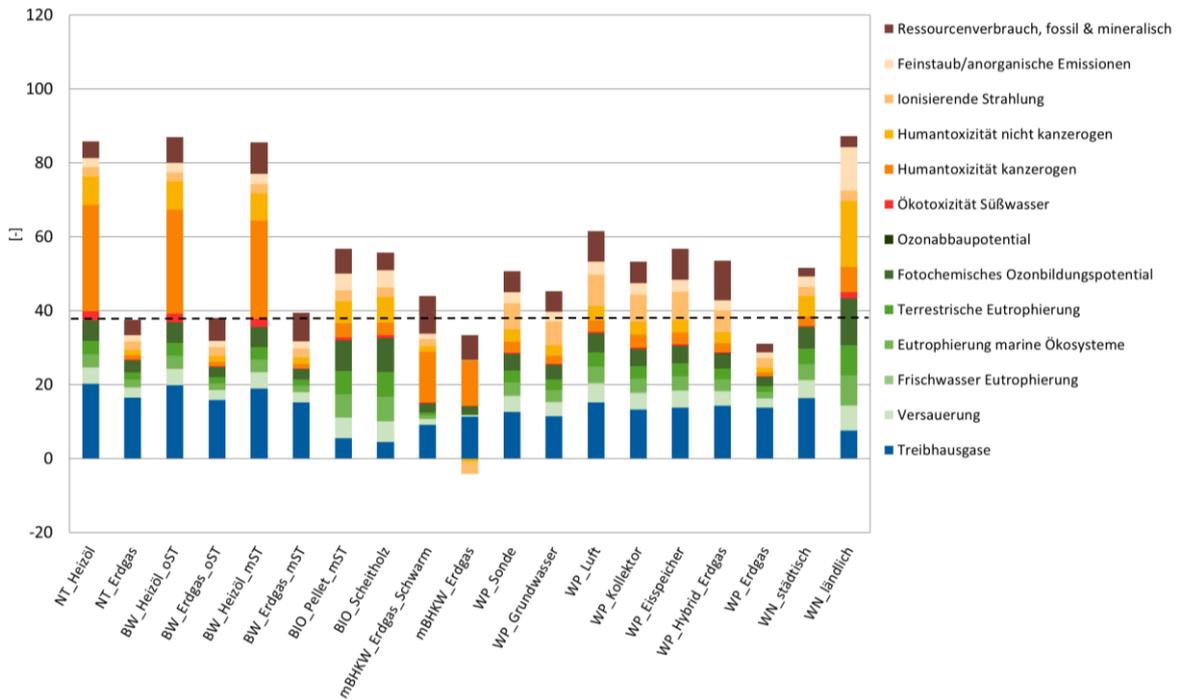


Abbildung 4-15: Altbau, Systemvergleich, gleichgewichtet, Szenario 1

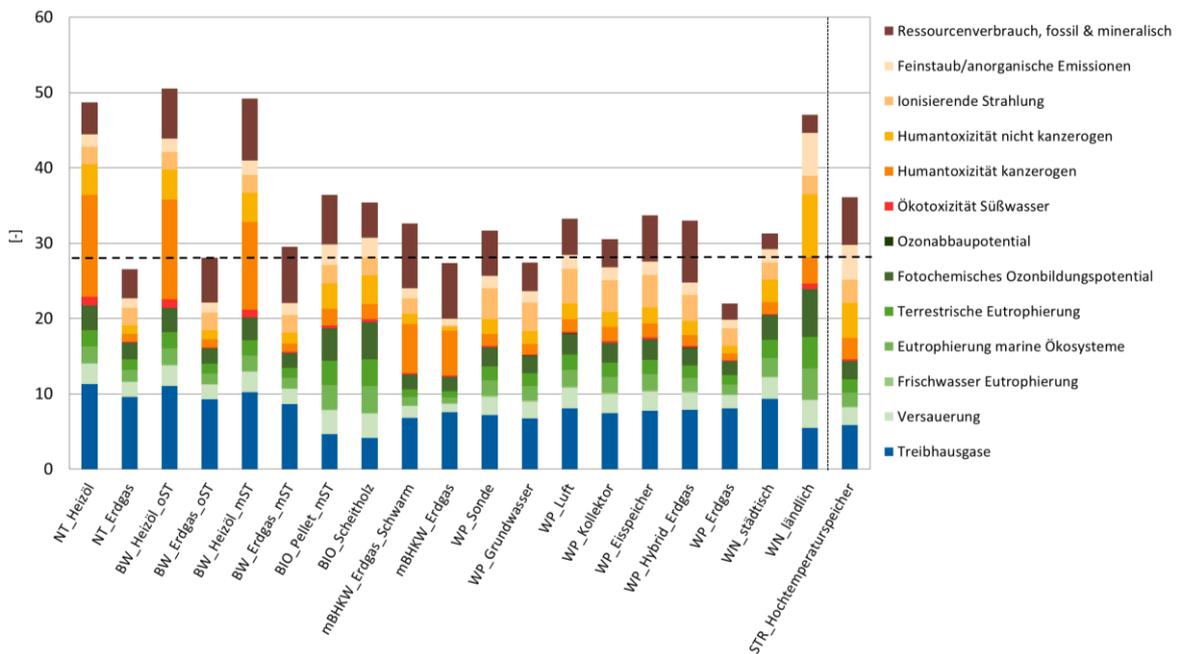


Abbildung 4-16: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich, gleichgewichtet, Szenario 1

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die drei Gebäudetypen im Szenario 1 unter Anwendung des Gewichtungsschlüssels (siehe Tabelle 4-5) dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 4.1.5 ausgeführt, basiert der Gewichtungsschlüssel immer auch auf subjektiven Werthaltungen. Er wird mit den Ergebnissen der Normierung multipliziert, die zusätzlich die methodischen Unsicherheiten bei der Erhebung bzw. Abschätzung der Normierungsfaktoren beinhalten. Normierung und Gewichtung sind

daher als Versuch zu verstehen, die unterschiedlichen Ergebnisse der Systeme in den verschiedenen Umweltkategorien beim Vergleich besser einordnen zu können. Die Ergebnisse können daher eine Hilfestellung sein, zu verstehen, welche Umweltkategorien mehr in den Fokus rücken sollten und welche zukünftigen Entwicklungen die Ergebnisse verändern bzw. die Umweltlasten einzelner Technologien reduzieren könnten.

Durch die Gewichtung bekommen einzelne Wirkungskategorien gegenüber den gleichgewichteten Ergebnissen einen höheren Einfluss im Gesamtergebnis, insbesondere die Treibhausgase mit 27,4 %. Bei anderen wird der Einfluss reduziert, z. B. Ozonabbaupotential mit 4,8 %.

Ein Vergleich der Ergebnisse für Neubau, Altbau und (teil-)saniertem Altbau in Abbildung 4-17 bis Abbildung 4-19, zeigt zunächst wieder den deutlichen Einfluss, den die unterschiedlichen Heizwärmebedarfe der Gebäude auf die Umweltwirkungen haben. Während die Unterschiede zwischen den Technologien beim Neubau, aufgrund des geringeren Einflusses der Nutzung der Heizgeräte und der Bereitstellung von Brennstoffen und Strom für die Wärmepumpen, weniger stark ausgeprägt sind (-19 % bis +27 % gegenüber Referenzgerät), sind die Unterschiede beim Altbau und (teil-)saniertem Altbau deutlich stärker ausgeprägt (-38 % bis +70 % gegenüber Referenzgerät beim Altbau).

Die in Abbildung 4-17 gezeigten gewichteten Ergebnisse für den Neubau zeigen eine Dominanz der Treibhausgase in den aggregierten Single-Scores. Durch die stärkere Gewichtung der Umweltkategorie Treibhausgase ergeben sich für die Biomasse nutzenden Technologien geringere Umweltlasten als für das Referenzgerät Erdgasbrennwert ohne Solarthermie. Ähnlich gut schneiden teilweise die Wärmepumpen (Grundwasser, Luft, Kollektor) sowie die Wärmenetze ab. Diese haben beide überwiegend aufgrund geringerer Umweltlasten der Kategorie Ressourcenverbrauch Vorteile. Eine ausführliche Diskussion über die Unsicherheiten bei dieser Umweltkategorie findet nachfolgend für die Speichersysteme statt.

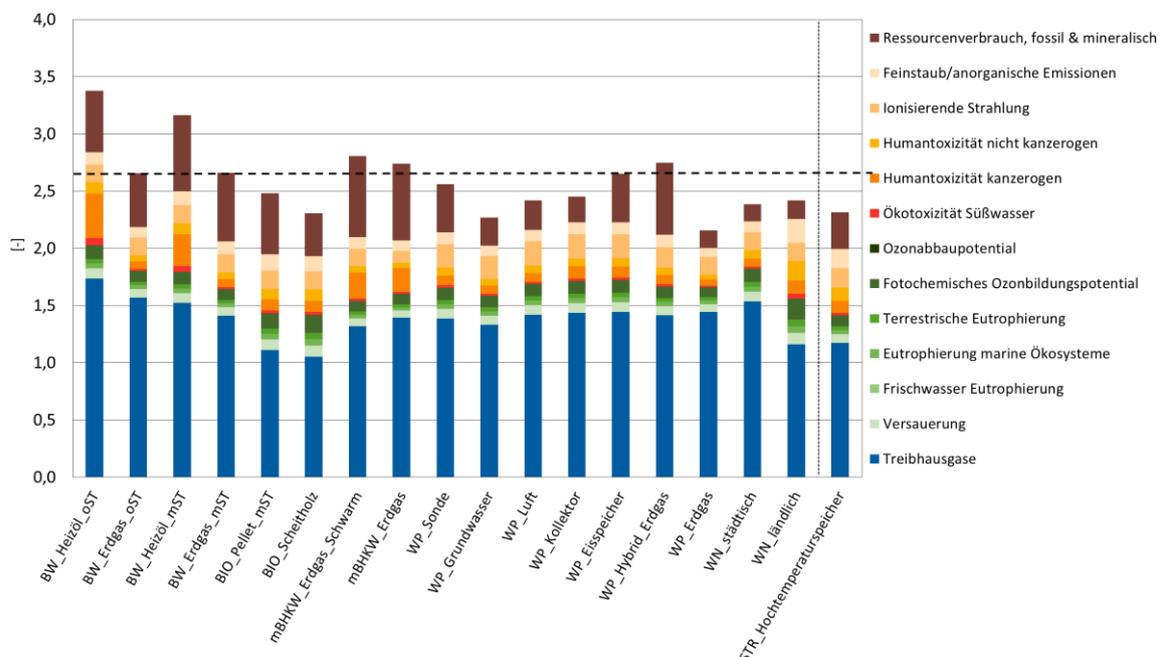


Abbildung 4-17: Neubau, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1

Die relativen Unterschiede der verschiedenen Technologien sind aufgrund der Inkludierung des Haushaltsstroms nicht sehr groß. Es dominieren die unterschiedlichen Treibhausgasemissionen aus der Nutzung, die ein Vergleich der Technologie Brennwert Heizöl ohne Solarthermie und Scheitholzkessel am besten verdeutlicht. Des Weiteren bestehen vor allem Unterschiede beim

Ressourcenverbrauch aufgrund der eingesetzten Infrastrukturen und der teilweise geringen Auslastungen (mBHKW) oder der, trotz des geringen Nutzwärmebedarfs, kaum geringeren Materialintensität verglichen mit Altbau oder (teil-)sanierten Altbau.

Das *mBHKW_Erdgas* verfügt normiert und gewichtet über eine geringere Umweltlast als das *mBHKW_Erdgas Schwarm*. Dieser Umstand lässt sich damit erklären, dass das *mBHKW_Erdgas Schwarm* zwar eine höhere Gutschrift bei den Treibhausgasen erhält, bei mehreren anderen Umweltkategorien aber eine geringere, da das substituierte Erdgaskraftwerk über sehr geringe Verbrennungsemissionen (NO_x, SO_x, Feinstaub, Schwermetalle, etc.) verfügt. Analog zu den oben gezeigten Ergebnissen der einzelnen Wirkungskategorien beim Altbau sei hier erwähnt, dass dieser Vorteil stark vom angenommenen Strommix abhängt und sich entsprechend ändern kann. Des Weiteren wurde der Einfluss der Netzdienlichkeit, z. B. der Einfluss auf den Netzausbau oder die Notwendigkeit von Speichern in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

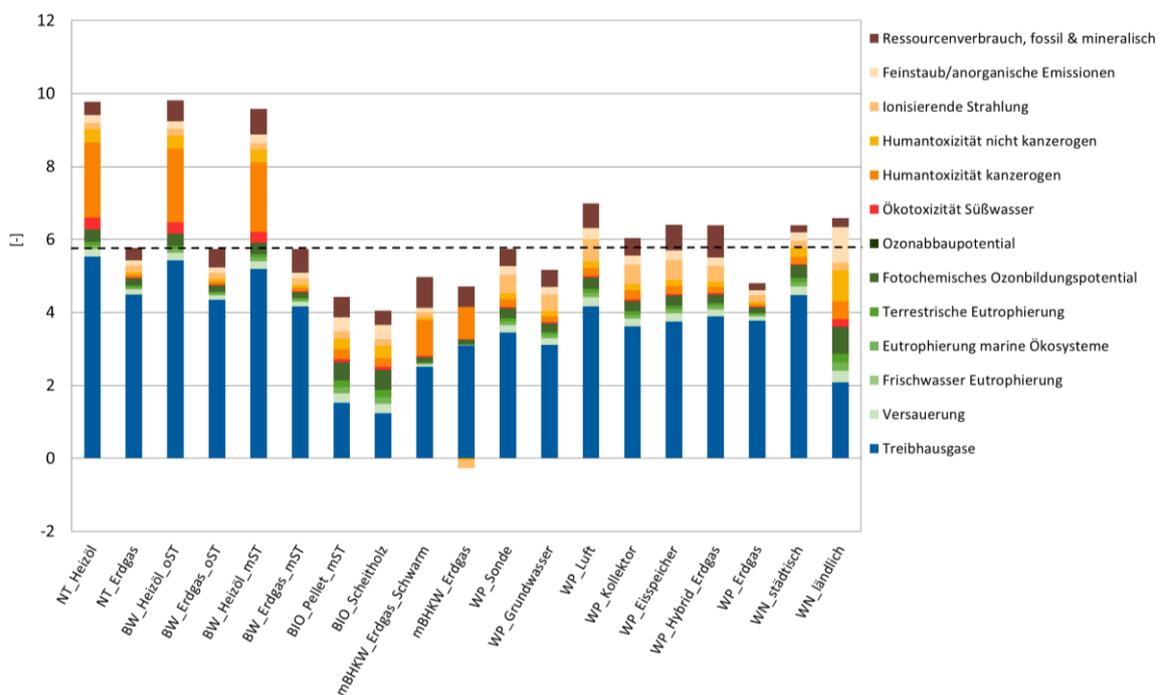


Abbildung 4-18: Altbau, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1

Die in Abbildung 4-18 gezeigten gewichteten Ergebnisse für den Altbau zeigen ein deutlich differenzierteres Bild. Die Heizgeräte, die Heizöl verwenden, verfügen aufgrund der Gewichtung der Umweltkategorie Treibhausgase sowie der Kategorie Humantoxizität kanzerogen (v.a. aus der Heizölbereitstellung) über die höchsten Umweltlasten. Die Unterschiede zwischen Niedertemperatur- und Brennwertkessel mit und ohne Solarthermie sind hingegen gering. Ähnlich gibt es bei den verschiedenen Systemen mit Erdgaskessel kaum Unterschiede bei den Ergebnissen.

Bei den elektrischen Wärmepumpen erreichen mit dem verwendeten Strommix nur die Grundwasserwärmepumpe geringere Umweltlasten als die Referenztechnologie. Die Wärmepumpe mit Erdwärmesonde erreicht ein vergleichbares Ergebnis wie die Referenztechnologie. Potentielle Vorteile, die sich durch eine intelligente Steuerung in Kombination mit dem Warmwasserpufferspeicher bei elektrisch betriebenen Wärmepumpen ergeben könnten, wie die Verwendung von Strom zu Zeiten mit viel Erzeugung aus Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen, sind nicht berücksichtigt.

Die Erdgaswärmepumpe verfügt nach den mBHKWs aufgrund der höheren Effizienz gegenüber den Brennwert Erdgaskesseln und den insgesamt geringen Verbrennungsemissionen über das beste

Umweltprofil. Beim (teil-)sanierten Altbau ist das Umweltprofil der Erdgaswärmepumpe, aufgrund der geringen Volllaststunden bei den mBHKW und den damit verbundenen geringen Stromeinsparungen, am besten (siehe Abbildung 4-19).

Die Erdgaswärmepumpe verfügt aufgrund der höheren Effizienz gegenüber den Brennwert Erdgaskesseln und den insgesamt geringen Verbrennungsemissionen über 16% geringere Umweltlasten beim Altbau und 19% geringere Umweltlasten beim (teil-)sanierten Altbau.

Aufgrund des Gewichtungsschlüssel und der CO₂ neutralen Nutzung ergeben sich für die Biomasse nutzenden Systeme deutliche Vorteile bei den Treibhausgasen gegenüber den anderen Systemen. Diese Vorteile werden gegenüber dem Referenzgerät Brennwertkessel Erdgas ohne Solarthermie teilweise durch höhere Verbrennungsemissionen bei den Biomassekesseln, wie NO_x, CO, Staub und Schwermetalle reduziert. Für den Pelletkessel (Bio_Pellet_mST) ergeben sich im Altbau 23% geringere Umweltlasten gegenüber dem Referenzgerät und 15% geringere Umweltlasten im (teil-)sanierten Altbau. Für den Scheitholzkessel ergeben sich im Altbau 30% geringere Umweltlasten gegenüber dem Referenzgerät und 21% geringere Umweltlasten im (teil-)sanierten Altbau.

Wichtig zu berücksichtigen ist bei den Ergebnissen für Pellet- und Scheitholzkessel, dass sich die Ergebnisse auf Systeme mit Partikelabscheider beziehen. Beim WN_ländlich wurden für den Biomassekessel die Feinstaubgrenzwerte von 20 mg/Nm³ angenommen, dadurch ergeben sich deutlich höhere Umweltlasten bei den Umweltkategorien Feinstaub/anorganische Emissionen sowie Humantoxizität. Bei Verwendung von Staubabscheidern könnten sich die Umweltlasten für das ländliche Wärmenetz (WN_ländlich) entsprechend teilweise reduzieren (ca. 50% des Abstandes zu Bio_Pellet_mST).

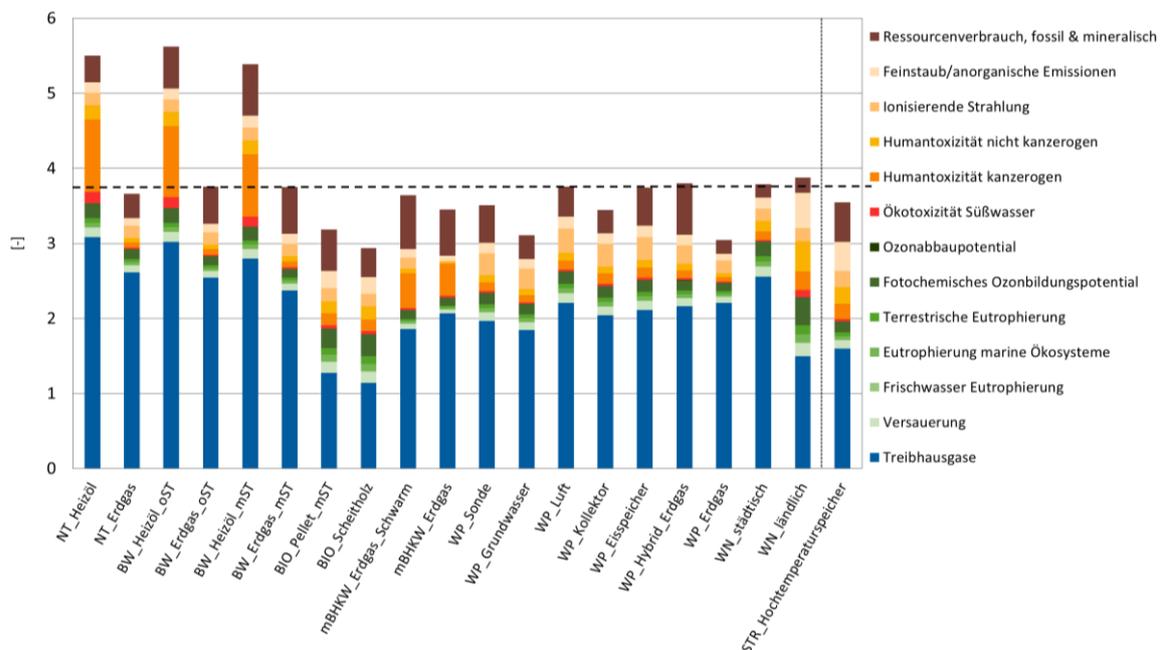


Abbildung 4-19: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1

Speichersysteme

Die im Folgenden gezeigten Diagramme zeigen die Ergebnisse für den Speichersystemvergleich. Die Speichersysteme werden innerhalb eines Neubaus mit Luftwärmepumpe und Photovoltaikanlage eingesetzt, siehe Abschnitt 2.3.2 für eine detaillierte Beschreibung. Bei der Referenztechnologie ohne Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte

Warmwasserpufferspeicher und ohne Batterie, kann der benötigte Haushaltsstrom, Betriebsstrom und Wärmepumpenstrom nur bei zeitlicher Übereinstimmung von Produktion und Bedarf durch die hauseigene Photovoltaikanlage gedeckt werden. Beim System mit Pufferspeicher aber ohne Batterie, wird ein Teil des Photovoltaikstroms durch die Luftwärmepumpe zur Produktion von Wärme verwendet und diese gespeichert.

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Abbildung 4-20 zeigt die Treibhausgase für die Strom- und Nutzwärmebereitstellung im Neubau mit Luftwärmepumpe, Photovoltaikanlage und unterschiedlichen Systemen zur teilweisen Speicherung des produzierten Photovoltaikstroms. Bei dem System ohne Batterie und Pufferspeicher wird der überwiegende Teil des produzierten Photovoltaikstroms ins Netz eingespeist, entsprechend muss auch am meisten Strom aus dem Netz für den Haushalt und zum Betrieb der Wärmepumpe entnommen werden. Vergleicht man die Treibhausgasemissionen für Infrastruktur (Photovoltaikanlage, Wärmepumpe etc.) und Stromversorgung abzüglich der berechneten Gutschrift mit den Treibhausgasemission der Luftwärmepumpe im Neubau ohne Photovoltaikanlage in Abbildung 4-5, ergibt sich eine Reduktion von 48 t auf 15,7 t über den gesamten Betrachtungszeitraum von 20 Jahren.

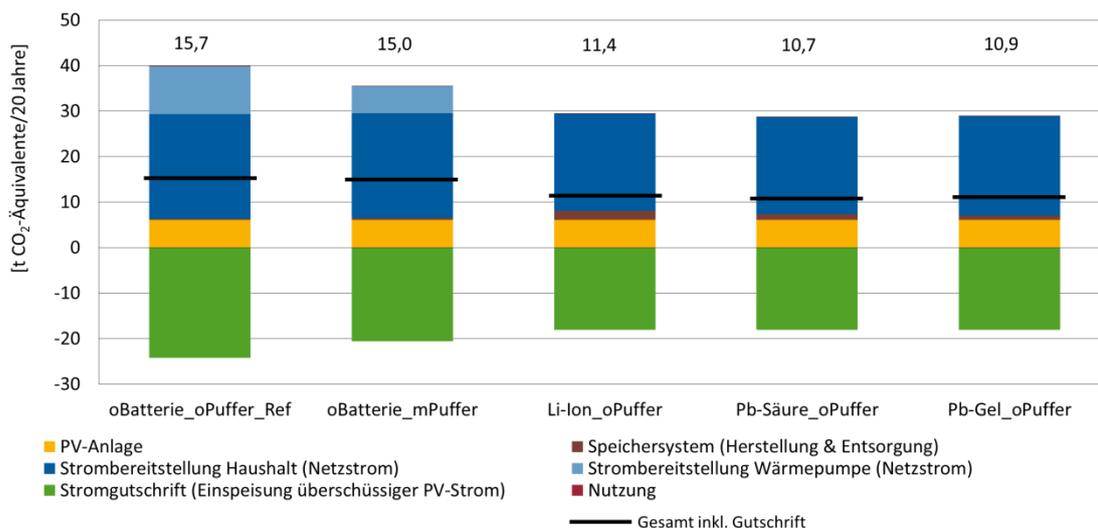


Abbildung 4-20: Neubau, Speichersystemvergleich Treibhausgase, Szenario 1

Die Verwendung eines Pufferspeichers ermöglicht einen Teil des produzierten Photovoltaikstroms zeitlich entkoppelt vom Bedarf, hauptsächlich zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser außerhalb der Heizperiode, zu verwenden. Entsprechend reduziert sich analog zum geringeren Netzbezug für die Luftwärmepumpe auch die Einspeisung ins Netz. Für die Berechnung der Gutschrift der beiden Systeme ohne Batterie wurde ein zum Zeitpunkt der Einspeisung repräsentativer Strommix berechnet, der sich somit vom durchschnittlichen Strommix für Strombezug aus dem Netz oder bei Einspeisung mit Batterie unterscheidet. Details für die verwendeten Strommixe zur Berechnung der Gutschriften finden sich in Abschnitt 4.1.1. Aufgrund der unterschiedlichen Strommixe für Bezug aus dem Netz und Einspeisung sowie den unterschiedlichen Mengen, ergibt sich für das System mit Pufferspeicher ein kleiner ökologischer Vorteil von 0,7 t CO₂-Äquivalenten / 20 a.

Bei den Systemen mit Batterie erhöht sich die Eigennutzung der Photovoltaikanlage, sodass weniger Strom ins Netz eingespeist wird und weniger Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Wie in Abschnitt 4.1.1 diskutiert, kann die Batterie dafür eingesetzt werden, die Einspeisung des Stroms während der Produktionsspitze in der Mittagszeit deutlich zu reduzieren. Für die Berechnung der Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte

Gutschrift wurde der durchschnittliche Strommix verwendet.¹²³ Die Treibhausgase reduzieren sich gegenüber dem Referenzsystem aufgrund der verwendeten Batteriespeicher um 26 – 31 % bzw. 4,3 t CO₂-Äquivalenten / 20 a.

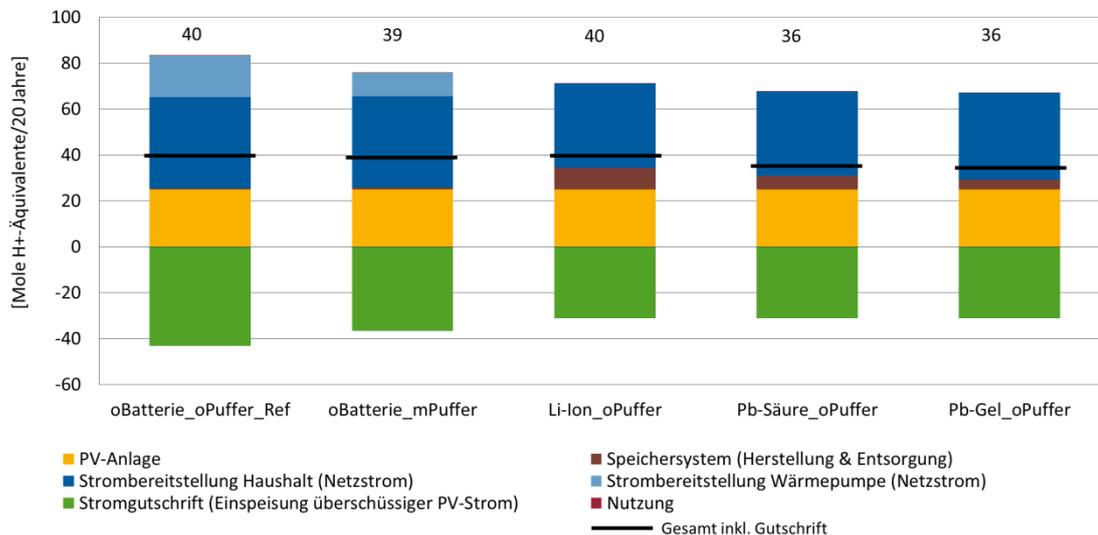


Abbildung 4-21: Neubau, Speichersystemvergleich Versauerung, Szenario 1

Exemplarisch für eine Reihe von Wirkungskategorien zeigt die Darstellung der Kategorie Feinstaub in Abbildung 4-22, dass der Vorteil der Speicherung durch die mit der Erzeugung der Batteriespeicher verbundenen Umweltlasten aufgezehrt werden kann. Etwas deutlicher wird dies für den Ressourcenverbrauch in Abbildung 4-23, der für alle drei Batteriespeicher gegenüber den beiden Systemen ohne Batterie höhere Umweltlasten in dieser Wirkungskategorie aufweist.

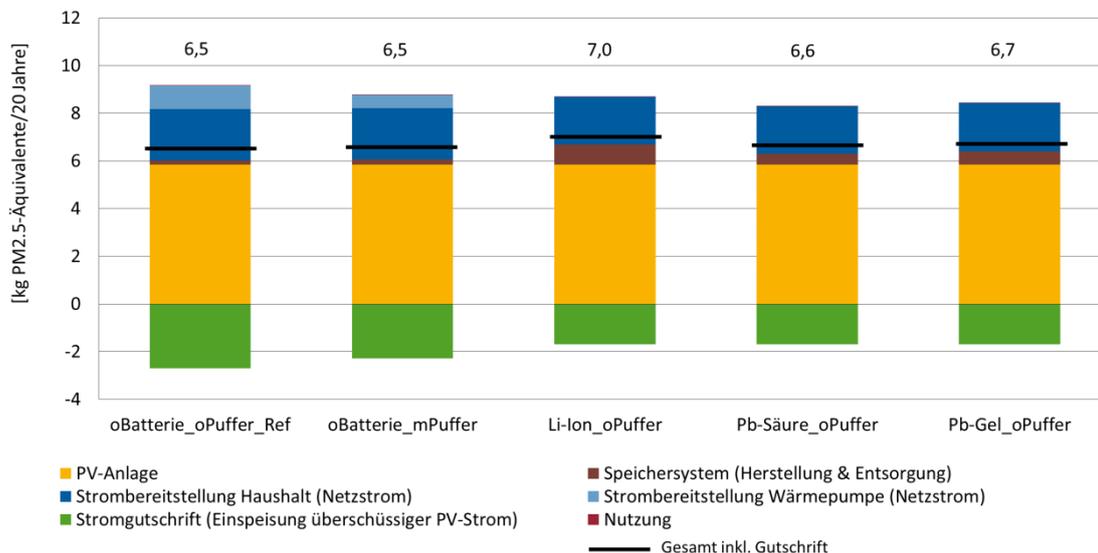


Abbildung 4-22: Neubau, Speichersystemvergleich Feinstaub, Szenario 1

¹²³ Es ist zu berücksichtigen, dass eine intelligente Steuerung oder ganz allgemein die Netzdienlichkeit der Batterie in dieser Studie nicht weiter analysiert und betrachtet wurde.

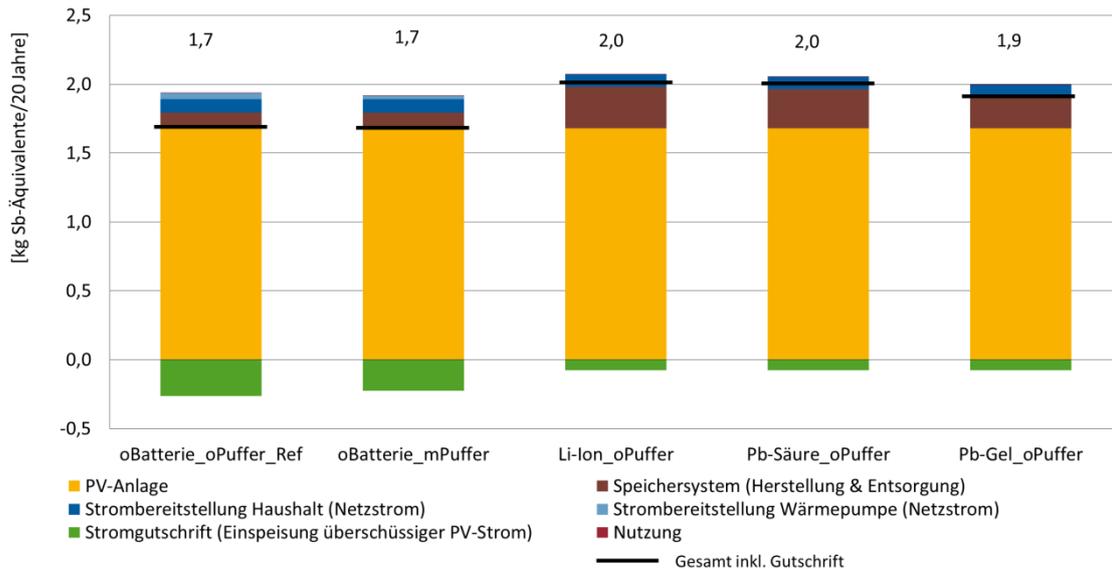


Abbildung 4-23: Neubau, Speichersystemvergleich Ressourcenverbrauch, Szenario 1

Ergebnisse der Gewichtung

Bei der Darstellung der betrachteten Wirkungskategorien in Abschnitt 4.1.4 wurde bereits erörtert, dass es bei der Verwendung der nach dem ILCD Handbook [JRC 2011b] empfohlenen Methodik für die Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch aktuell mehrere Diskussionspunkte gibt. Zunächst gibt es Diskussionen über den zu verwendenden Ressourcenbegriff und die damit verbundenen Charakterisierungsfaktoren. Van Oers und Guinée [Oers 2016] haben den aktuellen Stand der Diskussion zusammengefasst. Aktuell werden in einem Forschungsprojekt des JRC (Europäische Kommission) die Empfehlungen zu den drei Wirkungskategorien Landnutzung, Wasserverbrauch sowie Ressourcenverbrauch überarbeitet [JRC 2016]. Des Weiteren führt die Normierung bei der aktuell empfohlenen Methode aufgrund der Importabhängigkeit zu einer sehr starken Relevanz, die zwar auf der einen Seite ein reales Problem widerspiegelt, auf der anderen Seite aber auch von den zuvor genannten Punkten beeinflusst ist. Aus diesen Gründen werden die Ergebnisse für die Speichersysteme zunächst ohne die Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch dargestellt.

Bei den normierten und mit dem Gewichtungsschlüssel aus Tabelle 4-5 gewichteten Ergebnissen ohne Ressourcenverbrauch in Abbildung 4-24 ergeben sich für die Systeme mit Batterie gegenüber dem Referenzsystem Vorteile von 9 % für das System mit Lithiumionenbatterie und 10 % für die Systeme mit Bleibatterie. Da sich diese 9-10 % Einsparung für die Batteriespeicher auf das Gesamtsystem beziehen und somit auf die Herstellung aller anlagentechnischen Komponenten inklusive Photovoltaikanlage sowie die Bereitstellung der Nutzwärme mittels Luftwärmepumpe und des Haushaltsstroms, kann die Verwendung eines Batteriespeichers zu relevanten Einsparungen der Umweltlasten führen, sofern der Ressourcenindikator aufgrund seiner methodischen Unsicherheiten ausgeschlossen wird.

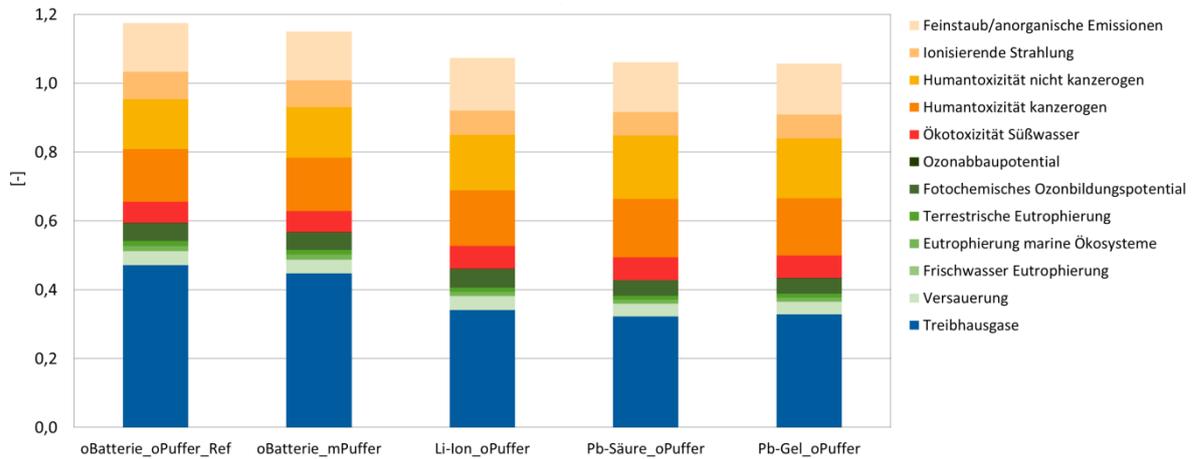


Abbildung 4-24: Neubau, Speichersystemvergleich nach Gewichtung (ohne Ressourcenverbrauch), Szenario 1

Unter Einbezug des Ressourcenverbrauches in die Ergebnisse ergeben sich aufgrund des Ressourceneinsatzes für die Herstellung der Photovoltaikanlage und der Batterie sowie der Verwendung des bereits diskutierten Normierungsfaktors für den Ressourcenverbrauch eine deutlich höhere Umweltlast und keine ökologischen Vorteile für die Systeme mit Batterie. Dieser Umstand liegt neben dem Ressourcenverbrauch für die Batterien vor allem auch in den unterschiedlichen Strommischen für die Berechnung der Gutschriften begründet. Der für die Systeme ohne Batterie verwendete Strommix mit mehr Photovoltaikstrom (siehe Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4) führt bei den Treibhausgasen zu geringeren Gutschriften beim Ressourcenverbrauch aber zu größeren Gutschriften.

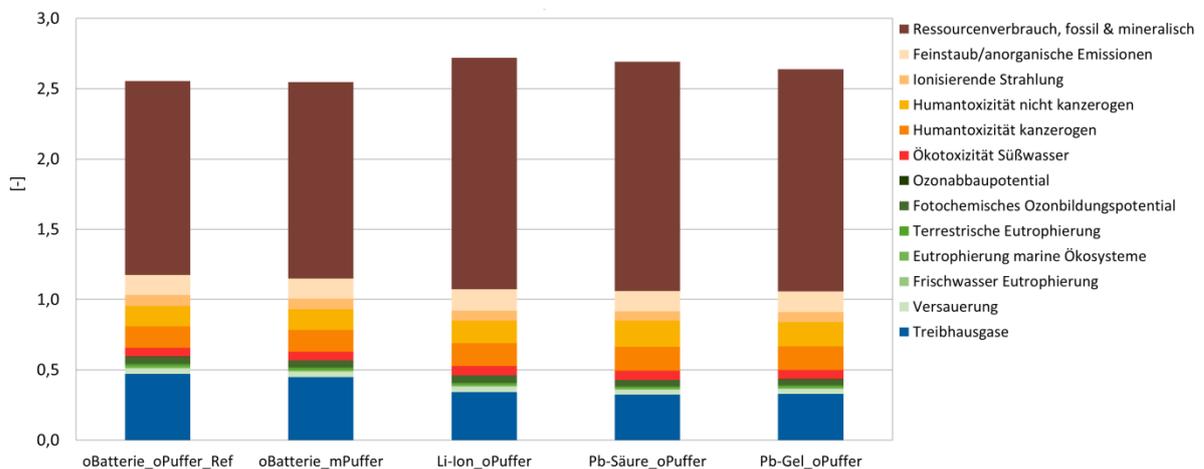


Abbildung 4-25: Neubau, Speichersystemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1

Die Unterschiede in den gezeigten Ergebnissen sind im Wesentlichen abhängig von den Umweltlasten der gewählten Strommische für die Berechnung der Gutschriften für den eingespeisten Strom und den Speichern (Batterien und Pufferspeicher). Alternativ zum gewählten Ansatz könnte die Photovoltaikanlage auch nur anteilig zum Eigenverbrauch betrachtet werden und für den eingespeisten Strom keine Gutschrift berücksichtigt werden. Diese Betrachtung führt zu sehr ähnlichen Ergebnissen wie in Abbildung 4-24 und Abbildung 4-25 gezeigt. Unter Ausschließung der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch, kann aufgezeigt werden, dass die Aufwendungen für

Speicher, durch einen höheren Eigenverbrauch kompensiert bzw. überkompensiert werden können. Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass diese Untersuchung die möglichen Aspekte der Netzdienlichkeit bei der breiten Verwendung von Batteriespeichern für die Stromerzeugung in Deutschland (Netzausbau, Reservekapazitäten, Kappung von Erzeugungsspitzen etc.) nicht betrachtet hat.

Sensitivität Warmwasser

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Der Vergleich der normierten (Abbildung 4-26) und gewichteten Ergebnisse (Abbildung 4-27) der drei verschiedenen Trinkwarmwasserverbräuche zeigt für die meisten Systeme eine zum Trinkwarmwasserverbrauch korrelierte Zu- oder Abnahme der für die Energieträgerbereitstellung (Erdgas, Heizöl, Biomasse), Nutzung (Verbrennungsemissionen) und Strombereitstellung für die Wärmepumpen beeinflussten Wirkungskategorien. Da die Infrastruktur in diesem Vergleich für alle drei Trinkwarmwasserverbräuche identisch ist, ändern sich die Ergebnisse der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch nur marginal¹²⁴.

Ausnahmen stellen die *mBHKWs* und der *Hochtemperaturelektrospeicher* dar. Bei den *mBHKW* führt ein höherer Nutzwärmebedarf zu einer höheren Anzahl an Volllaststunden und entsprechenden Stromeinspeisungen, für die eine Gutschrift berechnet wird. Daher fällt der Unterschied zwischen den drei Warmwasserverbräuchen insgesamt weniger stark aus, als dies beispielsweise beim Referenzsystem der Fall ist.

Beim *Hochtemperaturelektrospeicher* ergeben sich ebenfalls kaum Unterschiede, da die beiden hauptsächlichen Verursacher der Umweltlasten, der Haushaltsstrom und die Fertigung des Speichers, unverändert bleiben. Die für dieses System angenommene Versorgung mit überschüssigem Strom aus Windkraftanlagen, führt nur zu geringen Unterschieden ($\pm 2\%$) gegenüber dem mittleren Warmwasserverbrauch. Unterschiede ergeben sich vor allem beim Ressourcenverbrauch, der mit der Fertigung von Windkraftanlagen verbunden ist.

¹²⁴ Die Bereitstellung der fossilen und erneuerbaren Energieträger wie Erdgas, Heizöl, oder Biomasse haben aufgrund der verwendeten Charakterisierungsmethode fast keinen Einfluss auf das Ergebnis.
Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte

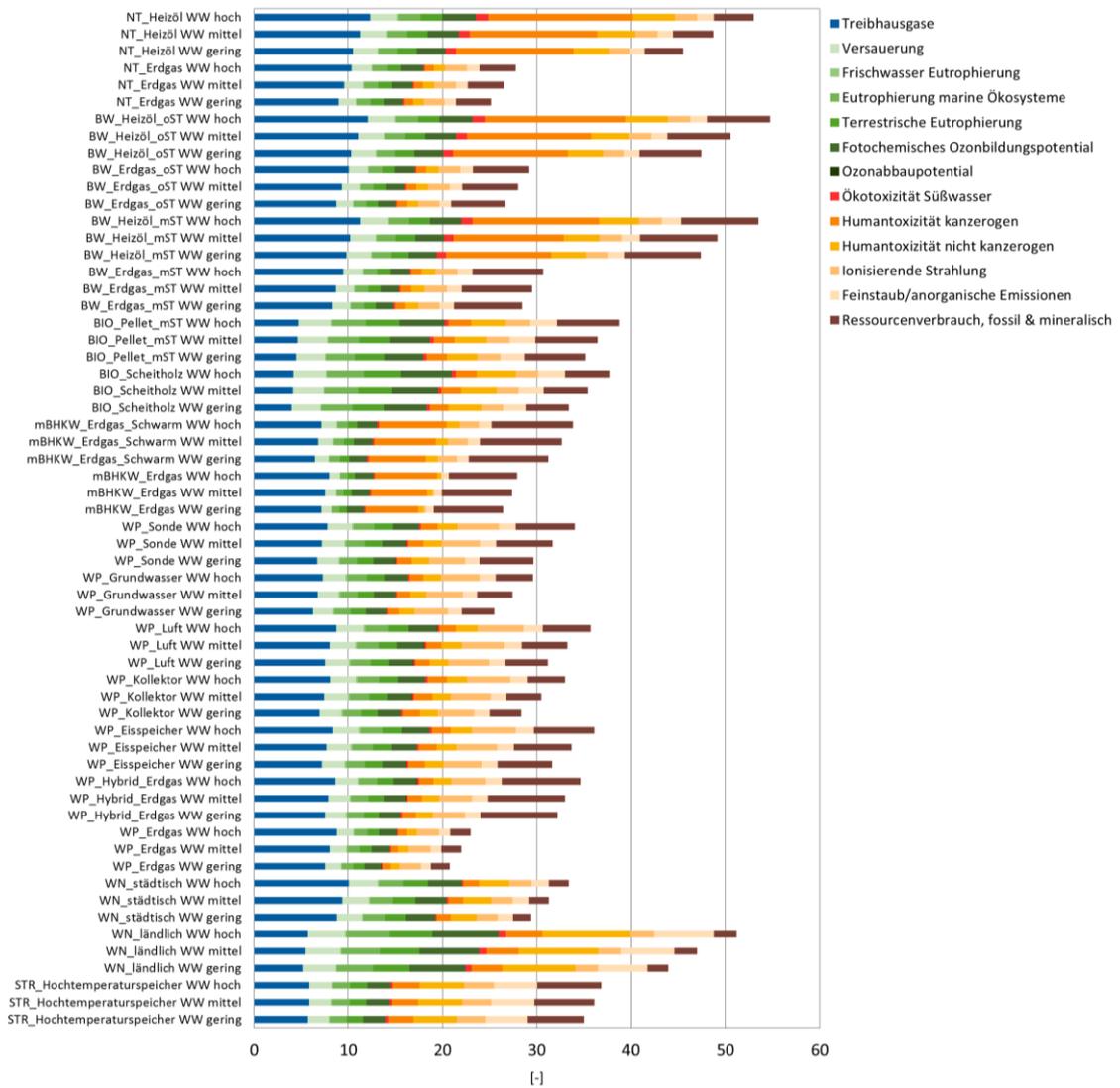


Abbildung 4-26: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich – Vergleich Warmwasserbedarf, gleichgewichtet, Szenario 1

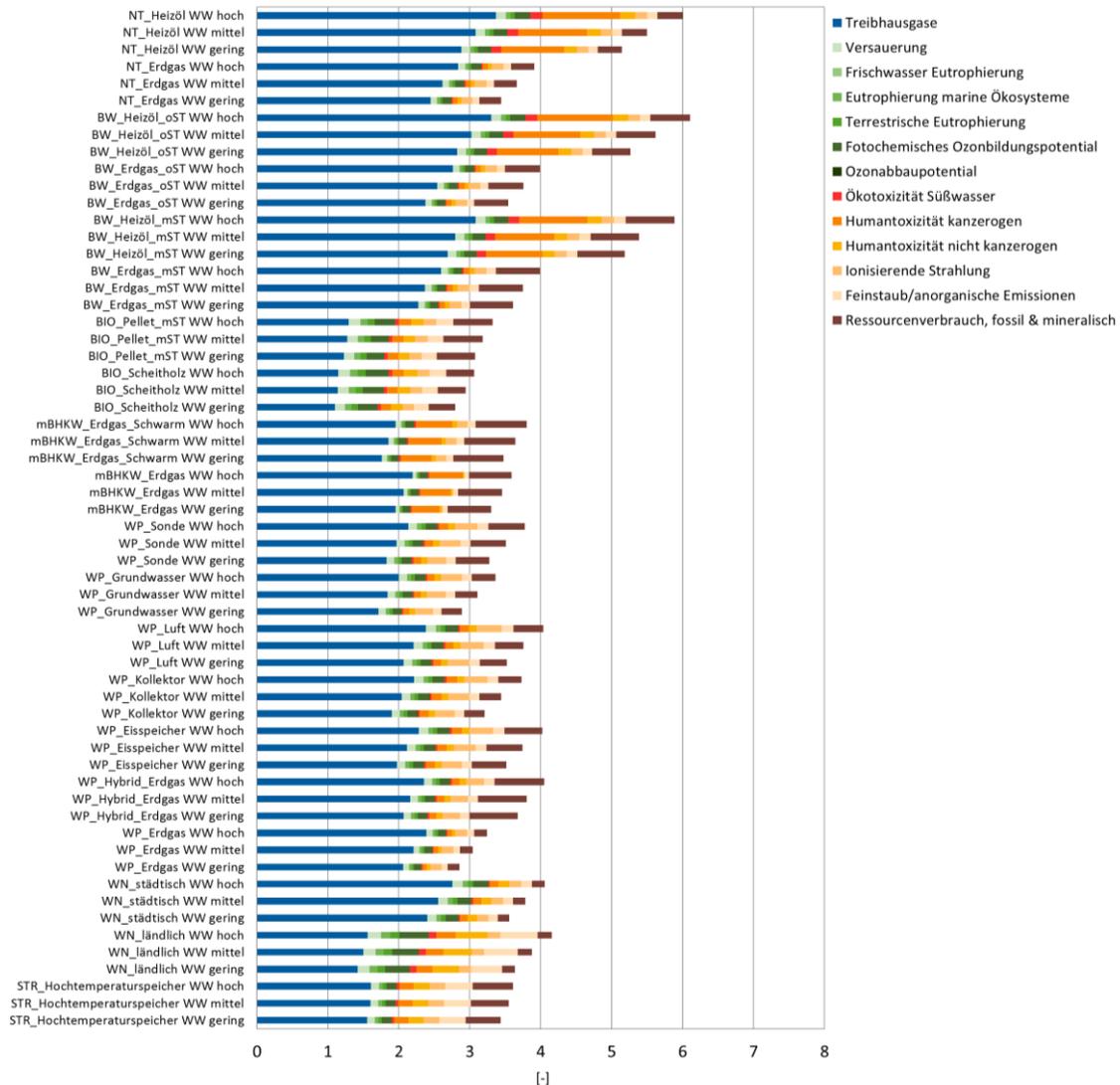


Abbildung 4-27: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich – Vergleich Warmwasserbedarf, nach Gewichtung, Szenario 1

4.3.3. Szenario 2: starke Energiepreissteigerung / optimierte Wärmepumpeneffizienz / längere Lebensdauern

Nachfolgend werden in ausgewählten Ergebnisdarstellungen die Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Szenarien gezeigt. Für die ökologische Betrachtung relevant sind die längeren, für Szenario 2, gewählten Lebensdauern der eingesetzten anlagentechnischen Komponenten (Tabelle 2-11) sowie die in Szenario 2 optimierten Wärmepumpeneffizienzen (Tabelle 2-6 und Tabelle 2-7).

Heizsysteme

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Durch die optimierten Jahresnutzungsgrade für die Wärmepumpen in Szenario 2, reduziert sich der benötigte Strom für die elektrischen Wärmepumpen im Neubau um ca. 10 % (beim Eisspeicher um 16 %). Im Altbau und (teil-)sanierter Altbau liegen die Einsparungen mit 13-15 % (beim Eisspeicher Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte 96 von 149

23-25 %) noch etwas höher. Der Vergleich der Treibhausgase, der in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt ist, zeigt entsprechend im Szenario 2 die reduzierten Umweltlasten für die Stromversorgung der elektrisch betriebenen Wärmepumpen.

Die Verlängerung der Lebensdauer der anlagentechnischen Komponenten wirkt sich vor allen bei den Technologien aus, die eine besonders materialintensive Infrastruktur benötigen, wie zum Beispiel der *Hochtemperaturelektrischer*. Relevant sind die Veränderungen bei einigen Technologien vor allem im Neubau, da hier die Infrastruktur einen höheren Anteil an den Gesamtemissionen hat.

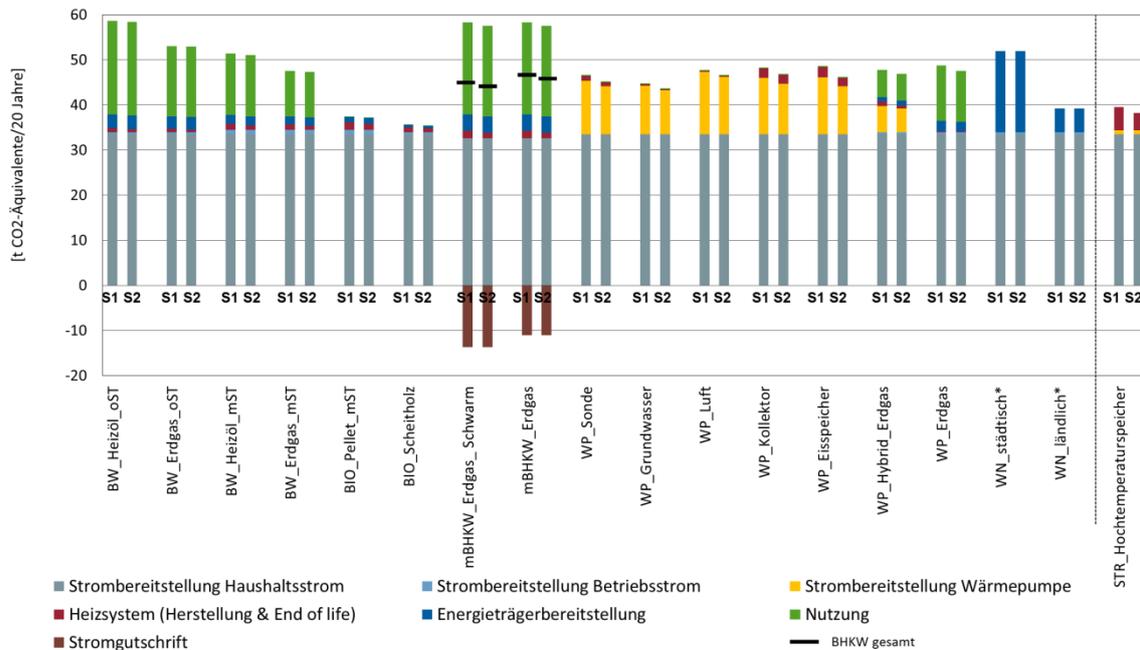


Abbildung 4-28: Neubau, Systemvergleich Treibhausgase, Szenariovergleich

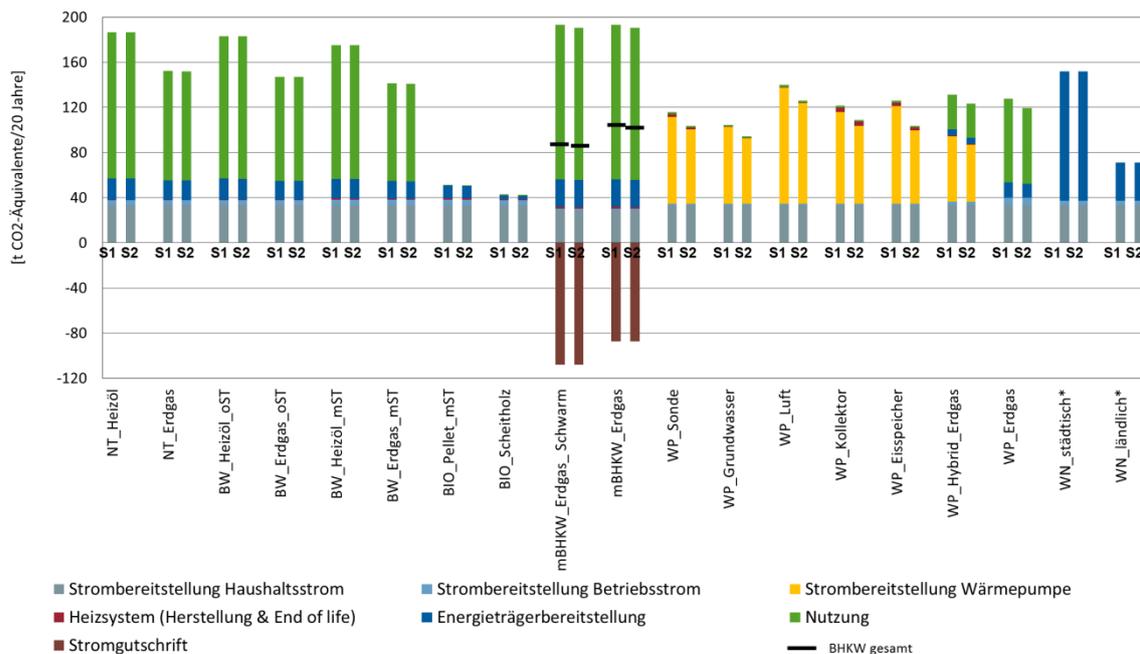


Abbildung 4-29: Altbau, Systemvergleich Treibhausgase, Szenariovergleich

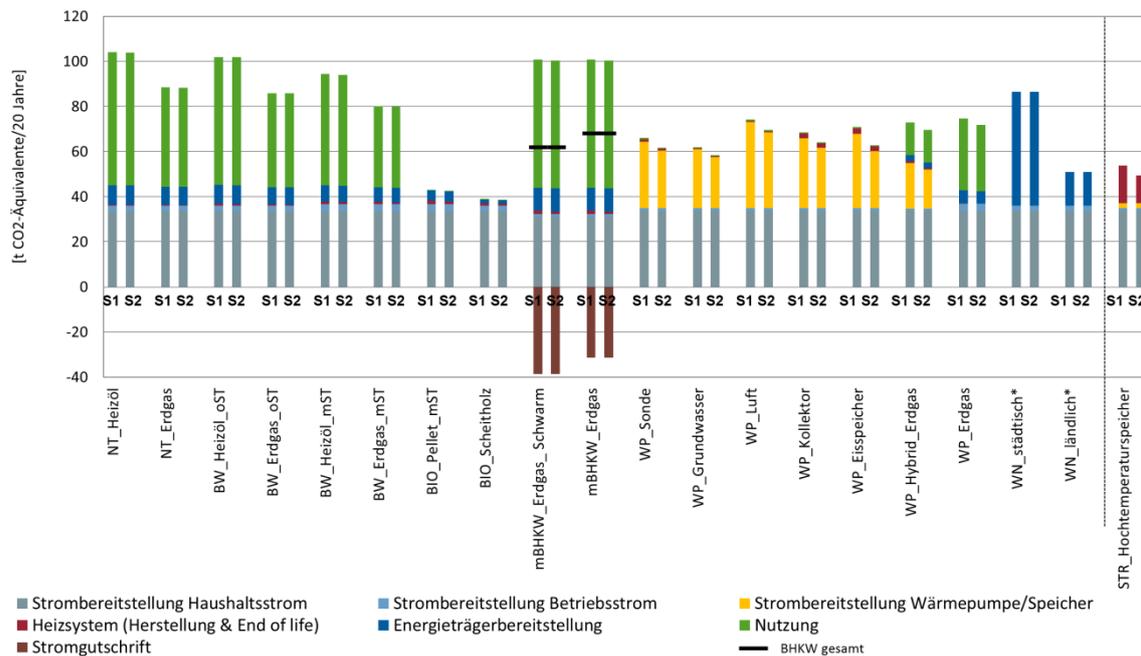


Abbildung 4-30: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Treibhausgase, Szenariovergleich

Ergebnisse der Gewichtung

Nach Normierung und Gewichtung der Ergebnisse aller betrachteten Umweltkategorien, bleibt die Relevanz der Umweltkategorie Ressourcenverbrauch für den Neubau erhalten, sodass Szenario 2 bei allen Technologien aufgrund der längeren Lebensdauer der Komponenten besser abschneidet. Trotz der hohen Relevanz der Bereitstellung des Haushaltsstroms, reduzieren sich die gesamten Umweltlasten um 4-6 % für die Heizkessel. Beim mBHKW reduzieren sich die Umweltlasten in Szenario 2 um 7 %, da der Einfluss der Infrastruktur hier noch höher ist und aufgrund der geringen Volllaststunden nur wenig Strom ins Netz eingespeist wird. Bei den Wärmepumpen reduziert sich in Szenario 2 die Umweltlast zusätzlich noch durch die optimierten Jahresnutzungsgrade. Insgesamt sind die Umweltlasten für die Wärmepumpen in Szenario 2 um 3-8 % geringer.

Der Einfluss der Infrastruktur im Altbau reduziert sich deutlich, da hier ein ca. 6-mal höherer Nutzwärmebedarf bereitgestellt werden muss. Entsprechend sind die Unterschiede bei den Heizkesseln zwischen den Szenarien gering (1-3 %). Bei den Wärmepumpen ergeben sich aufgrund der optimierten Jahresnutzungsgrade im Szenario 2 und dem deutlich geringeren Einfluss der Bereitstellung des Haushaltsstroms, Reduktionen zwischen 6 % (Erdgaswärmepumpe) bis 18 % (Eisspeicherwärmepumpe).

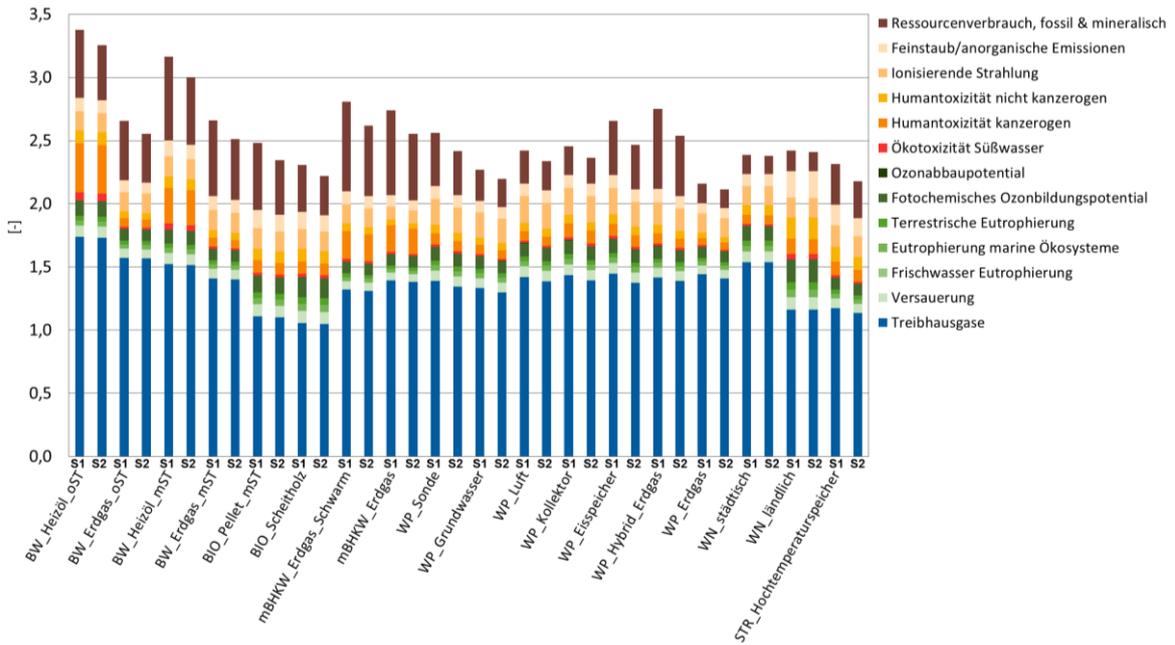


Abbildung 4-31: Neubau, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenariovergleich

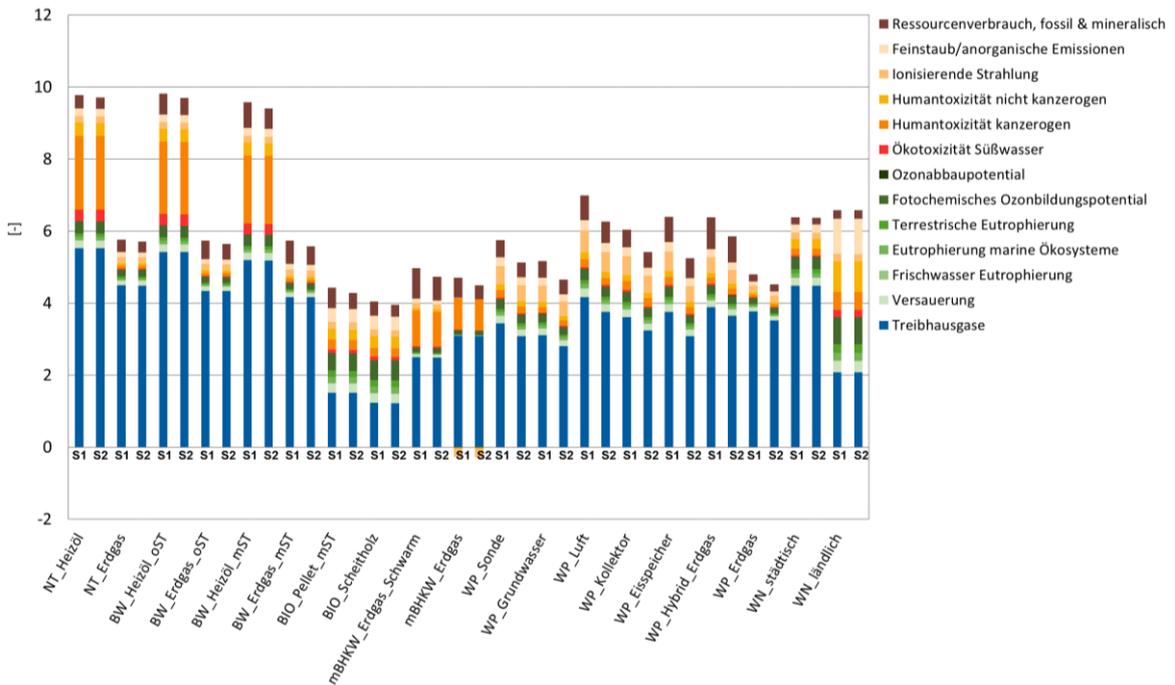


Abbildung 4-32: Altbau, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenariovergleich

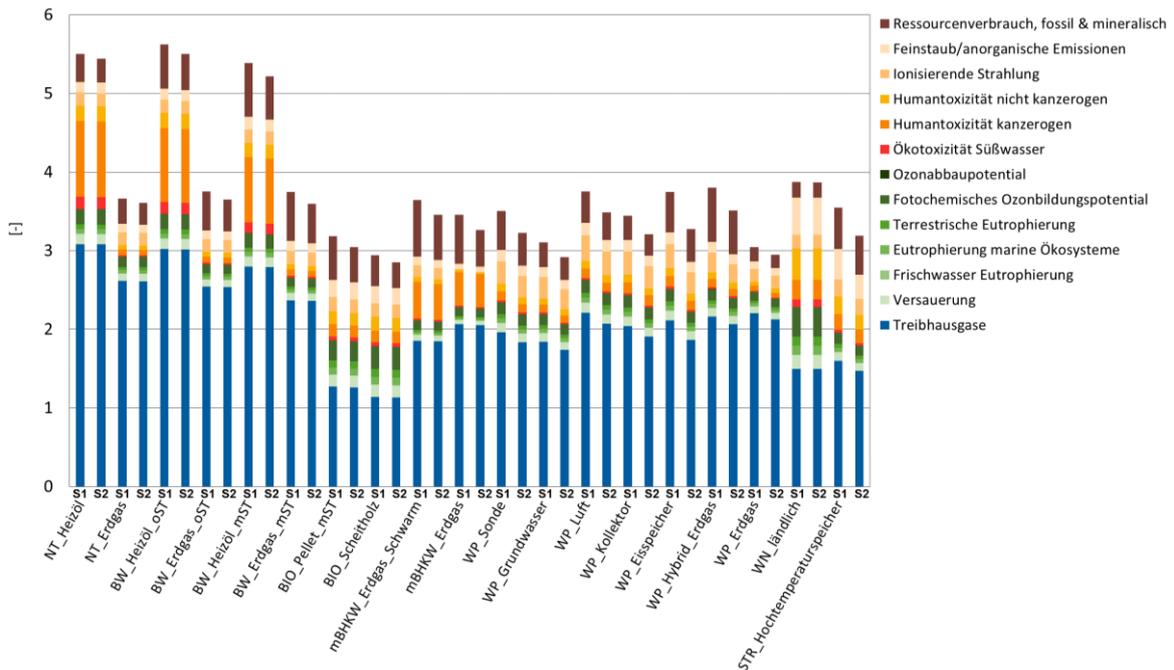


Abbildung 4-33: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich nach Gewichtung, Szenariovergleich

Speichersysteme

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Annahme eines optimierten Jahresnutzungsgrades für die Luftwärmepumpe führt insgesamt zu einem geringeren Stromverbrauch und als Folge zu einer geringeren Netzentnahme zur Deckung des Strombedarfs. Zusätzlich führen die längeren Lebensdauern der anlagentechnischen Komponenten zu geringeren Umweltlasten bei der Infrastruktur. Aus diesen Gründen sind die Treibhausgase in Szenario 2 über den gesamten Betrachtungszeitraum für die Technologien ca. 2,5 t CO₂-Äquivalente geringer (vgl. Abbildung 4-20). Zusätzlich reduzieren sich die Treibhausgasemissionen für die Technologien mit Batterie noch aufgrund der längeren Laufzeit der Batterien.

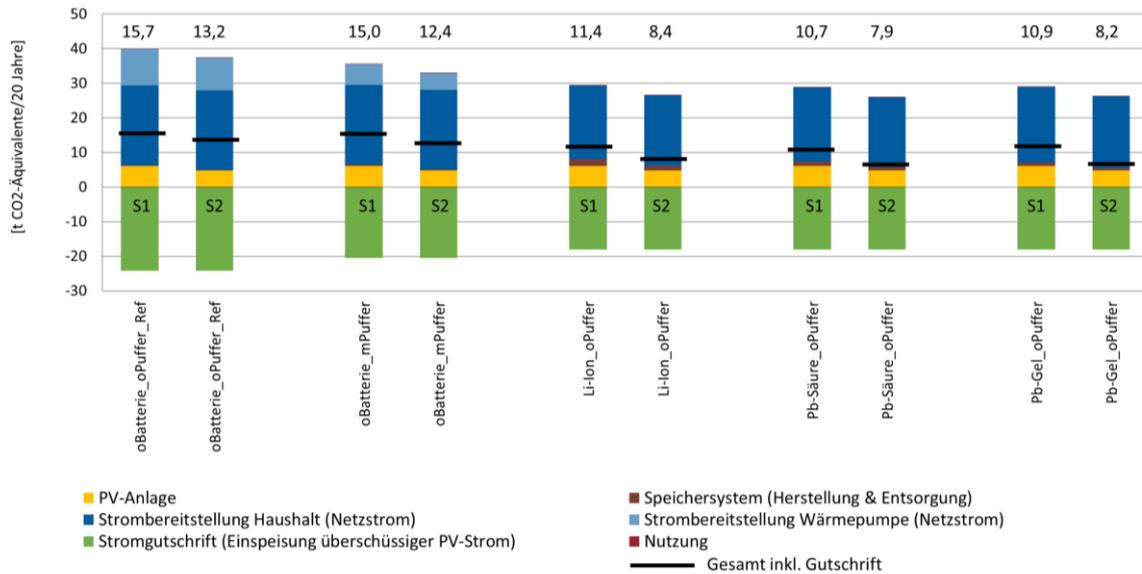


Abbildung 4-34: Neubau, Speichersystemvergleich Treibhausgase, Szenario 1&2

Ergebnisse der Gewichtung

Die normierten und gewichteten Ergebnisse ohne Ressourcenverbrauch reduzieren sich für Szenario 2 gegenüber Szenario 1 um 20 % für die Systeme ohne Batterie und 24 % mit Batterie. Mit Berücksichtigung der Umweltkategorie Ressourcenverbrauch liegt die Reduktion gegenüber Szenario 1 bei 14-16 %.

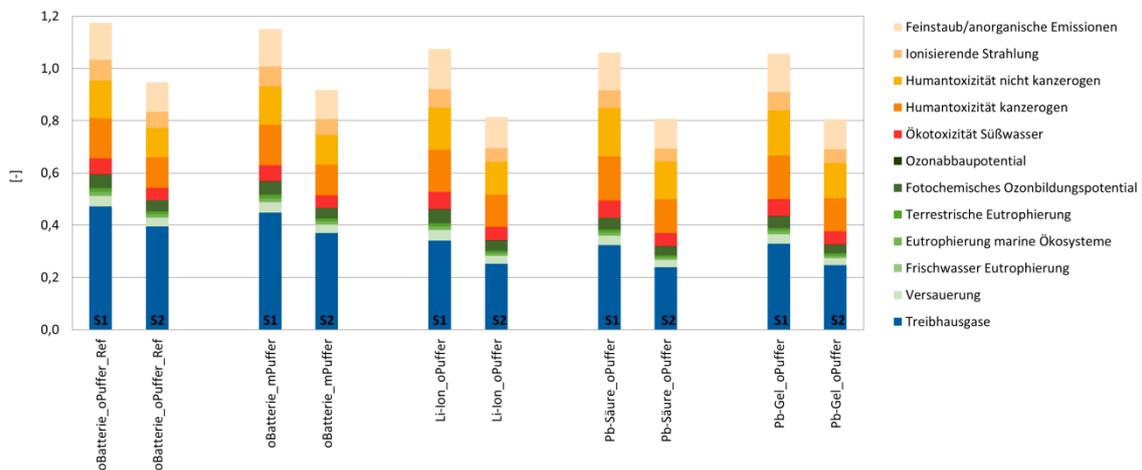


Abbildung 4-35: Neubau, Speichersystemvergleich nach Gewichtung (ohne Ressourcenverbrauch), Szenario 2

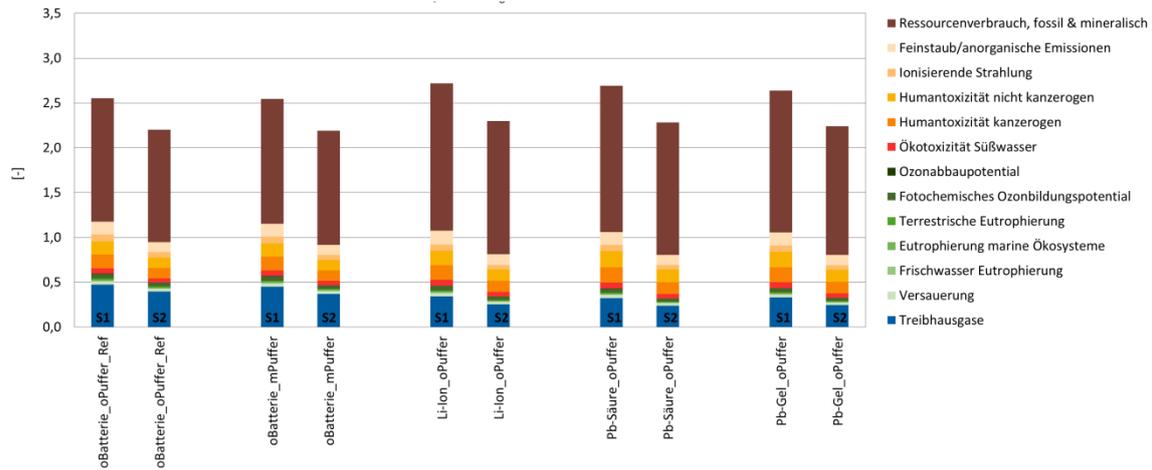


Abbildung 4-36: Neubau, Speichersystemvergleich nach Gewichtung, Szenario 1&2

Sensitivität Warmwasser

Die Ergebnisse des Vergleichs unterschiedlicher Trinkwarmwasserverbräuche ergeben für Szenario 2 in der Tendenz die gleichen Ergebnisse, die für Szenario 1 oben gezeigt und diskutiert wurden.

5. Ökoeffizienzanalyse

5.1. Methodik und Grundlagen der Ökoeffizienzanalyse

Als Ergebnis der ökonomischen und ökologischen Analyse erhält man für jedes der betrachteten Heiz- und Speichersysteme zwei Indikatoren:

- einen monetären Einzelwert sowie
- einen normierten und gewichteten ökologischen Single-Score-Indikator.

Diese beiden Indikatoren sind ins Verhältnis zu dem jeweiligen Referenzsystem gesetzt und die relative Abweichung zum Referenzsystem in einem Vier-Quadranten-Diagramm dargestellt. Als Referenzsystem für die Heizsysteme ist für alle Gebäudetypen das System *BW_Erdgas_oST* (siehe Kapitel 2.3.1) verwendet und für die Speichersysteme *oBatterie_oPuffer_Ref* (Kapitel 2.3.2) herangezogen. Die beiden Ergebniswerte der ökonomischen und ökologischen Analyse fließen gleichgewichtet (1:1) in die Ökoeffizienzbewertung ein. Die ökonomischen Werte beinhalten die Kosten für Anschaffung und Betrieb der Heiz- und Speichersysteme aus Sicht des Hausbesitzers. Entsprechend sind die Beträge der Förderungen von den Gesamtkosten für die Anschaffung abgezogen. Restwerte, die sich für anlagentechnische Komponenten mit längerer Lebenszeit als 20 Jahren ergeben sind von den Kosten für den Hausbesitzer ebenfalls abgezogen.

5.2. Ergebnisse der Ökoeffizienzanalyse

Zur Darstellung der Ergebnisse der Ökoeffizienzanalyse werden die folgenden beiden, bereits in Kapitel 2.3.1 beschriebenen, Szenarien untersucht:

- Szenario 1 (*=> ungünstig für Wärmepumpen und weitere investitionskostenintensive Technologien*):
 - moderate Energiepreissteigerung
 - gängige Wärmepumpeneffizienz
 - kürzere Lebensdauern
- Szenario 2 (*=> günstig für Wärmepumpen und weitere investitionskostenintensive Technologien*):
 - starke Energiepreissteigerung
 - optimierte Wärmepumpeneffizienz
 - längere Lebensdauern

Dargestellt werden die Ergebnisse:

1. Unterschiedliche Heizsysteme beim Einsatz in den drei Gebäudetypen (Neubau, (teil-)sanierter Altbau und Altbau) unter Berücksichtigung eines mittleren Warmwasserbedarfs.
2. Unterschiedliche Speichersysteme unter Berücksichtigung eines über eine Luftwärmepumpe versorgten effizienten Neubaus mit einer 5 kWp PV Anlage auf dem Dach.
3. Der Einfluss des Warmwasserbedarfs auf die diesbezüglichen Energiekosten bei unterschiedlichen Heizungssystemen am Beispiel des (teil-)saniereten Altbaus.

Anmerkung: Die Ergebnisse für den Hochtemperaturelektrospeicher basieren auf Forschungsergebnissen und theoretischen Annahmen und sind lediglich als mittel- bis langfristiges perspektivisches Potential zu sehen. Ein derartiges System inkl. entsprechenden Tarifs ist aktuell und in absehbarer Zeit nicht am Markt verfügbar.

5.2.2. Szenario 1: moderate Energiepreissteigerung / gängige Wärmepumpeneffizienz / kürzere Lebensdauern

Heizsysteme

Neubau

Die Ökoeffizienz des Neubaus, dargestellt in Abbildung 5-1, ist geprägt durch den niedrigen Nutzwärmebedarf und den großen Einfluss der Haushaltsstrombereitstellung. Infolgedessen sind der Ausgangswert des Referenzsystems und die Unterschiede bei der Umweltfreundlichkeit zu den anderen Heizsystemen nicht so stark ausgeprägt wie beim Altbau. Das Referenzsystem Erdgasbrennwertkessel ohne Solarthermie (BW_Erdgas_oST) ist kostenseitig das Optimum. Mehrere Technologien bieten eine vergleichbare Ökoeffizienz wie das Referenzsystem, wie beispielsweise die ländlichen und städtischen Wärmenetze (WN_ländlich & WN_städtisch)¹²⁵ mit 9-10 % geringeren Umweltlasten bei 12 % Mehrkosten. Der Hochtemperaturolektrospeicher bietet unter der Annahme, dass er mit überschüssigem und günstigem Strom aus Windkraftanlagen betrieben wird eine umweltfreundliche und kostengünstige Perspektive. Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, werden diese Systeme jedoch gegenwärtig noch erforscht und entwickelt und sind mittelfristig nicht verfügbar.

Die Erdgaswärmepumpe (WP_Erdgas) reduziert die Umweltlasten gegenüber dem Referenzsystem um 19 % bei 29 % höheren Kosten. Ökologische Vorteile, bei höheren Kosten, versprechen potentiell auch mehrere Wärmepumpen, wie zum Beispiel die Grundwasserwärmepumpe (WP_Grundwasser) mit 15% geringeren Umweltlasten bei 32% höheren Kosten. Die Erdgas-Mikro-BHKW führen aufgrund der geringen Volllaststunden zu deutlichen Mehrkosten von über 100 % bei vergleichbarer Umweltlast wie das Referenzsystem. Pellet- und Scheitholzessel bieten ein besseres Umweltprofil (-13% für BIO_Scheitholz und -7% für BIO_Pellet_mST) bei deutlich höheren Kosten (+39 % für BIO_Scheitholz, +57 % für BIO_Pellet_mST).

¹²⁵ Bei den Wärmenetzen ist zu berücksichtigen, dass sich die angenommenen Netzverluste auf existierende Anlagen beziehen und nicht zur ausschließlichen Versorgung von Neubauten mit Passivhausstandard. In Wärmenetzen mit geringer Wärmeabnahme können sich die Netzverluste erhöhen und die Ökoeffizienz entsprechend geringer ausfallen.

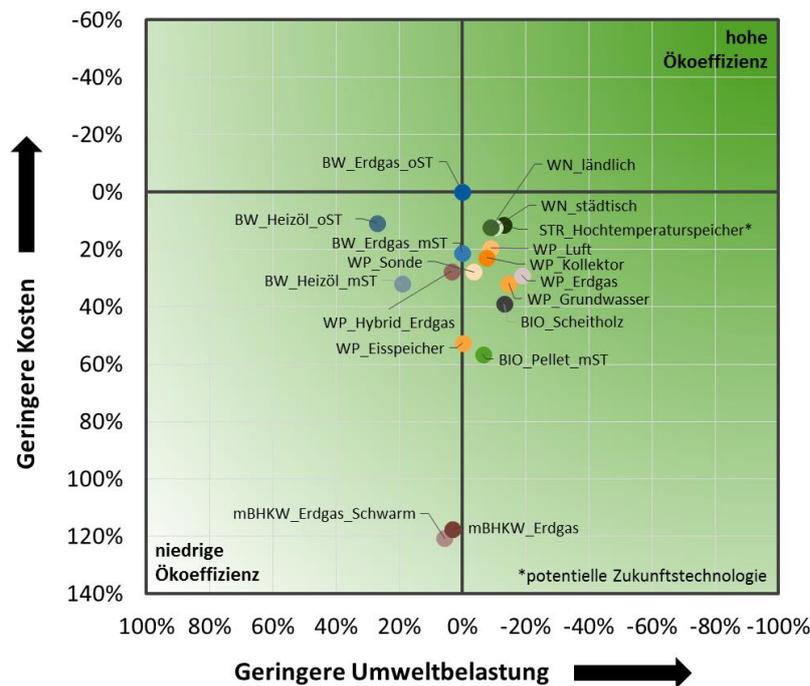


Abbildung 5-1: Neubau, Systemvergleich Ökoeffizienz¹²⁶, Szenario 1

Altbau

Durch den deutlich größeren Nutzwärmebedarf beim Altbau sind die Unterschiede der Wärmeerzeuger deutlich ausgeprägter. Gegenüber dem Referenzsystem BW_Erdgas_oST erweist sich die erdgasbetriebene Wärmepumpe (WP_Erdgas) in Abbildung 5-2 als Alternative (4 % geringere Kosten, 16 % geringere Umweltbelastung). Der Scheitholzessel (BIO_Scheitholz) erreicht bei 26 % höheren Kosten 30 % niedrigere Umweltlasten. Der Pelletheizkessel (BIO_Pellet_mST) erreicht 23 % geringere Umweltlasten bei 40 % höheren Kosten als das Referenzgerät.

Für den eingesetzten Biomassekessel des ländlichen Wärmenetzes wurde angenommen, dass die Staubemissionen dem Grenzwert der Stufe 2 für Holzheizkessel von 20 mg/Nm³ [UBA 2010] entsprechen. Durch Verwendung eines Partikelabscheiders, könnten die Umweltlasten für die ländliche Fernwärme, die 15% höher als beim Referenzgerät sind, deutlich reduziert werden. Bei Bestandsanlagen, die vor dem 31.12.2014 errichtet wurden, für die der Staubgrenzwert von 100 mg/Nm³ gilt, können die Umweltlasten allerdings auch höher ausfallen.

Das System mit 10 Jahren Weiterbetrieb des alten Niedertemperaturkessels und weiteren 10 Jahren mit Erdgasbrennwertkessel (NT_Erdgas) erreicht ungefähr die gleiche Ökoeffizienz wie das Referenzsystem. Das mBHKW_Erdgas verfügt gegenüber dem Referenzsystem über ein besseres Umweltprofil, bei deutlich höheren Kosten (23 % geringere Umweltlasten, bei 74 % höheren Kosten). Die beste Ökoeffizienz bei den elektrisch betriebenen Wärmepumpen erreicht WP_Grundwasser (10 % geringere Umweltlasten, bei 21 % höheren Kosten).

¹²⁶ Die Darstellung, sowie alle folgenden Ökoeffizienzdarstellungen der Heizgeräte, zeigen die Abweichung der betrachteten Technologien gegenüber dem Referenzgerät BW_Erdgas_oST (Erdgasbrennwertkessel ohne Solarthermie).
Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte 105 von 149

Die Verwendung von Heizkesseln führt bei ähnlichen Kosten gegenüber dem Referenzsystem zu deutlich höheren Umweltlasten.

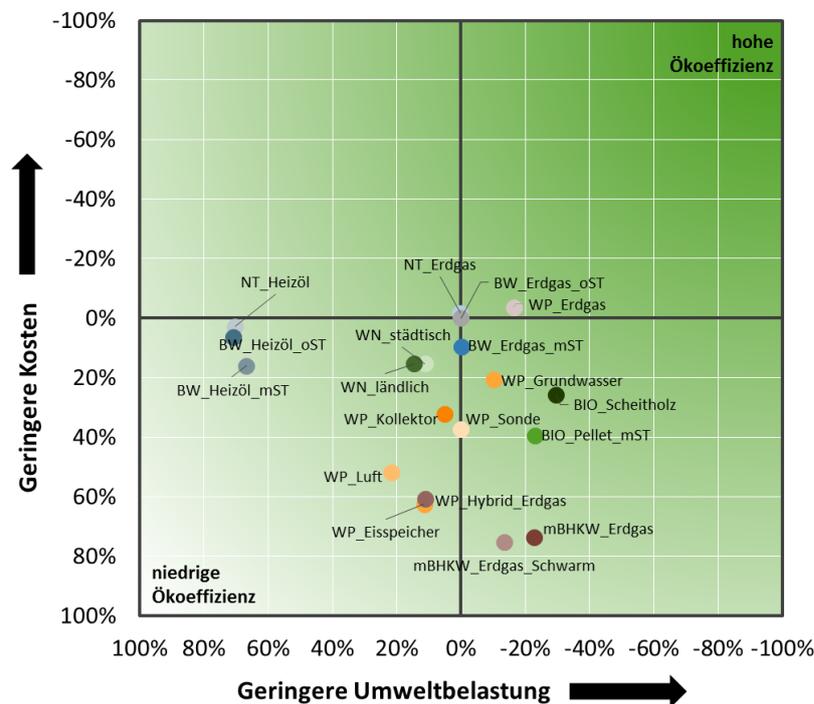


Abbildung 5-2: Altbau, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 1

(teil-)sanierter Altbau

Die Ökoeffizienzbetrachtung für den (teil-)sanierteren Altbau in Abbildung 5-3 ergibt im Wesentlichen ähnliche Ergebnisse wie der Altbau zuvor. Gegenüber dem Referenzsystem zeigt vor allem die Erdgas Wärmepumpe (WP_Erdgas) eine bessere Ökoeffizienz (2 % höhere Kosten bei 19 % geringeren Umweltlasten). Das System mit 10 Jahren Weiterbetrieb des alten Niedertemperaturkessels und weiteren 10 Jahren mit Erdgasbrennwertkessel (NT_Erdgas) verfügt eine minimal bessere Ökoeffizienz, da sich der Vorteil der höheren Effizienz eines neuen Brennwertkessels bei einem geringeren Nutzwärmebedarf weniger stark auswirkt.

Wie zuvor beim Altbau, können mit einigen Systemen, z.B. BIO_Scheitholz, BIO_Pellet_mST oder WP_Grundwasser die Umweltlasten bei höheren Kosten reduziert werden. Aufgrund der geringeren Vollaststunden reduziert sich der ökologische Vorteil der Mikro-Erdgas BHKW, bei gleichbleibend zusätzlichen Kosten gegenüber dem Referenzsystem.

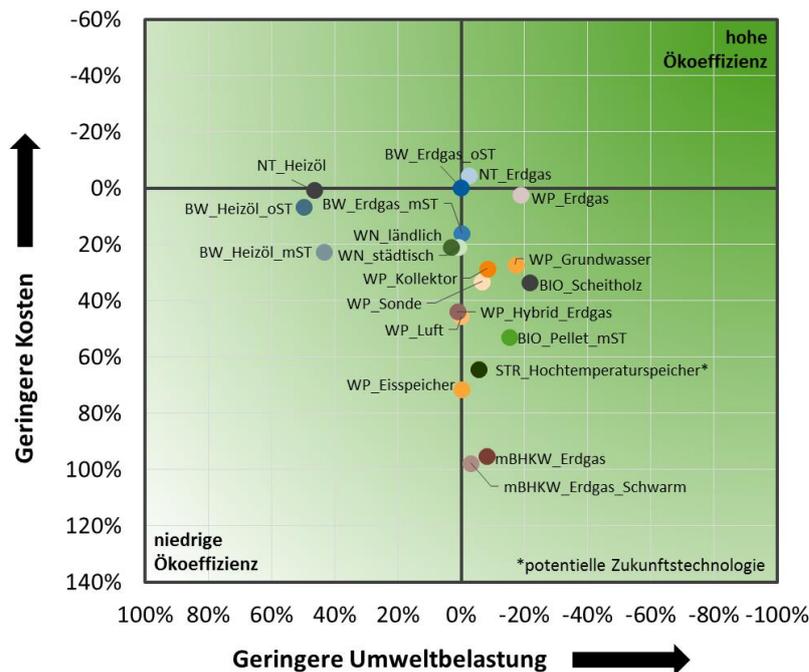


Abbildung 5-3: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 1

Speichersysteme

Die Ergebnisse für die Speichersysteme werden zunächst analog zur ökologischen Analyse ohne die Umweltkategorie Ressourcenverbrauch gezeigt. Alle drei Systeme mit Batterie verfügen über geringere Umweltlasten bei höheren Kosten. Für das System mit Lithiumionenbatterie (*Li-Ion_oPuffer*) reduzieren sich die Umweltlasten um 9 %, bei 48 % höheren Kosten, bei den Bleibatterien reduzieren sich die Umweltlasten um 10 %, mit 30 % höheren Kosten für die Bleisäurebatterie (*Pb-Säure_oPuffer*) und 70 % für die Bleigelbatterie (*Pb-Gel_oPuffer*). Eine leicht höhere Ökoeffizienz als das Referenzsystem erreicht das System mit Pufferspeicher ohne Batterie (*oBatterie_mPuffer*).

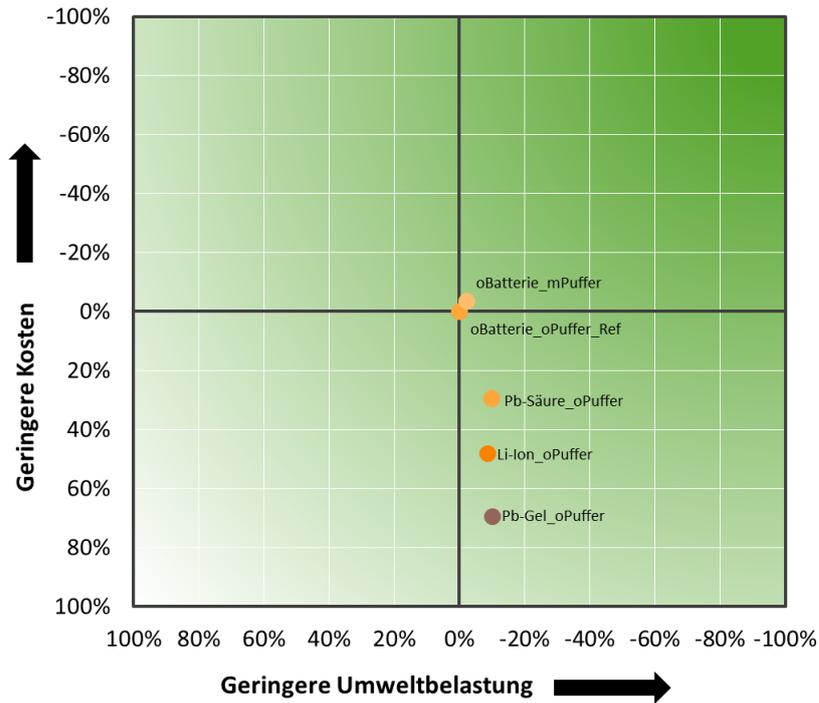


Abbildung 5-4: Neubau, Speichersystemvergleich Ökoeffizienz ohne Ressourcenverbrauch, Szenario 1

Unter Berücksichtigung der Wirkungskategorie Ressourcenverbrauch entfällt der ökologische Vorteil der Speichersysteme mit Batterie (Diskussion siehe ökologische Analyse der Speichersysteme, Abschnitt 4.3.2).

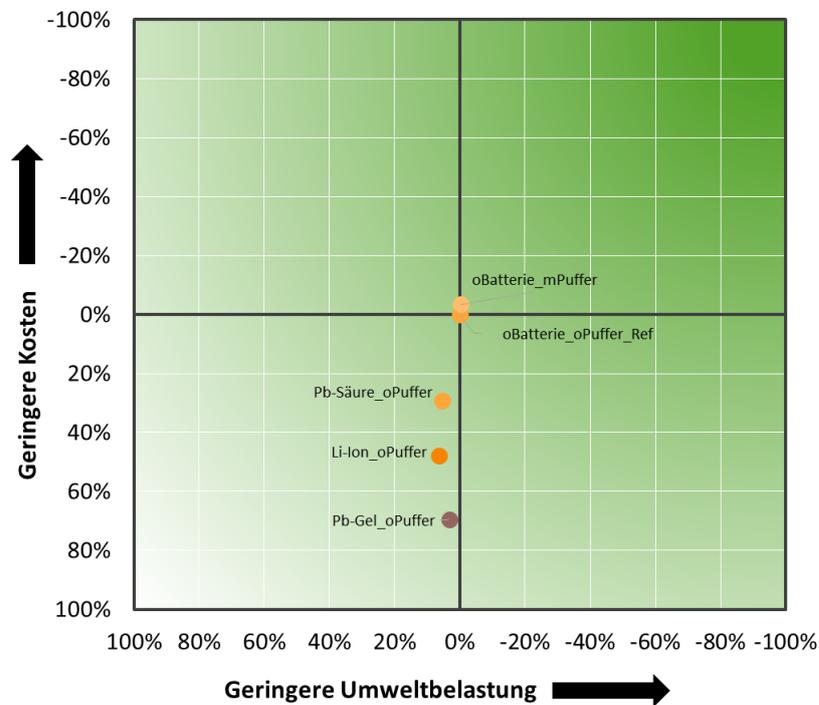


Abbildung 5-5: Neubau, Speichersystemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 1

Des Weiteren ist zu beachten, dass sich die oben genannten Aussagen auf die zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie vorliegenden Studien zum durchschnittlichen Preisniveau für Batteriespeichersysteme beziehen (Stand 2015). Inzwischen (Stand Januar 2017) sind die Preise für Batteriespeichersysteme stark gefallen. In Einzelfällen können die Investitionskosten für Batteriespeichersysteme (z.B. für Li-Ionen Batterien) weniger als die Hälfte der dargestellten Investitionskosten betragen.

Sensitivität Warmwasser

Wie bereits in der ökologischen Analyse diskutiert, führt der unterschiedliche Warmwasserverbrauch in Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 nicht zu grundlegend unterschiedlichen Ergebnissen verglichen mit dem mittleren Warmwasserbedarf für den (teil-)sanierten Altbau in Abbildung 5-3. Bei den Umweltlasten verstärkt sich der bereits beim mittleren Warmwasserverbrauch gezeigte Effekt für den hohen Wasserverbrauch leicht (hat das System beim mittleren Warmwasserverbrauch bereits höhere Umweltlasten gegenüber Referenzsystem nimmt der relative Abstand weiter zu), bzw. schwächt sich beim geringen Warmwasserverbrauch leicht ab. Am ausgeprägtesten sind die Unterschiede bei den mBHKW, da der höhere bzw. niedrigere Warmwasserbedarf entsprechend die Volllaststunden beeinflusst, allerdings bleibt das Problem hoher zusätzlicher Kosten bei leicht reduzierten Umweltlasten für die mBHKW gegenüber dem Referenzsystem bestehen.

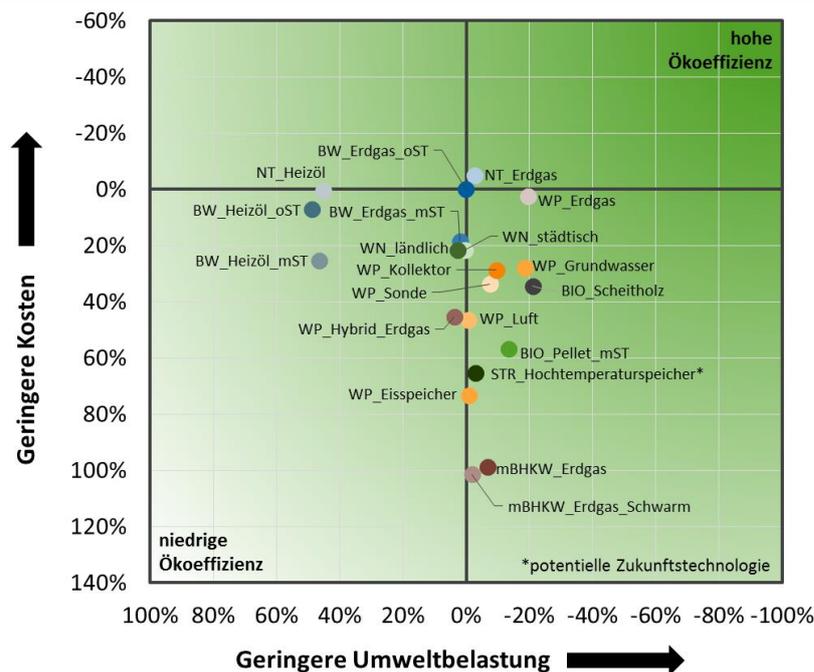


Abbildung 5-6: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich, Ökoeffizienz bei geringem Warmwasserbedarf, Szenario 1

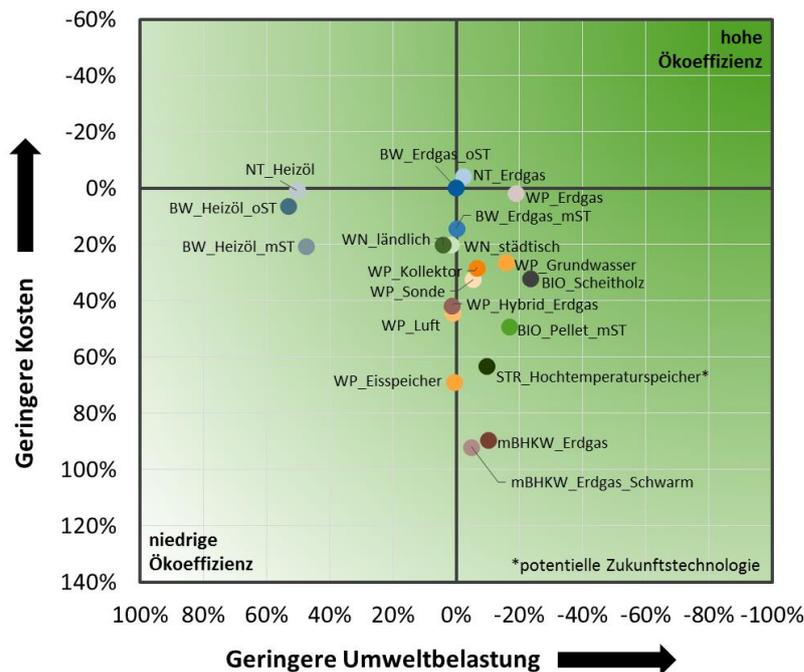


Abbildung 5-7: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich, Ökoeffizienz bei hohem Warmwasserbedarf, Szenario 1

5.2.3. Szenario 2: starke Energiepreissteigerung / optimierte Wärmepumpeneffizienz / längere Lebensdauern

Heizsysteme

Generell lässt sich feststellen, dass die optimierte Wärmepumpeneffizienz zu einer höheren Ökoeffizienz der Wärmepumpen gegenüber Szenario 1 führt (siehe Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-12). Im Neubau ist der Effekt der längeren Lebensdauer am deutlichsten, vor allem bei materialintensiven Systemen (WP_Sonde, WP_Eisspeicher, mBHKW oder Systeme mit Solarthermie) ergibt sich eine höhere Ökoeffizienz.

Im Altbau kommt es insbesondere bei den Wärmepumpen aufgrund der besseren angenommenen Effizienzen in Szenario 2 zu deutlichen Verbesserungen gegenüber Szenario 1 als auch relativ zum Referenzsystem. Sind die Umweltlasten beispielsweise der WP_Sonde in Szenario 1 noch gleich mit dem Referenzsystem, sind sie in Szenario 2 9 % besser, gleichzeitig fallen prozentual deutlich weniger zusätzliche Kosten gegenüber dem Referenzsystem an.



Abbildung 5-8: Neubau, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 2

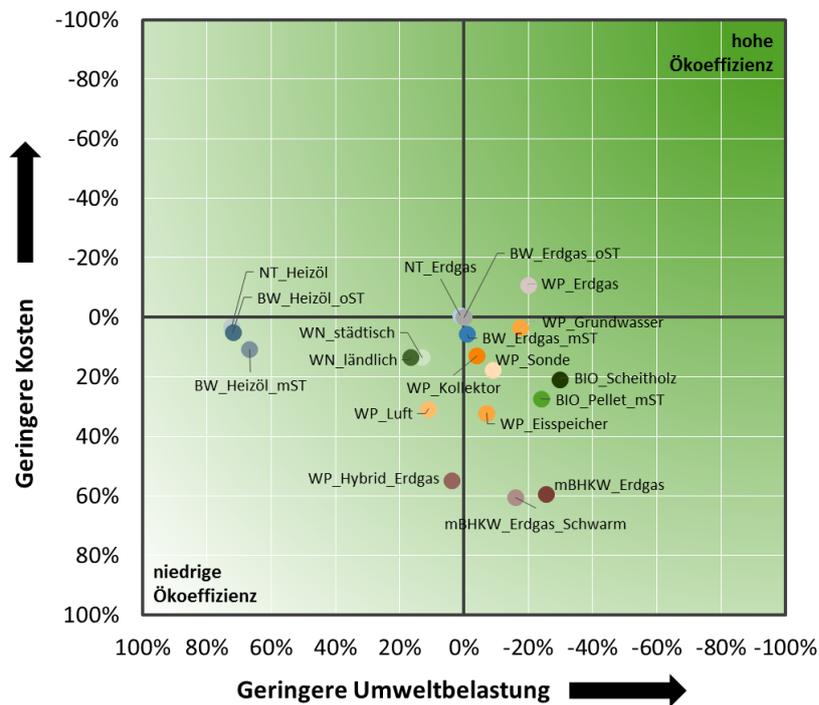


Abbildung 5-9: Altbau, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 2

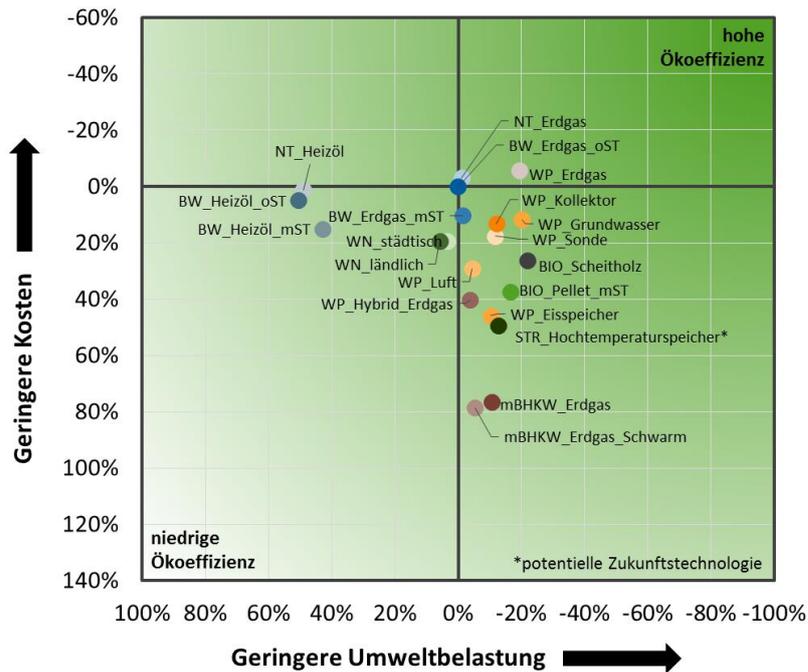


Abbildung 5-10: (teil-)sanierter Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 2

Speichersysteme

Bei den Speichersystemen führen die höheren Lebensdauern der anlagentechnischen Komponenten, insbesondere für die Photovoltaikanlage, sowie die höhere Effizienz der Wärmepumpe zu geringeren Umweltlasten und somit insgesamt zu einer höheren Ökoeffizienz der jeweiligen Technologien gegenüber Szenario 1. Dies gilt sowohl für die Betrachtung ohne Ressourcenindikator in Abbildung 5-11 sowie für die Betrachtung mit Ressourcenindikator in Abbildung 5-12.

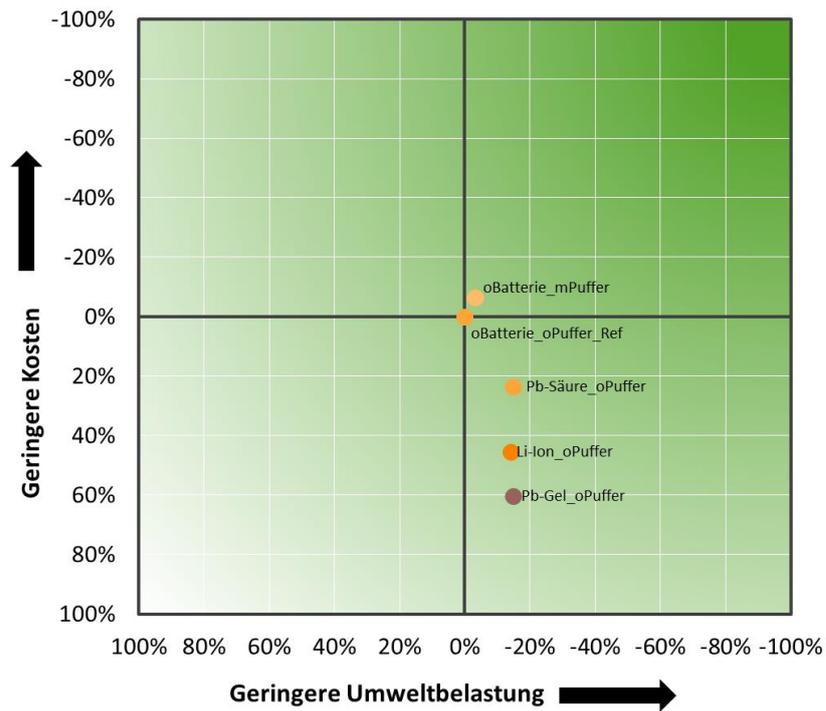


Abbildung 5-11: Neubau, Speichersystemvergleich Ökoeffizienz ohne Ressourcenverbrauch, Szenario 2

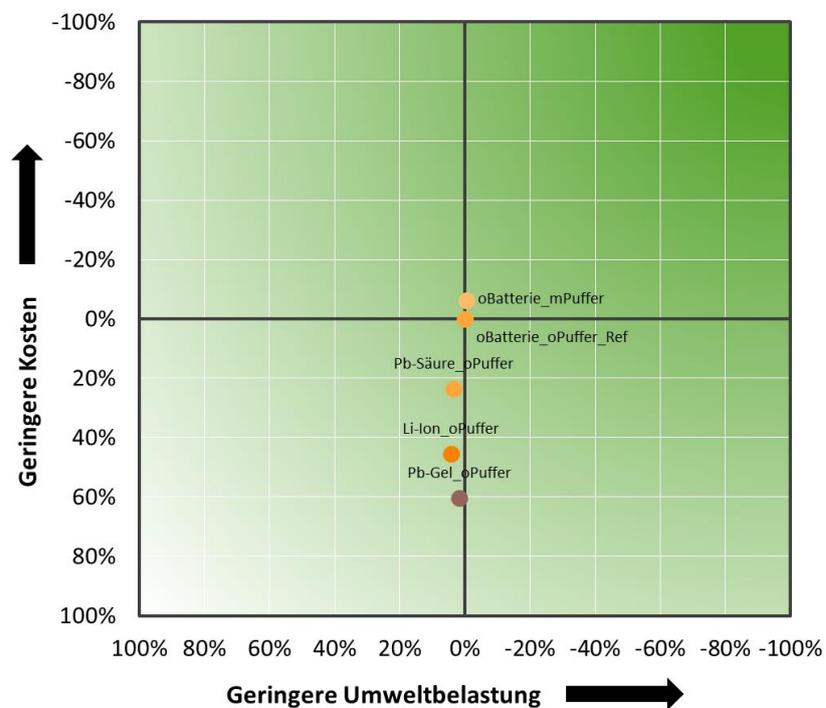


Abbildung 5-12: Neubau, Speichersystemvergleich Ökoeffizienz, Szenario 2

Sensitivität Warmwasser

Unterschiede bei geringem und hohem Warmwasserverbrauch in Szenario 2, dargestellt in Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14, gegenüber Szenario 1 (Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7) ergeben sich durch die optimierte Wärmepumpeneffizienzen als auch partiell aufgrund verlängerter Lebensdauern der anlagentechnischen Komponenten für einige materialintensive Systeme (z. B. *Hochtemperaturelektrospeicher, WP_Eisspeicher, mBHKW*).

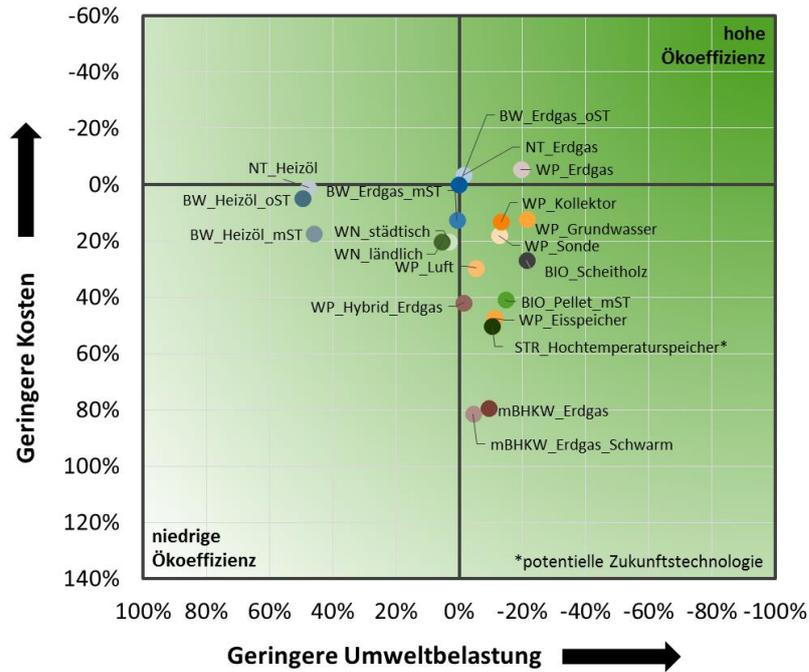


Abbildung 5-13: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich, Ökoeffizienz bei geringem Warmwasserbedarf, Szenario 2

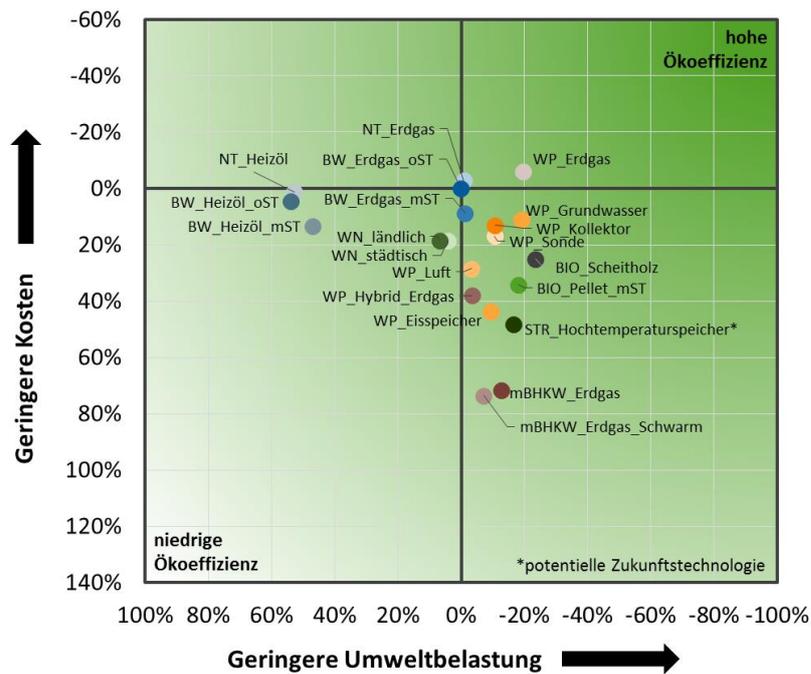


Abbildung 5-14: (teil-)sanierter Altbau, Systemvergleich, Ökoeffizienz bei hohem Warmwasserbedarf, Szenario 2

6. Monetarisierung von Umweltwirkungen

6.1. Methodik und Grundlagen der Monetarisierung von Umweltwirkungen

Eine weitere Möglichkeit, ökologische und ökonomische Effekte kombiniert zu betrachten, stellt die Monetarisierung von Umweltwirkungen dar. Dieser Ansatz ist auch unter dem englischen Begriff Natural Capital Accounting (NCA) bekannt und zielt darauf ab, Umweltwirkungen, die beispielsweise aus Emissionen von Schadstoffen oder aus dem Abbau von Rohstoffen resultieren, gewisse Kosten zuzuschreiben. Häufig handelt es sich dabei um Kosten für externe Effekte, das heißt, dass der entstandene Schaden nicht direkt vom jeweiligen Verursacher zu begleichen ist, sondern vielmehr von der Allgemeinheit getragen wird. Entsprechend schwierig ist es daher auch, externe Effekte, die von einer Umweltwirkung ausgehen, in finanziellen Einheiten auszudrücken (Monetarisierung). Die Kombination von internen, also tatsächlich anfallenden, und externen Kosten in einer integrierten Analyse ist auch Teil der Ansätze des Life Cycle Costing (LCC) [Hunkeler 2008].

Die in Kapitel 4 dargestellte Ökobilanz betrachtet Umweltwirkungen anhand von sogenannten Midpoint-Indikatoren, die in quasi-physikalischen Einheiten dargestellt werden (z. B. CO₂-Äquivalente). Beim NCA werden Midpoint-Indikatoren mit individuellen monetären Werten verknüpft. Somit können die Kosten der betrachteten Umweltwirkungen ermittelt werden. Dies ermöglicht eine integrierte Kostenanalyse unter Berücksichtigung von externen Effekten.

Im Rahmen dieser Studie werden die Ergebnisse der Ökobilanz mittels der Trucost Methode analysiert [Trucost 2015], welche die Monetarisierung zahlreicher Wirkungskategorien erlaubt. Entsprechende Faktoren, jedoch in weit geringerem Umfang, sind auch vom Umweltbundesamt veröffentlicht [UBA 2012]. Ein ähnlicher Ansatz aus der Ökobilanz ist der von Bengt Steen entwickelte Ansatz EPS 2000 („Environmental Priority Strategies“) [STE 1999a, STE 1999b], bei welchem Umweltwirkungen in Environmental Load Units (ELU) bemessen werden, wobei ein ELU-Äquivalent zu einem Euro gewählt wurde.

Da insbesondere der Betrachtung von klimaschädlichen Emissionen eine hohe Relevanz zukommt, vergleicht Abbildung 6-1 die entsprechenden Kosten nach den drei genannten Quellen. Hierbei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Gewichtungsfaktoren nach Trucost und EPS2000, wobei der Monetarisierungsfaktor des UBA etwas geringer ausfällt. Weitere Informationen können dem Trucost Methodenbericht entnommen werden [Trucost 2015].

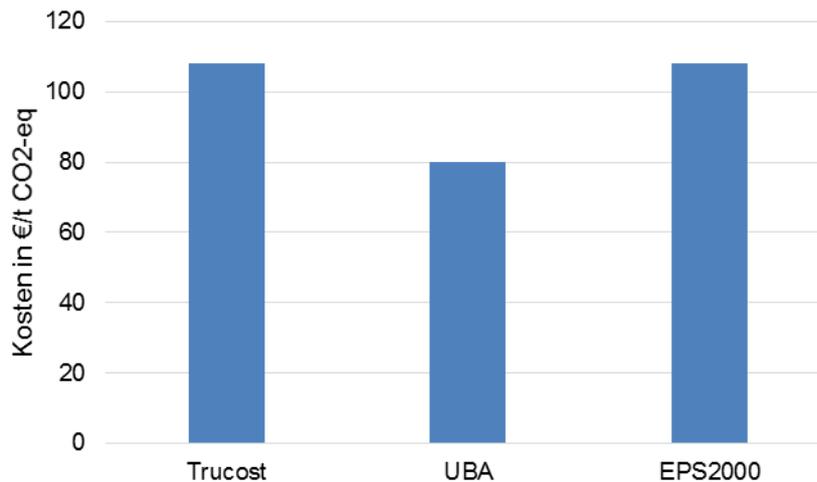


Abbildung 6-1: Vergleich von unterschiedlichen Faktoren zur Monetarisierung von Treibhausgasemissionen (verwendeter Umrechnungsfaktor: 1US\$ = 0,90€¹²⁷)

Im Unterschied zur gewählten Methode der ökonomischen Analyse in Kapitel 3, wurde für die externen Kosten in der Zukunft keine Diskontierung durchgeführt. Die verwendeten Faktoren zur Monetarisierung der Emissionen sind entsprechend für den gesamten Betrachtungszeitraum konstant. Zum einen wird die Diskontierung externer Kosten von Emissionen in der Zukunft in der Literatur unterschiedlich bewertet [Trucost 2015], zum anderen ist sie aufgrund des gewählten geringen Abzinssatzes von 1 % (Vergleiche Kapitel 3.1) kaum relevant¹²⁸, des Weiteren müsste zusätzlich noch eine Inflation der Faktoren zur Monetarisierung berücksichtigt werden.

Des Weiteren werden im Sinne einer ganzheitlichen Kostenbetrachtung alle auftretenden Kosten zusammengefasst (interne und externe), unabhängig von der Frage, ob diese tatsächlich anfallen und von wem sie getragen werden. Die externen Kosten sind in der Realität nicht vom Hausbesitzer zu zahlen, es handelt sich aber um gesamtgesellschaftliche Kosten, zu denen auch die Förderungen zu rechnen sind. In diesem Sinne werden die folgenden Kostenpositionen als ganzheitliche Kosten definiert und in den nachfolgenden Auswertungen dargestellt:

- verbrauchs-, betriebs- und kapitalgebundenen Kosten während der Nutzungsdauer, die vom Hausbesitzer getragen werden (der nach 20 Jahren noch bestehende Restwert von anlagentechnischen Komponenten ist von diesen Kosten abgezogen)
- Förderungen
- Monetarisierte Kosten der Umweltwirkungen der betrachteten Technologien

Da die Trucost-Methode ihre Ergebnisse in US\$ angibt, müssen diese erst in Euro umgerechnet werden, um mit den Ergebnissen der durchgeführten ökonomischen Analyse aus Kapitel 3.3 vergleichbar zu sein. Für diese Umrechnung wird ein Umrechnungsfaktor von 0,9 Euro je US\$¹²⁷ angesetzt.

Für die in der ökologischen Analyse betrachteten Umweltwirkungskategorien *Eutrophierung mariner Ökosysteme*, *terrestrische Eutrophierung*, *Ionisierende Strahlung* sowie *Ozonabbau* wurden für die

¹²⁷ Wechselkurs vom 03.11.2016 [ECB 2016]

¹²⁸ Zunächst betrifft die Diskontierung in der ökologischen Betrachtung nur Betriebskosten und die, im Laufe der Betrachtungszeit von 20 Jahren, auszuwechselnden anlagentechnischen Komponenten. Unter der Annahme, dass diese Kosten gleichmäßig über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren verteilt sind, würde sich durch die Diskontierung bei einem Zinssatz von 1% ca. ein Unterschied von 10% ergeben. Durch die Anschaffungskosten beim Einbau der Heiz- und Speichersysteme zu Beginn der Betrachtungszeit reduziert sich dieser Unterschied entsprechend.

Trucost-Methode keine Faktoren zur Monetarisierung erhoben. Infolgedessen sind diese vier Wirkungskategorien in der Berechnung der externen Kosten nicht enthalten.

6.2. Ergebnisse der Monetarisierung von Umweltwirkungen

Analog zu den bereits durchgeführten Analysen werden im Folgenden die Ergebnisse der beiden, bereits in Kapitel 2.3.1 beschriebenen, Szenarien untersucht:

Die folgenden Teilabschnitte stellen die Ergebnisse der Ökoeffizienzanalyse dar. Es werden die folgenden beiden, bereits in Kapitel 2.3.1 beschriebenen, Szenarien untersucht:

- Szenario 1 (=> *ungünstig für Wärmepumpen und weitere investitionskostenintensive Technologien*):
 - moderate Energiepreissteigerung
 - gängige Wärmepumpeneffizienz
 - kürzere Lebensdauern
- Szenario 2 (=> *günstig für Wärmepumpen und weitere investitionskostenintensive Technologien*):
 - starke Energiepreissteigerung (für Brennstoffe, siehe 3.3)
 - optimierte Wärmepumpeneffizienz (siehe Tabelle 2-7)
 - längere Lebensdauern (siehe Tabelle 2-11)

Dargestellt werden die Ergebnisse:

1. Unterschiedliche Heizsysteme beim Einsatz in den drei Gebäudetypen (Neubau, (teil-)sanierter Altbau und Altbau) unter Berücksichtigung eines mittleren Warmwasserbedarfs.
2. Unterschiedliche Speichersysteme unter Berücksichtigung eines über eine Luftwärmepumpe versorgten effizienten Neubaus mit einer 5 kWp PV Anlage auf dem Dach.
3. Der Einfluss des Warmwasserbedarfs auf die diesbezüglichen Energiekosten bei unterschiedlichen Heizungssystemen am Beispiel des (teil-)saniereten Altbaus.

Anmerkung: Die Ergebnisse für den Hochtemperaturelektrospeicher basieren auf Forschungsergebnissen und theoretischen Annahmen und sind lediglich als mittel- bis langfristiges perspektivisches Potential zu sehen. Ein derartiges System inkl. entsprechenden Tarifs ist aktuell und in absehbarer Zeit nicht am Markt verfügbar.

6.2.2. Szenario 1: moderate Energiepreissteigerung / gängige Wärmepumpeneffizienz / kürzere Lebensdauern

Heizsysteme

Neubau

Die NCA-Analyse der externen Effekte ergibt für die Heizungssysteme im Neubau nach Szenario 1 externe Kosten zwischen 6.000 € und 9.000 € (also 7.000 US\$ und 10.000 US\$). Da die umweltbedingten Kosten somit nur geringfügig voneinander abweichen, verschieben sich die Begebenheiten der bereits analysierten internen Kosten kaum (Abbildung 6-2). Der relativ geringe Unterschied der externen Kosten zwischen den Technologien im Neubau lässt sich vor allem mit dem hohen Einfluss der Bereitstellung des Haushaltsstroms, die für alle Technologien gleich ist, erklären.

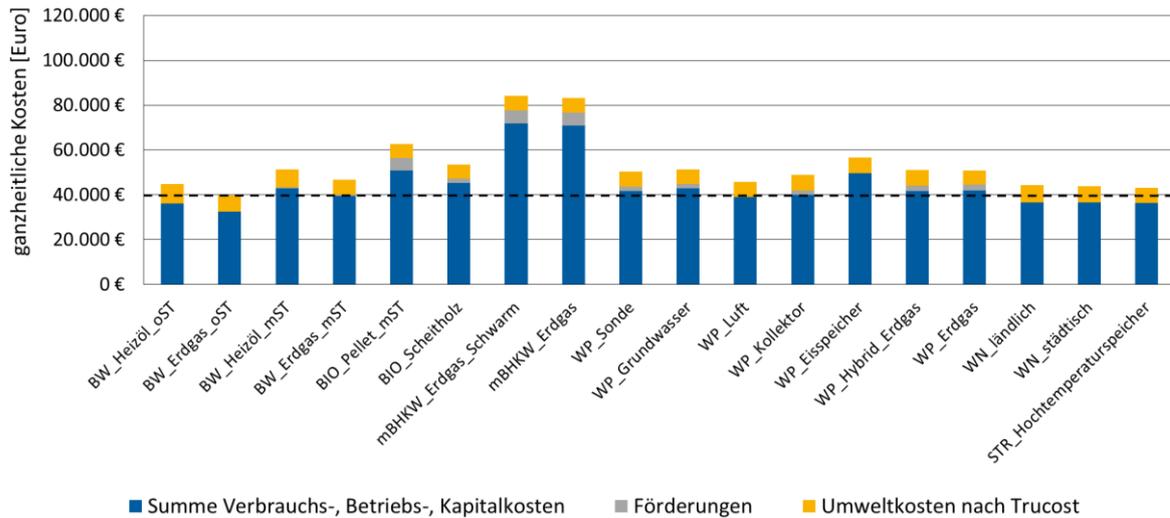


Abbildung 6-2: Neubau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)

Werden die Kosten aufgrund der externen Umwelteffekte näher betrachtet (Abbildung 6-3), fällt auf, dass der Großteil der externen Kosten für die meisten Heizsysteme auf die Emission von Treibhausgasen und ihren Beitrag zum Klimawandel entfällt. Insbesondere für das ländliche Wärmenetz, fällt außerdem die nicht-karzinogene Humantoxizität ins Gewicht. Das fotochemische Ozonbildungspotential, aber auch die Emission von Feinstaub sowie der Verbrauch von fossilen und mineralischen Ressourcen sind von geringerer Bedeutung. Für alle weiteren betrachteten Wirkungskategorien werden vernachlässigbare externe Kosten ermittelt.

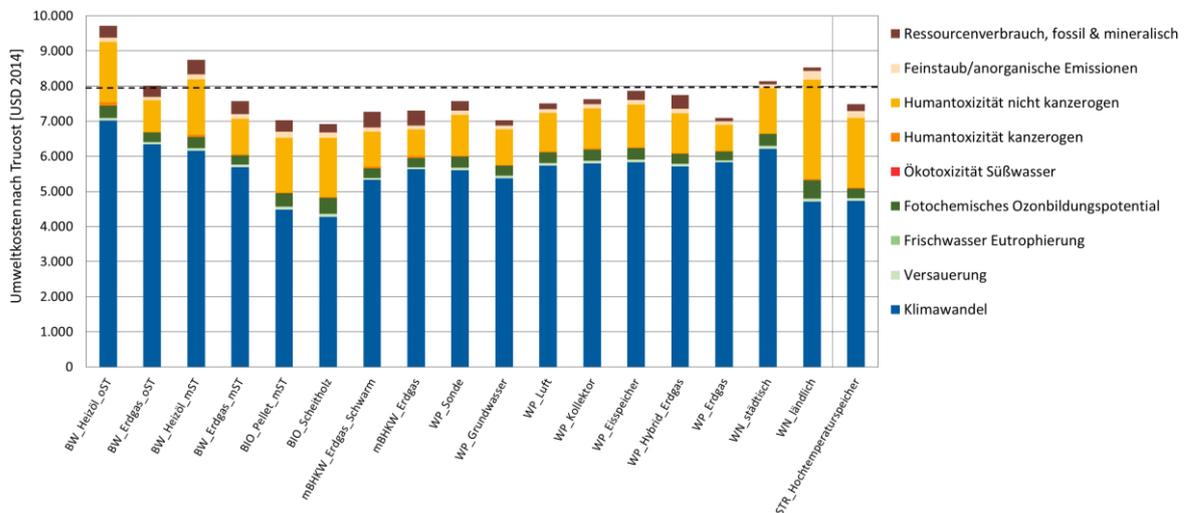


Abbildung 6-3: Neubau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)

Altbau

Die externen Kosten, die im Szenario 1 für den Altbau ermittelt werden, fallen mit 11.000 € - 28.000 € (ca. 12.000 US\$ bis knapp 31.000 US\$) deutlich höher aus als zuvor bei der Betrachtung des Neubaus. Für einige Technologien, wie beispielsweise das ländliche Wärmenetz, dem konventionellen Niedertemperaturölkessel (NT_Heizöl) oder auch dem Brennwertölkessel ohne Solarthermie (BW_Heizöl_oST), machen die externen Kosten ca. ein Drittel der ganzheitlichen Ökoeffizienzanalyse von Heiz- und Speichersystemen für private Haushalte

Kosten aus. Trotz des teilweise signifikanten Beitrags der externen Kosten schneiden die gleichen Technologien, nämlich die Erdgaswärmepumpe, der Brennwertkessel mit Erdgas ohne Solarthermie und der Erdgasniedertemperaturkessel, auch bei Betrachtung der ganzheitlichen Kosten am besten ab (Abbildung 6-4). Durch die Berücksichtigung der externen Kosten kommt es somit nur zu geringfügigen Verschiebungen der kostenoptimalen Heizsysteme. Der kleine ökonomische Vorteil bei den Erdgaskesseln gegenüber den Heizölkesseln vergrößert sich unter Einbezug der externen Kosten deutlich.

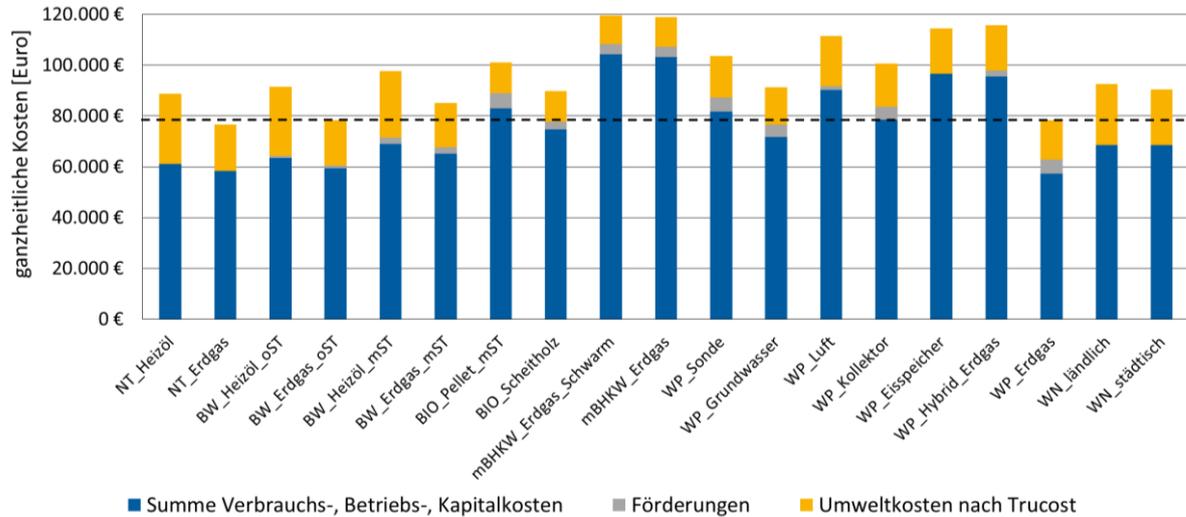


Abbildung 6-4: Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)

Auch für die meisten im Altbau eingesetzten Heizsysteme stellt die Emission von Treibhausgasen den größten Verursacher externer Kosten dar. Für die Nutzung des ländlichen Wärmenetzes überwiegen jedoch die externen Kosten aufgrund der nicht kanzerogenen Humantoxizität. Im Vergleich zu diesen, gehen von den weiteren betrachteten Wirkungskategorien nur geringe externe Kosten aus (Abbildung 6-5). Allerdings ist hier zu beachten, dass die Verwendung von Partikelabscheidern die Staub- und Schwermetallemission deutlich, und somit auch die externen Kosten, reduzieren würde.

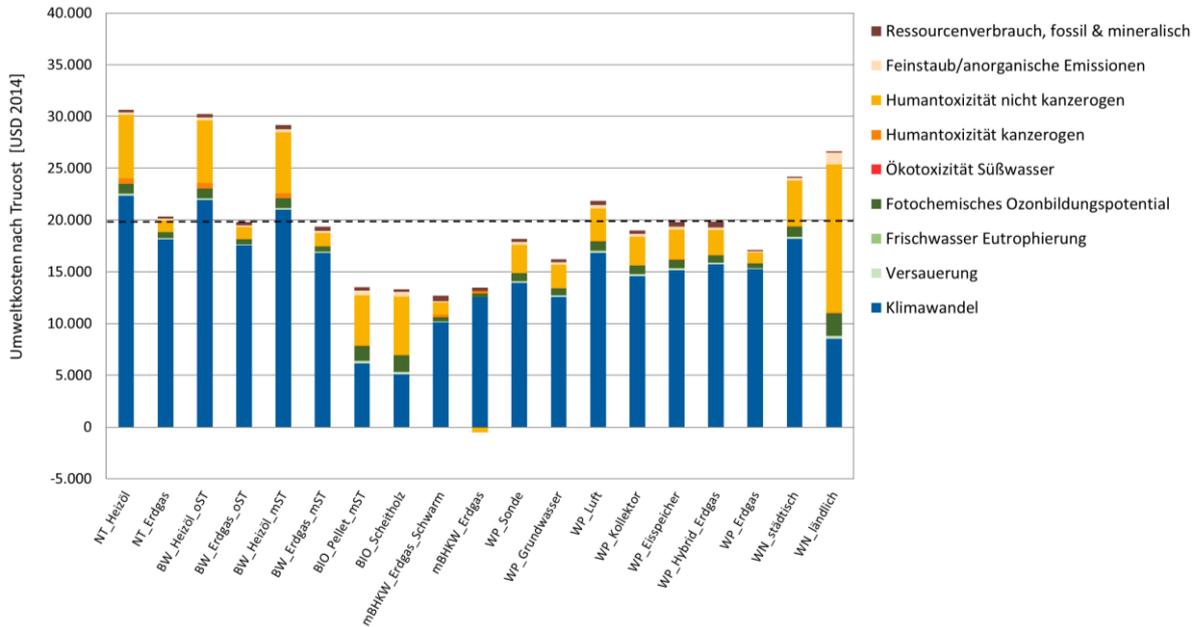


Abbildung 6-5: Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)

(teil-)sanierter Altbau, mittlerer Warmwasserverbrauch

Erwartungsgemäß liegen die externen Kosten für den (teil-)sanierteren Altbau (bei mittlerem Warmwasserbedarf und im Szenario 1) zwischen den bereits betrachteten Beiträgen bei Neu- und Altbau und belaufen sich auf 8.000 € - 15.000 € (9.000 US\$ - 17.000 US\$). Der vorläufige Weiterbetrieb des Erdgasniedertemperaturkessels mit anschließendem Austausch durch ein Brennwertgerät schneidet, wie bereits bei der ökonomischen Betrachtung in Abschnitt 3.3, auch hinsichtlich der ganzheitlichen Kosten am besten ab, und das im Schwarm gesteuerte BHKW am schlechtesten. Dazwischen kommt es zwar zu manchen Verschiebungen, beispielsweise Heizölniedertemperaturkessel und Erdgaswärmepumpe oder Wärmepumpensystem mit Erdkollektor und der Nutzung eines Wärmenetzes. Im Allgemeinen verstärken jedoch die zusätzlich betrachteten externen Kosten die Verhältnisse der internen Kosten (Abbildung 6-6).

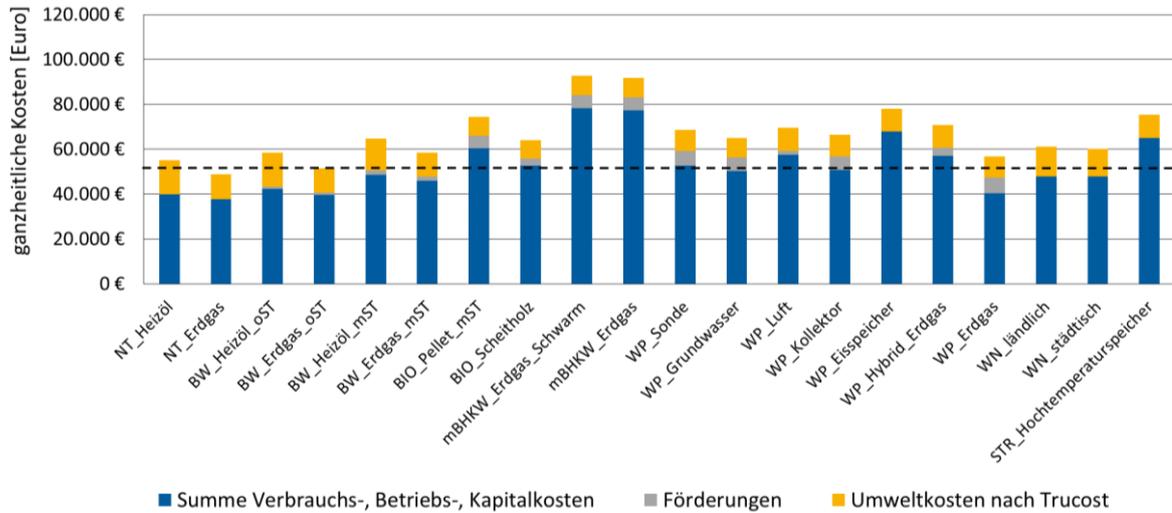


Abbildung 6-6: (teil-) San. Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)

Wie bereits bei den vorherigen Betrachtungen, entfällt auch beim (teil-)sanierten Altbau bei den meisten Heizsystemen der größte Anteil der externen Kosten auf den Beitrag zum Klimawandel durch die Emission von Treibhausgasemissionen. Allerdings gehen auch bei dieser Betrachtung für die Pellet- und Scheitholzheizung sowie für das ländliche Wärmenetz noch größere externe Kosten von der nicht kanzerogenen Humantoxizität aus. Diese fällt auch für die Ölheizungen und den *Hochtemperaturelektrospeicher* deutlich aus. Die weiteren betrachteten Wirkungskategorien sind von erheblich geringerer Bedeutung (Abbildung 6-7).

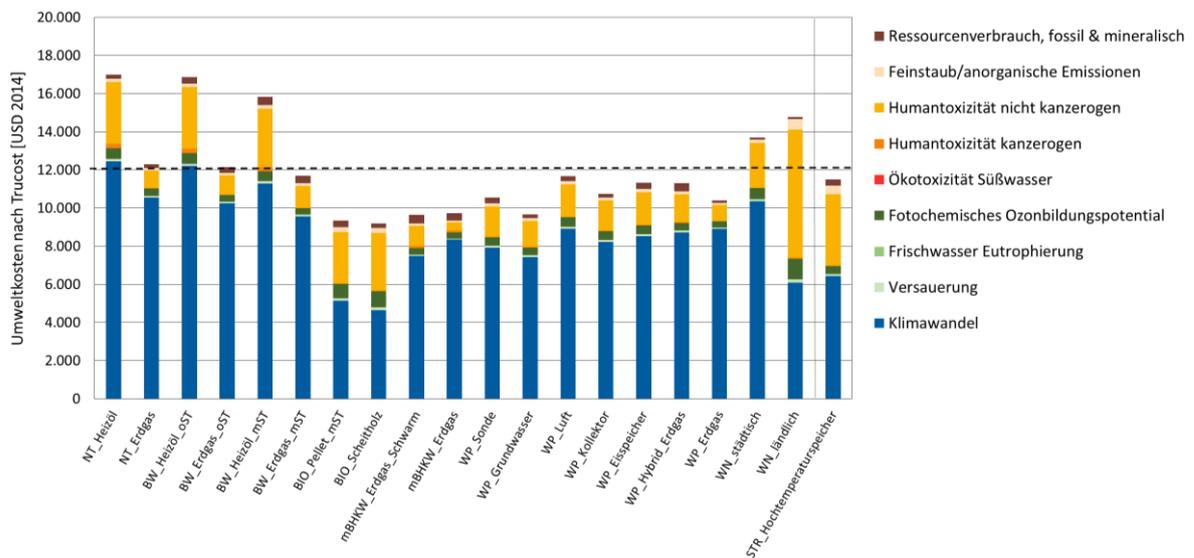


Abbildung 6-7: (teil-) San. Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 1 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)

Speichersysteme

Die Umweltwirkungen, die von der Nutzung der Speichersysteme (für einen Neubau im Szenario 1) ausgehen, werden mit externen Kosten von 4.970 € - 5.200 € (5.520 US\$ - 5.780 US\$) bemessen und tragen somit zu 10-15 % der ganzheitlichen Kosten bei. Durch die geringe Bedeutung der ermittelten externen Kosten ergeben sich keine Verschiebungen in der Bewertung der betrachteten Speichersysteme.

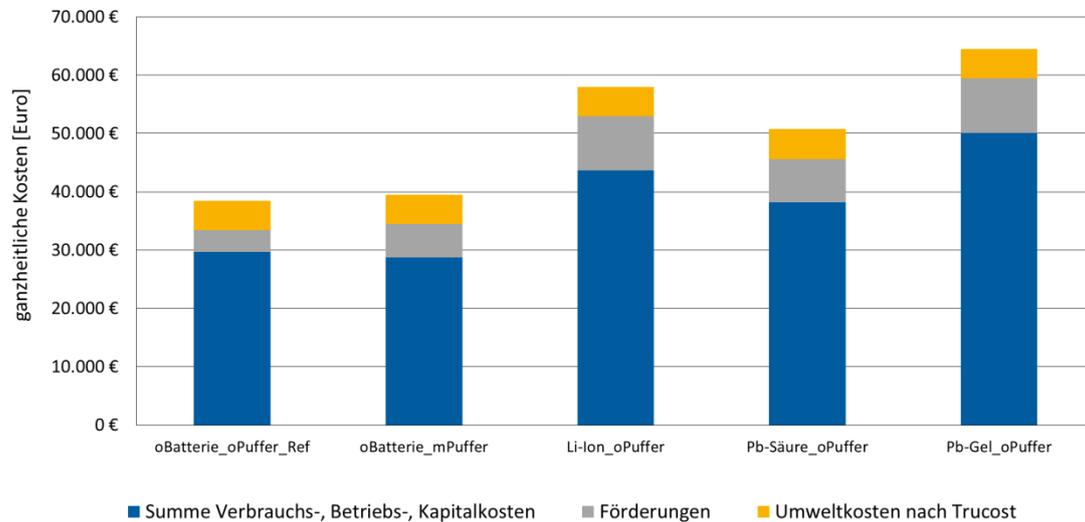


Abbildung 6-8: Neubau, Speichersystemvergleich, Szenario 1 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)

Im Unterschied zu den zuvor betrachteten Heizsystemen, gehen die größten externen Kosten für alle betrachteten Speichersysteme von der nicht-kancerogenen Humantoxizität aus. Der zweitgrößte Beitrag ist auf die Treibhausgasemissionen zurückzuführen, dicht gefolgt vom Verbrauch von fossilen und mineralischen Ressourcen, insbesondere wenn die Verwendung einer Batterie zugrunde gelegt wird. Von den Emissionen von Feinstaub und anderen anorganischen Substanzen sowie vom fotochemischen Ozonbildungspotential gehen deutlich geringere externe Kosten aus, wohingegen die externen Kosten aller anderen betrachteten Umweltwirkungen bereits vernachlässigbar sind (Abbildung 6-9).

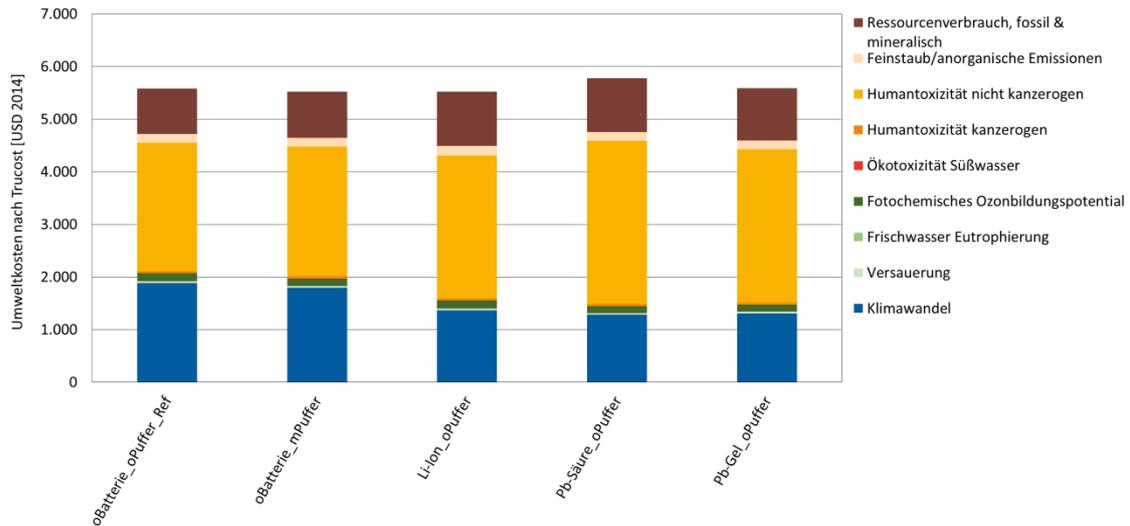


Abbildung 6-9: Neubau, Speichersystemvergleich, Szenario 1 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)

6.2.3. Szenario 2: starke Energiepreissteigerung / optimierte Wärmepumpeneffizienz / längere Lebensdauern

Heizsysteme

Die optimierte Wärmepumpeneffizienz und die verlängerten Lebensdauern im Szenario 2 führen nicht nur zu geringeren Kosten für den Verbraucher (vgl. Abschnitt 3.3.2), sondern bringen auch geringere externe Kosten aufgrund von Umweltwirkungen mit sich. Dies zeigt sich neben allen Wärmepumpentechnologien insbesondere bei den materialintensiven Systemen, wie *Hochtemperaturelektrospeicher*, *WP_Eisspeicher*, und *mBHKW*. Die Reduktion der externen Kosten beträgt im Allgemeinen bis zu 10 % und steigt für den Einsatz eines Wärmepumpensystems mit Eisspeicher im Altbau sogar bis auf 18 % an.

Da die Betrachtung nach Szenario 2 jedoch keine stark veränderten Ergebnisse mit sich bringt, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Diskussion der externen Kosten im Szenario 2 verzichtet und stattdessen auf die im Anhang befindlichen Abbildungen verwiesen.

Speichersysteme

Auch für die betrachteten Speichersysteme ergeben sich geringere externe Kosten durch Umweltwirkungen, die im Falle der Verwendung einer Batterie mehr als 20 % betragen.

Auch an dieser Stelle ist eine ausführlichere Diskussion nicht notwendig und es wird stattdessen auf die Darstellungen im Anhang verwiesen.

7. Zusammenfassung und Fazit

Das vorliegende Forschungsprojekt liefert eine faktenbasierte Entscheidungshilfe für die Auswahl eines neuen Heizungs- oder Speichersystems für Neubauten und für bestehende Gebäude (Altbau und teil-sanierter Altbau). Die Hauptadressaten der Untersuchung sind Eigenheimbesitzer von Ein- bis Zweifamilienhäusern in Bayern. Unter entsprechender Berücksichtigung der entsprechenden Rahmenbedingungen ist jedoch auch eine Anwendbarkeit auf Mehrfamilienhäuser möglich.

Besondere Berücksichtigung finden neben den klassischen Heizungssystemen wie Erdgas- oder Heizölbrennwertkessel Systeme, die sich in das sektorübergreifende, weitestgehend klimaneutrale Energiesystem der Zukunft eingliedern können, wie z. B. große Batteriespeichersysteme (>12 kWh) mit der Möglichkeit eines netzdienlichen Speichermanagements, Wärmepumpen oder Biomassekessel. Derartige Systeme werden von der bayerischen Staatsregierung im „10.000-Häuser Programm“ monetär gefördert. Es sei angemerkt, dass die potentielle Netzdienlichkeit einzelner Technologien und die damit verbundenen Auswirkungen auf Netzausbau, Kapazitäten zur Stromspeicherung oder den weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung im Fokus der bayerischen Staatsregierung stehen. In diesem Forschungsprojekt erfolgt die Ökoeffizienzbewertung der einzelnen Systeme jedoch aus Sicht des Eigenheimbesitzers und nicht hinsichtlich des volkswirtschaftlichen Nutzens. Die entsprechenden Förderungsbedingungen für Eigenheimbesitzer sind zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie bei den Betrachtungen entsprechend berücksichtigt und separat ausgewiesen, so dass auch bei einer Änderung der Einfluss auf das Gesamtergebnis abgeschätzt werden kann.

Im Mittelpunkt der Analyse stehen die drei Gebäudeklassen: Neubau, Altbau und (teil-)sanierter Altbau, die jeweils für einen definierten Heizwärmedarf stehen. Neben der Bereitstellung von Nutzwärme durch die Heizsysteme wird auch die Bereitstellung des Stroms für den Betrieb aller betrachteten anlagentechnischen Komponenten sowie des Haushaltsstroms berücksichtigt. Dieser Ansatz ist gewählt, da BHKWs neben Wärme auch Strom produzieren. Zudem deckt die Photovoltaikanlage bei den Speichersystemen ebenfalls einen Teil des Gesamtstrombedarfs. Als Konsequenz fallen die Unterschiede bei den Heizungssystemen, vor allem im Neubau, der durch einen geringen Heizwärmebedarf gekennzeichnet ist, weniger stark aus. Unterschiedliche Warmwasserbedarfe sowie unterschiedliche technische Parameter, z.B. Effizienzen, werden über zwei Szenarien abgebildet. Ferner umfasst die Studie einen 20 jährigen Analysehorizont (2017-2037). Für Systemkomponenten, die eine kürzere oder längere Lebensdauer haben, werden Ersatzinvestitionen berücksichtigt und/oder entsprechende Restwerte abgezogen, so dass eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Zunächst wird eine ökonomische Bewertung der Heiz- und Speichersysteme durchgeführt. In der anschließenden ökologischen Bewertung werden neben den Treibhausgasen weitere Umweltthemen wie Versauerung, Eutrophierung oder Toxizität betrachtet und mittels eines Gewichtungsschlüssels zu einem Wert (Single-Score) zusammengefasst. Abschließend werden die Ergebnisse der ökonomischen und ökologischen Bewertung in der Ökoeffizienzanalyse zusammengeführt.

Bei der Auswahl der Rahmenbedingungen wurde versucht möglichst allgemeingültige Daten zu verwenden. Die individuellen Rahmenbedingungen eines Eigenheimbesitzers, der vor einer Investitionsentscheidung steht, werden jedoch immer - mehr oder minder - von diesen abweichen, was zu abweichenden Ergebnissen und Schlussfolgerungen führen kann. Ein Teil der möglichen Bandbreite der Rahmenbedingungen wurde über Sensitivitätsuntersuchungen zum Warmwasserbedarf, der Wärmepumpeneffizienz und den Energiepreissteigerungen (siehe Szenario

1 und 2) berücksichtigt. Darüber hinaus gehende individuelle Rahmenbedingungen (z.B. hinsichtlich abweichender Investitionskosten auf der Grundlage von vorliegenden Angeboten oder abweichende Energiepreise) können durch die transparente Darstellung der berücksichtigten Rahmenbedingungen und Einzelergebnisse - aufgeteilt nach unterschiedlichen Kostenblöcken - durch den Anwender in geeigneter Weise berücksichtigt werden. Die Anwender, d.h. Investoren, werden somit in die Lage versetzt, unter Berücksichtigung der individuellen Rahmenbedingungen und der individuellen Priorisierung - sei dies der Klimaschutz, die Wirtschaftlichkeit oder die Luftreinhaltung im städtischen Raum - eine Entscheidungsgrundlage für das für Ihn/Sie optimale System zu treffen.

Die Ergebnisse der ökonomischen Analyse des Forschungsprojektes zeigen, dass insbesondere im Neubau die Anlagen mit geringen Investitionskosten am wirtschaftlichsten sind. Eine Heizwärmeversorgung mittels Erdgas stellt unter den berücksichtigten Rahmenbedingungen in den meisten Fällen die wirtschaftlichste Lösung dar. Durch die Förderung wird jedoch die Wirtschaftlichkeit von Systemen verbessert, die eine gute Kompatibilität zum Energiesystem der Zukunft aufweisen. Die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpen ist neben dem Verhältnis zwischen Stromkosten zu den Kosten der übrigen Energieträger stark von der Qualität der Anlage und deren Systemoptimierung abhängig. Darüber hinaus hat auch der Warmwasserbedarf einen signifikanten Einfluss auf die Energiekosten und sollte daher bei der Systemwahl berücksichtigt werden. Batteriespeicher sind unter den gegebenen Bedingungen, bei der berücksichtigten Größe von 12 kWh und den aktuellen Investitionskosten (zur Zeit der Erstellung der Studie), trotz Förderung, noch nicht wirtschaftlich. Da bei diesen Systemen jedoch aktuell ein starker Preisverfall zu beobachten ist, ist davon auszugehen, dass beispielsweise für Li-Ionen Batterien die Wirtschaftlichkeitsschwelle bereits 2017 erreicht werden kann.

Bei der ökologischen Analyse der Heizungssysteme zeigt der Vergleich von Altbau und (teil-)saniertem Altbau zunächst deutlich, dass die Reduzierung des Nutzwärmebedarfs unabhängig von der Frage der Energieträgerauswahl einen entscheidenden Beitrag zur Reduzierung der Umweltlasten hat. Bei Neubauten mit Passivhausstandard spielt die Art des Heizungssystems eine weniger entscheidende Rolle.

Des Weiteren zeigt sich, dass beim Neubau die Unterschiede bei den Treibhausgasen, als auch teilweise bei anderen Umweltwirkungskategorien, gegenüber dem Referenzgerät aufgrund des Einbezugs des Haushaltsstroms weniger stark ausgeprägt sind, als bei Altbau und (teil-)saniertem Altbau. Klammert man den Haushaltsstrom aus der Betrachtung aus, zeigen sich ähnliche Unterschiede wie beim Altbau, wobei die Produktion der anlagentechnischen Komponenten beim Neubau insgesamt für alle Umweltwirkungskategorien relevanter ist als bei Altbau und (teil-)saniertem Altbau mit entsprechend höherem Nutzwärmebedarf.

Die Nachteile des Referenzsystems Erdgasbrennwertkessel (BW_Erdgas_oST) bei den Treibhausgasen gegenüber den Biomassekesseln, werden aufgrund geringerer Stickoxid-, Kohlenmonoxid- und Staubemissionen bei der Verbrennung des Energieträgers in der gewichteten Betrachtung aller Umweltwirkungskategorien zwar teilweise kompensiert, dennoch ergeben sich für „BIO_Scheitholz“ und „BIO_Pellet“ deutliche Vorteile bei den aggregierten Umweltlasten. Es ist allerdings zu beachten, dass die Nutzung von Biomassekessel an die Verfügbarkeit von lokal oder regional angebaute Biomasse gekoppelt sein sollte.

Wichtig zu berücksichtigen ist, dass die gewichteten Ergebnisse aller Umweltwirkungskategorien vom Gewichtungsschlüssel abhängig sind, und dieser aufgrund individueller Präferenzen unterschiedlich ausfallen kann. Die Gewichtung von Staubemissionen kann beispielsweise je nach Standort ganz unterschiedlich ausfallen. Des Weiteren werden mit der Betrachtung aller Umweltthemen, Wirkungskategorien mit ganz unterschiedlichen Unsicherheiten bezüglich der Charakterisierungsmethode, der Normierungsfaktoren als auch der Emissionen selbst, aggregiert. Ist die Robustheit der Ergebnisse bei den Treibhausgasemissionen oder klassischen Luftschadstoffen

(NO_x, SO₂, CO, Staub etc.), die eine Wirkung bei den Umwelthemen Versauerung, oder Eutrophierung haben, hoch bis sehr hoch, so ist die Robustheit bei Toxizitätsindikatoren oder dem Ressourcenindikator eher als gering einzuschätzen.

Die sich aus der Verwendung von strombetriebenen Wärmepumpen ergebenden Emissionen, insbesondere die Treibhausgase, sind wesentlich von der Effizienz der Wärmepumpen und dem Umweltprofil des verwendeten Strombezugs abhängig. Aufgrund des gewählten Analysehorizonts von 20 Jahren ist für den Betrieb der Heizungs- und Speichersysteme der Zeitraum 2017 bis 2037 relevant. Aufgrund der Ausbauziele für erneuerbare Energien, die sich beispielsweise aus dem Energiekonzept der Bundesregierung ableiten lassen, wurde entsprechend ein Strommix modelliert, der die mögliche Entwicklung berücksichtigen soll und für den Betrachtungszeitraum repräsentativ ist. Die Ergebnisse ändern sich entsprechend bei einem langsameren oder schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien zur Erzeugung von Strom.

Mit dem verwendeten Strommix verfügen alle strombasierten Wärmepumpen bereits mit den konservativ gewählten Effizienzen in Szenario 1 über geringere Treibhausgasemissionen als das Referenzgerät Erdgasbrennwertkessel. Mit den in Szenario 2 verwendeten optimierten Effizienzen für die Wärmepumpen erhöhen sich die Reduktionen entsprechend. An dieser Stelle sei nochmals deutlich darauf hingewiesen, dass Ergebnisse für die Wärmepumpen stark von den individuellen Gegebenheiten des Gebäudes, der Planung und der Einstellung (Betrieboptimierung) abhängig sind.

Die Vorteile der mBHKW gegenüber dem Referenzsystem ergeben sich vor allem aus den Gutschriften für den erzeugten Strom aufgrund der Kraft-Wärme-Kopplung. Hier ist zu berücksichtigen, dass mit potentiell zunehmendem Anteil erneuerbarem Stroms, sich die Gutschrift für den eingespeisten Strom langfristig ändern wird und insbesondere für die Treibhausgase kleiner wird und sich der Vorteil künftig entsprechend mehr und mehr reduzieren wird.

Bei den Speichersystemen konnte gezeigt werden, dass, unter Ausschließung des Ressourcenindikators, die Verwendung von Batterien als Speichersysteme vorteilhaft sein kann. Die diskutierten Schwächen in der Methodik des Ressourcenindikators der verwendeten ILCD Methode machen eine abschließende Aussage allerdings nicht möglich. Die Aussagen über die Ökoeffizienz der Batteriespeicher sind stark von der aktuellen und zukünftigen Kostenentwicklung der Batterien abhängig. Wie zuvor beschrieben zeigte allein die Kostendynamik während des Zeitraums der Erstellung dieser Studie deutliche Kostenreduktionen, die bis zu 50 % erreichen, was zu einer deutlich verbesserten Ökoeffizienz führen würde.

Die Ergebnisse der Ökoeffizienz der Heizsysteme zeigen, dass verschiedene Anlagen (teilweise Wärmepumpen, BIO_Scheitholz & BIO_Pellet, mBHKW, im Neubau auch Wärmenetz und Hochtemperaturelektrospeicher) ökologisch besser als der Erdgasbrennwertkessel als Referenzgerät sind. Aufgrund höherer Kosten, ist die Ökoeffizienz aber nur bei wenigen Systemen vergleichbar oder besser. Dies sind bei Szenario 1 im Altbau zum Beispiel die WP_Erdgas oder BIO_Scheitholz und im Neubau die Wärmenetze. Eine Reduzierung der Umweltlasten geht somit meist mit entsprechend höheren Kosten einher. Wärmeerzeuger mit Erdgas als Energieträger verfügen aufgrund der geringen Luftschadstoffemissionen, wie Stickoxide, Kohlenmonoxid oder Feinstaub über eine relativ gute Ökoeffizienz. Hierzu muss jedoch angemerkt werden, dass der Einsatz dieser Technologien hinsichtlich des Erreichens der Klimaschutzziele kritisch zu sehen ist, solange das Gas nicht in relevanten Anteilen durch Biomethan oder synthetisches Gas (power-to-gas) ersetzt wird.

Ausblick:

Die Studie erarbeitet eine Entscheidungshilfe zur Auswahl eines geeigneten Heiz- und Speichersystems unter ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingung. Aus der Bearbeitung haben sich folgende Möglichkeiten für weitere wissenschaftliche Betrachtungen ergeben:

- Der Nutzwärmebedarf hat maßgeblichen Einfluss auf die Ökoeffizienz. Da dieser wiederum vom energetischen Zustand des Gebäudes stark abhängt, lässt sich folgern, dass gerade für Altbauten und teilsanierte Altbauten neben der Wahl des geeigneten Heiz- und Speichersystems immer die Option der energetischen Sanierung in Betracht gezogen werden sollte. Um diesen Vergleich der Investitionen in ein neues Heiz- und Speichersystem versus der Investitionen in energetische Gebäudesanierung zu quantifizieren, müsste eine detaillierte Analyse durchgeführt werden.
- Zudem könnte eine Studie zur Bewertung der Netzdienlichkeit einiger Technologien aus Sicht eines Energieversorgers bzw. aus volkswirtschaftlicher Sicht durchgeführt werden. Hier könnten auch jahresaufgelöste Strommixe für den betrachteten Zeitraum verwendet werden, um den Einfluss des möglichen Ausbaus der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung auf die Verwendung von strombasierten Heizungsgeräten genauer zu analysieren.
- Die Finalisierung der derzeitigen Überarbeitung der Auswahl der Methodik des Ressourcenindikators, für die im ILCD Handbook vorgeschlagenen Methoden zur Wirkungsabschätzung, könnte für eine Überarbeitung der vorliegenden Studie verwendet werden.
- Die Ergebnisse sind stark von den individuellen Rahmenbedingungen abhängig. Obwohl es durch die hohe Transparenz der Eingabedaten dem Nutzer grundsätzlich ermöglicht wird individuelle Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, ist jedoch zu befürchten, dass aufgrund des erforderlichen Rechenaufwandes, entgegen der ausdrücklichen Empfehlungen, keine gesonderten individuellen Rechnungen durchgeführt werden, bzw. diese nicht richtig durchgeführt werden. Dies kann zu unerwünschten Fehlentscheidungen führen. Dem könnte durch die Erstellung eines projektbezogenen Onlinetools entgegengewirkt werden.

Quellenverzeichnis

10.000-Häuser-Programm 2016	Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie (2016): 10.000-Häuser-Programm, EnergieBonusBayern, Förderrichtlinien zur Durchführung des bayerischen 10.000-Häuser-Programms. Verfügbar unter: https://www.energieatlas.bayern.de/file/pdf/1783/10000-Haeuser-Programm_-_Richtlinie.pdf (zuletzt geprüft: 18.01.2017)
AGEB 2015	AG Energiebilanzen e.V. (2015): Ausgewählte Effizienzindikatoren zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2014. Berlin, Deutschland.
AGFW 2015	Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (2015): AGFW – Hauptbericht 2014. Frankfurt am Main, Deutschland.
AGFW 2016	Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW) (2016): Fernwärme-Preisübersicht (Stichtag: 01.10.2016) Webexemplar. Frankfurt am Main, Deutschland. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_nawsecured1&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes_menue/wirtschaft_und_market/market_und_preise/Preisbildung-_Anpassung/AGFW-Preisuebersicht_2016_Internetexemplar.pdf&t=1484751154&hash=f25997477ca0b84b82b0cdbb92d27b5d00a6e20a (zuletzt geprüft: 17.01.2017)
Agora 2015	Agora Energiewende (2015): Agorameter – Stromerzeugung 2015, https://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/76/Agorameter/
ASUE 2014	BHKW- Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. (ASUE) (2014): BHKW-Kenndaten 2014/2015. Berlin, Deutschland.
BAFA 2015	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)(2015): Emissionen nach Typenprüfung aller BAFA geförderten Kessel - Januar 2014 bis Januar 2015
BAFA 2016a	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2016): EnergieINFO – Mineralölabsatz 03/2016. Eschborn, Deutschland.
BAFA 2016b	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (2016): Heizen mit Erneuerbaren Energien Verfügbar unter: http://www.bafa.de/DE/Energie/Heizen_mit_Erneuerbaren_Energien/heizen_mit_erneuerbaren_energien_node.html;jsessionid=0ECA0C7F31278090BB005F8C9D88D67B.1_cid371 (zuletzt geprüft: 18.01.2017)
BDEW 2014	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2014): Stromverbrauch im Haushalt. Berlin, Deutschland.
BDEW 2016	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2016): BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2016. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung im Neubau. Berlin, Deutschland. Verfügbar unter:

	https://www.bdew.de/internet.nsf/res/3CF1D7D642F76B6FC1257F620048D420/\$file/BDEW-HKV-Neubau-2016.pdf (zuletzt geprüft: 17.01.2017)
BGBI 2014	Bundesgesetzblatt (BGBI) (2014): Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014, Anlage 3 (zu den § 8 und 9) Anforderungen bei Änderung von Außenbauteilen und bei Errichtung kleiner Gebäude; Randbedingungen und Maßgaben für die Bewertung bestehender Wohngebäude. Berlin, Deutschland.
BMJV 2009	Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV) (2009): Verordnung über die Kehrung und Überprüfung von Anlagen (Kehr- und Prüfungsordnung – KÜO). Berlin, Deutschland.
BMUB 2014	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2014): Stromspiegel für Deutschland 2014. Vergleichswerte für Ihren Stromverbrauch. Berlin, Deutschland.
BTGA 2015	BTGA – Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e.V. (BTGA) (2015): BTGA-Regel 3.001 – Wartung heiztechnischer Anlagen. Bonn, Deutschland.
C.A.R.M.E.N. e.V. 2015	Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N. e.V.) (2015): Marktübersicht Batteriespeicher. Informationsangebot. Straubing, Deutschland. Verfügbar unter: http://www.carmen-ev.de (zuletzt geprüft: 01.08.2016).
C.A.R.M.E.N. e.V. 2016a	Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N. e.V.) (2016): Betriebsdaten geförderter bayerischer Biomasse-Heizwerke – Auswertung Jahresberichte 2014. Straubing, Deutschland.
C.A.R.M.E.N. e.V. 2016b	Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N. e.V.) (2016): Preisentwicklung bei Holzpellets - Der Holzpellet-Preis-Index. Verfügbar unter: https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets (zuletzt geprüft: 17.01.2017)
CEIP 2016	Centre on Emission Inventories and Projections (2016): Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) Inventory Submission, http://www.ceip.at/status_reporting/
DBFZ 2015	Deutsches Biomasseforschungszentrum (2015): Staubabscheider in häuslichen Feuerungen, Leipzig
DESTATIS 2016	Statistisches Bundesamt (2016): Preise, Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis November 2016 -. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden, Deutschland.
ECB 2016	European Central Bank (2016): Euro exchange rates USD, https://www.ecb.europa.eu/stats/exchange/eurofxref/html/eurofxref-graph-usd.en.html
EEG 2017	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017). Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf (zuletzt geprüft: 18.01.2017)
EnergieAgentur. NRW 2011	EnergieAgentur.NRW (2011): Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“ – Anteile, Verbrauchswerte und Kosten von 12 Verbrauchsbereichen in Ein- bis Sechs-Personen-Haushalten. Wuppertal, Deutschland

EID 2017	Energieinformationsdienst (Primärquelle) (2017): Aktuelle Heizölpreise. mobene GmbH & Co. KG. Verfügbar unter: https://www.mobene.de/energie/heizoel/preisinformationen.html (zuletzt geprüft: 17.01.2017)
Europäische Kommission 2012	Europäische Kommission (2012): Leitlinien zur delegierten 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. Erhältlich unter http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:C:2012:115:0001:0028:DE:PDF
FNR 2013	Hartmann, H et al. (2013): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
Fraunhofer ISE 2011	Miara, M. et al. (2011): Wärmepumpen Effizienz. Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanalgen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik. Freiburg, Deutschland.
HTW Berlin 2015	Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin (2015): Einsatz von PV-Systemen mit Wärmepumpen und Batteriespeichern zur Erhöhung des Autarkiegrades in Einfamilienhaushalten. Berlin, Deutschland.
HTW Berlin 2016	Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin (2016): Effekte der 50%-Einspeisebegrenzung des KfW-Förderprogramms für Photovoltaik-Speichersysteme. Verfügbar unter: http://pvspeicher.htw-berlin.de (zuletzt geprüft: 01.08.2016).
Hunkeler 2008	Hunkeler, D. et al. (2008): Environmental Life Cycle Costing, CRC Press Inc, ISBN: 978-1-420054705
IFEU 2008	Vogt, R. et al (2008): Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und –nutzung in Deutschland, IFEU, http://www.biogaspartner.de/fileadmin/biogas/Downloads/Studien/BMU-Biogasprojekt_2008-Gesamtband.pdf
ISO 2006a	International Organization for Standardization (ISO) (2006): ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Genf, Schweiz.
ISO 2006b	International Organization for Standardization (ISO) (2006): ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Genf, Schweiz.
IWO 2016	Institut für Wärme und Oeltechnik e. V. (IWO) (2016): Anteil schwefelarmen Heizöls. Hamburg, Deutschland.
IWU 2006	Hinz, E. et al. (2006): Gebäudetypologie Bayern – Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns. Endbericht. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU). Studie im Auftrag des Bund Naturschutz Bayern e.V.. Darmstadt, Deutschland.
JRC 2011a	Huppés, G.; van Oers, L. (2011): Evaluation of Weighting Methods for Measuring the EU-27 Overall Environmental Impact. European Commission – Joint

	Research Centre (JRC) – Institute for Environment and Sustainability. Luxemburg, Luxemburg.
JRC 2011b	European Commission – Joint Research Centre (JRC) – Institute for Environment and Sustainability (2011): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context. First edition November 2011. EUR 24571 EN – 2011. Luxemburg, Luxemburg.
JRC 2012	European Commission – Joint Research Centre (JRC) – Institute for Energy and Transport (2012): Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology. Luxemburg, Luxemburg. Verfügbar unter: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php (zuletzt geprüft: 01.08.2016).
JRC 2014	Benini, L. et al. (2014): Normalisation Method and Data for Environmental Footprints. European Commission – Joint Research Centre (JRC) – Institute for Environment and Sustainability. ISBN: 978-92-79-40847-2. Luxemburg, Luxemburg.
JRC 2016	Sala, S; Benini, L. et al. (2016): Environmental Footprint - Update of Life Cycle Impact Assessment methods; DRAFT for TAB (status: May 2, 2016), European Commission – Joint Research Centre (JRC) – Institute for Environment and Sustainability
JRC 2016 b	Joint Research Centre (2016): Table_ILCD_NFs_98-03-2016, excel file, http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/Table_ILCD_NFs_08-03-2016.xlsx , European Commission – Joint Research Centre (JRC) – Institute for Environment and Sustainability
KfW 2017	Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (2017): Förderprogramm 275, Erneuerbare Energien – Speicher. Verfügbar unter: https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Foerderprodukte/Erneuerbare-Energien---Speicher-(275)/#2 (zuletzt geprüft: 18.01.2017)
Kutzner 2015	Kutzner und Weber GmbH (2015): Aus Zumik@on wird Airjekt – Der Partikelabscheider Airjekt 1 – Produktbeschreibung, Maisach
KWK-Gesetz 2015	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) (2015): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG). Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/kwkg_2016/ (zuletzt geprüft: 18.01.2017)
LfU 2016	Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2016): Energieinfrastruktur der Zukunft: Projekt Windheizung 2.0. Energiespeicherung und Stromnetzregelung mit hocheffizienten Gebäuden. Laufendes Projekt des Bayerischen Landesamts für Umwelt und des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie. Augsburg, Deutschland
LSN 2014	Landesamt für Statistik Niedersachsen (LSN) (2014): Zensus 2011 – Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland. Erste Ergebnisse der Gebäude- und Wohnungszählung 2011. Im Auftrag der Herausberggemeinschaft. Statistische Ämter des Bundes und der Länder. Hannover, Deutschland

Mattenklott 2009	Mattenklott, M.; Höfert, N. (2009): Stäube an Arbeitsplätzen und in der Umwelt – Vergleich der Begriffsbestimmungen, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 69 (2009) Nr. 4 April
Oers 2016	van Oers, L.; Guinée, J.: The abiotic depletion potential: Background, Updates, and Future, Resources 2016, 5, 16, Faculty of Science Institute on Environmental Sciences (CML) – Department of Industrial Ecology, Leiden University
ÖKOBAUDAT 2016	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016): ÖKOBAUDAT 2016-I (18.05.2016). Berlin, Deutschland. Verfügbar unter: http://www.oekobaudat.de (zuletzt geprüft: 01.08.2016).
Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI 2015	Öko-Institut e.V.; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin, Deutschland.
PwC 2016	PricewaterhouseCoopers (2016): Wirtschaftliche Bewertung des Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 Abschlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin, Deutschland. Verfügbar unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Aktionsprogramm_Klimaschutz/aktionsprogramm_klimaschutz_2020_abschlussbericht_bf.pdf (zuletzt geprüft: 17.01.2017)
PHPP 2015	Passivhaus Institut (2015): Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) – Das Energiebilanzierungs- und Planungstool für effiziente Gebäude und Modernisierungen. Version 9.
STE 1999a	Steen, B. (1999): A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics. Chalmers University of Technology. Göteborg, Schweden.
STE 1999b	Steen, B. (1999): A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 – Models and data of the default method. Chalmers University of Technology. Göteborg, Schweden.
StMWi 2016	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie (2016): Bayerisches Energieprogramm für eine sichere, bezahlbare und umweltverträgliche Energieversorgung, https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwivt/Publikationen/2016/2016-02-08-6339_Bayerisches_Energieprogramm_gesichert.pdf (zuletzt geprüft 01.11.2016).
TFZ 2010	Ellner-Schuberth, F. et al. (2010): Partikelemissionen aus Kleinf Feuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen. Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.). Straubing, Deutschland.
TFZ 2013	Susanne Kiener, Peter Turowski, Hans Hartmann, Gerhard Schmoeckel (2013): Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel, Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Straubing
TFZ 2015	Bruhn, K. (2015): Scheitholzpreise (TFZ-Brennholzpresindex). Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.). Straubing, Deutschland.

	http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/15ebr002_mb_brennholzpreisindex.pdf (zuletzt geprüft: 17.01.2017).
thinkstep 2016a	thinkstep AG (2016): GaBi 2016 Datenbanken. Leinfelden-Echterdingen, Deutschland. Verfügbar unter: http://www.gabi-software.com (zuletzt geprüft: 01.08.2016).
thinkstep 2016b	thinkstep AG (2016): GaBi Modelling Principles. Leinfelden-Echterdingen, Deutschland. Verfügbar unter: http://www.gabi-software.com (zuletzt geprüft: 01.08.2016).
Trucost 2015	Trucost (2015): Trucost's valuation methodology. Verfügbar unter: http://www.gabi-software.com/fileadmin/GaBi_Databases/Thinkstep_Trucost_NCA_factors_methodology_report.pdf (zuletzt geprüft: 01.11.2016).
UBA 2000	Pfeiffer, F. et al. (2000): Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD). Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA). Dessau-Roßlau, Deutschland.
UBA 2008	Struschka, M. et al. (2008): Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung. Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD). Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA). Dessau-Roßlau, Deutschland.
UBA 2010	Umweltbundesamt (2010): Novellierung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - Neue Regelungen für Kaminöfen und Holzheizkessel
UBA 2012	Schwermer, S. et al. (2012): Ökonomische Bewertung von Umweltschäden – Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten. Fachgebiet I 1.4 - Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Umweltfragen, nachhaltiger Konsum – Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau, Deutschland.
UNFCCC 2016	United Nations Framework Convention on Climate Change (2016): National Inventory Submission 2016, http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php
Universität Stuttgart 2007	Pech, C. (2007): Quantifizierung der Umweltlasten verschiedener gebäudezentraler Heizungs- und Warmwassersysteme mit Hilfe der Methode der Ökobilanz. Diplomarbeit. Universität Stuttgart. Stuttgart, Deutschland.
Vaillant 2011	Vaillant (2011): Warmtekrachtkoppeling – Waarom Vaillant? Om eenvoudigweg dubbel gebruik te amken van energie
VDI 2008	Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2008): VDI 4655. Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz in KWK-Anlagen. VDI-Richtlinie. Düsseldorf, Deutschland.
VDI 2012	Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2012): VDI 2067 Blatt1. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung. VDI-Richtlinie. Düsseldorf, Deutschland.
Viessmann 2015	Viessmann (2015): Werke GmbH&Co KG: VITOBLOC 200 - Technische Beschreibung
Wuppertal 2011	Wuppertal Institut (2011): MaRess - Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen - Abschlussbericht zu AP2

ZUB 2010	Klauß, S. et al. (2010): Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. (ZUB). Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) sowie des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR). Kassel, Deutschland.
----------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Anhang A – Zusätzliche Abbildungen

Ökonomische Analyse

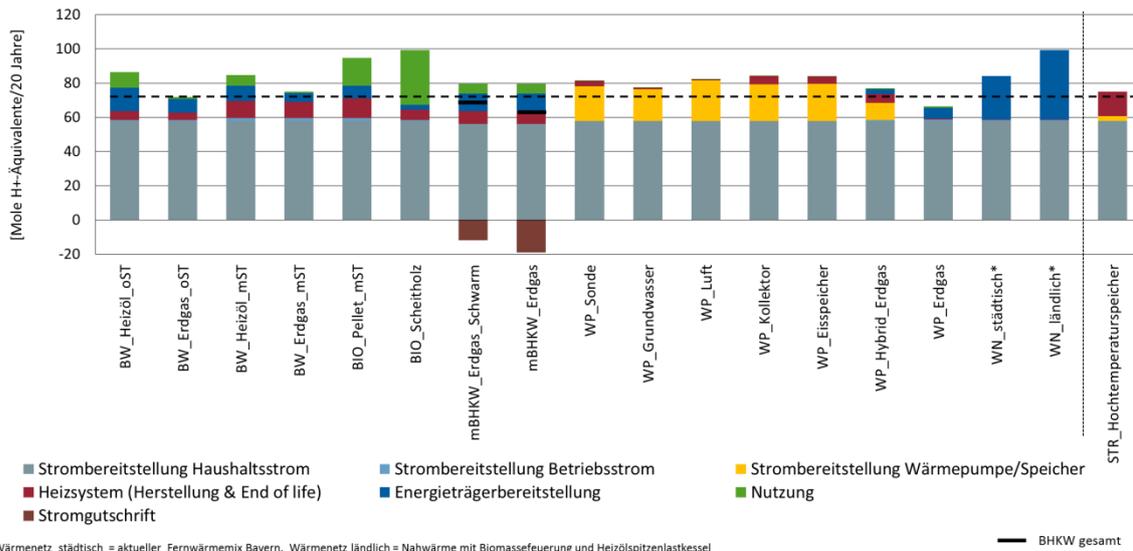


Abbildung 0-1: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich *Versauerung*, Szenario 1

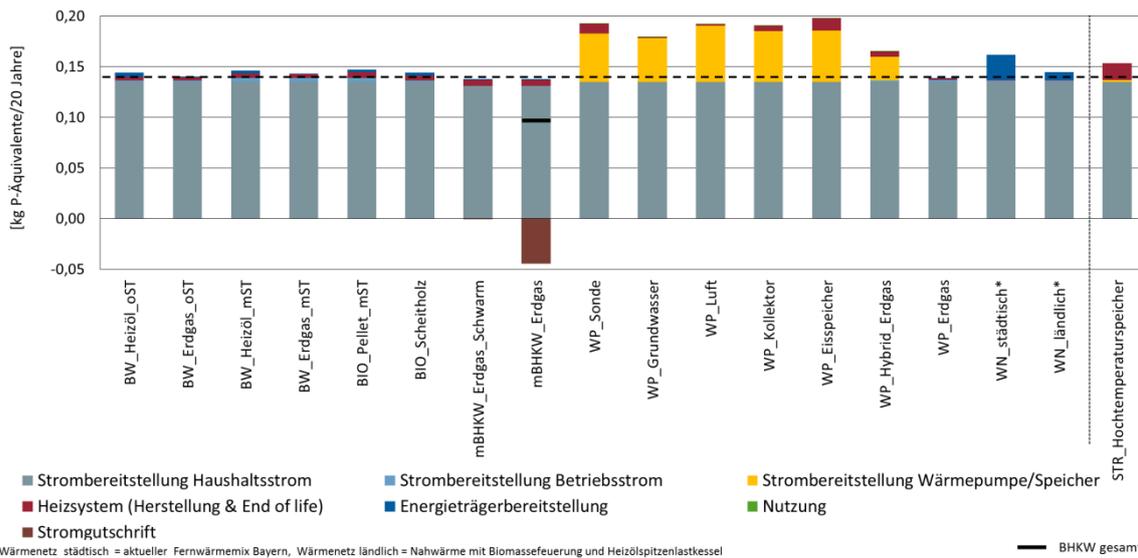


Abbildung 0-2: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich *Frischwasser* *Eutrophierung*, Szenario 1

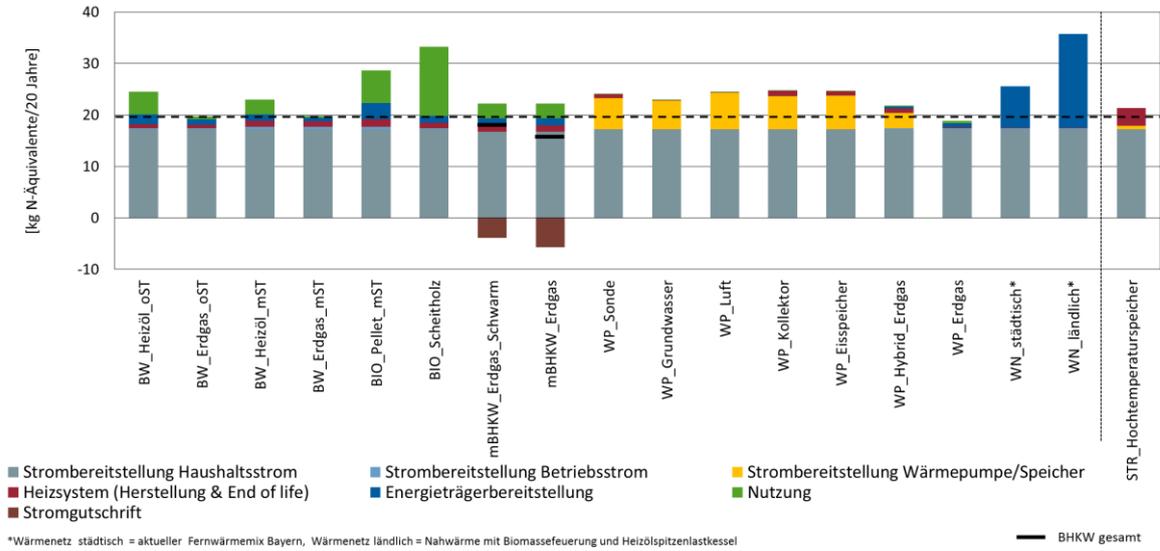


Abbildung 0-3: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich *Eutrophierung mariner Ökosysteme*, Szenario 1

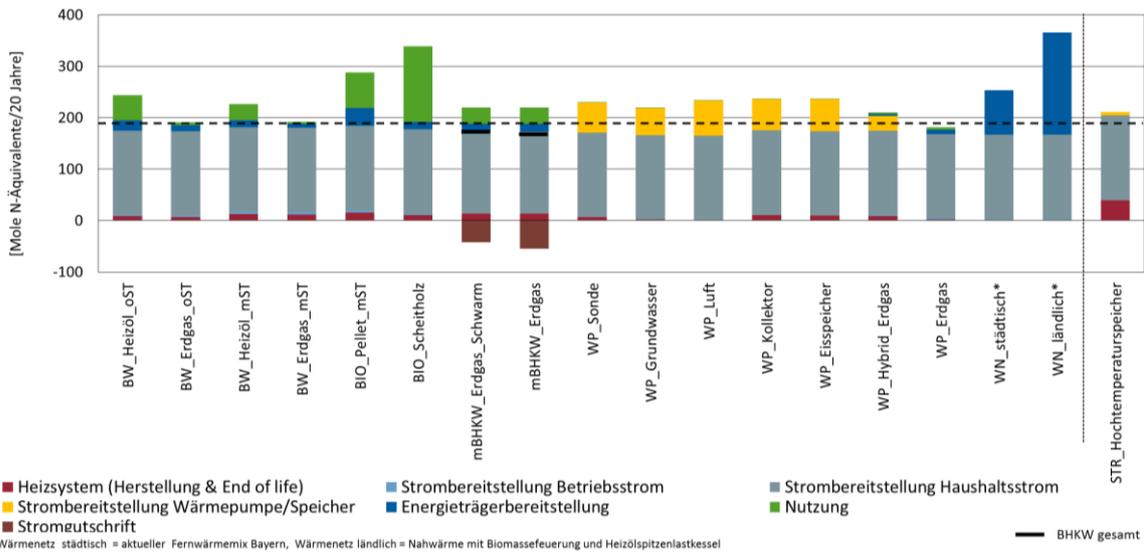


Abbildung 0-4: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich *terrestrische Eutrophierung*, Szenario 1

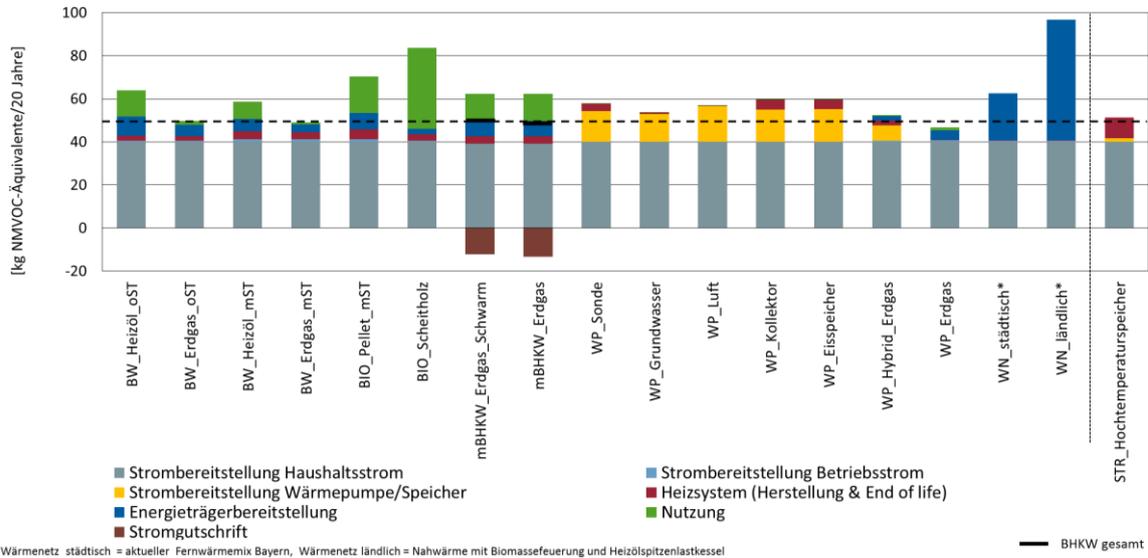


Abbildung 0-5: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich fotochemisches Ozonbildungspotential, Szenario 1

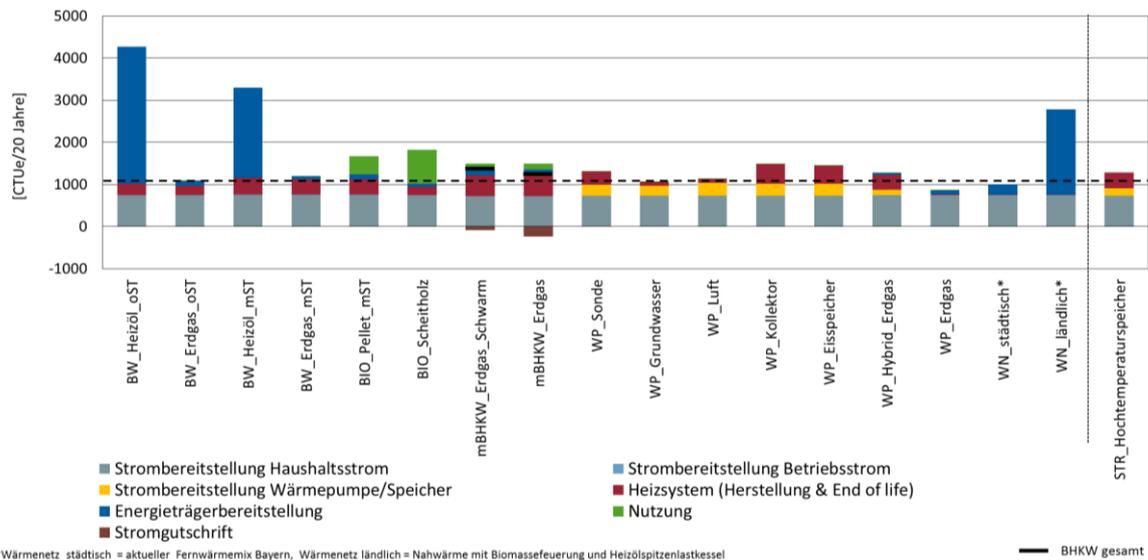


Abbildung 0-6: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ökotoxizität Süßwasser, Szenario 1

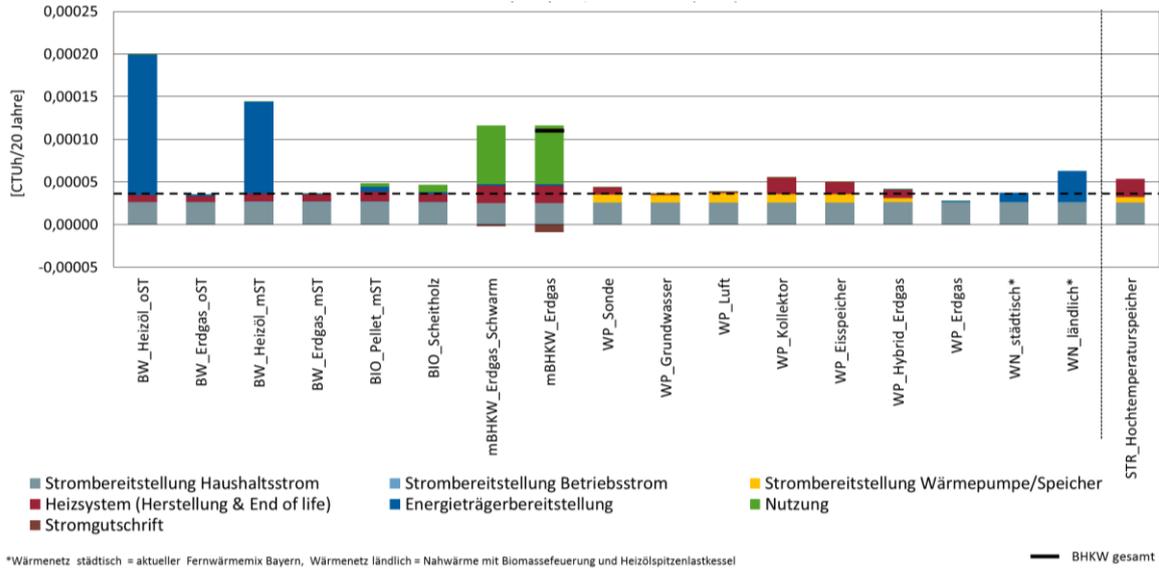


Abbildung 0-7: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich *Humantoxizität* kanzerogen, Szenario 1

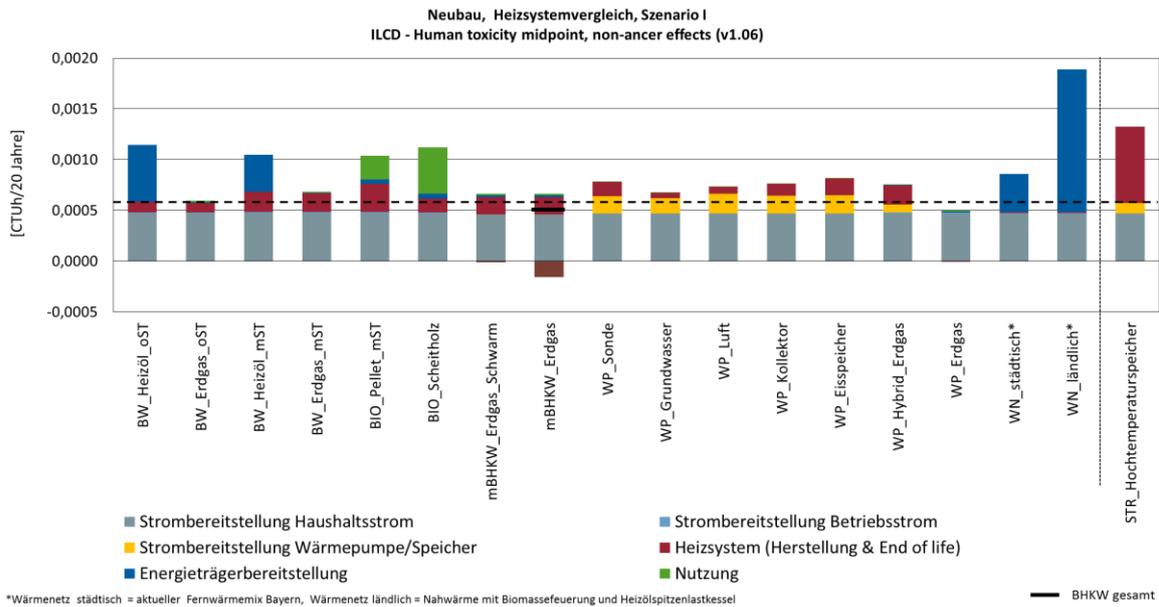


Abbildung 0-8: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich *Humantoxizität nicht-kanzerogen*, Szenario 1

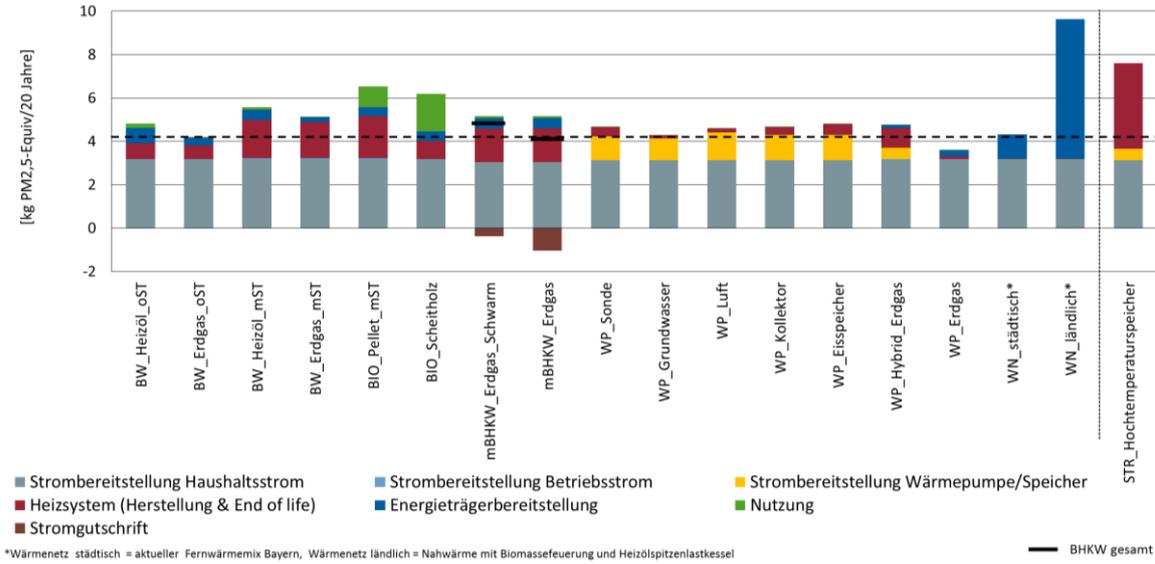


Abbildung 0-9: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Feinstaub/anorganische Emissionen, Szenario 1

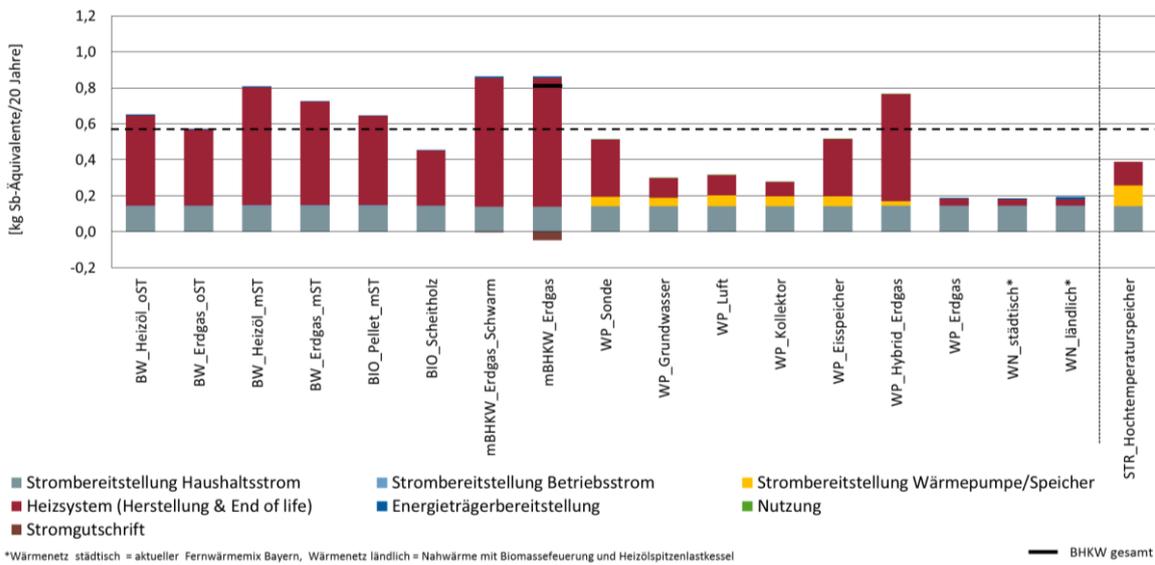


Abbildung 0-10: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ressourcenverbrauch, Szenario 1

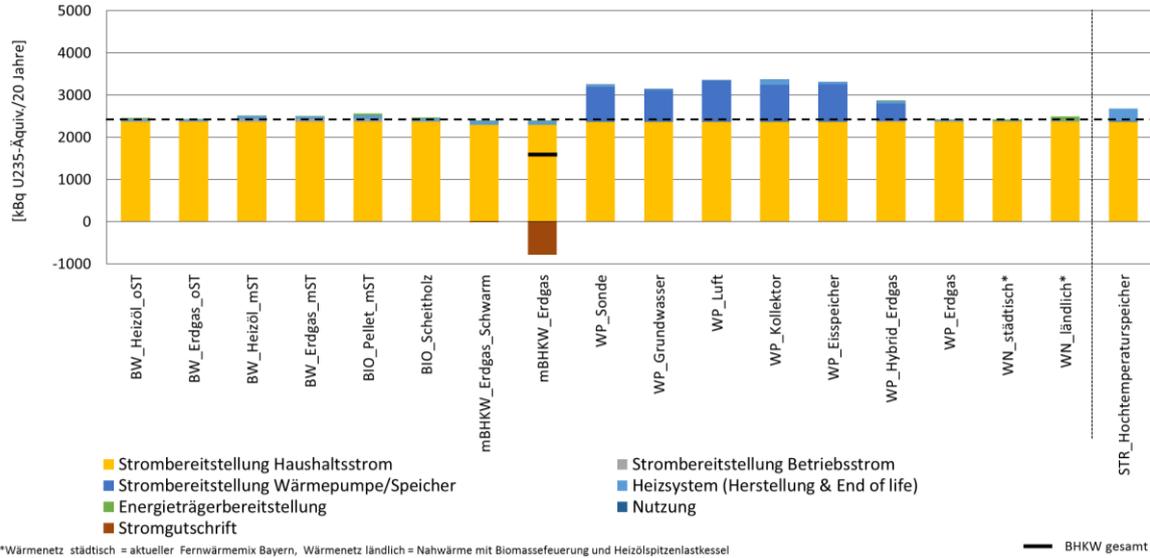


Abbildung 0-11: Neubau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ionisierende Strahlung, Szenario 1

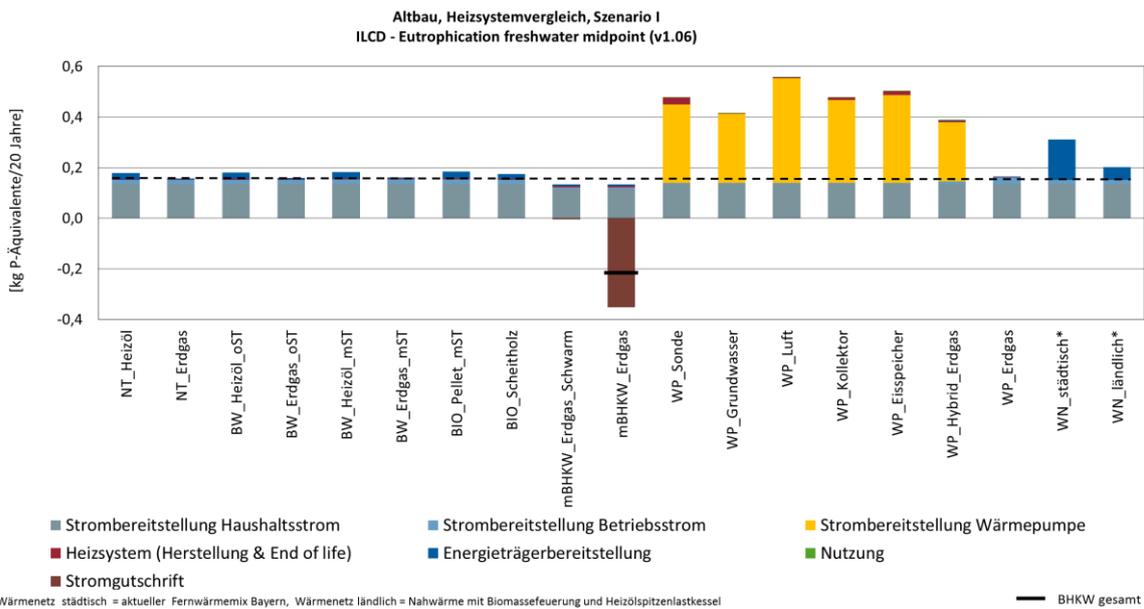


Abbildung 0-12: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Frischwasser Eutrophierung, Szenario 1

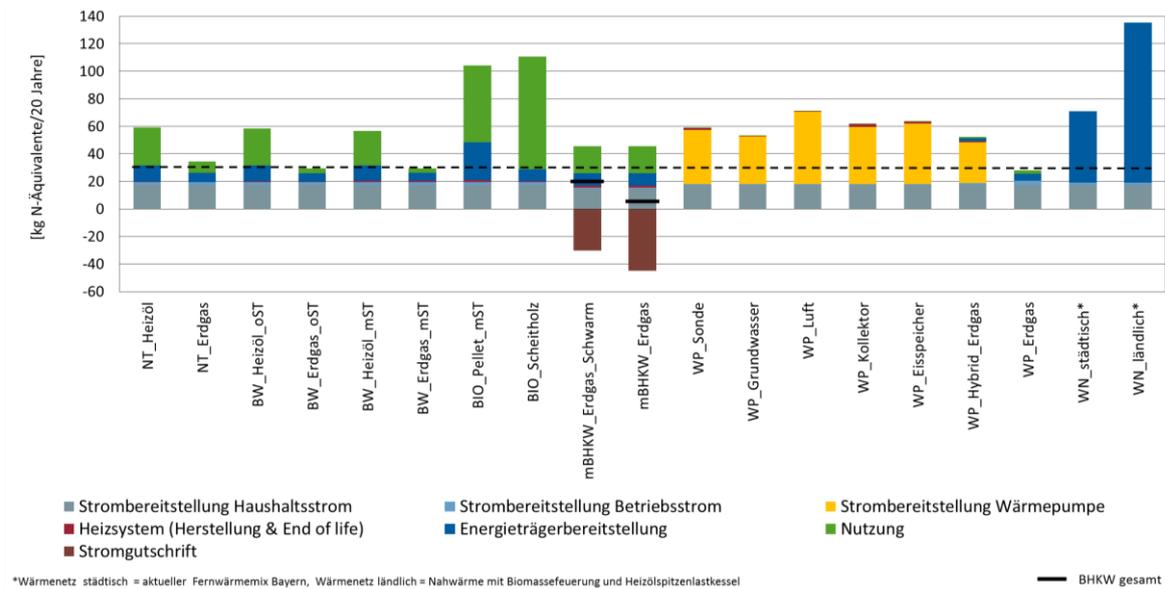


Abbildung 0-13: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Eutrophierung mariner Ökosysteme, Szenario 1

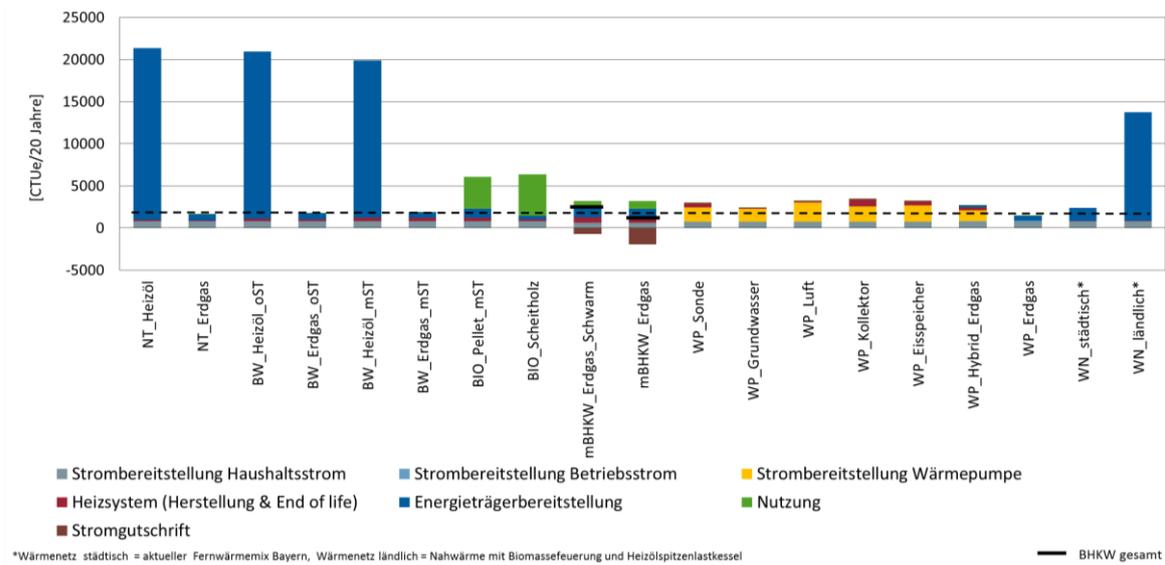


Abbildung 0-14: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ökotoxizität Süßwasser, Szenario 1

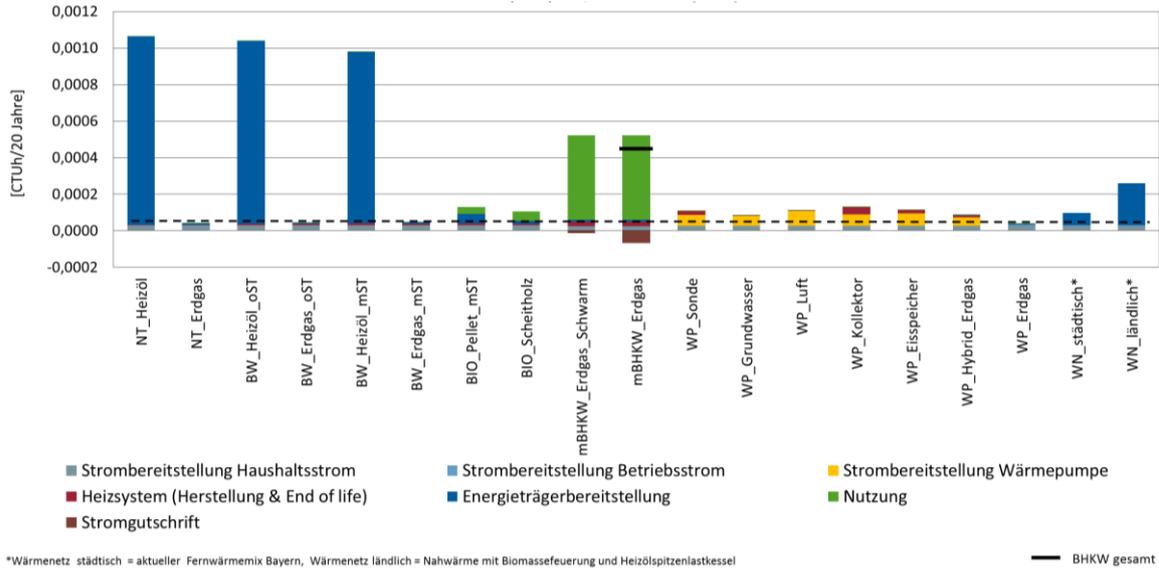


Abbildung 0-15: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Humantoxizität kanzerogen, Szenario 1

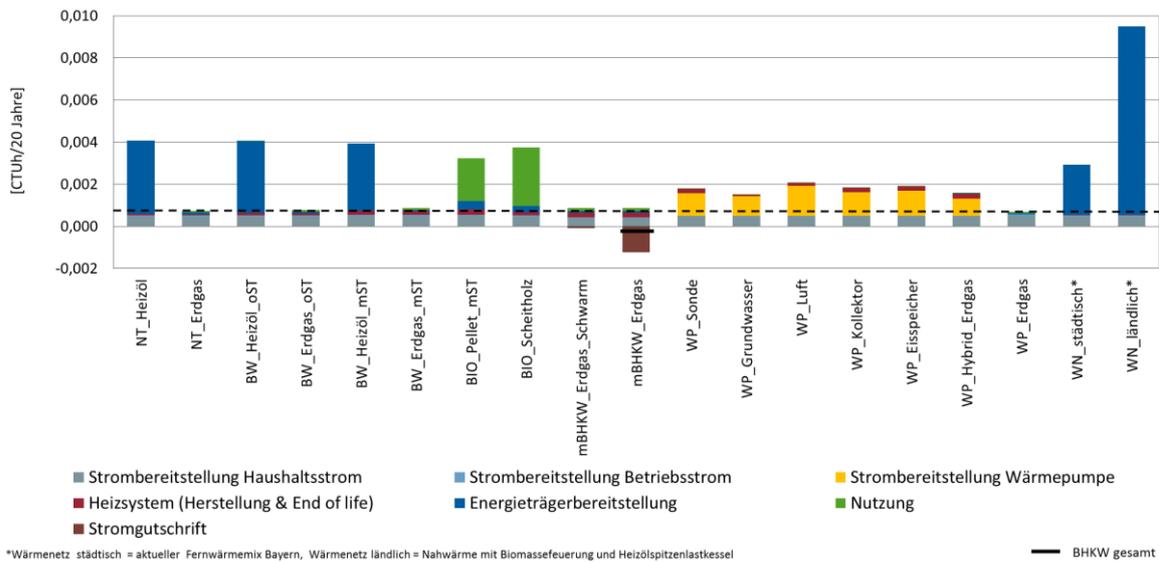


Abbildung 0-16: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Humantoxizität nicht-kanzerogen, Szenario 1

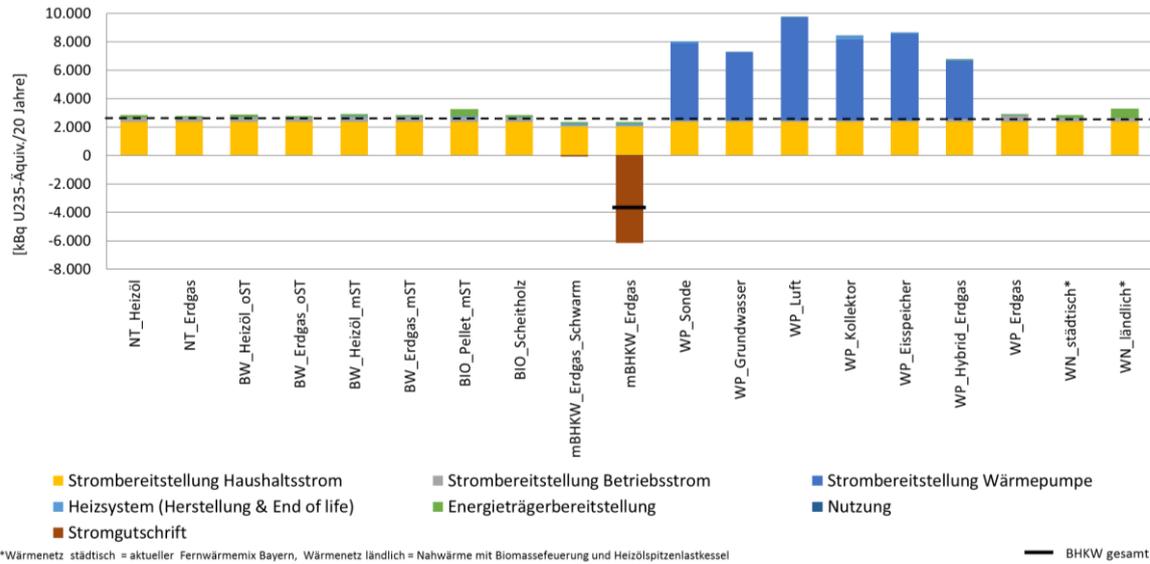


Abbildung 0-17: Altbau, Warmwasserbedarf mittel, Systemvergleich Ionisierende Strahlung, Szenario 1

Anhang B – Abbildungen der Monetarisierung von Umweltwirkungen

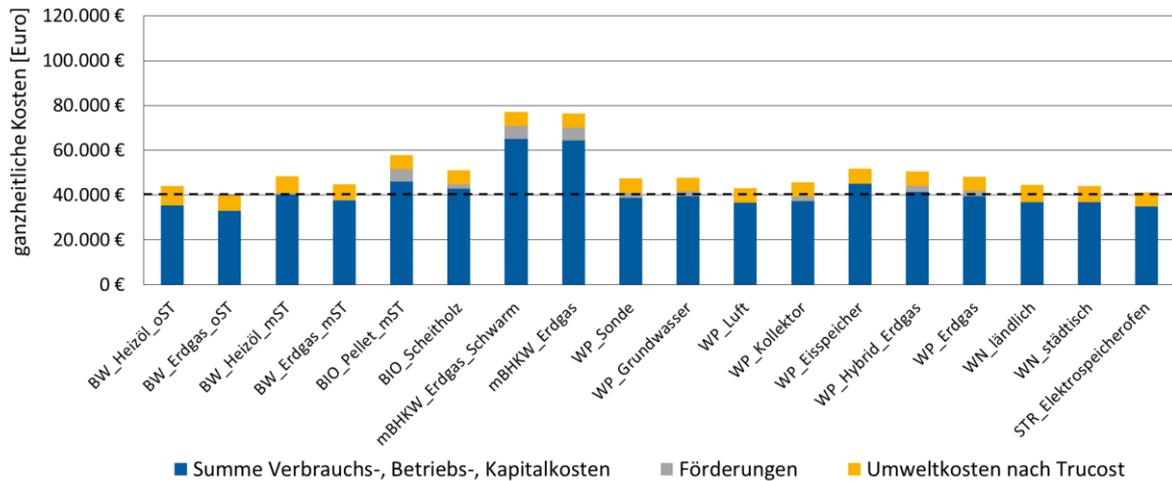


Abbildung 0-1: Neubau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)

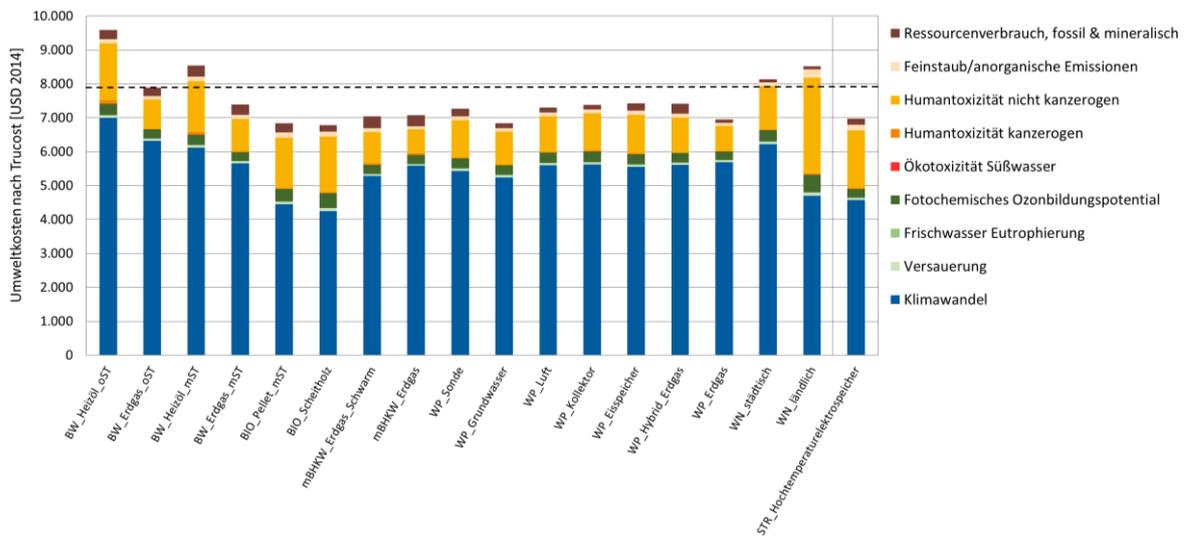


Abbildung 0-2: Neubau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)

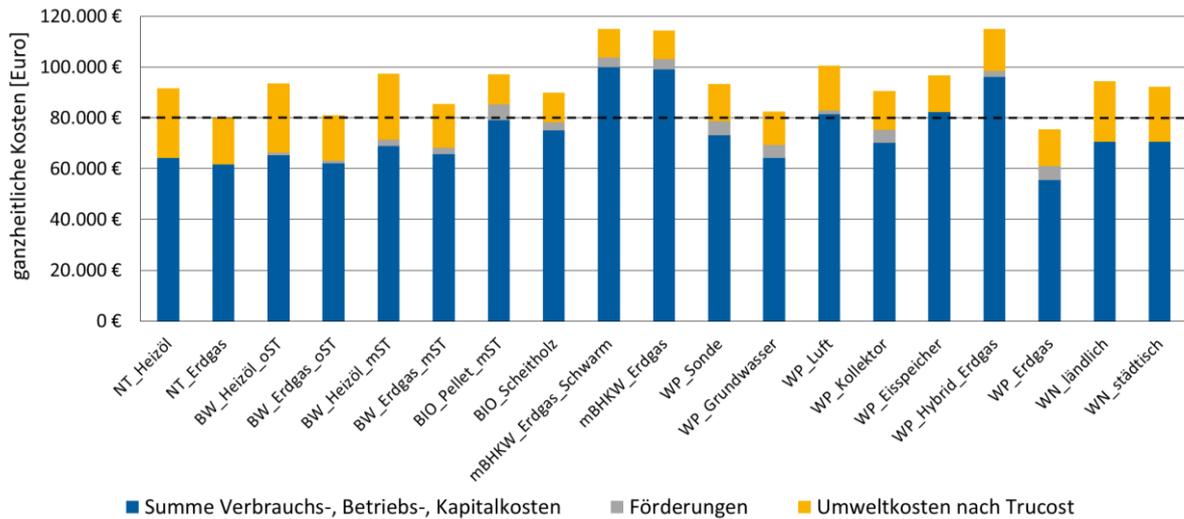


Abbildung 0-3: Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)

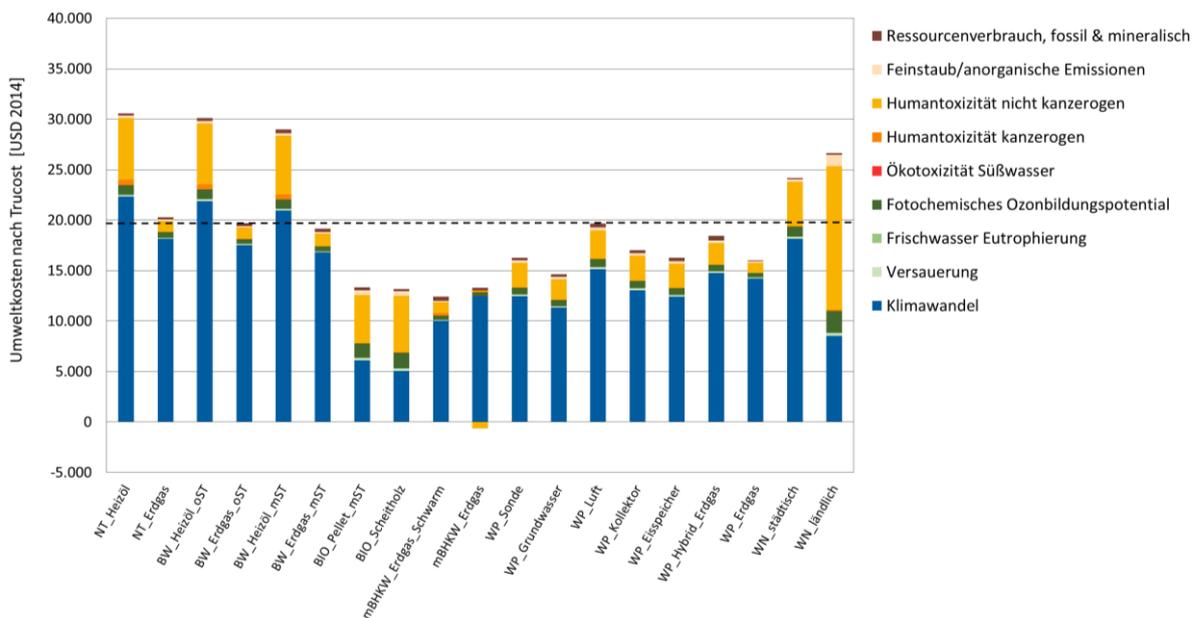


Abbildung 0-4: Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Detailanalyse der externer Kosten (in US\$)

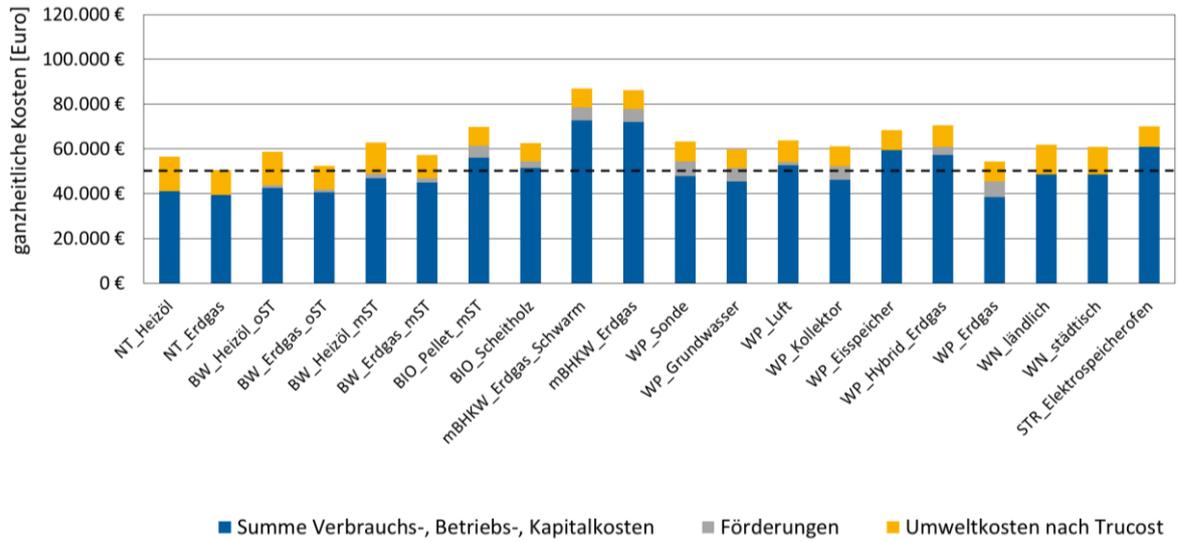


Abbildung 0-5: (Teil-) San. Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)

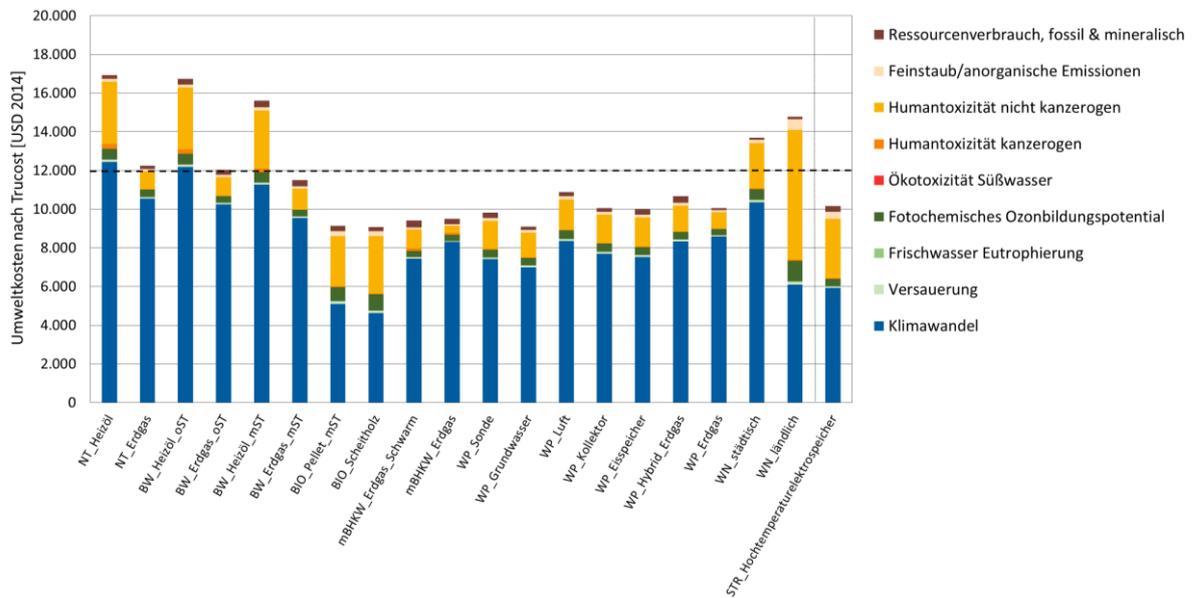


Abbildung 0-6: (Teil-) San. Altbau, Heizsystemvergleich, Szenario 2 – Detailanalyse der externen Kosten (in US\$)

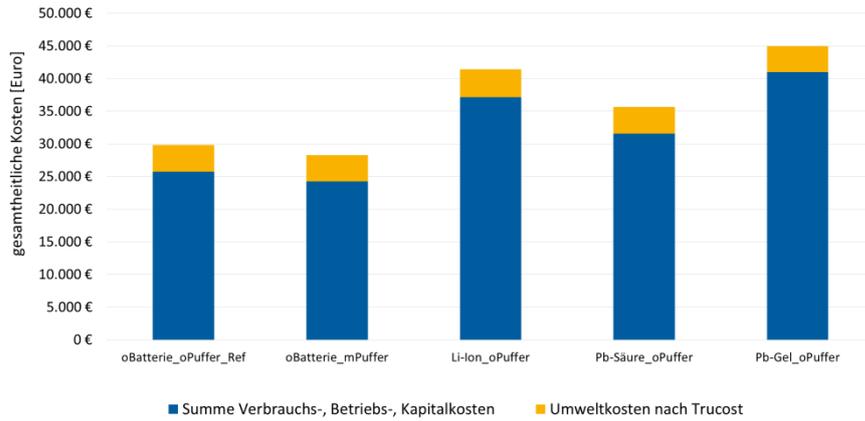


Abbildung 0-7: Neubau, Speichersystemvergleich, Szenario 2 – Ganzheitliche Kostenanalyse unter Berücksichtigung externer Kosten (in Euro)

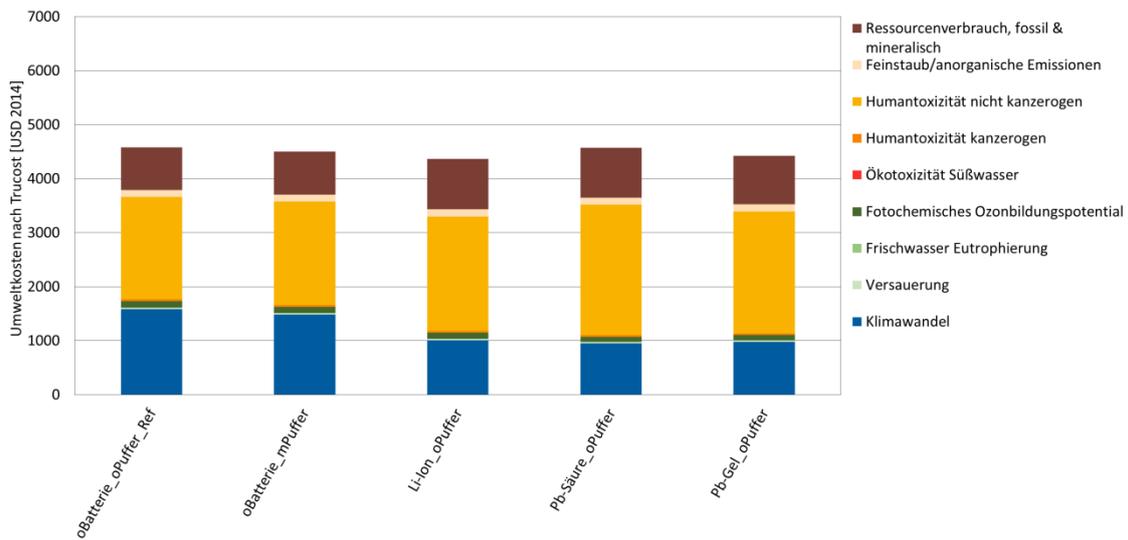


Abbildung 0-8: Neubau, Speichersystemvergleich, Szenario 2 – Detailanalyse der externer Kosten (in US\$)

Anhang C – Praxisbeispiel für die Berücksichtigung abweichender Energiekosten

Beispiel abweichender Erdgaspreis

Grundlagen

Aus Erdgasabrechnung:

Arbeitspreis = 5 Cent/kWh (bezogen auf den Brennwert bzw. oberen Heizwert)

Grundpreis = 100 Euro / Jahr,

Erdgasverbrauch = 3.500 kWh / Jahr (Passivhaus mit dem Neubau in der vorliegenden Studie vergleichbar)

Erdgaskostensteigerung (real): 2 %/a (gem. Szenario 2)

Berechnung

Umrechnung auf Arbeitspreis, bezogen auf den unteren Heizwert zzgl. Grundpreis:

$(5 \text{ Cent} / \text{kWh} * 1,11) + (100 \text{ Euro} / 3.500 \text{ kWh}) * 100 \text{ Cent} / \text{Euro} = 8,4 \text{ Cent/kWh}$

Arbeitspreis (vorliegende Studie): 6,3 Cent/kWh (bezogen auf den unteren Heizwert)

⇒ Differenz: 2,1 Cent / kWh

Überschlägige Berechnung des Faktors zur Berücksichtigung der mittleren Erdgaskostensteigerung über 20 Jahre (real): $((100 \% + 2 \%)^{20 \text{ Jahre}} - 100 \%) / 2 + 100 \% = 124 \%$

Resultierende Differenz der verbrauchsgebundenen Kosten aus der Studie:

$124 \% * 2,1 * \text{Cent} / \text{kWh} * 3500 \text{ kWh} / \text{Jahr} * 20 \text{ Jahre} = 1.823 \text{ Euro}$

Ergebnis

Neuer Kapitalwert = Alter Kapitalwert + Differenz = 32.861 Euro + 1.823 Euro = 34.684 Euro

Fazit

In diesem Fall wäre die Differenz zum Kapitalwert einer Luftwärmepumpe (Szenario 2: 36.598 Euro) bereits um fast die Hälfte reduziert.