

Technical Report Nr. 22, 2025

**Lebenszyklusanalyse und Einordnung
differenter Wärmepumpentechnologien
im realen Betrieb**

im Rahmen des Verbundvorhabens

**EnQuaFlex – Energiewendedienlicher
Quartiersbetrieb durch gemeinschaftliche
Flexibilitätskoordination**

Prof. Dr.-Ing. Nicolei Beckmann, Lutz Meinecke, M.Sc.

hochschule 21 – Technical report

Buxtehude:
hochschule 21 gemeinnützige GmbH
Staatlich anerkannte private Fachhochschule
Harburger Straße 6
21614 Buxtehude

Telefon: +49 4161 648 124

Fax: +49 4161 648 123

E-Mail: bibliothek@hs21.de

<http://www.hs21.de>

ISSN 2196-5153



Lebenszyklusanalyse und Einordnung differenter Wärmepumpentechnologien im realen Betrieb

im Rahmen des Verbundvorhabens

EnQuaFlex - Energiewendedienlicher Quartiersbetrieb durch gemeinschaftliche Flexibilitätskoordination

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Nicolei Beckmann

Lutz Meinecke, M.Sc.

Lector- und Korrektorart: Karina Witten, M. Sc.

Buxtehude, 13.10.2025

Hochschule 21
Harburger Str. 6
21614 Buxtehude

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

KURZFASSUNG

Die Arbeit untersucht verschiedene Wärmepumpentypen in einem realen Quartier auf Basis von Herstellerangaben sowie vor Ort erhobenen Energie- und Stoffstromdaten während der Betriebsphase. Ergänzend werden die Aufwendungen der vor- und nachgelagerten Lebenszyklusabschnitte mithilfe der ÖKOBAU.DAT bilanziert. Dabei zeigt sich, dass die Betriebsphase selbst bei hochgedämmten Gebäuden einen wesentlichen Einfluss hat. Die gemessenen Energieströme und die daraus berechneten Jahresarbeitszahlen (JAZ) weichen teilweise deutlich von den Herstellerangaben ab. Abschließend werden die Ergebnisse mit einem theoretischen Einsatz von Widerstandsheizungen verglichen. Trotz der im Betrieb niedrigeren realen Jahresarbeitszahlen im Vergleich zu den Herstellerwerten weisen die Wärmepumpen über den gesamten Lebenszyklus hinweg geringere Treibhausgasemissionen auf.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung	iii
Inhaltsverzeichnis.....	iv
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	vi
1 Einleitung.....	1
2 Lebenszyklusanalyse.....	2
2.1 Eingangsdaten zur Lebenszyklusanalyse von Wärmeerzeugern.....	2
2.2 Eingangsdaten zur Lebenszyklusanalyse von Wärmespeichereinheiten	3
2.3 Eingangsdaten zur Lebenszyklusanalyse Der Wärmeübertrager.....	4
2.4 Vergleich der Systeme	4
3 Ökologischer Vergleich mit einer elektrischen Widerstandsheizung.....	9
3.1 Angesetzte Randbedingungen	9
3.2 Auswertung am Beispielgebäude (Doune).....	9
4 Fazit	11
5 Literatur	12

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen über 20 Jahre	6
Abbildung 2 CO ₂ äquivalente Treibhausgasemissionen aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen ..	7
Abbildung 3: Flächenspezifische Treibhausgasemissionen	7
Abbildung 4: Vergleich Widerstandsheizung mit Wärmepumpenheizung.....	10

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht Art der Wärmeerzeuger.....	3
Tabelle 2: Parameter aus der ÖKOBAUDAT [1].....	3
Tabelle 3: Anlagenmassen.....	3
Tabelle 4: Flächenspezifische Aufwendungen nach ÖKOBAUDAT [2, 3].....	4
Tabelle 5: Berechnungsergebnisse Treibhausgasemissionen pro Gebäude hochgerechnet von 6 auf 12 Monate.....	5
Tabelle 6: Treibhausgasemissionen - Mittelwerte der differenten Wärmeerzeugungsanlagen	8
Tabelle 7: Theoretische Wärmeverluste Zirkulationsleitung und Wärmespeicherung	9

1 EINLEITUNG

Die ökologischen Aufwendungen für die Heizungsanlagen werden repräsentativ über die äquivalenten Treibhausgasemissionen der Anlagen bewertet. Dabei greift die Analyse auf alle Lebenszyklusphasen zu, von der Herstellung bis zum Recycling. Als Datenbasis wird die Datenbank ÖKOBAUDAT des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen genutzt. Es ist anzumerken, dass es sich in der folgenden Analyse um eine vereinfachte eindimensionale Auswertung handelt. Multidimensionale Umweltauswirkungen können weitere Belastungen neben den Treibhausgasemissionen beinhalten, z. B. Graue Energie, Ozonabbaupotenzial, etc.

2 LEBENSZYKLUSANALYSE

Die LCA-Datensätze der ÖKOBAUDAT werden nach den Technologien geclustert und massenspezifisch auf die vorhandenen Anlagen und Gebäudeeigenschaften skaliert (Tabelle 1). Neben den Aufwendungen in der Herstellung (A1-A3), den Betriebsaufwendungen, dem Transport (C2), der Abfallbehandlung (C3) und der Beseitigung (C4) werden auch die Recyclingpotentiale (D) als Gutschrift in die Analyse eingebunden (siehe Tabelle 2). Die Aufwendungen für die Betriebsphase bestehen aus einer Messreihe der aufgenommenen Betriebsenergie im Zeitraum vom 01.01.2025 bis zum 30.06.2025. Vereinfacht wurden die Messergebnisse linear auf die folgenden Monate hochskaliert. Sobald eine vollständige Messreihe über ein Jahr vorliegt, werden die Energiemengen ausgetauscht.

Ebenfalls werden die Ergebnisse mit einer theoretischen Widerstandsheizungsanlage verglichen, basierend auf Infrarotheizungen und Durchlauferhitzer. Ziel ist es, eine ökologische Transparenz zwischen den Technologien herzustellen.

Aufgrund einer Anlagenkomplikation in einer Wasserstoffanlage muss die Bewertung einer Brennstoffzellenanlage zum aktuellen Zeitpunkt als nicht auswertbar deklariert werden.

2.1 EINGANGSDATEN ZUR LEBENSZYKLUSANALYSE VON WÄRMEERZEUGERN

Die Aufwendungen für die Wärmeerzeuger basieren auf der ÖKOBAUDAT [1]. Die Aufwendungen wurden massenspezifisch auf die drei unterschiedlichen Wärmepumpentypen skaliert. Die Unterschiede in den Kältemitteln in ihrem Global Warming Potenzial (GWP) gehen aufgrund der Recyclingmöglichkeit der Kältemittel am Lebenszyklusende der Anlage nicht mit ein.

Tabelle 1: Übersicht Art der Wärmeerzeuger

Art des Wärmeerzeugers	Leis-tung	Gewicht Wärme-pumpeneinheit	Kälte-mittel	Füllmenge	GWP Kälte-mittel
	[kW]	[kg]		[kg]	[CO ₂ eq.]
Luft-Wasser-Wärmepumpe Typ 1	6	66	R410A	1,5	2088
Abluft-Wärmepumpe	6	87	R290	0,42	3
Luft-Wasser-Wärmepumpe Typ 2	5,2	76	R32	1,3	675
Luft-Wasser-Wärmepumpe Typ 3	5,33	163	R290	0,8	3

Aufgrund einer eingeschränkten Datenverfügbarkeit in der ÖKOBAUDAT hinsichtlich der Lebenszyklusaufwendungen der unterschiedlichen Wärmepumpentechnologien, wurden die Berechnungen der unterschiedlichen Wärmepumpentypen über massenspezifische Aufwendungen aus der ÖKOBAUDAT [1] hochinterpoliert.

Tabelle 2: Parameter aus der ÖKOBAUDAT [1]

	A1-A3	C2	C3	C4	D	Summe
	[CO ₂ eq.]					
Aufwendung ÖKOBAUDAT	325,8	1,015	20,33	3,054	-133,8	216,399
Massenspezifisch	3,473	0,011	0,217	0,033	-1,426	2,307

2.2 EINGANGSDATEN ZUR LEBENSZYKLUSANALYSE VON WÄRMEPESICHEREINHEITEN

Die Wärmepumpen haben funktionsbedingt externe Trinkwarmwasserspeicher mit Umschalteinheiten zwischen Warmwasser- und Heizungsbedarf, monoenergetischen Wärmequellen sowie Fördereinheiten als zusätzliche Komponente. Zusätzlich sind energetische Puffer für den zeitweise notwendigen Abtaubetrieb über die Speichereinheit sichergestellt. Obwohl die Abluft-Wärmepumpen keine offensichtliche Trennung zwischen der Wärmepumpen- und der Speichereinheit aufweisen, sind die Masseinheiten direkt zuzuordnen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Anlagenmassen

Art der Wärmeerzeugung	Leis-tung	Gewicht Innen-einheit	Speichergröße Wasser
	[kW]	[kg]	[l]
Speichereinheit Luft-Wasser-WP Typ 1 & 2	9	141	178
Speichereinheit Abluft-WP	9	161	178
Speichereinheit Luft-Wasser-WP Typ 3	0	163	750

2.3 EINGANGSDATEN ZUR LEBENSZYKLUSANALYSE DER WÄRMEÜBERTRÄGER

Für die Wärmeübertragung werden in den Häusern Flächenheizungen eingesetzt. Die nassverlegten Heizschleifen wurden flächenspezifisch nach ÖKOBAUDAT [2, 3] und einem Belegungsschlüssel von 80 Prozent sowie einem durchschnittlichen Verlegeabstand von 150 mm auf die Nutzflächen (NF.) der Gebäude bezogen. Die lineare Interpolation zwischen den beiden Referenzquellen mit 100 und 200 mm ermöglicht einen Rückschluss auf die Aufwendungen der Peripherie (Tabelle 4).

Tabelle 4: Flächenspezifische Aufwendungen nach ÖKOBAUDAT [2, 3]

Beschreibung	GWP total pro m ² in kg CO ₂ eq.					
	A1-A3	C2	C3	C4	D	Summe
Fußbodenheizung Summe Abstand 100 mm	6,778	0,01526	6,674	0,003415	-2,283	11,187675
Fußbodenheizung Summe Abstand 200 mm	5,309	0,01124	4,917	0,002517	-1,682	8,557757
Rechnerischer Abstand 150 mm	6,0435	0,01325	5,7955	0,002966	-1,9825	9,872716

2.4 VERGLEICH DER SYSTEME

Die folgende Tabelle 5 gibt die auswertbaren Gebäudetechnikanlagen wieder. Neben den gemessenen Energiemengen des Herstellers wurden auch theoretische Aufwendungen der Lüftung bei den Gebäuden hinzugefügt, die eine zusätzliche Lüftungsanlage benötigen. Die Bilanzierung erfolgt über eine Betrachtungszeit von 20 Jahren in Anlehnung an VDI 2067. Für die Betriebsemissionen der elektrischen Energie wurde in der aufgeführten Analyse der CO₂-Emissionsfaktor des Umweltbundesamtes mit 363 g/kWh (2024) herangezogen [vgl. 4, Tabelle 1]. Eine Treibhausgasemissionsberechnung des Strommixes in dem betrachteten Quartier liegt zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht vor.

An den Auswertungen der Tabelle 5 ist der übermäßige Einfluss der Betriebsphase auf das Gesamtergebnis nach zwanzig Betriebsjahren gegenüber den vor- und nachgelagerten Lebenszyklusphasen eindeutig zu erkennen.

Tabelle 5: Berechnungsergebnisse Treibhausgasemissionen pro Gebäude hochgerechnet von 6 auf 12 Monate

Haus	kg CO ₂ eq.	Wärmeerzeuger [A, C, D]	kg CO ₂ eq.	Wärmespeicherung [A, C, D]	m ²	Gebäudenutzfläche [A, C, D]	kg CO ₂ eq. Wärmeverteilung [A, C, D]		kg CO ₂ eq. Aufwendung 20 Jahre [A, C, D]	Wärmemenge gemäß Hersteller- schnittstelle (6 Monate × 2 als Jahresannahme) [B]	kWh/a	Elektrischer Energieverbrauch (6 Monate × 2 als Jahresannahme) [B]	kWh/a	Gemessene Werte am Stromzäh- ler (6 Monate × 2 als Jahresan- nahme) [B]	kWh/a	JAZ Nach Herstellerschnittstelle [B]	JAZ berechnet [B]	kg kg CO ₂ eq. /kWh	Summe WP und Lüftung [B]	kg CO ₂ eq. CO2 eq. Stromsektor 2024	Summe CO ₂ eq. [A, B, C, D]	kg CO ₂ eq. Aufwand pro m ² Nutzfläche [A, B, C, D]	
							kg CO ₂ eq.	Wärmeverteilung [A, C, D]															
Ludlow	200,71	393,95	174,28	640,39	1021,59	9706,75	2757,60	3606,80	3,52	2,69	0,00	3606,80	0,36	1309,27	26185,37	27206,95	156,11						
Raby	200,71	393,95	192,00	705,50	1064,99	10597,78	3744,80	4682,56	2,83	2,26	0,00	4682,56	0,36	1699,77	33995,39	35060,38	182,61						
Inveraray	200,71	393,95	193,60	711,38	1068,91	11399,66	4115,40	4699,22	2,77	2,43	0,00	4699,22	0,36	1705,82	34116,34	35185,25	181,74						
Carrickfergus	200,71	393,95	192,40	706,97	1065,97	10723,34	3182,00	4032,56	3,37	2,66	0,00	4032,56	0,36	1463,82	29276,39	30342,36	157,70						
Dover	200,71	393,95	142,70	524,35	944,23	8889,14	2448,80	2960,94	3,63	3,00	0,00	2960,94	0,36	1074,82	21496,42	22440,65	157,26						
Edinburgh	200,71	393,95	164,00	602,62	996,40	6951,64	3639,60	4565,84	1,91	1,52	0,00	4565,84	0,36	1657,40	33148,00	34144,40	208,20						
Arundel	376,05	398,84	302,01	1109,74	1514,71	15834,53	3665,40	4383,90	4,32	3,61	889,71	5273,61	0,36	1914,32	38286,40	39801,11	131,79						
Doune	152,26	345,01	230,20	845,87	1061,19	11866,45	3147,60	4180,94	3,77	2,84	478,82	4659,76	0,36	1691,49	33829,87	34891,06	151,57						
Eilean	152,26	345,01	178,30	655,16	934,05	14754,60	4684,00		3,15		370,90	0,00	0,36	0,00	0,00	934,05	5,24						
Sterling	152,26	345,01	208,10	764,66	1007,05	8564,26	2179,20	2926,52	3,93	2,93	432,92	3359,44	0,36	1219,48	24389,53	25396,58	122,04						
Alnwick	175,33	345,01	207,09	760,95	1027,65	9334,58	2482,60		3,76		430,82	0,00	0,36	0,00	0,00	1027,65	4,96						
Conwy	200,71	393,95	172,70	634,59	1017,72	15018,00	5006,00	5692,80	3,00	2,64	0,00	5692,80	0,36	2066,49	41329,73	42347,44	245,21						
Windsor	175,33	345,01	190,80	701,09	987,74	12595,30	3254,60	4493,30	3,87	2,80	0,00	4493,30	0,36	1631,07	32621,36	33609,10	176,15						

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Herstellerangaben mit den gemessenen Energiemengen eine Diskrepanz aufweisen. Der gemessene elektrische Mehraufwand liegt zwischen 14,18 und 38,06 Prozent. Die resultierenden Jahresarbeitszahlen sinken daraufhin signifikant. Die Anlage Edinburgh weist mit einer Jahresarbeitszahl von 1,91 des Herstellers und 1,52 als gemessener Wert einen unverhältnismäßig schlechten Effizienzgrad auf. Fehlerhafte Einstellungen oder eine fehlerhafte Anlage werden in kommenden Untersuchungen beleuchtet.

Über eine flächenspezifische Betrachtung der Lebenszyklusanalysen in Abbildung 3 schwächt sich der Einfluss der unterschiedlichen Gebäudekubaturen ab (Abbildung 1).

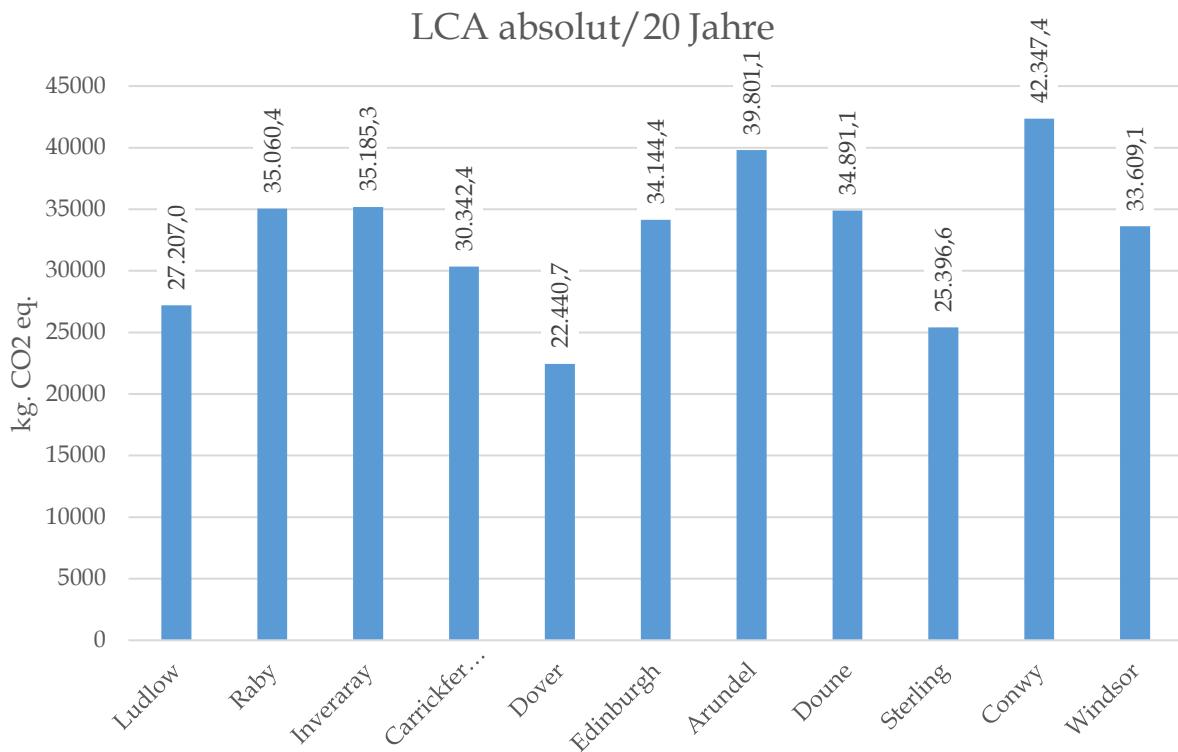


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen über 20 Jahre

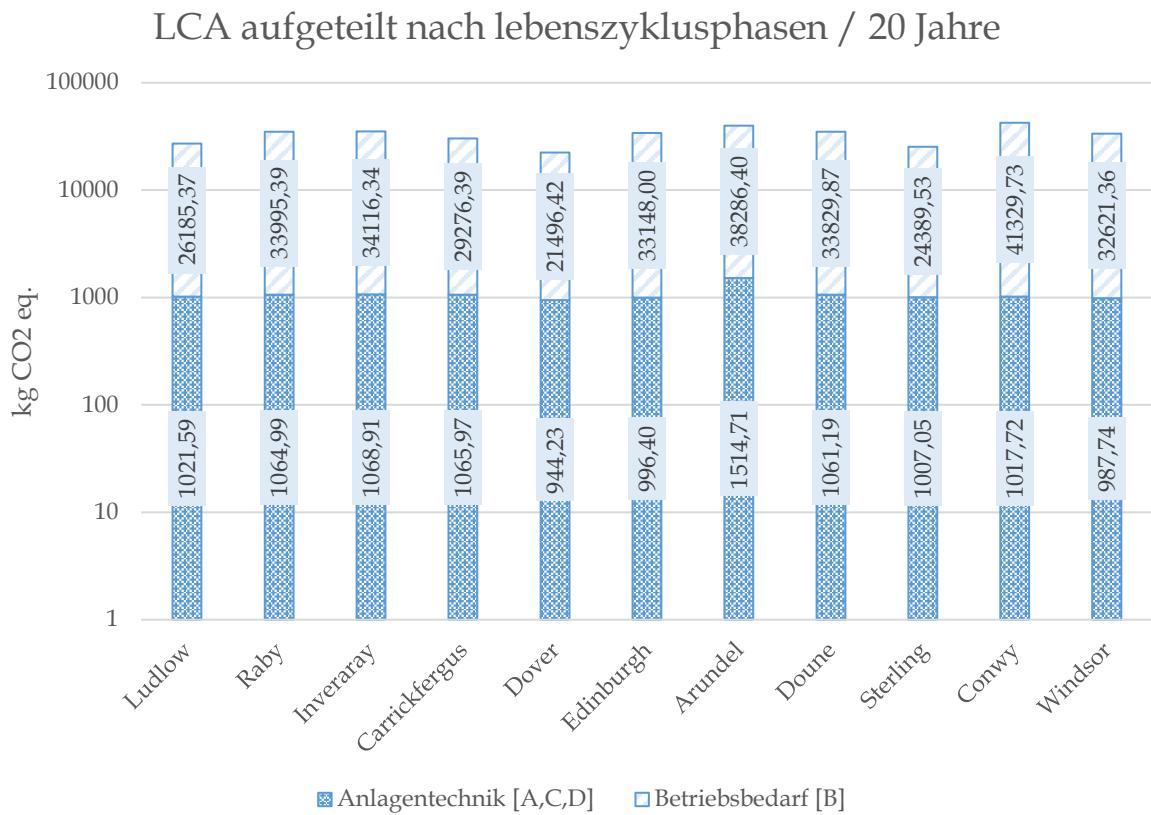


Abbildung 2 CO_2 *equivalente Treibhausgasemissionen* aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen

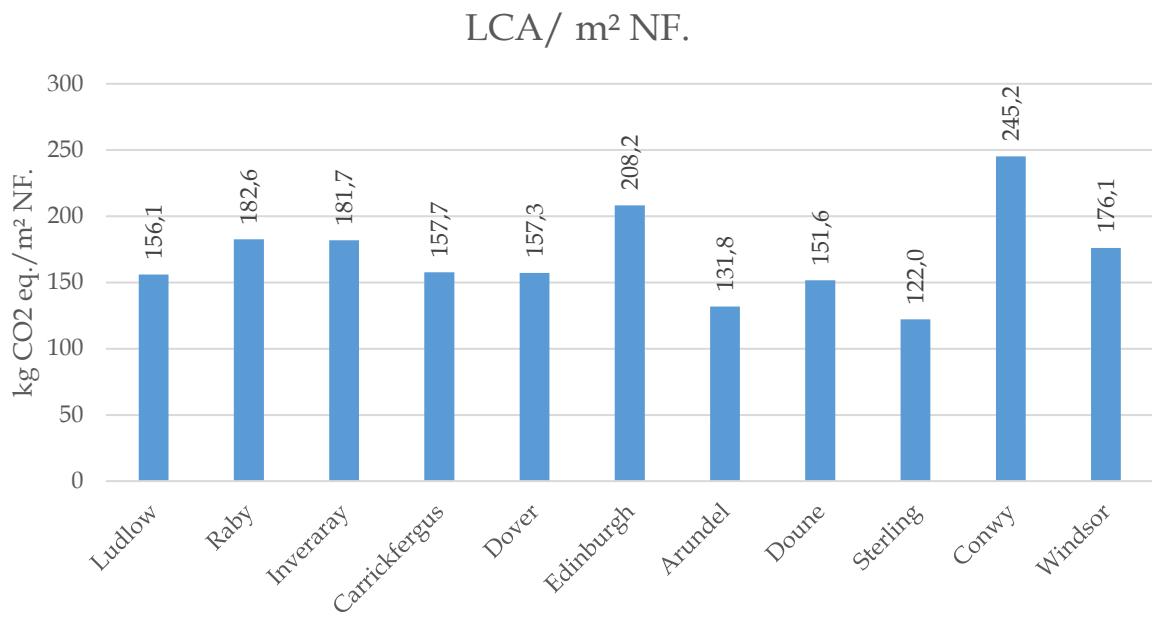


Abbildung 3: Flächenspezifische Treibhausgasemissionen

Werden die Darstellungen nach der Wärmepumpentechnologie aufgegliedert, ermöglicht sich eine Bewertung der Systemeffizienz. Die Außenluft-Wasser-Wärmepumpen weisen durchschnittlich eine höhere Effizienz und über die Lebenszyklusphase von 20 Jahren auch geringere flächenspezifische Emissionen auf.

Tabelle 6: Treibhausgasemissionen - Mittelwerte der differenten Wärmeerzeugungsanlagen

Anzumerken ist, dass der Wärmepumpentyp 3 lediglich in einem Gebäude zum Einsatz gekommen ist und somit individuelle Einflüsse signifikant auf das Ergebnis wirken.

3 ÖKOLOGISCHER VERGLEICH MIT EINER ELEKTRISCHEN WIDERSTANDSHEIZUNG

Ein aktuelles Thema ist die Enttechnologisierung im Gebäudesektor mit dem Ansatz: „Keep it simple“. Aus diesem Grund bietet sich ein Vergleich der Technologie in Form von dezentralen Infrarotheizungen und Durchlauferhitzern an. Verteilverluste, Speicherverluste und geringere Aufwendungen in den vor- und nachgelagerten Lebenszyklen könnten einen Mehraufwand in der Betriebsphase rechtfertigen.

3.1 ANGESETZTE RANDBEDINGUNGEN

Die theoretischen Verluste der Zirkulationsleitungen sowie der Speichereinheiten sind in der folgenden Tabelle aufgestellt.

Tabelle 7: Theoretische Wärmeverluste Zirkulationsleitung und Wärmespeicherung

Nummer	Bezeichnung	Wert
1	Innendurchmesser Zirkulationsleitung	12 mm
2	Außendurchmesser Zirkulationsleitung	16 mm
3	Dämmstärke	20 mm
4	Wärmeleitkoeffizient	0,035 W/mK
5	Leitungslänge	30 m
6	Innentemperatur Medium	57,5 °C
7	Außentemperatur	20 °C
8	Wärmeverlustleistung	265,54 W
9	Verlustwärme im Jahr	2326,15 kWh
10	Speicherverluste 200 l Speicher (Herstellerangabe)	45 W
11	Wärmeverlust 8760 h/a Speicher	394,2 kWh

3.2 AUSWERTUNG AM BEISPIELGEBÄUDE (DOUNE)

Eine ökologische Betrachtung zwischen den Aufwendungen erfolgt durch die eingesetzten Wärmemengen eines Referenzhauses über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren.

Im Gebäude Doune wurden nach der internen Energiemengenerfassung der Wärmepumpe ein Wärmebedarf von 11.866,45 kWh/a bilanziert. Das Gebäude besitzt eine Zirkulationsleitung und einen Warmwasserspeicher. Die resultierenden theoretischen Verluste sind in der Tabelle 7 dargestellt. Nach Abzug der Verluste ergibt sich ein jährlicher Energiebedarf für Warmwasser und Heizenergie von 9.146,09 kWh. Ergänzend wird die schnellere Temperaturregelung im Raum mit einer niedrigeren mittleren Raumtemperatur von 2

°C im Wärmebedarf angesetzt. Daraus resultiert ein Wärmebedarf für die Infrarotheizung von 8542,45 kWh/a. Rein für den jährlichen Betrieb emittiert der Wärmebedarf über die Widerstandsheizungen ohne Verluste 3.274,7 kg CO₂ eq., über 20 Jahre ergeben sich äquivalente Treibhausgasaufwendungen von 65.494,5 kg.

Eine flächenspezifische Auswertung der Treibhausgasemissionen unter Vernachlässigung der Lebenszyklusaufwendungen von der Widerstandsheizung aus den Lebenszyklen A1-A3, C2, C3, C4 und D ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die flächenspezifischen Emissionen einer Widerstandsheizung liegen über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren deutlich über den Aufwendungen mit einer Wärmepumpe vom Typ 2. Auch Wartungs- und Instandhaltungsaufwendungen der Wärmepumpeinheit gleichen den erhöhten Bedarf in der Betriebsphase der Widerstandsheizung nicht aus. Perspektivisch wird der ansteigende regenerative Anteil im Strommix jedoch die erhöhten Aufwendungen im Betrieb reduzieren.

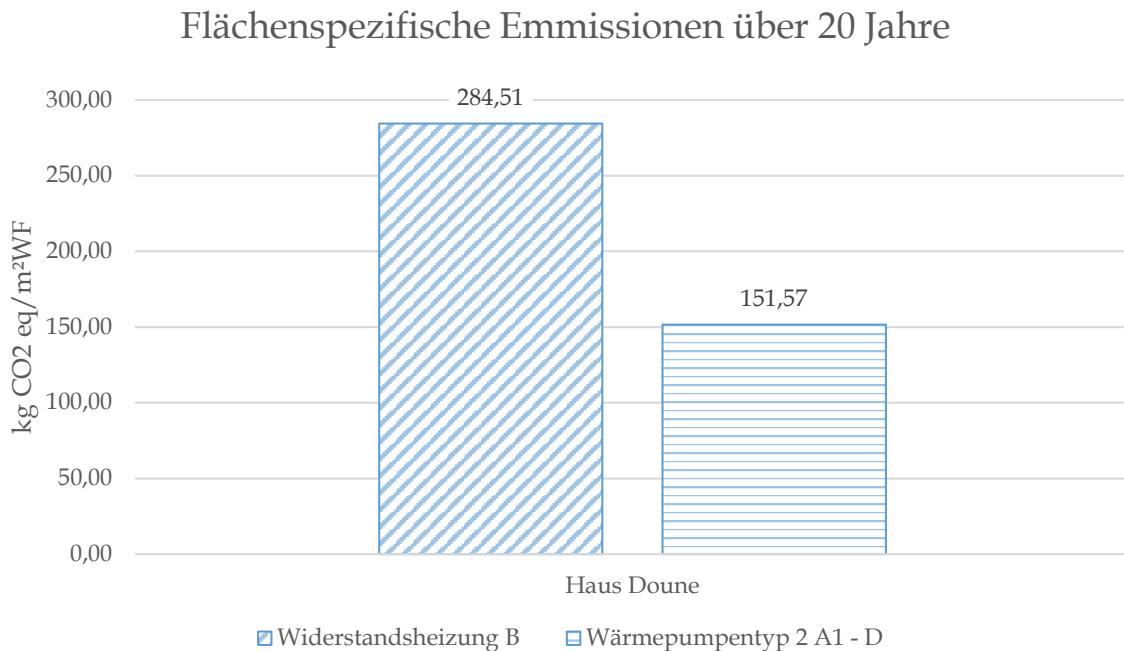


Abbildung 4: Vergleich Widerstandsheizung mit Wärmepumpenheizung

4 FAZIT

Die Auswertungen aus einem realen Quartier verdeutlichen die Dominanz der Betriebsphase bei den äquivalenten Treibhausgasemissionen. Die Aufwendungen in den vor- und nachgelagerten Lebenszyklusphasen sind selbst unter Berücksichtigung von Reinvestitionen in die Anlagentechnik als gering einzustufen. Besonders auffällig sind in diesem Zusammenhang die deutlichen Abweichungen zwischen den Herstellerangaben zum elektrischen Energieverbrauch und den im Forschungsprojekt während der Betriebsphase gemessenen Werten. Nach Rücksprache mit mehreren Herstellern lassen sich die unterschiedlichen Werte für den elektrischen Energieverbrauch auf verschiedene Messmethoden zurückführen. Einige Hersteller berechnen den Energieverbrauch anhand vorhandener Anlagenparameter, während im Forschungsprojekt elektrische Messinstrumente mit einer Messgenauigkeit der Class 1 (IEC 61557-12) verwendet werden.

Im Vergleich der eingesetzten Wärmepumpentypen konnte der energetische Vorteil von R290 Außenluft-Wasser-Anlagen angedeutet werden. Aufgrund der ungünstigen statistischen Verteilung lässt sich dieses Ergebnis jedoch nicht mit ausreichender Sicherheit bestätigen. Abluftanlagen weisen die geringste Betriebseffizienz auf.

Ein Vergleich mit einer Widerstandsheizung zeigt deutlich, dass unter Berücksichtigung der äquivalenten Treibhausgasemissionen während der Betriebsphase kein Vorteil über den gesamten Lebenszyklus hinweg gegenüber einer Wärmepumpeneinheit erzielt werden kann. Es wird darauf hingewiesen, dass der Einfluss der Betriebsphase bei ansteigendem regenerativem Anteil im Strommix rückläufig sein wird.

5 LITERATUR

- [1] ÖKOBAUDAT; Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 7 kW; https://oekobaudat.de/OEKBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=2dfb0a59-e38c-41d3-babc-56c7221d935d&version=20.24.070&stock=OBD_2024_I&lang=de; Referenzjahr 2023; Gliederungsnummer 8.1.01; Zugriff 31.07.2025
- [2] ÖKOBAUDAT; Prozess-Datensatz: Fußbodenheizung PEX (100 mm Abstand); https://oekobaudat.de/OEKBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e787b7b8-6846-4d3f-b72b-d587e6833613&version=20.24.070&stock=OBD_2024_I&lang=de; Referenzjahr 2023; Gliederungsnummer 8.1.02; Zugriff 31.07.2025
- [3] ÖKOBAUDAT; Prozess-Datensatz: Fußbodenheizung PEX (200 mm Abstand); https://oekobaudat.de/OEKBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=ce17aa80-9649-47ae-abd8-eb45488e4af7&version=20.24.070&stock=OBD_2024_I&lang=de; Referenzjahr 2023; Gliederungsnummer 8.1.02; Zugriff 31.07.2025
- [4] Umweltbundesamt; Entwicklung der spezifischen Treibhausgas Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2024; ISSN 1862-4359 ; Dessau-Roßlau, April 2025